

НОВОСИБИРСКИЙ ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ им. А. В. РЖАНОВА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК «КОНСТРУКТОРСКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ
МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ»
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



ПАУЛИШ АНДРЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ
ПРИЕМА И ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Специальность: 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научные консультанты:

доктор технических наук, профессор

Виктор Брунович Шлишевский;

доктор физико-математических наук, профессор

Александр Капитонович Дмитриев

Новосибирск – 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 ОСНОВЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ	
ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН.....	19
1.1 Поляризация электромагнитной волны	19
1.2 Поляризационно-оптические методы измерения некоторых физических величин	22
1.2.1 Эффект полного внутреннего отражения	22
1.2.2 Рефрактометр для определения коэффициента преломления жидкости	27
1.2.3 Сенсор газа	29
1.2.4 ДНК сенсор	33
1.2.5 Измерение акустических сигналов	37
1.2.6 Измерение инфракрасного излучения оптически- поляризационными методами	46
1.3 Детекторы терагерцового излучения	47
1.4 Методы тензометрии	53
1.4.1 Тензорезисторы	54
1.4.2 Волоконно-оптические датчики	60
1.4.3 Пьезоэлектрические датчики	63
1.4.4 Пьезооптические датчики	65
1.4.5 Метод фотоупругих покрытий	67
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1.....	70
ГЛАВА 2 КОНВЕРТЕР ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МЕТОДИКА ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАРИАНТЫ РЕГИСТРАЦИИ ТГЦ-ИЗЛУЧЕНИЯ	72
2.1 Преобразователь (конвертер) ТГц-излучения в ИК-излучение	72
2.2 Методика изготовления ТГц-ИК-конвертеров	75
2.3 Варианты построения ТГц-детекторов на основе различных конструкций ТГц-ИК-конвертера	78
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2.....	85
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТГЦ→ИК КОНВЕРТЕРЕ	86
3.1 Математическая модель для описания теплофизических процессов в конвертере	87
3.2 Временные зависимости изменения температуры от толщины слоя диэлектрика	92
3.3 Чувствительность и быстродействие конвертера	92
3.4 Эффективность конверсии терагерцового излучения в инфракрасное	94
3.5 Линейность преобразования	96
3.6 Влияние латеральной теплопроводности на пространственное разрешение конвертера	97

3.7 Эффективность конверсии терагерцового излучения в инфракрасное для конвертера с разрезами	105
3.8 Оценка вклада теплообмена с воздушной средой величины тепловой связи между пикселями	106
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3.....	108
ГЛАВА 4 ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА В ТЕХНОЛОГИИ ТГЦ→ИК КОНВЕРТЕРА.....	110
4.1 Установки для лазерной резки структуры конвертера	110
4.2 Идеология выбора режима лазерной резки многослойной структуры	112
4.3 Изготовление структуры конвертера со сквозными разрезами	113
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4.....	116
ГЛАВА 5 ДЕТЕКТОР ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНВЕРТЕРА.....	117
5.1 Схема визуализации ТГц-излучения	117
5.2 Терагерцовый объектив	119
5.3 Инфракрасный объектив	121
5.4 Конструкция матричного ТГц-детектора	123
5.5 Параметры ТГц-детектора изображения	124
5.6 ТГц-детектор с неохлаждаемыми ИК ФПУ	125
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5.....	126
ГЛАВА 6. ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР ТГЦ- И МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.....	128
6.1 Образцы пироэлектрических детекторов	129
6.2 Измерение спектральных характеристик чувствительности пироприёмника в видимом и ИК-диапазоне	130
6.3 Измерения в ТГц-диапазоне	132
6.4 Амплитудно-частотная характеристика пироприёмника	136
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 6.....	140
ГЛАВА 7 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗООПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ СВЕРХЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ.....	141
7.1 Теоретический анализ коэффициентов тензочувствительности для датчиков механических напряжений на основе различных физических принципов	141
7.1.1 Тензорезисторные датчики	141
7.1.2 Волоконно-оптические датчики	143
7.1.3 Пьезоэлектрические датчики	144
7.1.4 Пьезооптические датчики	146
7.2 Пьезооптические преобразователи	148
7.3 Пьезооптические преобразователи новой конструкции	155

7.3.1	Пьезооптический датчик деформации в виде пластины	155
7.3.2	Пьезооптический датчик в виде цанги	161
7.3.3	Пьезооптический датчик с герметичным корпусом	164
7.3.4	Пьезооптический датчик с термокомпенсацией	166
7.3.5	Оптимизация формы фотоупругого элемента	170
7.3.6	Пьезооптический преобразователь с собственным унифицированным корпусом	177
7.3.7	Устройство для измерения комбинированных деформаций	188
7.4	Исследование параметров пьезооптических преобразователей экспериментально и с помощью численного моделирования	196
7.4.1	Моделирование преобразования световой волны при прохождении оптических элементов пьезооптического преобразователя	196
7.4.2	Устройство электронной обработки сигнала пьезооптического преобразователя	203
7.4.3	Моделирование напряжений и деформаций в фотоупругом элементе	205
7.4.4	Устройство и методика измерений для экспериментального определения основных параметров пьезооптического преобразователя	207
7.4.5	Расчёт силы, прикладываемой к фотоупругому элементу преобразователя	210
7.5	Результаты исследований пьезооптического преобразователя	212
7.5.1	Минимальная детектируемая сила.	212
7.5.2	Минимальная детектируемая деформация	213
7.5.3	Определение коэффициента тензочувствительности пьезооптического преобразователя методом численного моделирования	214
7.5.4	Экспериментальный коэффициент тензочувствительности	216
7.5.5	Динамический диапазон и запас прочности	216
7.5.6	Чувствительность к силе и деформации	217
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 7		219
ГЛАВА 8 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ РАЗРАБОТАННЫХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ.....		221
8.1	Результаты экспериментальных исследований образцов детекторов терагерцового и субтерагерцового излучения	221
8.1.1	Визуализация монохроматических пучков излучения	222
8.1.2	Визуализация многоспектральных пучков излучения	226

8.1.3	Использование методики визуализации пучков миллиметрового излучения в экспериментах в ИЯФ СО РАН	229
8.1.4	Моделирование расплывания теплового изображения	234
8.2	Предложения по использованию ТГц-визуализатора для построения систем контроля скрытых предметов	236
8.3	Предложения по построению систем контроля скрытых предметов с использованием пироэлектрического детектора миллиметрового диапазона и сверхвысокочастотного модуля с линейно-частотной модуляцией	240
8.4	Результаты практического использования пироэлектрических приёмников ТГц- и ММ-излучения	247
8.4.1	Центр измерительных технологий и промышленной автоматизации, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва	249
8.4.2	ООО «Специальные технологии», Новосибирск	250
8.4.3	Институт лазерной физики СО РАН	254
8.5	Тестирование пьезооптических датчиков деформации новой конструкции	255
8.5.1	Испытания на испытательной машине INSTRON 8802 в Институте горного дела СО РАН	255
8.5.2	Испытания в «Ростест-Москва»	268
8.5.3	Испытания в калибровочной лаборатории Trescal, г. Детройт, США	285
8.5.4	Испытания в Институте физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина (ИФХЭ РАН), Москва	291
8.6	Применение пьезооптического преобразователя для контроля параметров движения подъёмных устройств	294
ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 8.....		310
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		311
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....		314
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		316
ПРИЛОЖЕНИЕ «А» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.....		344
ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ МОДЕЛИ.....		349
ПРИЛОЖЕНИЕ «В» ПРОТОКОЛЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ.....		380
ПРИЛОЖЕНИЕ «Г» ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ, ДЕМОНСТРИРОВАВШИХСЯ НА ВЫСТАВКАХ И ЯРМАРКАХ.....		446
ПРИЛОЖЕНИЕ «Д» БЛАГОДАРНОСТЬ.....		450

ВВЕДЕНИЕ

В диссертации представлены результаты исследований, направленных на создание устройств нового типа для регистрации электромагнитного излучения в дальнем оптическом диапазоне ($\lambda \gtrsim 300$ мкм), а также пьезооптических датчиков механических напряжений с высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном. Во всех разработанных устройствах используются оптические эффекты, связанные с взаимодействием электромагнитного излучения с веществом. Поляризация электромагнитной волны при таком взаимодействии является наиболее «восприимчивым» параметром, что обеспечивает высокую чувствительность поляризационно-оптических методов по сравнению с другими методами измерений.

Предложенные и разработанные терагерцовые (ТГц) детекторы изображения в области длин волн $\lambda \gtrsim 300$ мкм (обычно монохроматического в активных системах) основаны на использовании конверсии ТГц-излучения в тепловое излучение с максимумом вблизи $\lambda_{\text{макс}} \approx 10$ мкм (при температуре $T \approx 300$ К) с последующим детектированием его ИК-камерой. ТГц-детекторы на основе ТГц-ИК-конвертеров не требуют дорогостоящих криогенных систем, систем сканирования и обеспечивают получение информации в режиме реального времени. Также предложены одиночные ТГц-детекторы на основе пироэлектрических преобразователей.

Предложенные и разработанные пьезооптические датчики механических напряжений, сочетая в себе компактность, надежность, устойчивость к перегрузкам, линейность и высокую чувствительность, по совокупности названных параметров существенно превосходят широко применяемые в настоящее время тензорезисторные, пьезоэлектрические и волоконно-оптические датчики и открывают новые, ранее недоступные, возможности в задачах измерения силовых нагрузок. При этом немаловажно, что все указанные устройства остаются достаточно технологичными в изготовлении и, следовательно, конкурентоспособными в ценовом отношении.

Актуальность темы исследования. В последнее время интенсивно развиваются методы контроля различных параметров объектов с использованием ТГц-излучения ($\lambda \gtrsim 300$ мкм). Высокая проникающая способность по сравнению с видимым и ближним ИК-диапазонами, отсутствие ионизирующего воздействия, в отличие от рентгеновских лучей, делает данное излучение перспективным для дистанционного исследования объема объектов, включая системы безопасности (обнаружение скрытого оружия, взрывчатки и др.), бесконтактного контроля строительных конструкций и качества продукции фармацевтической и пищевой промышленности. Малая величина длины волны в сравнении со сверхвысокочастотным (СВЧ) диапазоном обеспечивает значительно более высокое геометрическое разрешение. Однако проблемой остается отсутствие матричных детекторов, простых в использовании, обладающих достаточной чувствительностью и быстродействием без глубокого охлаждения и позволяющих регистрировать ТГц-излучение с пространственным разрешением и чувствительностью к состоянию поляризации излучения, в реальном масштабе времени и без использования систем сканирования. В спектрометрических приложениях, например в квазиоптических спектрометрах, по-прежнему представляют интерес одиночные широкополосные неохлаждаемые детекторы. В последние годы предпринимаются многочисленные попытки реализовать высокую чувствительность пьезоэлектрических сенсоров в данной области, так как они потенциально обладают большим быстродействием и низкой стоимостью в сравнении с другими типами тепловых детекторов, например, с одиночным оптико-акустическим приемником (ячейкой Голея).

Измерение механических напряжений является основным экспериментальным методом изучения напряженных состояний в различных конструкциях. Современные и перспективные датчики напряжений должны обладать малым весом, небольшими размерами, малой мощностью, устойчивостью к воздействиям внешней среды и электромагнитной помехозащищенностью, стабильностью параметров при эксплуатации, низкой стоимостью. С развитием технологий необходимость в подобных датчиках резко

возрастает в таких областях, как аэрокосмическая и оборонная промышленности, производство материалов и готовых изделий, строительство, горная промышленность и др. Сегодня наиболее широко используемыми устройствами для измерения механических напряжений являются датчики, основанные на тензорезистивном и пьезоэлектрическом эффектах, а также волоконно-оптические датчики. Однако все они имеют ряд неустранимых недостатков, а именно: неустойчивость и деградация параметров со временем, гистерезис, нелинейность, малый динамический диапазон, недостаточную на сегодняшний день чувствительность к измеряемым параметрам и, наоборот, высокую чувствительность к перегрузкам.

Датчики на основе пьезооптического эффекта (изменение фазы электромагнитной волны при прохождении напряженного прозрачного материала) обладают значительно более высоким коэффициентом тензочувствительности, чем другие, благодаря принципиально высокой чувствительности фазы волны к напряженному состоянию вещества. Несмотря на то, что пьезооптический эффект известен давно, на рынке отсутствуют датчики, удовлетворяющие условиям промышленной эксплуатации. Высокая чувствительность подобных датчиков позволит открыть новые, ранее недоступные, методы контроля напряженных состояний. В пьезооптических датчиках используются материалы, параметры которых, в отличие от тензорезисторных и пьезоэлектрических датчиков, слабо меняются под нагрузкой или со временем, поэтому пьезооптические датчики должны быть лишены недостатков, присущих датчикам на других физических принципах.

Степень разработанности проблемы

1. Для создания систем ТГц-диапазона ($\lambda \gtrsim 300$ мкм) в настоящее время, как правило, используются глубоко охлаждаемые ($T < 4$ К) детекторы (на основе полупроводниковых соединений, сверхпроводников, болометров на горячих электронах и пр.), работающие при субгелиевых температурах. Такие детекторы не позволяют создавать широкоформатные матричные структуры и используются в системах со сканированием изображения по одиночному приемнику.

Гетеродинные матричные детекторы на основе ТГц-диодов Шоттки, диодов Ганна или лавинно-пролетных диодов, являются чрезвычайно дорогими и сложными, неустойчивыми к электромагнитным помехам и также не позволяют создавать компактные матричные системы.

Чувствительность болометрических и пироэлектрических матричных приемников (например, пироэлектрическая камера Pyrocam фирмы Spiricon), чьи поглощающие слои оптимизированы на работу в диапазоне $\lambda = 8\text{--}14$ мкм, при переходе в ТГц-область ($\lambda > 50$ мкм) спадает примерно на два порядка. Кроме того, существующие технологии их изготовления направлены на минимизацию размеров фоточувствительных чувствительных элементов и габаритных размеров матриц. Размеры современных матриц, представленных на рынке, не превосходят 15×15 мм, что недостаточно для получения качественного изображения в длинах волн $\lambda \geq 300$ мкм. Поэтому при разработках новых приборов ТГц-диапазона для научных исследований и промышленных применений необходимо иметь в распоряжении простые в использовании широкоформатные ($> 200 \times 200$) матричные приемники, не требующие охлаждения до гелиевых температур, но обладающие высокой чувствительностью и обеспечивающие режим реального времени. Это позволило бы создавать носимые и стационарные, относительно недорогие системы локального (до 2–3 м) и дистанционного (более 10 м) контроля скрытых объектов, системы контроля качества продукции в фармацевтической, пищевой и строительной промышленности, а также приборы для контроля источников ТГц-излучения и для научных исследований.

2. Быстрое развитие волоконно-оптических технологий привело к появлению датчиков деформации, которые устойчивы к воздействию окружающей среды и обладают электромагнитной помехоустойчивостью. Эти технологии позволяют реализовать множество датчиков в распределённых системах мониторинга на одном оптическом волокне. К сожалению, подобного типа датчики имеют примерно в 2–7 раз меньшую чувствительность по сравнению с тензорезисторными.

При изучении процессов распространения волн напряжений (вибраций)

широко используются датчики, основанные на пьезоэлектрическом эффекте. Однако во время работы датчиков возможны как обратимые, так и необратимые изменения их коэффициента тензочувствительности и других характеристик. Это, естественно, ограничивает условия применения и является одним из самых серьезных недостатков пьезоэлектрических акселерометров.

Пьезооптический метод определения деформаций известен с 1930-х годов, однако не используется в современной промышленности, хотя отдельные попытки разработки тензодатчиков на пьезооптическом эффекте – пьезооптических измерительных преобразователей – предпринимались. Указанные разработки не привели к созданию и появлению на рынке малогабаритных, относительно недорогих пьезооптических датчиков деформации. В научной литературе мало данных об экспериментальном и теоретическом исследовании параметров пьезооптических датчиков, что затрудняет оценку их преимуществ по сравнению с датчиками на других физических принципах, широко применяемых в различных областях техники. Решение научных проблем создания пьезооптических датчиков позволит существенно повысить точность контроля напряженных состояний механизмов и откроет новые функциональные возможности их применения, благодаря реализации преимуществ поляризационно-оптических методов измерений.

Цель и задачи диссертации

Целью диссертации является разработка и создание оптико-электронных устройств как для регистрации электромагнитного излучения в дальнем ИК-диапазоне без криогенных систем и систем сканирования, так и для повышения чувствительности и расширения динамического диапазона при измерении деформаций.

Для достижения поставленной цели решались следующие основные задачи:

1) на основе разработанных ранее ультратонких резонансных поглотителей разработать и создать структуру конвертера ТГц-излучения в более коротковолновое тепловое излучение для его дальнейшей регистрации существующими ИК-камерами;

2) исследовать теплофизические процессы в ТГц-ИК-конвертере с целью определения влияния его структуры на эффективность ТГц-ИК-конверсии;

3) разработать конструкцию детектора ТГц-излучения с использованием ТГц-ИК-конвертера и изготовить экспериментальные образцы ТГц-детекторов;

4) исследовать спектральные характеристики пироэлектрических детекторов на основе тетрааминодифенила в широком диапазоне 0,4–2500 мкм;

5) разработать схемотехнические и технологические основы создания пьезооптических преобразователей для датчиков механических напряжений, устойчивых к перегрузкам и обеспечивающих высокую чувствительность к деформациям в широком динамическом диапазоне.

Научная новизна. В работе впервые:

1) реализована методика регистрации ТГц-излучения без использования криогенных систем и систем сканирования с пространственным разрешением, спектральной и поляризационной чувствительностью на основе ТГц-ИК конвертера;

2) разработана методика создания эмиссионного слоя с обратной стороны ТГц-поглотителя, обеспечивающая конверсию энергии ТГц-излучения в энергию теплового излучения эмиссионного слоя, которое может быть зарегистрировано существующими ИК-камерами;

3) разработана методика лазерной резки структуры ТГц-ИК-конвертера, позволяющая изготавливать сквозные разрезы, не нарушающие целостность структуры конвертера, и, практически, исключить блюминг, эффект расплывания изображения за счёт латеральной теплопроводности вдоль структуры конвертера;

4) показано, что при суммарной толщине ТГц-ИК-конвертера 45–60 мкм со сквозными разрезами, основная часть поглощённой энергии ТГц-излучения (до 80%) переизлучается в тепловое ИК излучение, остальная часть энергии рассеивается за счёт латеральной теплопроводности вдоль структуры ТГц-ИК-конвертера и теплообмена с окружающим воздухом; установлена линейность зависимости быстродействия и чувствительности приемника от толщины ТГц-

ИК-конвертера;

- 5) экспериментально показано, что тонкие пироэлектрические плёнки тетрааминодифенил толщиной 1 мкм обладают широким спектральным диапазоном чувствительности от ультрафиолета до миллиметровых длин волн при слабой зависимости спектральной чувствительности от длины волны излучения.
- б) предложено использование крестообразной формы фотоупругого элемента в пьезооптических преобразователях;

Практическая значимость работы

1. Разработанные детекторы на основе ТГц-ИК-конвертера и высокочувствительной ИК-камеры открывают новые возможности для решения научных задач в области исследования свойств материалов в ТГц-части спектра, а также в прикладных задачах неразрушающего контроля конструкций, строительных материалов, интроскопии в биомедицине, контроле качества продукции в фармацевтической и пищевой промышленности, в создании дистанционных систем контроля скрытых опасных объектов (оружие, взрывчатка, отравляющие вещества). Рабочий спектральный диапазон таких детекторов ограничивается только технологиями изготовления метапоглозителей, которые на данный момент охватывают интервал длин волн от 1,6 мкм до 10 мм.

2. Созданные многоканальные пироэлектрические детекторы типа УМК-5, являясь достойной альтернативой зарубежных аналогов, могут использоваться для контроля параметров источников излучения в диапазоне длин волн 0,4–2500 мкм.

3. Благодаря высокой чувствительности (менее 0,3 мН) и большому динамическому диапазону (до 6×10^4) пьезооптических датчиков открываются новые возможности в задачах измерения силовых нагрузок, в частности – дистанционный контроль деформаций, когда датчик размещается на некотором расстоянии от зоны измеряемых деформаций, например, в задачах весового контроля движущихся автомобилей и вагонов, в лифтах, в механизмах, где установка датчика деформаций в измеряемой зоне недопустима, по каким-либо

причинам неприемлема или является сложной и дорогостоящей. На основе предлагаемых пьезооптических преобразователей созданы и выпускаются семейство модификаций специализированных датчиков деформации УПС-10, УПС-12 и УКЗК-15, применяемых для контроля степени загрузки кабин лифтов, и семейство модификаций УПС-15, УПС-17 – для контроля параметров движения подъемных устройств.

Методология и методы исследования. При выполнении работы применялись поляризационно-дифференциальные методы контроля состояния поляризации при взаимодействии света с контролируемым объектом, а также аналитические методы, основанные на теории фотоупругости и теории упругости твердых тел. При исследовании теплофизических процессов в тепловых приемниках среднего ИК- и ТГц-излучения, исследовании параметров световой волны при прохождении оптических элементов пьезооптического преобразователя, пространственного распределения напряжений в фотоупругом элементе проводилось компьютерное моделирование всего процесса с последующим экспериментальным контролем.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы, ее формуле «... специальность в области науки и техники, занимающаяся использованием оптического диапазона электромагнитных волн для создания исследовательских, измерительных, ... и технологических приборов, систем ..., а также разработкой способов применения таких приборов, систем Значение решения научных и технических проблем в данной области состоит в создании новых методов и аппаратуры для физических исследований с использованием оптического излучения, высокоточных измерений, ... и решения других задач народнохозяйственного и оборонного назначения, требующих использования оптической и оптико-электронной техники» и областям исследований, обозначенных в пунктах:

«1. Исследование и разработка новых методов и процессов, которые могут быть положены в основу создания оптических и оптико-электронных приборов,

систем и комплексов различного назначения».

«2. Разработка, совершенствование и исследование характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн, предназначенных для решения задач:

- исследования и контроля параметров различных сред и объектов, в том числе при решении технологических, экологических и биологических задач;
- приема, обработки и отображения информации;
- создания оптического и оптико-электронного оборудования для научных исследований в различных областях науки и техники».

На защиту выносятся следующие положения:

1. создание эмиссионного слоя для ТГц-ИК-конвертера на основе графитополимерной смеси обеспечивает коэффициент эмиссии не менее 0,9 при толщине не более 30 мкм, что повышает эффективность и быстродействие ТГц-детектора на основе ТГц-ИК-конвертера;
2. изготовление сквозных разрезов в структуре ТГц-ИК-конвертера существенно снижает эффект расплывания изображения, повышает эффективность конверсии ТГц-излучения в ИК излучение, повышает чувствительность ТГц-детектора;
3. эффективность конверсии ТГц излучения в ИК излучение в ТГц-ИК-конвертере суммарной толщиной 45–60 мкм и со сквозными разрезами, помещенного в воздушную среду, может достигать 80%;
4. созданные детекторы ТГц-излучения на основе ТГц-ИК-конвертера позволяют регистрировать ТГц-излучения с минимальной обнаруживаемой плотностью мощности $2,5 \times 10^{-5}$ Вт/см² на частоте 1 Гц, пространственным разрешением, спектральным разрешением и поляризационной чувствительностью, в режиме реального времени и без глубокого охлаждения;
5. использование тонких плёнок тетрааминодифенила толщиной 0,6–1,0 мкм обеспечивает спектральный диапазон чувствительности пироэлектрических детекторов на их основе 0,4–2500 мкм с высокой чувствительностью, превышающей аналоги;

б. использование крестообразной формы фотоупругого элемента позволяет повысить чувствительность пьезооптических датчиков деформаций при широком динамическом диапазоне измерений, при этом такие датчики устойчивы к перегрузкам и отвечают условиям и особенностям промышленной эксплуатации, обеспечивают стабильность характеристик во времени, отсутствие гистерезиса при чувствительности к силе менее 0,3 мН и к относительной деформации менее 10^{-9} .

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или под его руководством и при его непосредственном участии. В совместных работах вклад соискателя состоял в обосновании целей, постановке задач и разработке методик исследований, постановке экспериментов, обсуждении их результатов и формировании общих выводов. Совместные работы, а так же соисполнители и их вклад, подробно указаны в тексте диссертации. Использование результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с коллегами, которым автор выражает благодарность за сотрудничество. При подготовке всех приведённых патентов автор диссертации являлся единственным лицом со стороны авторов, который предоставлял исходные данные и участвовал в дальнейшем в подготовке заявок: составление текста и подготовка чертежей, создание многозвенной формулы с зависимыми пунктами, а также подготовке ответов по существу вопросов экспертов в процессе патентной экспертизы.

Достоверность и апробация результатов. Получение изображений ТГц-излучения с помощью детекторов на основе ТГц-ИК-конвертеров подтверждено результатами исследований, проведенными в Филиале ИФП СО РАН "КТИПМ"; результаты хорошо воспроизводятся, соответствуют известным из литературы данным других авторов и опубликованы в ведущих зарубежных изданиях. Параметры пьезоэлектрических датчиков подтверждены исследованиями, проведенными на радиофизическом факультете в Томском государственном университете, на физическом факультете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова и в ООО «Специальные технологии»

совместно с Институтом лазерной физики СО РАН (г. Новосибирск)

Согласно действующим техническим условиям, проведены все виды испытаний пьезооптических датчиков деформации. Дополнительно в РОСТЕСТе и сертифицированной калибровочной лаборатории Detroit Calibration Lab Trescal (г. Детройт, США) проведены сравнительные испытания, которые продемонстрировали на порядок более высокую чувствительность разработанного пьезооптического датчика по сравнению с калибровочным тензорезисторным датчиком Ultra Precision LowProfile™ Load Cell Interface Force™, используемым для калибровки тестовых машин. Испытания в испытательной лаборатории Института физической химии и электрохимии имени А. Н. Фрумкина РАН (ИФХЭ РАН, Москва) показали, что параметры датчика УПС-17 превышают параметры тензорезисторных датчиков с категорией 0,02 (наивысшая категория). Результаты испытаний подтверждаются соответствующими протоколами. Работа «Теоретическое и экспериментальное исследование пьезооптического преобразователя для высокочувствительных датчиков деформаций», авторов П. С. Загубисало, А. Г. Паулиша, стала победителем конкурса научных работ сотрудников ИФП СО РАН в 2017 году и получила 1-ю премию.

Экспериментальные образцы детекторов ТГц-излучения демонстрировались на выставках «ФОТОНИКА. МИР ЛАЗЕРОВ И ОПТИКИ» (2011 г., Москва), «Комплексная безопасность» (2012–14 гг., Москва), «INTERPOLITECH» (2014–15 гг., Москва). Опытные образцы пьезооптических датчиков деформации демонстрировались на выставках и ярмарках: «ЛИФТ ЭКСПО» (2011 г., Москва), «INTERLIFT» (2011 г., Аутсбург, Германия), «ОПОРА РОССИИ» (2011 г., Москва), «Russian Elevator Week» (2015–17 гг., Москва), «Э-ЛИФТ» (2018 г., Екатеринбург) и были удостоены дипломом победителя конкурса «Импортозамещение лифтовых комплектующих» за проект «Способ и устройство контроля параметров движения лифта в режиме реального времени».

Основные результаты докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях: ISMTH-2009 (С.-Петербург), IRMMW-THz-2010 (Рим, Италия), ИМЕКО ТС2-2011 (Линц, Австрия), «Metamaterials'2010»

(Карлсруэ, Германия), GSMM-2011 (Эспуу, Финляндия), «SPIE Photonics Europe 2012» (Брюссель, Бельгия), «Metamaterials VII, META'12» (Париж, Франция), PIERS-2015 (Прага, Чехия), «ФОТОНИКА-2015» (Новосибирск), «Территория NDT 2016» (Москва), PIERS-2017 (С.-Петербург), «ФОТОНИКА-2017» (Новосибирск), «ФОТОНИКА-2019» (Новосибирск).

Внедрение результатов работы

1. Многоканальные пьезоэлектрические детекторы типа УМК-5 используются для контроля параметров источников ТГц-излучения в Московском государственном университете (МГУ) имени М. В. Ломоносова (грант РФФИ 16-29-09593), в ООО «Специальные технологии» совместно с ИЛФ СО РАН в рамках Государственного задания АААА-А17-117050410068-7, а также в ИЯФ СО РАН (г. Новосибирск) для исследования свечения плазмы (грант РНФ 14-12-00610) и в других научных учреждениях.

2. Разработки пьезооптических преобразователей осуществлялись в рамках опытно-конструкторских и инновационных работ, осуществляемых ООО «Фирма ПОДИЙ» (Москва, договоры №№ 625-09, 637-11, 651-12, 664-13, 665-13, 675-14, 688-17). На основе предложенных технических решений создано и выпускается семейство модификаций специализированных оптико-электронных датчиков деформации УПС-10, УПС-12, УПС-15, УКЗК-15, УПС-17. С 2010 г. датчики УПС-10 эксплуатируются на лифтах ОАО «Могилевлифтмаш» (г. Могилев, Республика Беларусь) и ряде жилых домов Москвы без замечаний. С их помощью по разработанной оригинальной методике контролируются:

– степень загрузки кабины лифта для обеспечения обратной связи в управлении частотным преобразователем двигателя лебедки с целью экономии электроэнергии, снижения износа, предотвращения перегрузок, продления срока службы лебедки;

– параметры комфортности движения лифта (ускорение, торможение, рывки, величина трения и вибрации) согласно вводимому в действие Международному стандарту ISO 18738-1:2012 (E) «Measurement of ride quality — Part 1: Lifts (elevators)» [«Измерение ходовых качеств. Часть 1. Лифты (подъемники)»];

– наступление предаварийных ситуаций.

Ранее данные параметры в совокупности не контролировались из-за отсутствия соответствующих устройств контроля и методик.

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 72 печатных работ, в том числе 16 научных статей в журналах из перечня ВАК для докторских диссертаций и приравненных к ним, индексируемых в Web-of-Science и Scopus, получены 19 патентов, в том числе 3 зарубежных, 37 работ опубликовано в других изданиях и в трудах российских и международных конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 8 глав, заключения, списка литературы, включающего 252 наименования. Общий объем работы 450 страниц, включая 238 рисунков, 58 таблиц, 5 приложений.

ГЛАВА 1 ОСНОВЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

В первой главе рассмотрены общие вопросы взаимодействия световой волны с веществом и оптико-электронные методы измерения различных физических величин. Приведены способы регистрации ТГц- и субТГц-излучения с пространственным разрешением. Рассмотрены способы и устройства регистрации механических напряжений на основе тензорезистивного и пьезооптического эффектов.

1.1 Поляризация электромагнитной волны

Хорошо известно, что электромагнитная волна может быть описана тремя ортогональными векторами [1]. Первый вектор определяет направление потока электромагнитной энергии. Два других вектора описывают направление колебаний напряженности электрического поля волны (рис.1.1.1). Два последних вектора описывают состояние поляризации электромагнитной волны. В зависимости от сдвига фаз Δ между двумя ортогональными векторами напряженности электрического поля результирующий вектор в общем случае описывается эллипсом. В частых случаях, когда $\Delta = 0^\circ$ или $\Delta = 180^\circ$, эллипс вырождается в прямую (рис.1.1.1 внизу), и эта волна называется линейно поляризованной. В случаях $\Delta = 90^\circ$ или $\Delta = 270^\circ$ результирующий вектор описывается кругом, и эта волна называется циркулярно поляризованной.

Изменения в состоянии поляризации электромагнитной волны при взаимодействии света с физическим объектом при изменении его механических и химических характеристик лежат в основе поляризационно-оптических методов измерения физических величин [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 10]. Изменения в поляризации обусловлены тем, что свет с различным направлением вектора поляризации распространяется в веществе с различной скоростью, что приводит к дополнительному сдвигу фазы Δ между двумя волнами с разной поляризацией.

Такие вещества называются анизотропными. Анизотропия может быть обусловлена как природными свойствами материала (например, полевой шпат и турмалин), так и внешним воздействием на материал (например, механической нагрузкой).

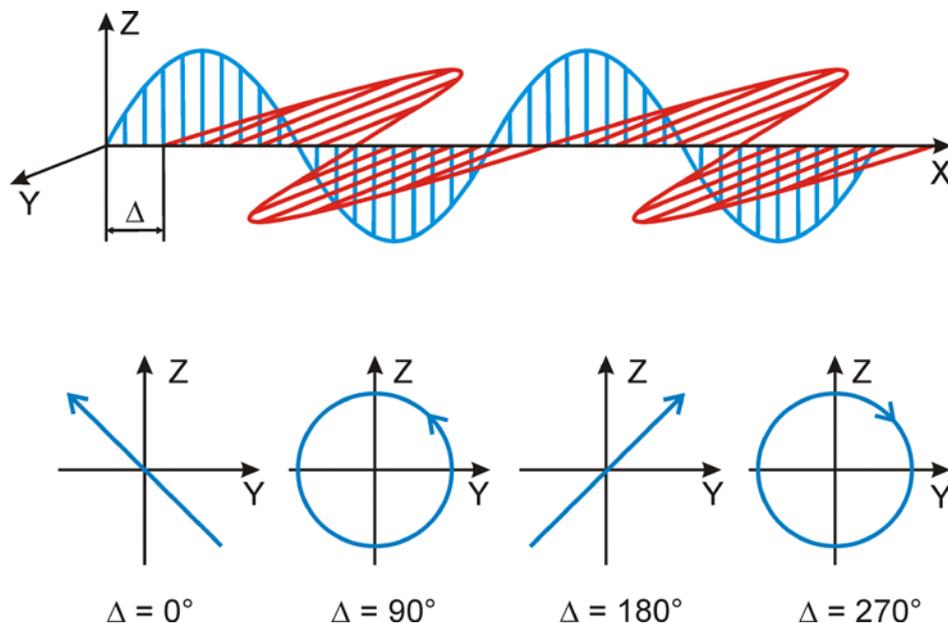


Рисунок 1.1.1 — Пространственное поведение электромагнитной волны (вверху) и частные случаи результирующего вектора напряженности электрического поля (внизу)

Существуют различные методы определения эллипса поляризации, объединённые в целый раздел науки, называемый эллипсометрией [11, 12]. В патенте [13] была предложена конструкция эллипсометрического датчика. Детектор (рис.1.1.2 и рис.1.1.3) состоит из источника света, поляризатора, четвертьволновой пластины, исследуемого образца, двух анализаторов, установленных перед двумя фотодетекторами. Оптические оси анализаторов повернуты по отношению друг к другу на угол 90° . Свет, отраженный от (или прошедший сквозь) образец, представляет собой два луча одинаковой интенсивности и регистрируемые двумя фотоприемниками. Такая схема измерений с лучами, пространственно разделенными вдоль фронта волны, позволяет использовать пленочные поляризаторы, такие как поляроидные пленки, уменьшить длину оптического пути и использовать некогерентный источник

света, такой как светодиод с низким энергопотреблением. Одно из главных преимуществ такой схемы – возможность поместить всю оптическую схему в малом объёме, менее 1 см^3 , и таким образом сделать прибор миниатюрным, при этом сохраняющим высокую чувствительность к изменению поляризации.

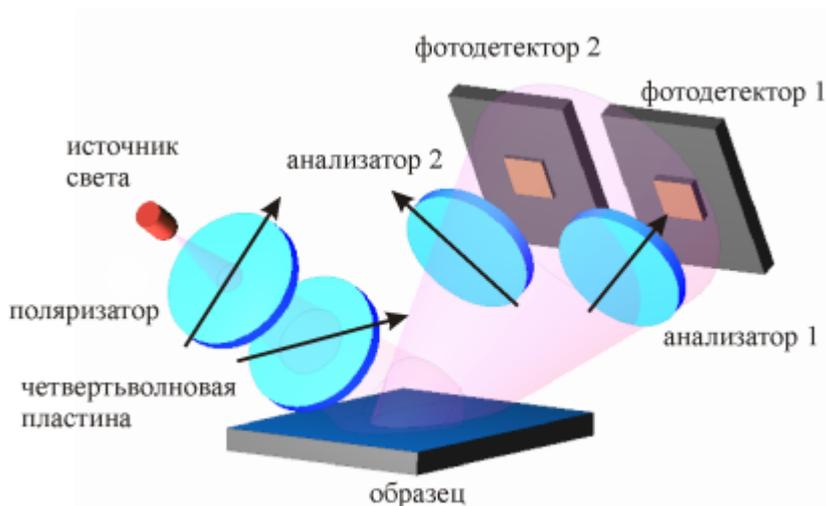


Рисунок 1.1.2 — Оптическая схема поляризационно-оптического детектора в режиме отражения. Стрелки показывают ориентацию осей оптических элементов

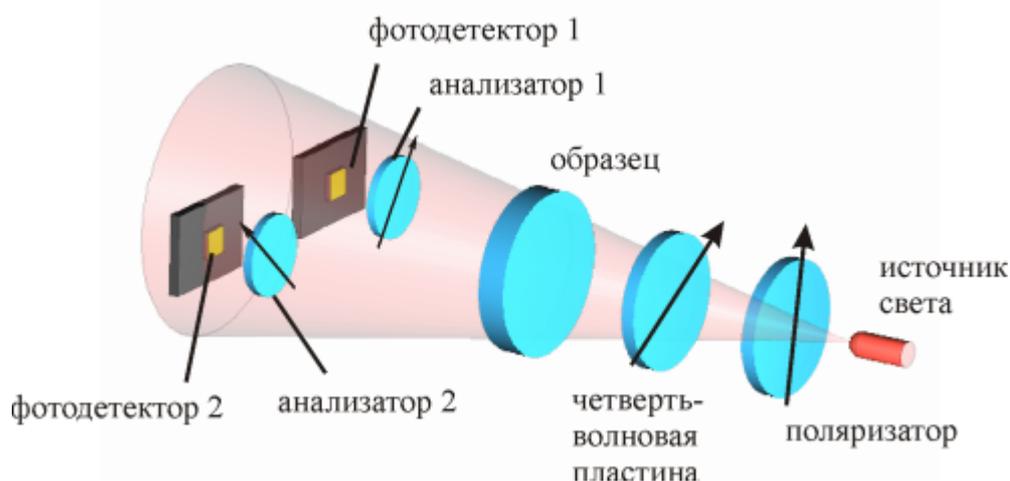


Рисунок 1.1.3 — Оптическая схема поляризационно-оптического детектора в режиме на просвет. Стрелки показывают ориентацию осей оптических элементов

Фотоприёмники подключены к электрической схеме дифференциальным способом, что компенсирует нестабильность источника света. При этом исходной настройкой осей поляризатора и фазовой пластинки можно выровнять величины фототоков с фотодиодов и получить исходный нулевой сигнал. Это позволяет работать на наиболее линейном участке синусоидальной зависимости выходного

сигнала от изменения фазы световых лучей. При малых изменениях фазы $\delta\Delta$, много меньше рабочей длины волны, выходной сигнал эллипсометра прямо пропорционален $I \sim \delta\Delta$. Согласно [13] чувствительность детектора к изменению фазы составляет 10^{-4} радиан или 10^{-5} длины волны. Таким образом, эта схема позволила разработать высокочувствительные, малогабаритные, легкие по весу устройства с низким потреблением энергии для измерения различных физических величин, подробно описанные в работе [14].

1.2 Поляризационно-оптические методы измерения некоторых физических величин

1.2.1 Эффект полного внутреннего отражения

Полное внутреннее отражение является оптическим явлением, которое возникает, когда луч света падает на границу раздела двух веществ под углом, большим критического угла по отношению к нормали к поверхности. Если показатель преломления на обратной стороне интерфейса меньше, чем со стороны падения света, то свет полностью отразится. Критический угол – это угол падения, выше которого происходит полное внутреннее отражение (угол Брюстера) [1].

Когда свет пересекает границу между материалами с различными показателями преломления, световой пучок частично преломляется на поверхности раздела и частично отражается (рис.1.2.1). Однако если угол падения увеличивается (то есть, луч становится ближе к параллели с интерфейсом) выше, чем критический угол, тогда свет не пересекает интерфейс и вместо этого полностью отражается обратно внутри. Критический угол падения это угол, при котором свет преломляется так, что далее перемещается вдоль границы раздела. Это может происходить только тогда, когда свет переходит от вещества с более высоким показателем преломления к веществу с более низким показателем преломления. Например, это происходит, когда свет проходит от стекла к

воздуху, но не от воздуха к стеклу. Критический угол φ_c задается законом Снеллиуса:

$$\varphi_c = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (1.2.1)$$

где n_2 – показатель преломления оптически менее плотного вещества, а n_1 – показатель преломления оптически более плотного вещества.

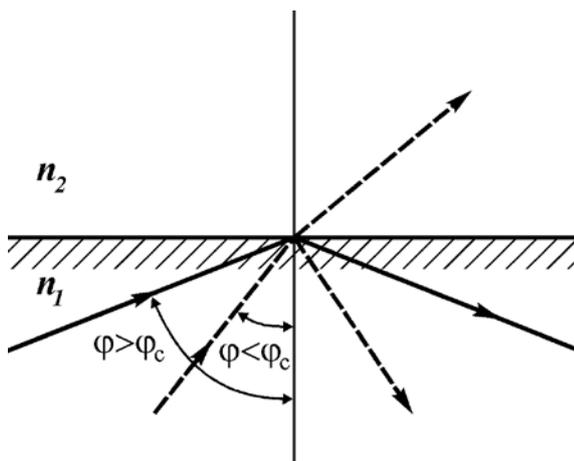


Рисунок 1.2.1 — Схема полного внутреннего отражения. Чем больше угол к нормали, тем меньше доля света передается; полное внутреннее отражение возникает, когда угол достигает значения φ_c .

Есть два аспекта полного внутреннего отражения. Во-первых, отраженный свет имеет фазовый сдвиг, зависящий от угла между отраженным и падающим светом. Этот сдвиг фазы зависит от поляризации и возрастает по мере отклонения угла падения от критического угла к скользющему падению. Второй аспект – распространение затухающей волны через интерфейс. На самом деле, несмотря на то, что вся падающая волна отражается обратно в исходное вещество, происходит некоторое проникновение во второе вещество на границе раздела. Оба эти аспекта позволяют проектировать оптические устройства для исследования очень тонких слоев ($\sim \lambda$), близких к интерфейсу.

Амплитуды отраженной и преломленной волн определяются уравнениями Френеля [1]. Если падающий свет поляризован так, что электрическое поле света

лежит в плоскости диаграммы (рис.1.2.2), то амплитудные отношения для отражения и пропускания:

$$r_{\parallel} = \frac{E_{r\parallel}}{E_{i\parallel}} = -\frac{\tan(\varphi - \psi)}{\tan(\varphi + \psi)}, \quad (1.2.2)$$

$$t_{\parallel} = \frac{E_{d\parallel}}{E_{i\parallel}} = \frac{2 \sin \psi \cos \varphi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)}. \quad (1.2.3)$$

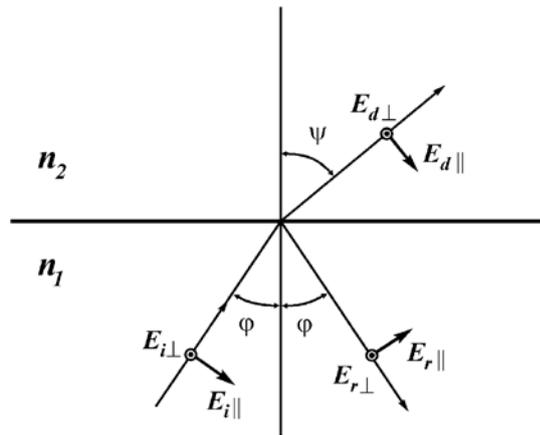


Рисунок 1.2.2 — Схема положения векторов электрического поля в падающей E_i , отраженной E_r и преломленной E_d электромагнитных волнах. Компоненты вектора электрического поля $E_{j\parallel}$ лежат в плоскости падения, а компоненты $E_{j\perp}$ перпендикулярны плоскости падения.

Если падающий свет поляризован так, что электрическое поле света перпендикулярно плоскости диаграммы (рис.1.2.2), то амплитудные отношения для отражения и пропускания:

$$r_{\perp} = \frac{E_{r\perp}}{E_{i\perp}} = -\frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi + \psi)}, \quad (1.2.4)$$

$$t_{\perp} = \frac{E_{d\perp}}{E_{i\perp}} = \frac{2 \sin \psi \cos \varphi}{\sin(\varphi + \psi)}. \quad (1.2.5)$$

Здесь E_i , E_r , E_d – амплитуды падающей, отраженной и преломленной волн соответственно; φ и ψ – углы падения и преломления соответственно.

Согласно закону Снеллиуса соотношение между показателями преломления:

$$\frac{\sin \varphi}{\sin \psi} = \frac{n_2}{n_1} \equiv n_{12}. \quad (1.2.6)$$

Из уравнения 1.2.6 видно, что при $n_{12} < 1$ φ могут принимать значения, при которых $\sin \psi > 1$, что не имеет смысла. Это имеет место для всех значений φ , удовлетворяющих условиям $\sin \varphi > n_{12}$. Это возможно только при $n_{12} < 1$. Поскольку в этих условиях угол ψ не имеет смысла, мы не можем использовать уравнения Френеля, так как ψ – их непосредственная составляющая. Но мы можем преобразовать эти уравнения, введя n_{12} . Заменяем $\sin \psi$ на $\sin \varphi / n_{12}$ и $\cos \psi$ на $\pm \sqrt{1 - \sin^2 \varphi / n_{12}^2}$. Для рассматриваемого здесь случая $\sin \varphi / n_{12} > 1$. Это означает, что $\sin^2 \varphi / n_{12}^2 > 1$, т. е. $\cos \psi$ становится мнимым аргументом:

$$\cos \psi = \pm i \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi}{n_{12}^2} - 1}. \quad (1.2.7)$$

Знак «плюс» соответствует бесконечному увеличению амплитуды при удалении от интерфейса во втором веществе, что лишено физического смысла. Поэтому окончательное уравнение будет:

$$\cos \psi = -i \sqrt{\frac{\sin^2 \varphi}{n_{12}^2} - 1}. \quad (1.2.8)$$

После вычислений E_r и E_d выражаются через E_i , φ и n_{12} . Однако расчетные выражения являются не действительными, а комплексными. Комплексные значения амплитуды отраженных и преломленных волн имеют простой смысл: аргумент комплексной амплитуды определяет фазовый сдвиг между падающей и отраженной (преломленной) волнами. Компоненты $E_{r\perp}$ и $E_{r\parallel}$ меняют фазу относительно $E_{i\perp}$ и $E_{i\parallel}$, которые обозначаются, как Δ_{\perp} и Δ_{\parallel} соответственно, и могут быть выражены как:

$$\tan \frac{\Delta_{\parallel}}{2} = -\frac{\sqrt{\sin^2 \varphi - n_{12}^2}}{n_{12}^2 \cos \varphi}, \quad \tan \frac{\Delta_{\perp}}{2} = -\frac{\sqrt{\sin^2 \varphi - n_{12}^2}}{\cos \varphi} \quad (1.2.9)$$

Здесь величина Δ_{\perp} отличается от величины Δ_{\parallel} , и можно записать уравнение для относительной разности фаз $\Delta = \Delta_{\perp} - \Delta_{\parallel}$ как:

$$\tan \frac{\Delta}{2} = \frac{\tan \frac{\Delta_{\perp}}{2} - \tan \frac{\Delta_{\parallel}}{2}}{1 + \tan \frac{\Delta_{\perp}}{2} \tan \frac{\Delta_{\parallel}}{2}} = \frac{\cos \varphi \sqrt{\sin^2 \varphi - n_{12}^2}}{\sin^2 \varphi}. \quad (1.2.10)$$

Следовательно, если $E_{i\perp}$ и $E_{i\parallel}$ в падающей волне находятся в одной фазе, фазовый сдвиг Δ появляется между $E_{r\perp}$ и $E_{r\parallel}$ в отраженной волне, которая зависит от φ и n_{12} . Поэтому первично линейная поляризованная волна преобразуется в эллиптически поляризованную волну после полного внутреннего отражения. Изменения фазового сдвига $\delta\Delta$, вызванного изменениями показателя преломления δn_{12} (из-за химической реакции, процессов адсорбции-десорбции и т. д.), в веществе с n_2 (рис.1.2.2), при фиксированном угле φ , определяются уравнением:

$$\frac{\delta\Delta}{2 \cos^2 \frac{\Delta}{2}} = - \frac{\cos \varphi}{\sin^2 \varphi} \frac{2n_{12} \delta n_{12}}{\sqrt{\sin^2 \varphi - n_{12}^2}}, \quad (1.2.11)$$

где $n_{12} = n_2 / n_1$ и $\delta n_{12} = \delta n_2 / n_1$. Из уравнения видно, что $\delta\Delta \sim \delta n_{12}$.

Это уравнение является основой разработанных датчиков для измерения величины изменения показателя преломления.

При полном внутреннем отражении исчезающая волна проникает только в 100-300 нанометров в среду с меньшим показателем преломления, а ее интенсивность (I) на заданной глубине (z) может быть рассчитана как:

$$I(z) = I(0) e^{-\frac{z}{d}}, \quad (1.2.12)$$

где

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} [n_1^2 \sin^2 \varphi - n_2^2]^{-1/2} \quad (1.2.13)$$

и λ – длина волны света, падающего на границу раздела под углом φ . Эффективная глубина проникновения равна $\sim \lambda$. Это дает очень небольшой исследуемый объем вблизи границы раздела и позволяет разрабатывать различные методы исследования, такие как флуоресцентная микроскопия полного внутреннего отражения [15]. Преимущества такой конфигурации освещения заключается в том, что она значительно снижает фоновый сигнал, обычно связанный с неоднородностью исследуемого слоя по толщине.

Суммируя, мы можем записать последовательность преобразований из амплитуды сигнала в измеренную физическую величину:

$$\partial I \propto \partial \Delta \propto \partial n, \quad (1.2.14)$$

где ∂I – амплитуда сигнала, $\partial \Delta$ – изменение фазового сдвига в световой волне, ∂n – изменение показателя преломления, вызванное изменением физических и химических свойств вещества.

Метод полного внутреннего отражения использовался для создания таких детекторов физических, химических и биологических параметров объектов исследования, как рефрактометр для определения коэффициента преломления жидкости, газовый сенсор и сенсор ДНК, описанных далее.

1.2.2 Рефрактометр для определения коэффициента преломления жидкости

На базе предложенного детектора поляризации (рис.1.1.2) были разработаны оптико-электронные рефрактометры для измерения показателя преломления жидких растворов. Были разработаны проточные (рис.1.2.3) и контактные (рис.1.2.4) детекторы.

В качестве источника света используется светодиод с рабочей длиной волны 650 нм, точность измерения показателя преломления составляет 5×10^{-5} . Диапазон измерений показателя преломления зависит от показателя преломления призмы и изменяется от 1,33 до 1,49.

Эти рефрактометры могут использоваться в качестве датчиков в жидкостной хроматографии и в автоматическом испытательном оборудовании для контроля качества продукции в пищевой и химической промышленности.

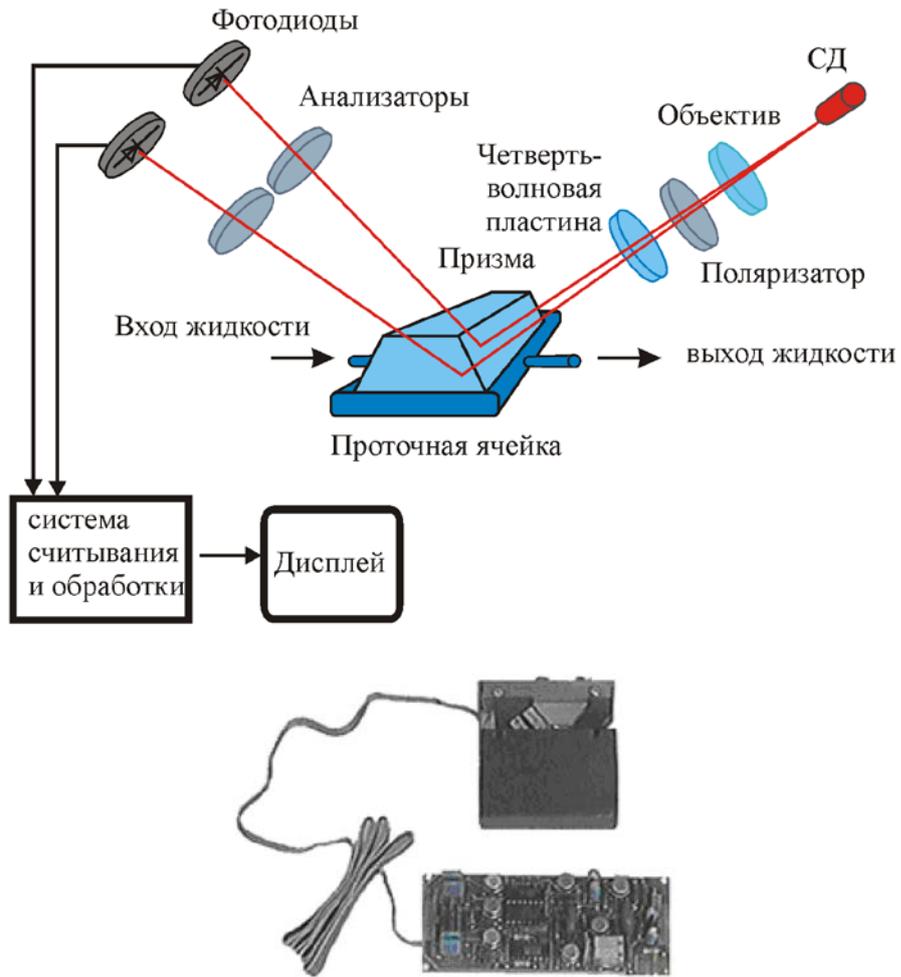


Рисунок 1.2.3 — Схема и внешний вид проточного рефрактометра

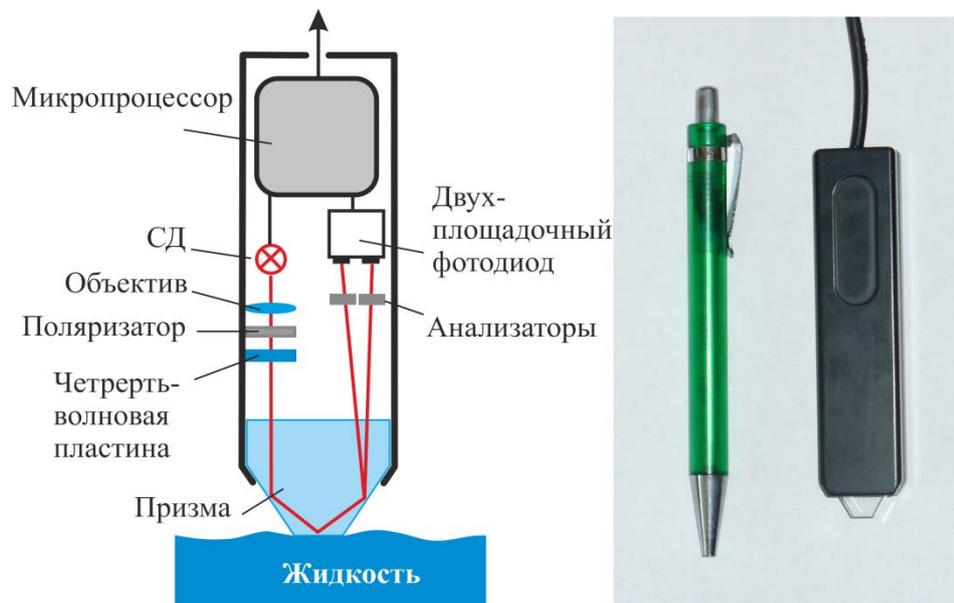


Рисунок 1.2.4 — Схема и внешний вид контактного рефрактометра

1.2.3 Сенсор газа

Оптическая схема газового датчика такая же, как для жидкого рефрактометра (рис.1.2.5), за исключением объема газа. Метод газового анализа основан на измерениях изменений показателя преломления поглощающей пленки при взаимодействии с молекулами газа. Поглощающая пленка имеет контакт с призмой, в которой реализованы условия внутреннего отражения. Химическая реакция между молекулами газа и молекулами-рецепторами поглощающей пленки приводит к изменению молекулярной поляризуемости и, как следствие, к изменению показателя преломления пленки. Существует два режима измерения изменения показателя преломления в зависимости от задачи исследования: 1) полное внутреннее отражение на границе раздела поглощающая пленка–газ; 2) полное внутреннее отражение на границе раздела призмы с поглощающей пленкой. Выбор режима определяется показателем преломления призмы и углом падения светового луча на призму. Первый режим более подходит для процессов адсорбции-десорбции поверхности; второй – для объемных процессов диффузии.

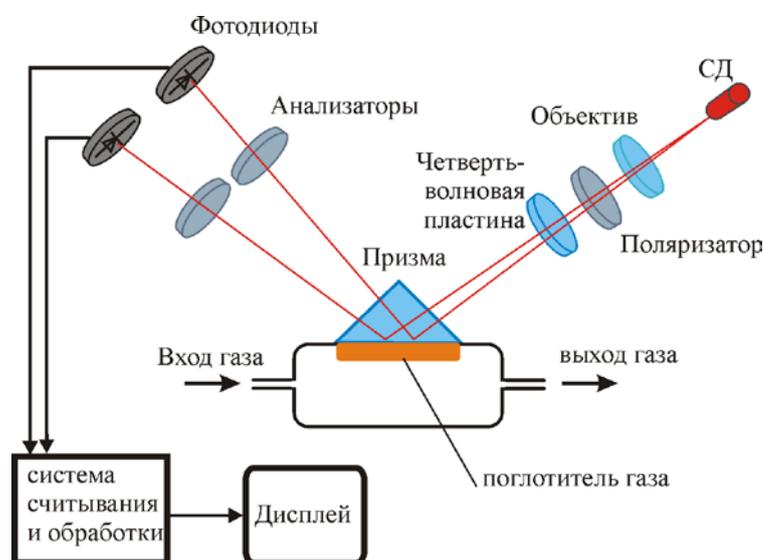


Рисунок 1.2.5 — Схема оптического датчика газа с адсорбционной пленкой.

Показатель преломления вещества, состоящего из молекул R -типа, обусловлен молекулярной поляризуемостью по уравнению Лорентца-Лоренца [1]:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} \sum_R N_R \alpha_R, \quad (1.2.15)$$

где n – показатель преломления, N_R – число молекул с поляризуемостью α_R на единицу объема, а R – число типов молекул (связей).

Предположим, что M – новые молекулы с поляризуемостью α_Q генерируются в поглощенной пленке из-за химической реакции молекул типа R с молекулами газа. Показатель преломления n_M пленки с новым составом определяется из уравнения:

$$\frac{n_M^2 - 1}{n_M^2 + 2} = \frac{4\pi}{3} \left[\sum_{R-1} N_{R-1} \alpha_{R-1} + (N_R - M) \alpha_R + M \alpha_Q \right] \quad (1.2.16)$$

Показатель преломления изменяется ($\Delta n = n - n_M$), вызванный этой химической реакцией, можно определить из уравнения:

$$\frac{6\Delta n \cdot n}{(n^2 + 2)^2} = \frac{4\pi}{3} M (\alpha_R - \alpha_Q). \quad (1.2.17)$$

Заметим, что если известны α_R и α_Q , можно оценить число M .

Разработанный датчик газа имеет чувствительность к фазовому сдвигу (Δ) $\sim 2 \times 10^{-3}$ градуса, линейный динамический диапазон $\Delta \pm 10$ градусов, чувствительность к изменению показателя преломления $\Delta n \sim 5 \times 10^{-5}$, размер $42 \times 25 \times 13$ мм³, вес 50 г. Выходной сигнал пропорционален фазовому сдвигу:

$$\Delta I = K \cdot \Delta, \quad (1.2.18)$$

где $K = 500$ мВ/градус.

Суммируя, мы можем записать последовательность преобразований из амплитуды сигнала в измеряемую физическую величину:

$$\partial I \propto \partial \Delta \propto \partial n \propto \partial M, \quad (1.2.19)$$

где ∂I – величина изменения сигнала, $\partial \Delta$ – изменение фазового сдвига в световой волне, ∂n – изменение показателя преломления, а ∂M – количество новых молекул, образующихся во время химической реакции.

Результаты обнаружения двуокиси серы представлены в виде примера на рисунках 1.2.6 и 1.2.7, заимствованных из работы [16]. Полисилоксановые пленки, модифицированные алкиламинами, использовали в качестве поглощенной пленки. Этот материал был выбран в качестве чувствительной пленки, поскольку диоксид серы образует соединения донорно-акцепторного типа с алкиламинами.

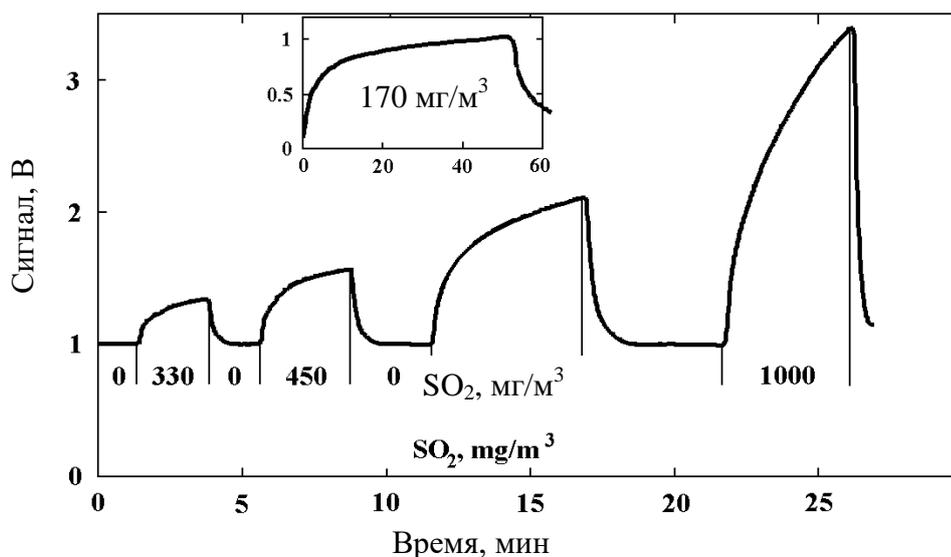


Рисунок 1.2.6 — Временная зависимость сигнала (пропорционального Δn) при периодическом воздействии SO₂ при различных концентрациях. Долговременная экспозиция при концентрации SO₂ 170 мг/м³ показана на вставке

Полное внутреннее отражение происходило на границе раздела поглощающей пленки и газа как наиболее чувствительный режим с поглощающей поверхностью. Резкое увеличение сигнала наблюдается в течение первых нескольких секунд. Затем нарастание сигнала становится медленнее, но полное насыщение не наблюдается даже за 50 минут экспозиции (рисунок 1.2.6, вставка).

При отключении подачи SO₂ сигнал резко падает и возвращается к первоначальному значению менее чем за 1 минуту. Поэтому процесс взаимодействия SO₂ с чувствительной пленкой полностью обратим. Из рисунка 1.2.6 видно, что скорость десорбции значительно превышает скорость адсорбции. Насыщение сигнала, которое характеризуется установлением равновесия адсорбции-десорбции, не достигается. Это означает, что диффузия молекул SO₂ в объем поглощающей пленки происходит наряду с адсорбцией на поверхности.

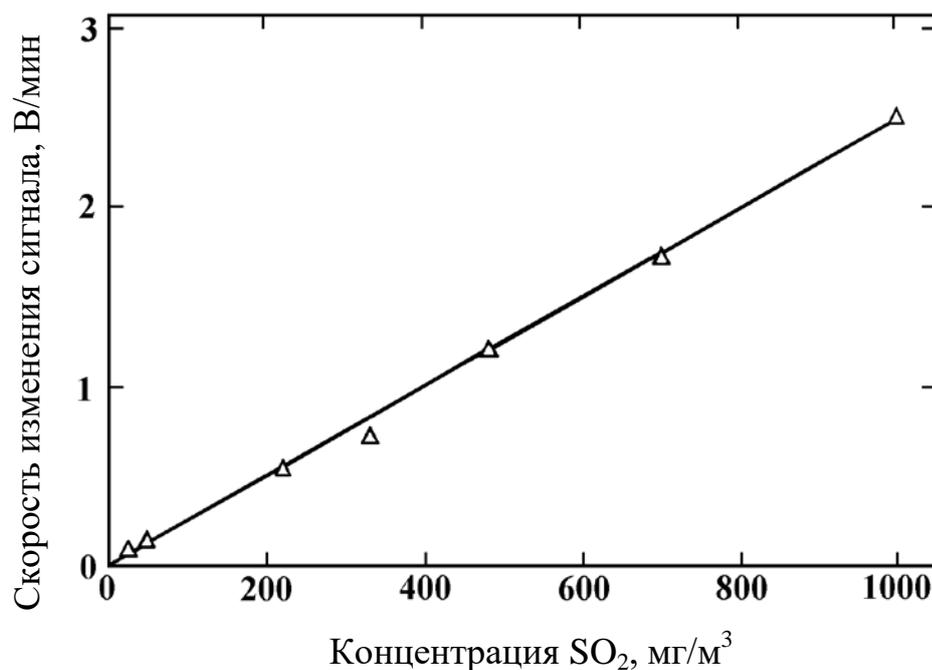


Рисунок 1.2.7 — Зависимость скорости изменения сигнала от концентрации SO₂ в начале воздействия SO₂ (см. рисунок 1.2.6)

При отсутствии насыщения сигнала невозможно определить концентрацию SO₂ по амплитуде сигнала. Поэтому в качестве статической характеристики датчика была выбрана скорость изменения сигнала (В/мин) в начале воздействия SO₂. Зависимость скорости изменения сигнала от концентрации SO₂ довольно линейна до концентрации 1000 мг/м³ (рисунок 1.2.7). Отклонение от линейности не превышает 5%. Предел обнаружения составляет 20-30 мг/м³.

Описанный принцип измерения концентрации SO₂ может быть использован для разработки различных газовых датчиков. Предложенный датчик может использоваться как для исследования процессов поверхностной и объемной диффузии в чувствительной пленке, так и для исследования кинетики химических реакций. Этот датчик имеет высокую чувствительность, малый размер и низкое энергопотребление, соизмеримое с полупроводниковыми сенсорными устройствами и позволяет реализовать бесконтактный метод измерений.

1.2.4 ДНК сенсор

В работе [14] описывается датчик поляризационной рефрактометрии, который предназначен для анализа гибридизации молекул дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Принцип действия датчика основан на измерении рефрактометрических характеристик чувствительного поверхностного слоя (см. раздел 1.2.1). Предлагаемый датчик использован для обнаружения комплементарных комплексов, образованных между олигонуклеотидными пробами, иммобилизованными на поверхности ДНК-чипа, и анализируемыми фрагментами ДНК. Взаимодействие молекул с раствором с рецепторами на поверхности приводит к образованию новых комплексов и, тем самым, к изменению оптических характеристик иммобилизованных пленок, вызванных изменением их структуры и толщины (см. уравнения 1.2.15–17). Регистрация приведенного процесса сорбции ДНК осуществляется путем измерения разности фаз (Δ) между двумя ортогональными компонентами световой волны, возникающими при полном внутреннем отражении на границе пленки и среды (см. уравнения 1.2.10–11).

На рисунках 1.2.8 показана схема ДНК датчика и ДНК-чипа.

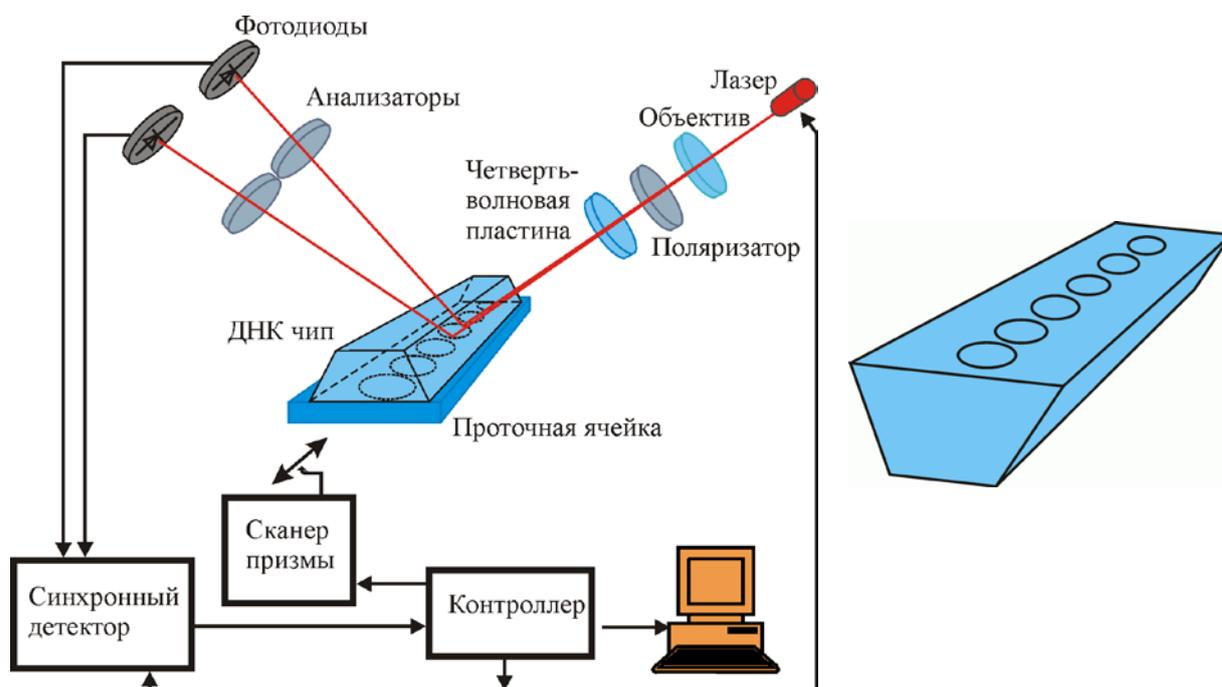


Рисунок 1.2.8 — Оптическая схема ДНК сенсора слева и схема ДНК-чипа справа

Предложенный датчик ДНК снабжён ДНК-чипом, который представляет собой призму длиной 2 см, с базовым углом 53° , изготовленной из стекла с коэффициентом преломления 1.74. Поверхность призмы покрыта пленкой, состоящей из трех слоев $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$ (280-120-190 нм соответственно) или одного слоя TiO_2 (300 нм), полученной с помощью методов электронного луча или магнетронного распыления соответственно. Полученная поверхность использовалась для иммобилизации олигонуклеотидных проб различных последовательностей, соответствующих различным проанализированным ДНК. Схема ДНК-чипа показана на рисунке 1.2.8 справа.

Олигонуклеотиды наносились (иммобилизовались) способом, основанным на использовании полилизинсодержащих олигонуклеотидных производных [17]. Нанесение олигонуклеотидов (от 10 до 15 проб диаметром 0,5 мм) на поверхности призмы проводилась в корпусе датчика, снабженном специальным держателем и устройством сканирования, обеспечивающим высокую точность позиционирования призмы (< 1 мкм), так что пробы олигонуклеотидов помещали в определенные положения вдоль прямой линии (рис.1.2.9).

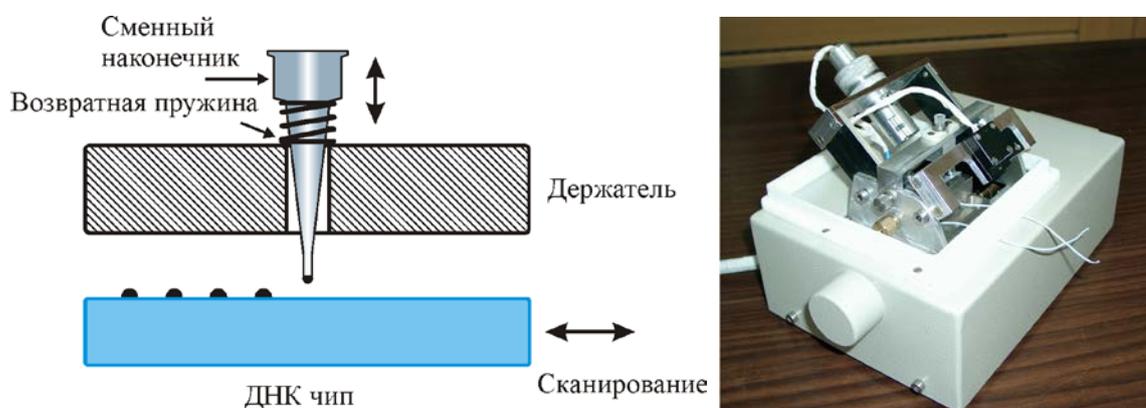


Рисунок 1.2.9 — Схема нанесения проб на поверхности чипа и внешний вид ДНК-сенсора в режиме нанесения проб

Сканирование призмы в режиме измерения проводилось с использованием той же самой схемы сканирования, что и для нанесения проб, что позволяло значительно повысить отношение сигнал/шум и, таким образом, надежность результатов измерения. После того, как пробы были нанесены, призму промывали

раствором с необращёнными олигонуклеотидами и готовили для измерений. Полученный ДНК-чип после сушки помещали в специальный держатель так, чтобы объем проточной ячейки составлял 4 мкл.

Результат иммобилизации можно контролировать, просматривая призму в «сухом состоянии» перед последующими реакциями (рис.1.2.10).

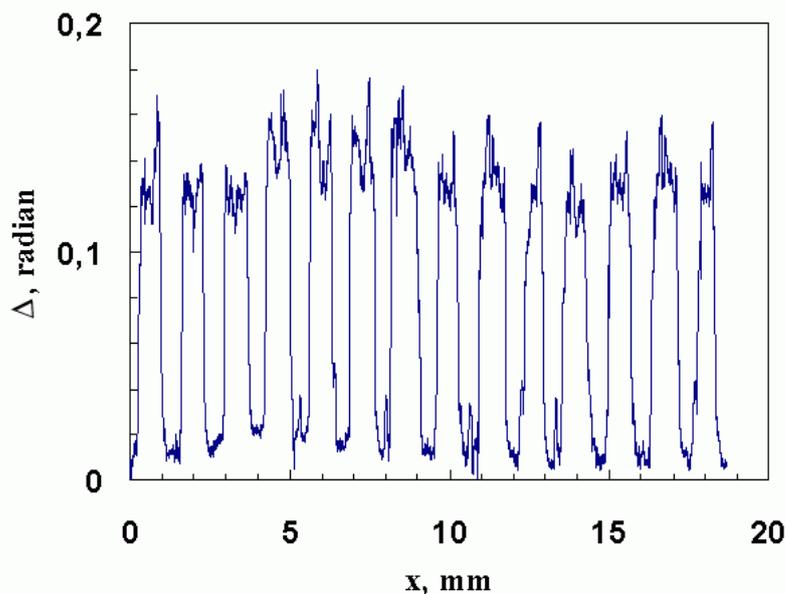


Рисунок 1.2.10 — Скан призмы, содержащей иммобилизованные олигонуклеотидные зонды. x – расстояние вдоль чипа; Δ – фазовый сдвиг отраженного света вдоль чипа. Пики соответствуют сигналу от проб

Призмы с трехслойной пленкой ($\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2\text{-SiO}_2$) использовали в экспериментах по гибридизации модельного биотинилированного анализируемого образца (AS-bio), соответствующего нуклеотидным последовательностям гена E из вируса клещевого энцефалита (TBEV) с комплементарным олигонуклеотидом пробы, иммобилизованной на поверхности призмы. Призму, содержащую иммобилизованные комплементарные и некомплементарные пробы и контрольные пробы, подвергали реакции с AS-bio, а затем реакцией с конъюгатом SA-AP. Затем призму вставляли в датчик, сканировали в буферном растворе, обрабатывали хромогенными субстратами и снова проверяли через 30 минут после начала реакции. Результат разницы между этими двумя сканами представлен на рисунке 1.2.11. Сигналы регистрируются в

положениях 1-4 и 9-10, где расположены дополнительная проба (с-Р) и контрольная проба (+Р) соответственно. Сигналы в положениях 5-8 с некоплементарными пробами (n / с-Р) практически не детектируются.

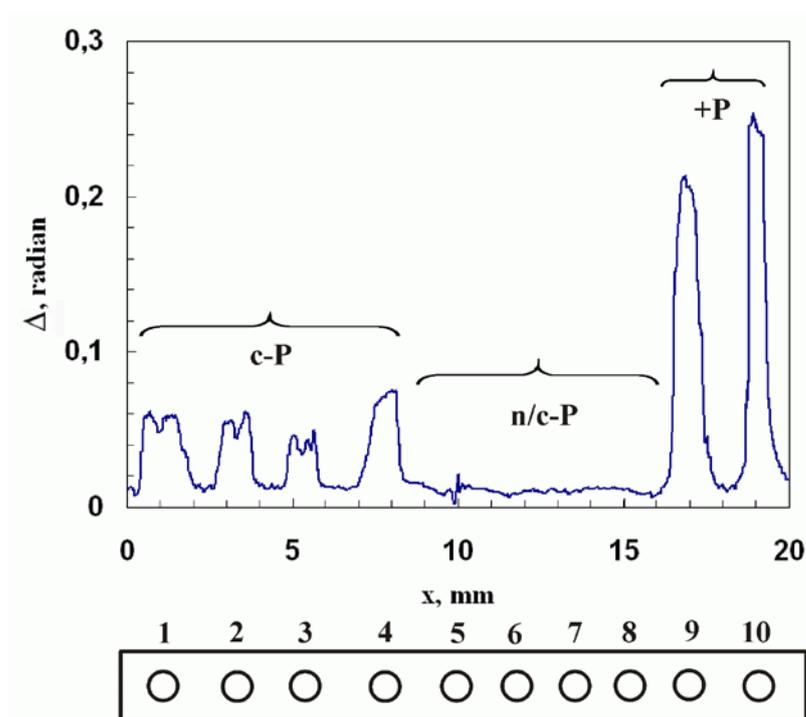


Рисунок 1.2.11 — Результат гибридизации биотинилированного олигонуклеотида (AS-bio) (концентрация 10^{-10} молей), соответствующий нуклеотидным последовательностям гена E из TBEV с комплементарной олигонуклеотидной пробой, иммобилизованной на призме. Сканирование призмы проводилось до и после выявления пятен с хромогенными субстратами. Приведенная картина представляет собой разницу между этими двумя измерениями. Дополнительные (с-Р) и некоплементарные (n / с-Р) и контрольные (+ Р) пробы иммобилизуются на поверхности призмы в положениях 1-4, 5-8 и 9-10 соответственно

Поляризационно-рефрактометрический датчик ДНК, предназначен для регистрации образования комплементарных комплексов ДНК и, таким образом, для выявления определенных последовательностей в структуре ДНК. Таким образом, датчик может применяться для быстрого и массового анализа нуклеиновых кислот, а именно для диагностики различных заболеваний; он также может быть полезен для оптимизации режима лечения. Использование датчиков

ДНК позволяет получить количественные характеристики процессов при гибридизации нуклеиновых кислот. Разработки инструментальных диагностических методов направлены на снижение влияния субъективных факторов при выявлении и лечении различных заболеваний. В более широком смысле датчики ДНК могут использоваться для обнаружения биологических боевых агентов и в судебной медицине для расследования преступлений и т. д.

1.2.5 Измерение акустических сигналов

Системы спектрального анализа акустических сигналов находят все большее применение в акустической диагностике механических устройств, систем распознавания речи и гидролокационных устройств. Существующие анализаторы спектрального состава акустического сигнала обычно используют специализированные цифровые методы, такие как Fast Fourier Transform (FFT) [18, 19, 20], которым предшествует запись сигнала в течение определенного времени (Δt) (рисунок 1.2.12).

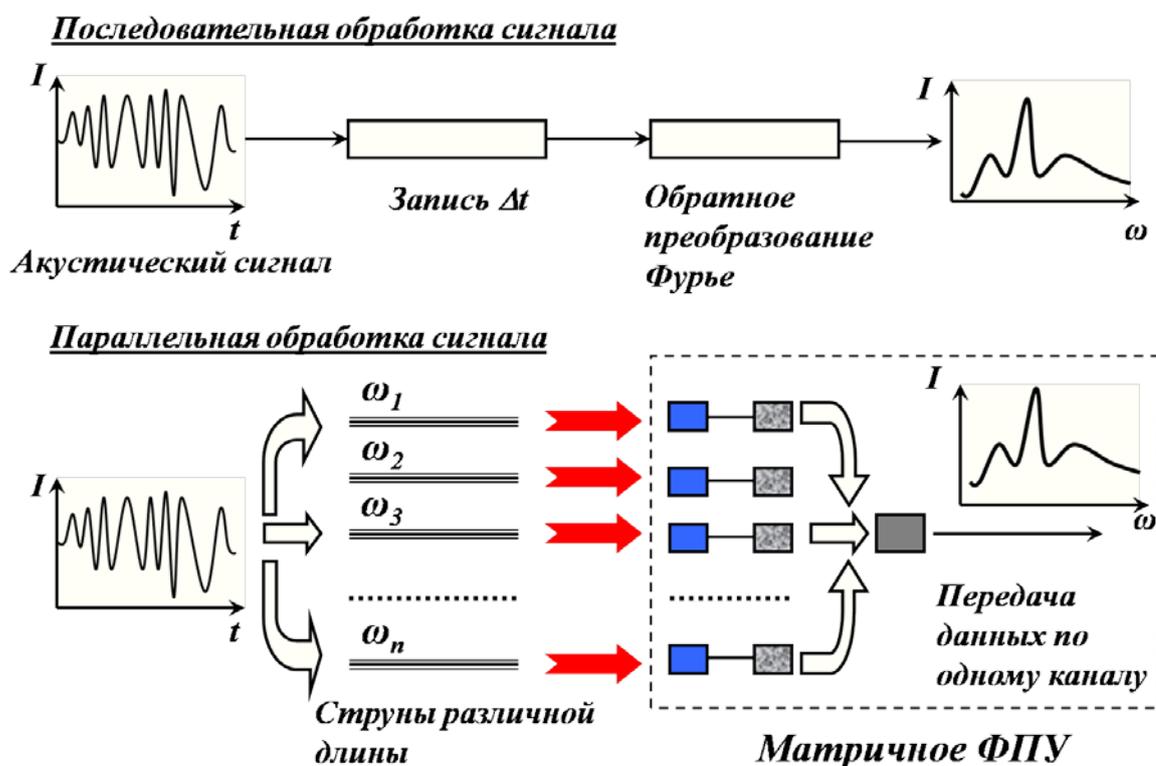


Рисунок 1.2.12 — Схемы последовательной и одновременной обработки сигналов

Спектральное разрешение преобразования Фурье сильно зависит от отношения времени продолжительности сигнала к длине волны анализируемого сигнала. Хорошее спектральное разрешение может быть достигнуто только при достаточно высоких коэффициентах. Поэтому данный метод в основном применяется к анализу установленных колебаний, слабо меняющихся во времени. Данный метод регистрации имеет низкую точность при импульсном акустическом сигнале, когда действие сигнала не имеет регулярного характера во времени и делает некоторые периоды (например, человеческую речь, импульс сонара).

В работе [14] предлагается использовать многоэлементную структуру резонансных датчиков на основе технологии изготовления микроэлектромеханических систем (MEMS) [21, 22, 23] с оптической системой считывания для анализа спектрального состава акустических колебаний. Структура (рис.1.2.13) представляет собой набор микрострун, имеющих различные резонансные частоты колебаний. Колебание каждой из струн возникает, когда анализируемый сигнал содержит частоту, совпадающую с резонансной частотой струны. Таким образом, каждая струна является исходным фильтром, который настраивается на определенной частоте. Чтение амплитуды колебаний струны осуществляется оптическим методом с использованием коммерческой КМОП-камеры. В этой системе считывание сигнала осуществляется хорошо развитой и недорогой мультиплексной системой камеры. Данная система регистрации позволяет определить спектральный состав акустического сигнала в параллельном режиме, который обеспечивает высокую быстроту и точность анализа.

Конструкция позволяет создавать системы с чувствительностью до ультразвукового диапазона, что важно для гидролокации, потому что звук является уникальным способом разведки на дальних расстояниях и связи под водой, определения местоположения и распознавания источника звука [24, 25, 26].

Многострунный резонансный датчик аналогичен принципу его действия с ушной улиткой человека, где происходит пространственное разделение акустического сигнала вдоль базилярной мембраны, а регистрация сигнала осуществляется серией сенсорных волосковых клеток вдоль базилярной мембраны, реагирующей и передающей нейронные импульсы в мозг [27]. Следует обратить внимание, что на сегодняшний день ухо человека (или млекопитающего) является лучшим анализатором акустических колебаний.

Структура механических резонаторов

В качестве акустических резонирующих элементов в структуре анализатора использовались вольфрамовые нити диаметром 15–80 мкм. Струны были намотаны на жесткую рамку из вольфрама с контролируемым натяжением и фиксировались путем прессования с последующей термообработкой. Схемы и внешний вид изготовленных струнных анализаторов круглых, эллиптических и трапециевидных форм показаны на рисунке 1.2.13.

Измерение собственных резонансных струнных частот акустического датчика проводилось за счет возбуждения колебаний электрическим полем с использованием пьезоэлектрического осциллятора. Количество струнных резонаторов на одной сенсорной структуре составляло 60–200, диапазон частот 100–20000 Гц, полуширина резонансной линии составляла 5 Гц, что близко к разрешению человеческого уха.

Опико-электронный метод измерения акустических колебаний

Возбуждения резонансных колебаний струн происходит на частотах, кратных опорной частоте. Например, резонанс струны, наблюдаемой на частоте $\omega_s = 40$ Гц, может возникать при действии частот $\omega_k = k \cdot \omega_s$, где $k = 1, 2, 3 \dots$. Данное условие не позволяет однозначно интерпретировать результаты измерений. Для однозначного определения частоты сигнала была проведена процедура смешивания измеренного сигнала с сигналом фиксированной частоты (частота модуляции) ω_0 . В результате резонанс возникает только на частотах ω_s , ω_0 и $\omega_0 \pm \omega_s$. Частоту ω_0 выбирали так, чтобы только суммарная частота $\omega_0 + \omega_s$

попадала в диапазон чувствительности анализатора (рис.1.2.14). Это позволяет однозначно определять частоту измеряемого акустического сигнала.

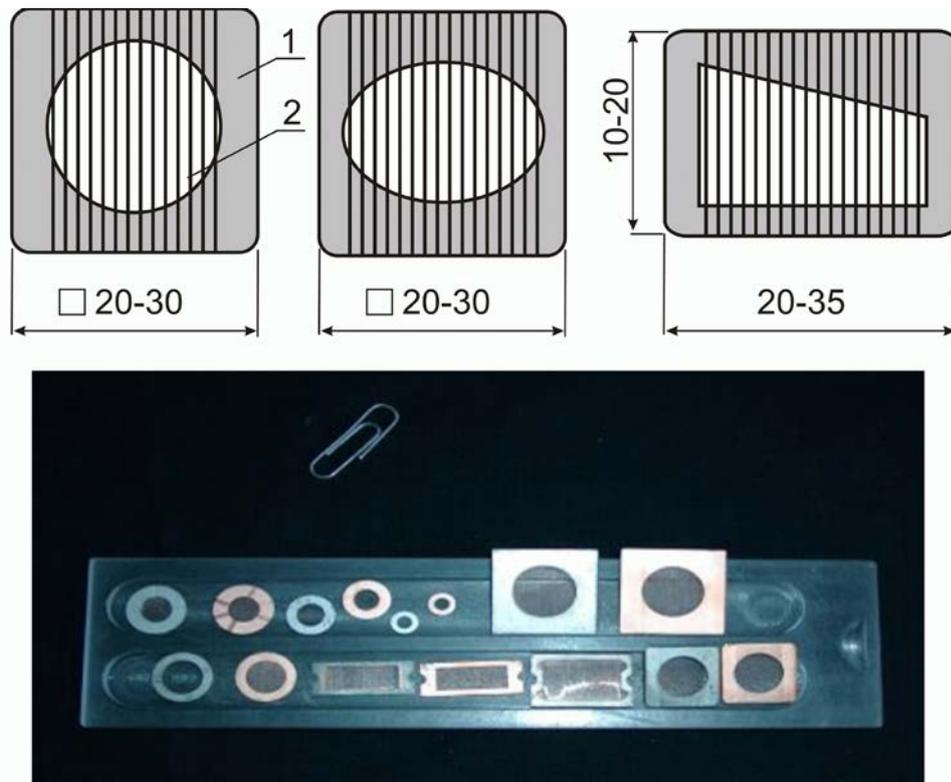


Рисунок 1.2.13 — Схемы резонансных структур акустических детекторов (вверху): 1 – вольфрамовая рама; 2 – струны. Внешний вид изготовленных резонансных струнных структур (внизу)

Схема оптической системы считывания показана на рисунке 1.2.15. Видимый свет от светодиода проходит через поляризатор, делитель и падает на струнную структуру акустического датчика. Свет, отраженный от струн и металлической поверхности, проходит через делитель, объектив и поляризатор и падает на поверхность КМОП-камеры. Объектив передаёт изображение струн на поверхности КМОП-камеры. Оптические оси поляризаторов обращены друг к другу на 90° . Это обеспечивает подавление зеркально отраженного света и уменьшает воздействие рассеянного света. Фрагмент изображения струнной структуры показан на рисунке 1.2.16.

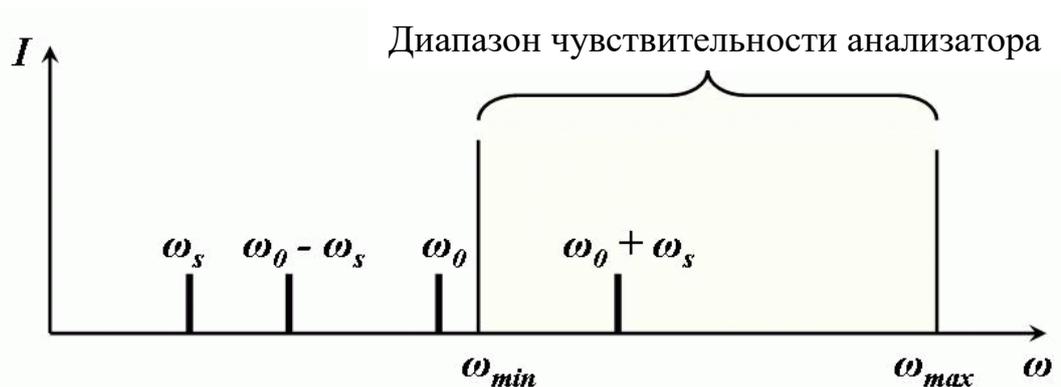


Рисунок 1.2.14 — Схема выбора частоты модуляции. ω_0 — частота модуляции; ω_s — частота сигнала

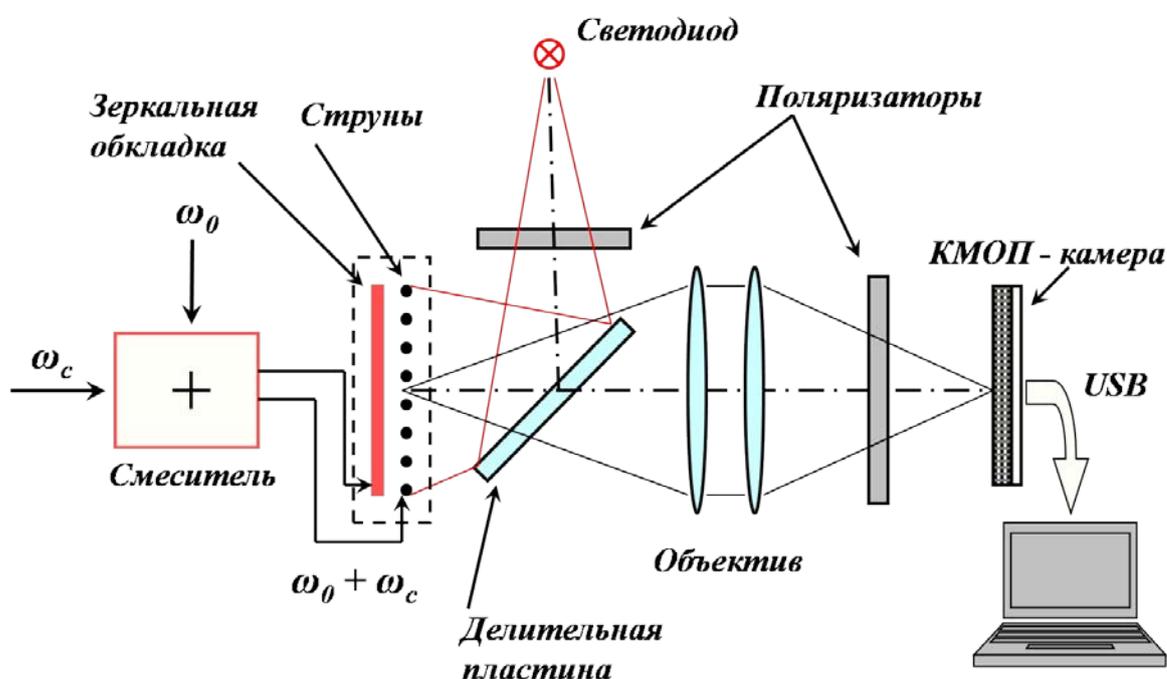


Рисунок 1.2.15 — Схема системы оптического считывания

Основная проблема определения величины амплитуды колебаний струны заключается в том, что интервал времени накопления пикселя матрицы составляет не менее 40 мс (25 Гц), тогда как период колебаний струны лежит в диапазоне 10–0,05 мс (0,1–20 кГц). Следовательно, невозможно напрямую определить амплитуду колебаний посредством прямого преобразования оптического сигнала в электрический сигнал с использованием пикселя КМОП-матрицы. Поэтому в работе была разработана математическая модель, которая описывает величину

электрического сигнала пикселя матрицы при переменном оптическом сигнале с периодом, намного меньшим интервала накопления.

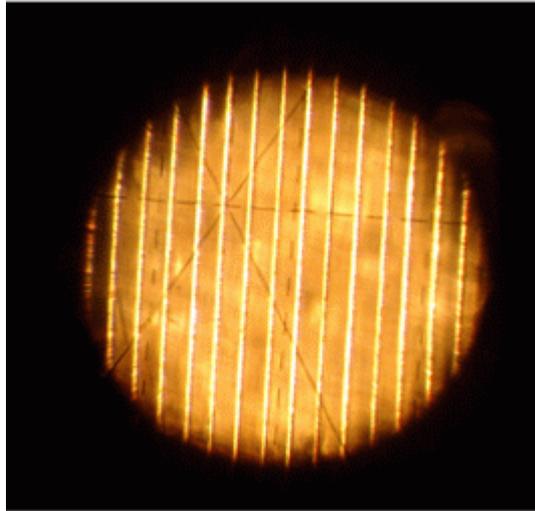


Рисунок 1.2.16 — Изображение струн в поляризованном свете, полученных с помощью КМОП-камеры

Распределение интенсивности света, отраженного от невозбужденной струны и проецируемого в плоскости КМОП-матрицы, можно описать функцией гауссовского типа (рис.1.2.17):

$$E_1 = E_0 e^{-(mx)^2}, \quad (1.2.20)$$

где x – координата, перпендикулярная строковой линии (рис.1.2.17), а m – постоянная.

Интенсивность света, создаваемая вибрирующей струной, описывается уравнением:

$$E_2(x, t) = E_0 \exp\{-m(x + \Delta x \sin \omega t)^2\}, \quad (1.2.21)$$

где Δx – амплитуда колебания струны (рис.1.2.17), ω – частота колебаний, а $x = 0$ – точка равновесия струны при отсутствии колебаний. Величина сигнала от матричного элемента является результатом интегрирования уравнения (1.2.21) на период, равный интервалу времени накопления (40 мс) при $x = 0$:

$$I_2 = E_0 \int \exp\{-m\Delta x \sin \omega t\} dt. \quad (1.2.22)$$

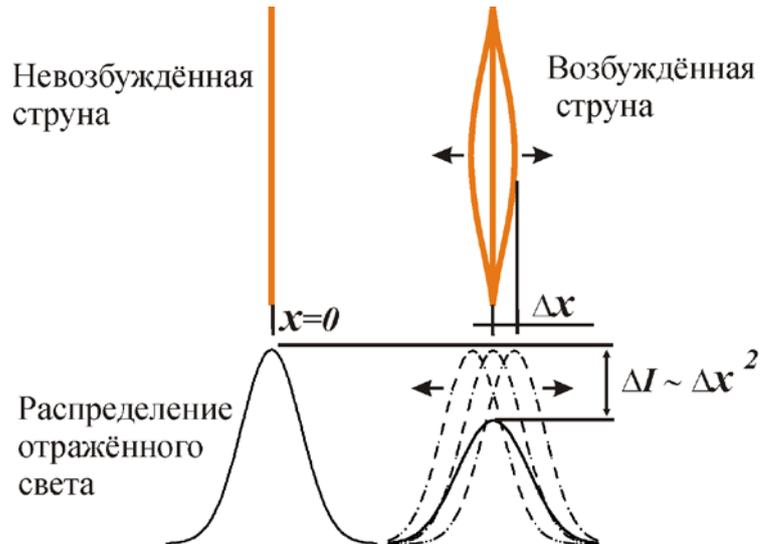


Рисунок 1.2.17 — Модель распределения интенсивности света, отраженного от невозбужденных (левых) и возбужденных (правых) струн. Сплошные линии показывают интенсивность света, усредненную по интервалу получения матричного элемента

Решение данного уравнения возможно с помощью разложения функции $\exp\{-z^2\}$ в ряд:

$$\exp\{-z^2\} = 1 - \frac{z^2}{1!} + \frac{z^4}{2!} \quad (1.2.23)$$

и рассмотрением только первых двух членов. Уравнение (1.2.22) принимает вид:

$$I_2 = E_0 \int_{t_1}^{t_2} (1 - m^2 \Delta x^2 \sin^2 \omega t) dt, \quad (1.2.24)$$

где $\Delta t = t_2 - t_1$ — интервал времени накопления матричного элемента. Результат интегрирования дает величину сигнала от матричного элемента, измеренного в точке $x = 0$:

$$I_2 = E_0 \left(1 - \frac{1}{2} m^2 \Delta x^2\right) \Delta t. \quad (1.2.25)$$

Разность сигналов между невозбужденной и возбужденной струной

$$\Delta I = I_1 - I_2 \approx \Delta x^2. \quad (1.2.26)$$

Здесь Δx^2 пропорциональна колебательной энергии, которая, в свою очередь, пропорциональна энергии анализируемого акустического сигнала на частоте,

равной резонансной струне. Таким образом, становится возможным однозначно связать величину оптического сигнала с амплитудой колебаний струны.

Суммируя, мы можем записать последовательность преобразований из амплитуды сигнала в измеренную физическую величину:

$$\partial I \propto \partial x^2 \propto \partial Q(\omega) \quad (1.2.27)$$

где ∂I – изменение измеряемого сигнала, ∂x – амплитуда колебаний струны, $\partial Q(\omega)$ – интенсивность акустического сигнала на частоте ω .

Диаграмма интенсивности света, отраженного от струнной структуры, показана на рисунке 1.2.18 (вверху). Число элементов в строке матрицы показано по координате x , а интенсивность сигнала в произвольных единицах показана на y -координате. Узкие пики соответствуют струнам. Широкие пики соответствуют неравномерности интенсивности света на площади структуры. Диаграмма разности двух кадров, полученных при времени накопления 40 мс, показана на рисунке 1.2.18 ниже и отражает уровень шума.

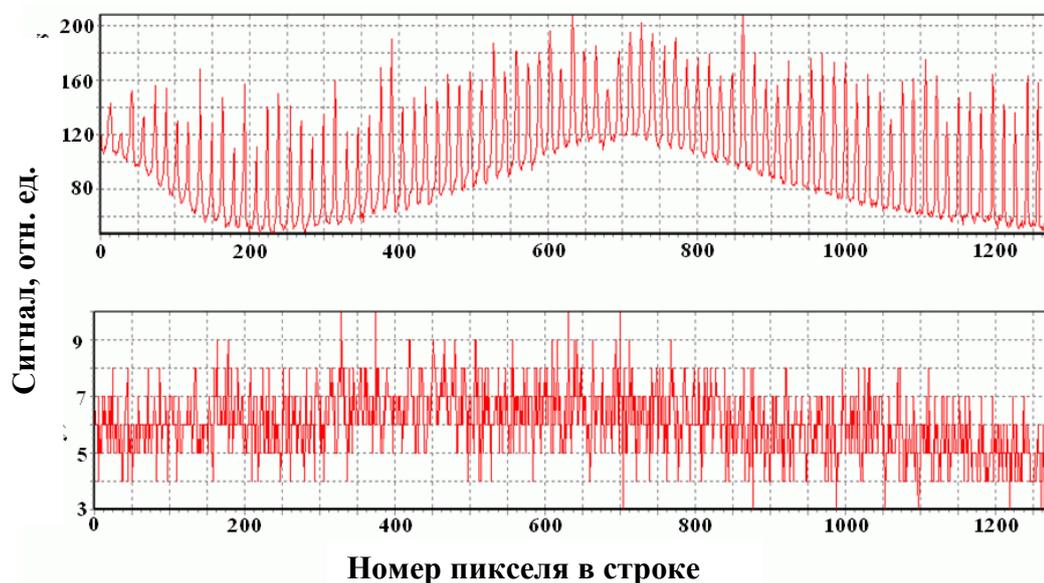


Рисунок 1.2.18 — Диаграмма интенсивности света от струнной структуры (вверху) и диаграмма разности двух последовательно полученных кадров, показывающих уровень шума (внизу)

Диаграмма разности кадров между возбужденными и невозбужденными состояниями резонансного датчика показана на рисунке 1.2.19. Сигналы с

частотой $\omega_s = 119$ Гц (измеренный сигнал) и частотой $\omega_0 = 4200$ Гц (частота модуляции) подаются на входы микшера. Из рисунка видно, что резонансы возникали только на частотах, соответствующих ω_0 и $\omega_0 + \omega_s$. Диаграмма спектра сигнала со случайным набором частот показана на рисунке 1.2.20.



Рисунок 1.2.19 — Диаграмма спектра сигнала с частотой сигнала $\omega_s = 119$ Гц и частотой модуляции $\omega_0 = 4200$ Гц



Рисунок 1.2.20 — Диаграмма спектра случайных сигналов

Данный метод позволяют создавать малогабаритные быстродействующие спектральные анализаторы акустических колебаний для систем распознавания речи и гидролокаторов.

1.2.6 Измерение инфракрасного излучения оптически-поляризационными методами

В работах [28 29, 30] была предложена конструкция и методика изготовления матричной структуры ячеек Голея (оптико-акустических преобразователей) с оптической системы считывания сигнала с матрицы. В качестве поглотителя ИК-излучения были предложены слои диоксида кремния (SiO_2). Мембрана содержала тонкие слои полиимидной плёнки и диоксида кремния общей толщиной 150 нм. Очевидно, что чувствительность детектора на основе ячеек Голея, помимо коэффициента пропускания входного окна, определяется: коэффициентом поглощения слоя SiO_2 , жесткостью мембраны и чувствительностью оптической системы считывания к деформации мембран ячеек МОАП. Исследования, проведенные автором с коллегами в работе [31] показали, что спектры поглощения ИК излучения в плёнках диоксида кремния, полученного методом электронно-лучевого испарения, отличаются от спектров поглощения объёмного плавленого кварца и зависят от толщины плёнки. Это связано, по-видимому, с тем, что структура диоксида кремния отличается от структуры объёмного плавленого кварца на начальных стадиях роста плёнки, и эта структура модифицируется по мере роста плёнки. Зависимость величины суммарного поглощения во всём рабочем диапазоне ИК детектора ($\lambda = 7\text{--}14$ мкм) от толщины плёнки диоксида кремния оказалась близка к линейной в диапазоне до ~ 2 мкм. Данные экспериментальные результаты существенно отличаются от рассчитанных на основе коэффициента поглощения на длине волны максимального поглощения диоксида кремния. При определении оптимальной толщины поглотителя на основе плёнки диоксида кремния более корректно использовать спектр поглощения во всём рабочем диапазоне ИК детектора. Кроме того, форма спектра поглощения будет зависеть от используемой технологии нанесения плёнки диоксида кремния (электронно-лучевое, термическое или магнетронное испарение, окисление силана кислородом, плазмохимический метод, реактивное катодное распыление, пиролиз тетраэтоксисилана и др.).

Поэтому в каждом случае необходимо экспериментально определить свою оптимальную толщину диоксида кремния. Данный вывод касается не только плёнок диоксида кремния, но и нитрида и оксинитрида кремния, также используемых в качестве поглотителей в детекторах теплового излучения.

В работе [32] подробно описан принцип работы оптического метода регистрации деформации мембраны, использованный в работах [28, 29, 30], который основан на интерференции двух поляризованных световых волн, распространяющиеся параллельно, но пространственно разнесены на половину диаметра ячейки Голея. После отражения этих лучей от мембранной поверхности ячеек Голея на поверхности ТВ-матрицы формируется исходной интерференционное изображение, которое запоминается как «темновой кадр». При поглощении ИК-излучения, нагрева и расширения газа в ячейке происходит сдвиг мембраны относительно исходного положения, что приводит к изменению интерференционной картины. Программное обеспечение ТВ-камеры выводит на монитор дифференциальное изображение, относительно исходного. В результате пространственное распределение интенсивности разностного сигнала отражает пространственное распределение интенсивности ИК-излучения. Специально проведённые автором исследования показали, что данная оптическая система считывания имеет чувствительность к перемещению мембран на уровне 1 нм [32].

1.3 Детекторы терагерцового излучения

Обзоры детекторов терагерцового излучения хорошо представлены в работах [33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42]. Электромагнитное излучение терагерцового диапазона частот (0.3–3 ТГц) долгое время интенсивно не исследовалось, так как естественных интенсивных источников этого излучения на поверхности Земли не существует, а его доля в тепловом излучении ничтожно мала. Однако в последнее время эта область электромагнитного излучения стала интенсивно осваиваться благодаря развитию технологий генерации терагерцового излучения. К терагерцовому диапазону принадлежат частоты колебаний большого количества атомов и молекул, включая органические. Поэтому ТГц-спектроскопия позволяет

идентифицировать данные молекулы и соединения применительно к биологии и медицине, к охране окружающей среды, при анализе газовых смесей, участвующих в технологических процессах, идентификация скрытых взрывчатых веществ, химического оружия [43, 44, 45].

Терагерцовый (ТГц) диапазон электромагнитного излучения приходится на стык оптического и миллиметрового диапазонов. При этом, с одной стороны, как оптические технологии, так и СВЧ технологии исчерпывают свои возможности и преимущества в ТГц-диапазоне. С другой стороны, высокая проникающая способность терагерцового излучения, в сравнении с инфракрасным излучением, и отсутствие ионизирующего воздействия, в отличие от рентгеновских лучей, делает терагерцовые волны перспективным для интроскопии объектов, включая неинвазивную медицинскую диагностику (выявление новообразований и патологий под кожей, стоматология, хирургия и др.) и системы безопасности (обнаружение скрытого под одеждой оружия, взрывчатки и др.). При этом малая величина длины волны терагерцового излучения ($\lambda=100-1000$ мкм) в сравнении с СВЧ-диапазоном позволяет обеспечить значительно более высокое пространственное разрешение изображения.

Одна из центральных проблем создания систем терагерцового диапазона является визуализация пучков данного излучения. Наилучшим способом проблема визуализации электромагнитного излучения решается путем использования матричных приёмников.

Так как энергия фотона терагерцового излучения мала (0.4–4 мэВ), то матричные фотоприемники, основанные на внутреннем фотоэффекте, требуют глубокого охлаждения. Ведутся разработки ТГц-детекторов на основе полупроводниковых A_2B_6 структур $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ [46, 47], $HgCdTe$ [48], а так же низкоразмерных структур $Ge-Si$ [49]. На сегодня такие системы являются весьма дорогими единичными устройствами.

Охлаждаемые и неохлаждаемые детекторы на основе барьеров Шоттки (Shottky Barrier Detector, SBD) используются как для прямого детектирования излучения, так и в качестве нелинейных элементов в гетеродинных смесителях

(Рис. 1.3.1). Такие детекторы обладают высокой чувствительностью в терагерцовом и субтерагерцовом диапазоне, но их сложно объединить в матричную структуру из-за высокой мощности локально осциллятора и гетеродина [50, 51, 52].

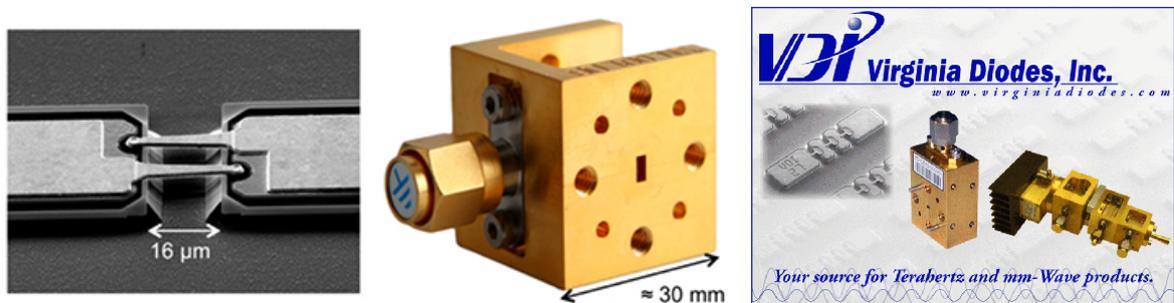


Рисунок 1.3.1 – Детекторы на основе диодов Шоттки фирмы Virginia Diodes, Inc.

Наиболее чувствительными детекторами, обеспечивающими высокое спектральное разрешение, являются гетеродинные детекторы на основе структур сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник (superconductor-insulator-superconductor, SIS) [53, 54] (Рис. 1.3.2).



Рисунок 1.3.2 – Детекторы на основе SIS- и НЕВ-смесителей

Данные детекторы работают при субгелиевых температурах и обеспечивают чувствительность, близкую к квантовому пределу, что даёт возможность работать в режиме счёта фотонов. Однако крупноформатных матричных детекторов ещё не создано. Для высокочастотного ТГц-диапазона с частотой более 1 ТГц хорошие характеристики имеют НЕВ-смесители (hot electron bolometer, болометры на горячих электронах) на основе сверхпроводящих слоёв NbN [55, 56, 57], которые являются перспективными для создания матричных структур большого формата.

Благодаря малому времени электрон-фононной релаксации такие детекторы перспективны для создания широкополосных детекторов.

Современные неохлаждаемые болометрические и пирозлектрические матричные приемники создаются в основном для регистрации ИК-излучения ($\lambda=8-12$ мкм) и обладают весьма низкой чувствительностью в терагерцовой области спектра [58, 59] (Рис.1.3.3).



Рисунок 1.3.3 – Матричные приемники: пирозлектрические фирмы Spiricon (США) и болометрические фирмы NEC Corporation (Япония)

Малая площадь чувствительного элемента (50×50 мкм²) по сравнению с длиной волны терагерцового излучения ($\lambda=100-1000$ мкм) и малый размер матрицы, не превышающий 20 мм, (что явно недостаточно для получения качественного изображения излучения с длиной волны порядка 1 мм) делают такие приемники практически неприменимыми для субтерагерцового излучения.

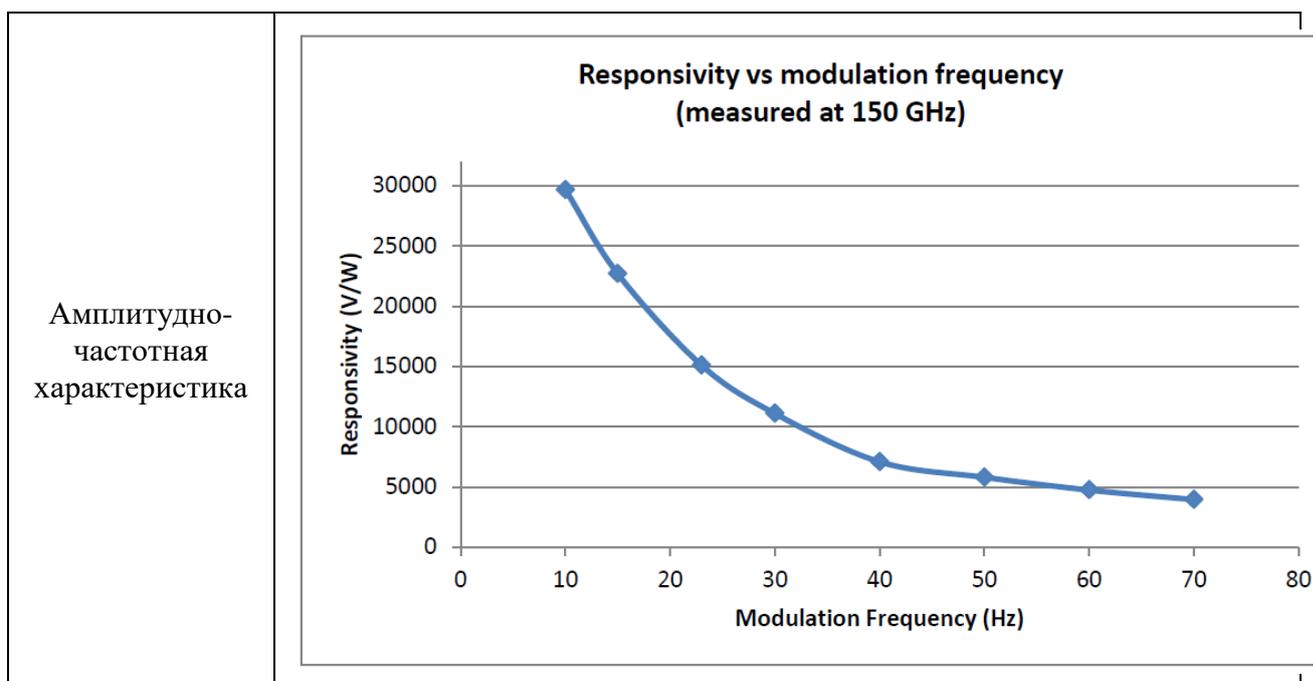
Одним из наиболее эффективных одиночных тепловых детекторов, используемых для регистрации терагерцового излучения, является оптико-акустический или пневматический приёмник (ОАП) [60, 61]. Параметры современных оптико-акустических приёмников ТГц-излучения (Golay Cell) приведены в таблице 1.3.1.

Однако на сегодняшний день не создано матричных приемников такого типа для получения изображения в терагерцовой области излучения.

Таблица 1.3.1 — Параметры Golay Cell, производства Microtech Instruments, Inc. [62]

Параметр	Значение
Чувствительность, Вт/Гц ^{1/2}	~ 10 ⁻⁸
Максимальная частота модуляции	70 Гц
Динамический диапазон	0.1 – 500 мкВт
Время отклика	25 мс
Максимальное выходное напряжение	1.5 В
Диаметр входного окна	6 мм
Размеры	135×115×120 мм

Спектральная характеристика отклика, В/Вт	<p style="text-align: center;">Responsivity vs THz frequency (measured at 15 Hz modulation)</p>
---	--



Получение терагерцового изображения возможно с помощью термофлуоресцентных экранов, выпускаемых американской компанией Macken Instruments [62] (Рис. 1.3.4).



Рисунок 1.3.4 – Термофлуоресцентный экран фирмы Macken Instruments (США)

Термофлуоресцентный экран, разработанный для визуализации ИК-излучения CO_2 лазера, представляет собой пластину из анодированного алюминия, на которую нанесен теплоизолирующий слой и слой термочувствительного фосфора. При облучении светом ультрафиолетовой лампы с длиной волны 360 нм фосфор флуоресцирует. Интенсивность флуоресценции уменьшается при увеличении температуры фосфора. Поглощение ИК-излучения фосфором приводит к его нагреву и гашению интенсивности флуоресценции.

Таким образом, пространственная неоднородность ИК-излучения приводит к пространственной неоднородности интенсивности флуоресценции.

Однако область применения таких экранов в терагерцовой области излучения резко ограничена ввиду следующих недостатков: а) низкой чувствительности к излучению терагерцового диапазона; б) малого динамического диапазона (< 20) и низкого временного разрешения (> 1 сек); в) необходимость равномерной подсветки рабочего поля экрана ультрафиолетовым излучением от внешнего источника; г) подсветка экрана ультрафиолетовым излучением должна осуществляться со стороны падения терагерцового излучения, что создает дополнительные трудности при регистрации терагерцового излучения в геометрии на просвет.

Так же как и в случае матричных ИК-детекторов, существует необходимость в достаточно простых, малогабаритных и недорогих матричных детекторах ТГц-диапазона, работающих при комнатной температуре и в режиме реального времени.

1.4 Методы тензометрии

Экспериментальная механика занимается разработкой методов экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния различных конструкций под действием механических, тепловых и других нагрузок [63]. Методы экспериментальной механики основаны на физических эффектах, возникающих в материале под действием нагрузки. К ним относятся: тензорезистивный эффект, пьезооптический эффект, пьезоэлектрический эффект, магнитоупругий эффект, а так же эффекты, связанные с изменением индуктивности, ёмкости, резонанса и др. [64, 65, 66, 67, 68, 69, 70]. Наряду с этими традиционными методами появились методы муаровых полос, голографической интерферометрии, теневых фигур – каустик, термография, лазерная спекл-интерферометрия [63]. Развитие вычислительной техники и методов моделирования конструкций, такие как SolidWorks, AutoCAD Inventor, T-Flex CAD и другие, дало начало экспериментально-расчётным методам

исследования с помощью комбинации численных методов расчёта с экспериментальными методами. Численные методы позволяют исследовать характеристики конструкций ещё до их изготовления и, тем самым, оптимизировать их на ранних стадиях проектирования.

Идеальными для использования во многих приложениях датчики должны обладать такими свойствами, как малый вес, небольшой размер, малая потребляемая мощность, устойчивость к воздействиям внешней среды и электромагнитная помехозащищённость, стабильность параметров при эксплуатации и со временем, низкая стоимость. С развитием технологий необходимость в датчиках с такими характеристиками резко возрастает в таких областях, как аэрокосмическая и оборонная промышленность, производство материалов и готовых изделий, строительство, горная промышленность.

1.4.1 Тензорезисторы

В настоящее время наиболее широко используемыми устройствами для измерения механических напряжений (деформации, силы) являются датчики, основанные на тензорезистивном эффекте [71, 72, 73, 74]. Главные их достоинства — проста конструкции и способа их использования, относительно низкая стоимость. Такие датчики наилучшим образом удовлетворяют критерию стоимость-эффективность.

Тензорезистивный эффект заключается в изменении электрического сопротивления проводника при его деформации. Величина эффекта зависит от материала проводника. Величина изменения сопротивления мала по сравнению с исходным сопротивлением проводника, однако может быть измерена достаточно точно с помощью моста Уитстона [63].

Сопротивление R проводника длиной L , площадью поперечного сечения S с удельным сопротивлением ρ определяется выражением

$$R = \rho \frac{L}{S}. \quad (1.4.1)$$

При приложении силы вдоль проводника его длина увеличивается ($L + \delta L$), а поперечное сечение уменьшается ($S - \delta S$) (рис. 1.4.1).

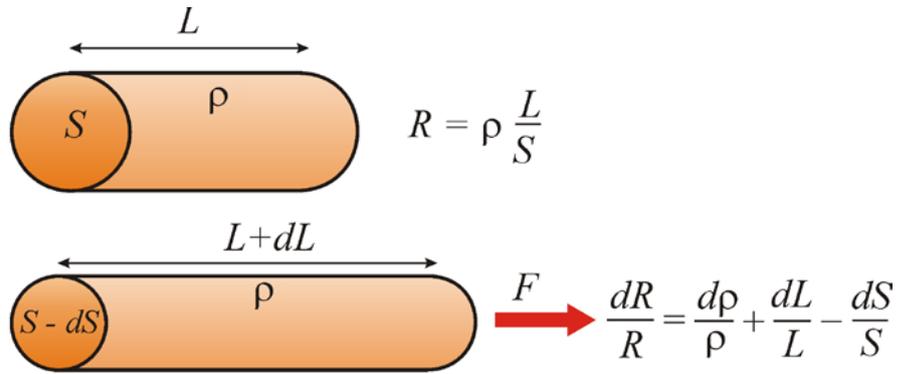


Рисунок 1.4.1 — Тензорезистивный эффект

Относительное изменение сопротивления $\delta R/R$ определяется соотношением

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta \rho}{\rho} + \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta S}{S}. \quad (1.4.2)$$

В случае упругой деформации $\delta S/S$ определяется формулой:

$$\frac{\delta S}{S} = -2\nu \frac{\delta L}{L} + \nu^2 \left(\frac{\delta L}{L} \right), \quad (1.4.3)$$

где ν – коэффициент Пуассона, при упругой деформации металлов обычно равный 0.3 [63].

Коэффициент тензочувствительности S_A (в зарубежной литературе gauge factor (GF)) связывает величину относительной деформации с величиной относительного изменения измеряемого параметра (сигнала) и определяется выражением

$$\frac{\delta U}{U} = \frac{\delta R}{R} = S_A \frac{\delta L}{L}, \quad (1.4.4)$$

где U – опорное напряжение питания и δU – величина изменения измеряемого напряжения (рис.1.4.2). Для точного измерения изменения величины $\delta U/U$ датчик включают в мост Уитстона (рис.1.5.3).

Постановка (1.4.3) в (1.4.2), а затем в (1.4.4) даёт выражение для коэффициента тензочувствительности тензорезисторных датчиков:

$$S_A = \frac{\delta R/R}{\delta L/L} = \frac{\delta \rho/\rho}{\delta L/L} + 1 + 2\nu - \nu^2 \left(\frac{\delta L}{L} \right). \quad (1.4.5)$$

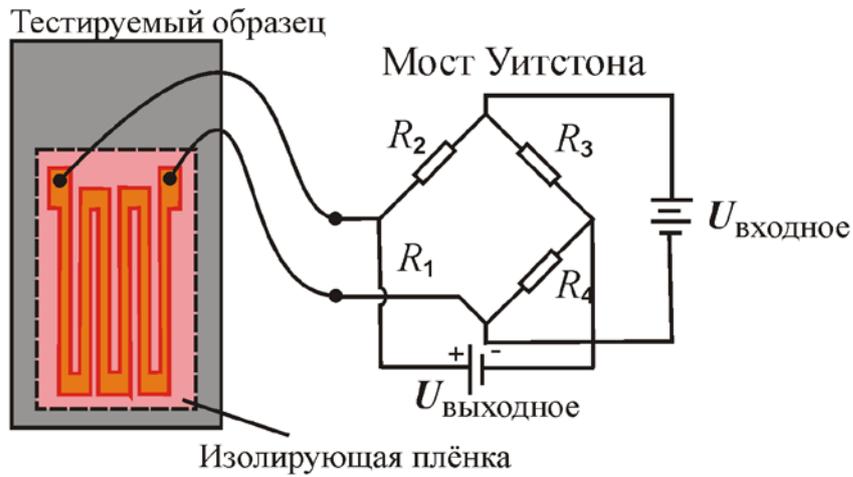


Рисунок 1.4.2 — Тензорезисторный датчик деформации, включенный в мост Уитстона

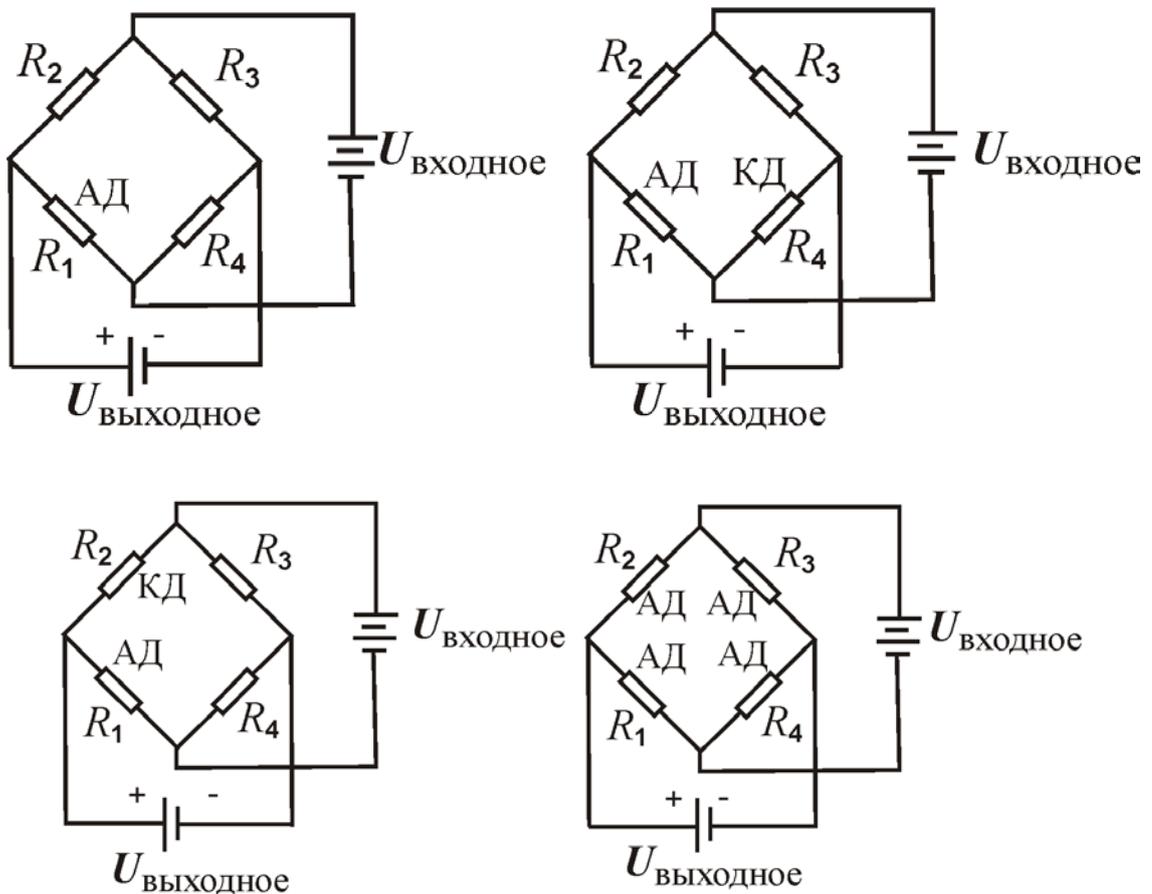


Рисунок 1.4.3 — Способы включения датчиков деформации, в мост Уитстона, АД – активный датчик, КД – контрольный датчик

Первый член выражения (1.4.5) обусловлен зависимостью удельного сопротивления проводника от величины возникающих в нём напряжений при деформации $\delta L/L$. Последние члены выражения (1.4.5) обусловлены изменением геометрии проводника: увеличение длины $L + \delta L$ при соответствующем уменьшении поперечного сечения $S - \delta S$, которые связаны между собой через коэффициент Пуассона ν .

При пластической деформации выражение (1.4.1) лучше выразить через объём проводника $V = SL$:

$$R = \rho \frac{L^2}{V}. \quad (1.4.6)$$

Дифференцирование выражения (1.4.6) и деление на R даёт

$$\frac{\delta R}{R} = \frac{\delta \rho}{\rho} + 2 \frac{\delta L}{L} - \frac{\delta V}{V}. \quad (1.4.7)$$

При пластической деформации напряжения в материале не возрастают, поэтому $\delta \rho \rightarrow 0$, а $\delta V = 0$, подставляем в (1.4.7) и получаем

$$\frac{\delta R}{R} = 2 \frac{\delta L}{L}. \quad (1.4.8)$$

При малых деформациях коэффициент тензочувствительности равен $S_A = 2$, а при больших деформациях необходимо учитывать член второго порядка малости, что даёт

$$S_A = 2 + \varepsilon = 2 + \frac{\delta L}{L} \quad (1.4.9)$$

Перечень сплавов, используемых для изготовления тензорезисторов, указаны в таблице 1.4.1 вместе со значениями коэффициентов тензочувствительности S_A . Как видно из таблицы типичные значения коэффициента тензочувствительности лежат в диапазоне $S_A = 2 - 4$ [63]. Если обратиться к выражению (1.4.5), то можно заметить, что член $1+2\nu$, равный 1,6, не полностью определяет коэффициент тензочувствительности, что связано с изменением удельного сопротивления материала $\delta \rho/\rho$ с изменением величины напряжений в проводнике.

Таблица 1.4.1 — Состав сплавов, используемых для изготовления тензодатчиков, и их коэффициент тензочувствительности [63]

Материал	Состав	S_A
Константан	45% Ni, 55 Cu%	2.1
Карма	74% Ni, 20% Cr, 3% Al, 3% Fe	2.0
Изоэластик	36% Ni, 8% Cr, 0.5% Mo, 55,5% Fe	3.6
Нихром V	80% Ni, 20% Cr	2.1
Платиновольфрам	92% Pt, 8% W	4.0
Армюр	70% Fe, 20% Cr, 10% Al	2.0

Основу современных датчиков деформации составляют наклеиваемые тензорезисторы. Конструкция таких датчиков деформации представляет собой тонкую металлическую плёнку, нанесённую на полимерную плёнку, которая служит несущей основой. После приклеивания на объект контроля полимерная плёнка функционирует как изолятор. В качестве несущей основы применяются различные материалы, в том числе акриловые, полиимидные, эпоксидные. Чаще всего применяются полиимидные плёнки, отличающиеся прочностью и совместимостью с различными типами клеев, используемых для крепления структуры на объекте.

Первый член выражения (1.4.5) обусловлен зависимостью удельного сопротивления проводника от величины возникающих в нём напряжений при деформации $\delta L/L$. Последние члены выражения (1.4.5) обусловлены изменением геометрии проводника: увеличение длины $L + \delta L$ при соответствующем уменьшении поперечного сечения $S - \delta S$, которые связаны между собой через коэффициент Пуассона ν .

Первый член выражения (1.4.5) обусловлен зависимостью удельного сопротивления проводника от величины возникающих в нём напряжений при деформации $\delta L/L$. Последние члены выражения (1.4.5) обусловлены изменением геометрии проводника: увеличение длины $L + \delta L$ при соответствующем

уменьшении поперечного сечения $S - \delta S$, которые связаны между собой через коэффициент Пуассона ν .

На сегодняшний день тензорезисторные датчики составляют основу подавляющего числа систем контроля деформаций благодаря относительной простоте конструкции и использования, а главное – низкой стоимости (рис.1.4.4).

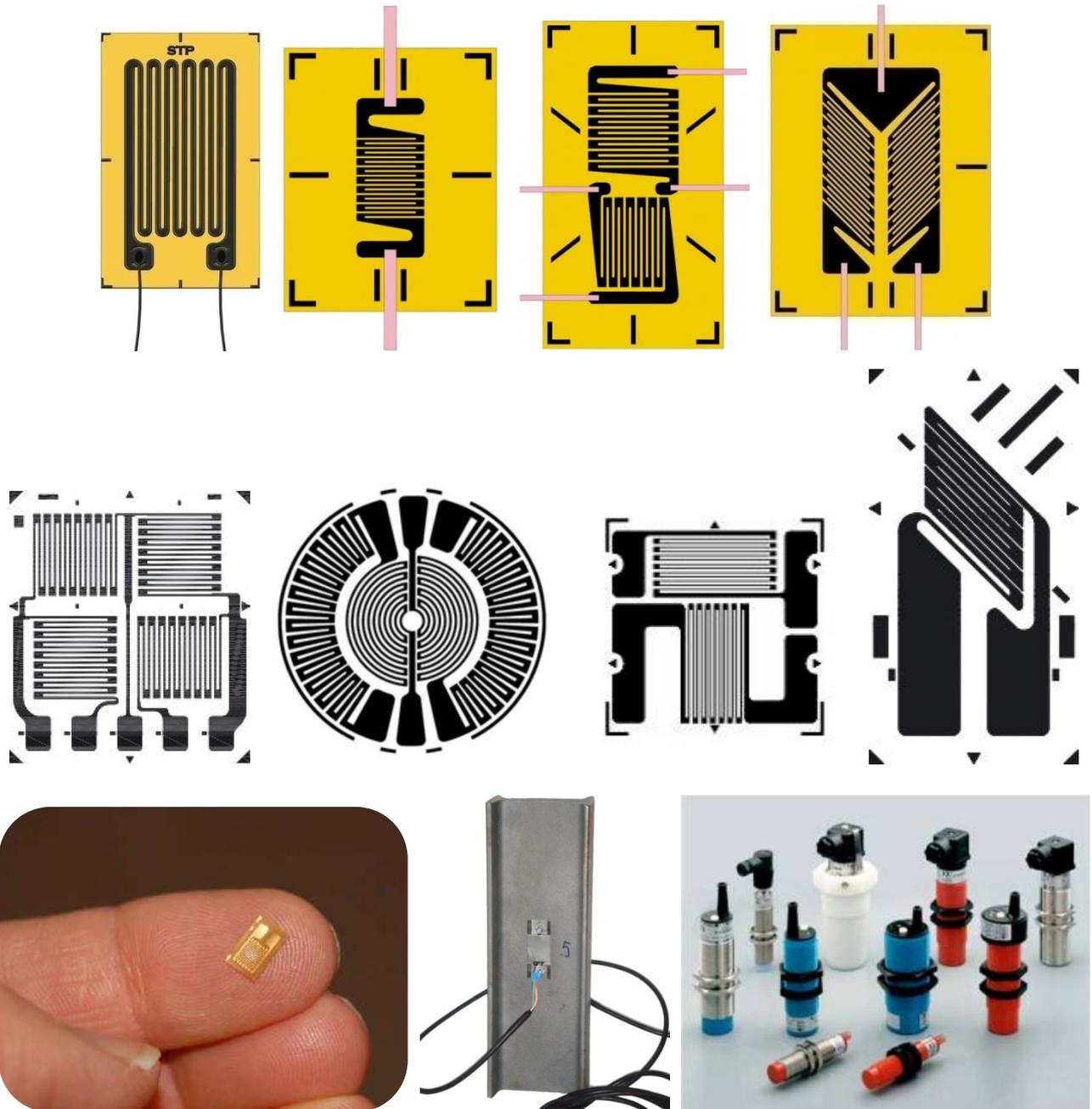




Рисунок 1.4.4 — Примеры тензорезисторных датчиков и способов их крепления

Производство тензорезисторных датчиков представляет сложившуюся индустрию, где технологические процессы надёжно контролируются [75, 76, 77, 78, 79].

Полупроводниковые тензорезисторы применяют значительно реже, чем металлические, так как они сильнее подвержены внешним воздействиям и сложнее в эксплуатации. Их используют для измерения сравнительно кратковременных деформаций [80].

В ограниченном количестве используют тензодатчики других типов, в частности емкостные, а также пьезоэлектрические, измеряющие только динамические деформации, но зато имеющие чрезвычайно высокую чувствительность [81]. Необходимым условием их нормальной работы является постоянство температуры во время измерения. Магнитоупругие датчики деформации значительно уступают тензорезистивным и практически вышли из применения.

1.4.2 Волоконно-оптические датчики

Быстрое развитие *волоконно-оптических* технологий привело к появлению датчиков деформации, которые устойчивы к воздействию окружающей среды и обладают электромагнитной помехоустойчивостью [82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96]. В оптоволоконных сенсорах деформации [83] используется, волоконная брэгговская решетка (ВБР), представляющая собой оптическое волокно, в котором реализовано периодическое изменение показателя преломления (рис.1.4.5).

При прохождении света через такую структуру часть его с определённой длиной волны $\lambda_{\text{Брэгг}}$, отражается, а остальная часть проходит дальше. Длина волны $\lambda_{\text{Брэгг}}$ отражённого света называется брэгговская длина волны и определяется соотношением $\lambda_{\text{Брэгг}} = 2nL$, где n – эффективный показатель преломления оптического волокна, L – расстояние между решётками или период решётки.

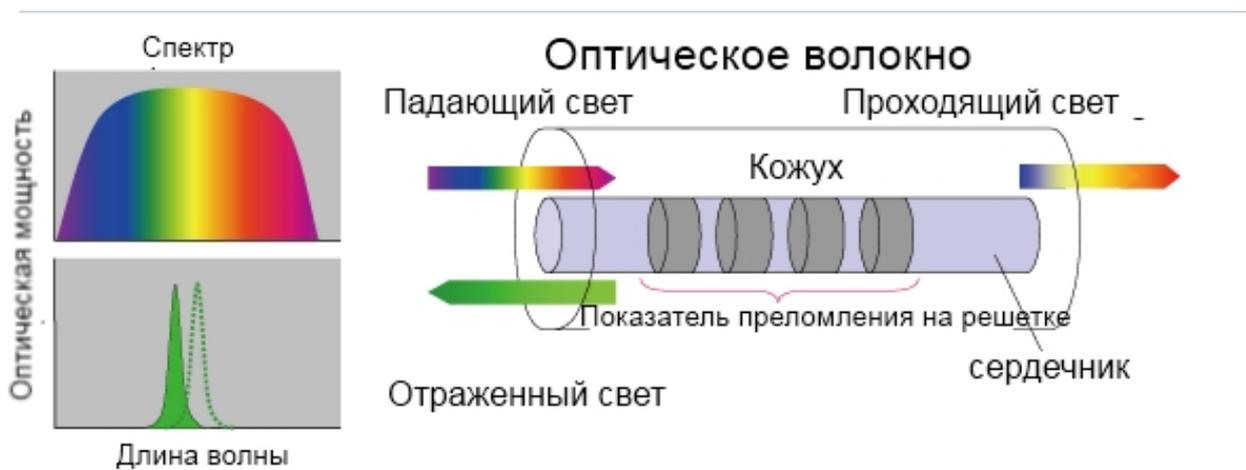


Рисунок 1.4.5 — Схема волоконно-оптического датчика с дифракционной решеткой Брэгга (рисунок взят из открытого источника)

При растяжении-сжатии волокна меняется расстояние L и показатель преломления n , что приводит к изменению $\lambda_{\text{Брэгг}}$, которое регистрируется оптической системой. Коэффициент тензочувствительности S_A оптических сенсоров деформации определяется по аналогии с тензорезисторами:

$$\frac{\Delta\lambda_{\text{Брэгг}}}{\lambda_{\text{Брэгг}}} = S_A \frac{\Delta L}{L}. \quad (1.4.10)$$

где $\lambda_{\text{Брэгг}}$ – брэгговская длина волны, $\Delta\lambda_{\text{Брэгг}}$ – изменение $\lambda_{\text{Брэгг}}$ при деформации волоконной решетки, S_A – коэффициент тензочувствительности (около 0.78 [83]), $\Delta L/L$ – относительная деформация.

В работе [83] была исследована устойчивость волоконно-оптических сенсоров (ВОС) деформации компании НВМ (ФРГ) к длительным переменным нагрузкам. После 10^7 циклов деформации ± 1000 мкм/м никаких изменений характеристик ВОС выявлено не было – чувствительность датчиков, и базовая длина волны не изменились.

По сравнению с тензорезисторными датчиками ВОС деформации выдерживают существенно более высокие пиковые нагрузки и обеспечивают на порядок более высокую стойкость к переменным нагрузкам [94]. На рисунке 1.4.6 показаны примеры промышленно выпускаемых волоконно-оптических датчиков.

Волоконно-оптические сенсоры деформации обладают следующими преимуществами:

- Выдерживают большое число циклов нагружения: данные сенсоры позволяют проводить испытания даже на материалах с высокими значениями деформации.
- Не подвержены влиянию электромагнитных помех, могут эксплуатироваться во взрывоопасных условиях.
- Позволяют создавать распределённые системы мониторинга: одно волокно – несколько измерительных точек. Несколько оптических элементов можно встроить в одно стекловолокно.

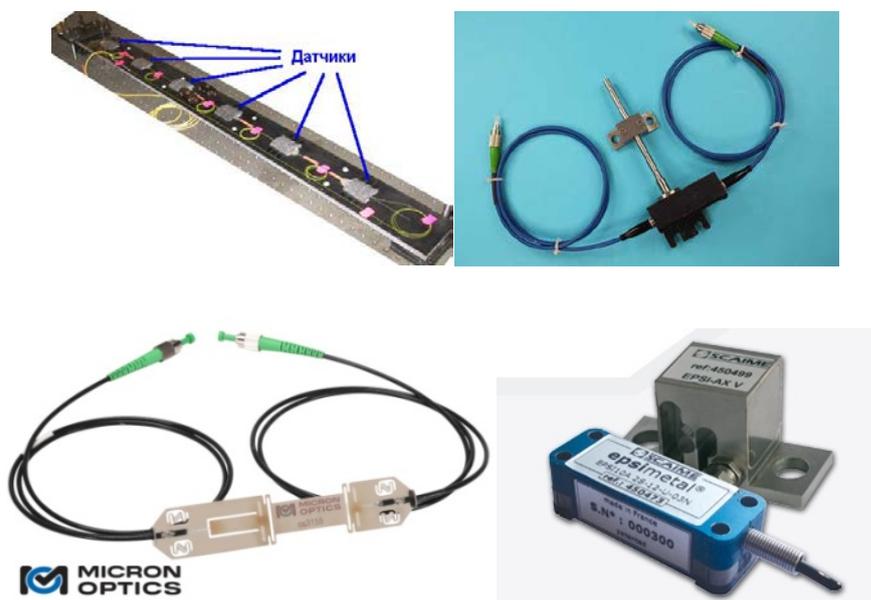


Рисунок 1.4.6 — Волоконно-оптические датчики

Волоконно-оптические сенсоры деформации обладают характеристиками, которые в некоторых условиях эксплуатации делают их более эффективными по сравнению с тензорезисторами.

1.4.3 Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрические датчики широко используются в промышленности и во многих других отраслях. Существует большое количество пьезоэлектрических датчиков, такие как волоконно-оптические пьезоэлектрические (кварцевые) датчик импульсного давления, пьезоэлектрические датчики вибрации, на основе пьезоэлектричества работают и многие другие приборы, например пьезоэлектрический громкоговоритель [97, 98, 99, 100, 101, 102, 103]. Пьезоэлектрический датчик преобразует механическое усилие в электрический сигнал, его действие основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, который заключается в возникновении поляризации диэлектрика под действием механических напряжений.

Величина плотности наведённого электрического заряда, возникающего на поверхности пьезоэлемента под действием внешней нагрузки, описывается уравнением [98]:

$$\Delta q = d_{ij}\sigma = d_{ij}E\varepsilon. \quad (1.4.12)$$

где Δq – поверхностная плотность заряда, d_{ij} – пьезоэлектрический модуль, представляющий собой тензор размерностью 3×6 , с типичными значениями в диапазоне $10^{-10} - 10^{-12}$ Кл/Н, σ – величина напряжения в материале под действием внешней нагрузки, E – модуль Юнга пьезоэлектрического материала, $\varepsilon = dL/L$ – относительная деформация. В таблице 1.4.2 приведены величины пьезоэлектрических модулей и модулей Юнга для некоторых материалов, широко используемых для изготовления пьезоэлектрических датчиков.

Пьезоэлектрические датчики обладают следующими достоинствами:

- малыми габаритами;
- простотой конструкции;
- возможностью измерения быстропеременных нагрузок (например, вибраций, акустических волн).

Пьезоэлектрические датчики для статических измерений не используются, так как заряд, возникающий на гранях пьезоэлемента под действием нагрузки,

очень мал и может разрядиться через утечки. Заряд может долго сохраняться только при условии бесконечно большого входного сопротивления измерительной цепи, что на практике невыполнимо.

В зависимости от конструкции пьезодатчиков можно получить высокие частоты собственных колебаний (до 60 кГц), что позволяет исследовать процессы распространения волн напряжений. В отличие от тензорезисторных датчиков, которые позволяют производить измерения в одном направлении, пьезоэлектрические датчики одинаково чувствительны к напряжениям в направлении длины и радиальном направлении. Промышленно выпускаются комплекты виброизмерительной аппаратуры, в которых чувствительным элементом являются пьезоэлектрические датчики с усилительными и интегрирующими блоками [104]. Примеры промышленных пьезоэлектрических датчиков приведены на рисунке 1.4.7.

Таблица 1.4.2 — Пьезоэлектрические модули некоторых материалов

Материал	d_{ij} , 10^{-12} Кл/Н
Пьезокерамика: Цирконато-титанат свинца ЦТС, PZT:	
ЦТС-19	160 – 330
ЦТС-21	40 – 100
ЦТСНВ-1	160 – 400
PZT-5A (США)	274 – 593
PZT-6A (США)	80 – 189
PZT-6B (США)	27 – 71
Кристаллический кварц	2.33
Титанат бария $BaTiO_3$	78
Твердые растворы $(K, Na)NbO_3$	80 – 160
Неполярные полимеры (ПТФЭ, ПП, полиэтилен, каучуки)	0.1 – 1
Полярные полимеры (поликарбонат, поливинилхлорид)	20 – 40
Электроактивные полимеры	30 000



Рисунок 1.4.7 — Пьезоэлектрические датчики

Однако во время работы таких датчиков возможны как обратимые, так и необратимые изменения их коэффициента тензочувствительности и других характеристик. Это, естественно, ограничивает условия применения и является одним из самых серьезных недостатков пьезоэлектрических датчиков [98, 105].

1.4.4 Пьезооптические датчики

Пьезооптический эффект (по-другому называемый – фотоупругий эффект) представляет собой изменение показателя преломления вещества, вызванного механическим напряжением [106, 107]. Пьезооптический эффект наблюдается во всех кристаллах и аморфных веществах. Эффект заметно проявляется в стекле, плавленом кварце, кремнии и германии.

Опико-поляризационный метод на основе пьезооптического эффекта

Использование фотоупругости включает приложение напряжений к исследуемому образцу и использование индуцированного напряжением двулучепреломления материала для изучения распределения напряжений в образце [108, 109, 110, 111, 112, 113]. Приложенное напряжение приводит к анизотропному изменению показателя преломления прозрачного вещества из-за

деформации атомных электронных оболочек. Если напряжения расположены в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света, то величина Δn , обусловленная двулучепреломлением, пропорциональна разности $\Delta\sigma$ между двумя главными осями напряжений в этой плоскости [114].

$$\Delta n = n_o - n_e = K\Delta\sigma, \quad (1.4.13)$$

где n_o и n_e – коэффициенты преломления для «обычного» и «необычного» лучей, K – пьезооптический коэффициент с типичным значением $10^{-11} \div 10^{-12}$ м²/Н для большинства оптических материалов, $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$ – разница напряжений вдоль и поперёк приложенной силе в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света. Данная разница в коэффициентах преломления приводит к разнице фаз для двух ортогональных поляризаций световой волны, прошедшей напряженный материал:

$$\Delta = \frac{2\pi l}{\lambda} (n_o - n_e) = C\Delta\sigma l, \quad (1.4.14)$$

где l – расстояние, пройденное лучом в напряженном материале, λ – длина волны света, $C = 2\pi K/\lambda$ – новая константа.

Принимая во внимание, что чувствительность описанного выше детектора к фазовому сдвигу составляет 10^{-4} радиан и, используя закон Гука, можно оценить чувствительность детектора к деформации.

$$\Delta\sigma = E \frac{\Delta x}{x} \rightarrow \Delta = \frac{2\pi l}{\lambda} KE \frac{\Delta x}{x} \rightarrow \frac{\Delta x}{x} = \Delta \frac{\lambda}{2\pi l KE}, \quad (1.4.15)$$

где E – модуль Юнга материала, $\Delta x/x$ – относительная деформация оптического материала, $\Delta\sigma = E\Delta x/x$ – закон Гука. Для плавленого кварца, используемого как фотоупругий элемент, $E = 70$ ГПа, $K = 1,4 \times 10^{12}$ Па⁻¹ [115]. Полагая, что $l = 4$ мм, $\lambda = 650$ нм, $x = 10$ мм, чувствительность к деформации принимает значение

$$\Delta x \approx 2.7 \times 10^{-10} \text{ м} = 0.27 \text{ нм}. \quad (1.4.16)$$

Суммируя, мы можем записать последовательность преобразований из амплитуды сигнала в измеренную физическую величину:

$$\partial I \propto \partial \Delta \propto \partial n \propto \partial \sigma \propto \partial x, \quad (1.5.17)$$

где ∂I – величина изменения сигнала, $\partial \Delta$ – изменение сдвига фазы световой волны, ∂n – изменение показателя преломления, $\partial \sigma$ – изменение напряжения, ∂x – смещение.

1.4.5 Метод фотоупругих покрытий

Аналогично методу фотоупругости метод фотоупругих покрытий (муаровых полос) дает возможность получить картину распределения перемещений и деформаций сразу на всей поверхности исследуемой модели или детали [116, 117, 118, 119]. Метод фотоупругих покрытий позволяет исследовать напряжения непосредственно на плоских поверхностях деталей. Поверхность покрывают тонкой пленкой оптически активного вещества (эпоксидные смолы) и нагружают. Под действием напряжений, возникающих в поверхностном слое, пленка становится двоякопреломляющей. Исследуемую поверхность облучают неполяризованным светом и рассматривают отраженный от пленки свет через второй поляризатор, получая интерференционную картину распределения напряжений. При отсутствии в образце напряжений анализатор гасит световые лучи, прошедшие через поляризатор, и изображения получается затемненным. Под нагрузкой материал становится двоякопреломляющим и в итоге после анализатора возникает система интерференционных полос, отражающих величину и пространственное распределение напряжений. При освещении белым светом образуются цветные полосы (*изохромы*), цвет которых зависит от разности главных напряжений $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$, а частота расположения – от величины нагрузки. Кроме того, на изображении темные полосы – *изоклины* (линии одинакового угла наклона главных напряжений).

Метод применяют как в лабораторных, так и в натуральных условиях. Фотоупругие плёнки наносят на поверхность контролируемой конструкции, что позволяет в течение длительного времени периодически определять изменения, происходящие при эксплуатации конструкции. Удобнее применять

монохроматический свет, тогда на изображении возникают тёмные полосы изохром и изоклин. Изоклины можно подавить, применяя круговую поляризацию света, для чего перед образцом и за ним располагают четвертьволновые пластинки. В итоге на изображении остаются только изохромы (рис.1.4.8).

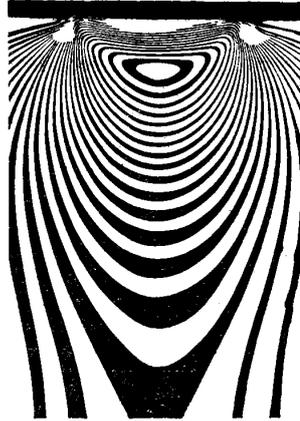


Рисунок 1.4.8 — Изохромы, наибольшие касательные напряжения в зоне контактного нагружения цилиндра

Метод лаковых плёнок даёт сразу траектории главных напряжений (изостаты) и позволяет приблизительно определить их величину [63]. На поверхность детали наносят тонкий слой хрупкого лака, толщиной 0.05–0.1 мм, и подвергают деталь нагружению: растяжению (рис.1.4.9, *a*), либо сжатию (рис. 1.4.9, *б*).

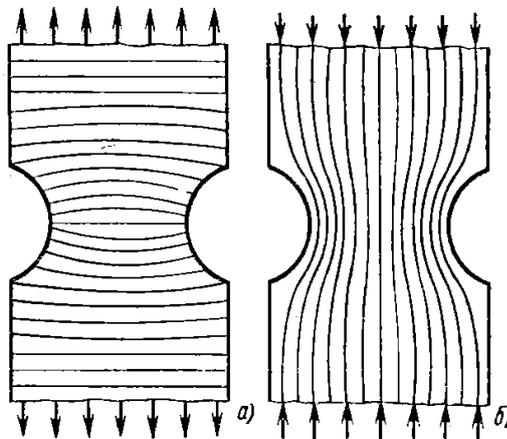


Рисунок 1.4.9 — Сетка трещин в лаковых плёнках

Метод фотоупругих плёнок позволил получить важные результаты при исследовании концентрации напряжений при деформации различных конструкций [120, 121, 122]. Рисунок 1.4.10 соответствуют случаю изгиба балки точечной силой, приложенной к её центру. Частое расположение тёмных полос указывает на высокие напряжения вблизи точки приложения силы. Число полос убывает с увеличением расстояния от центра балки.

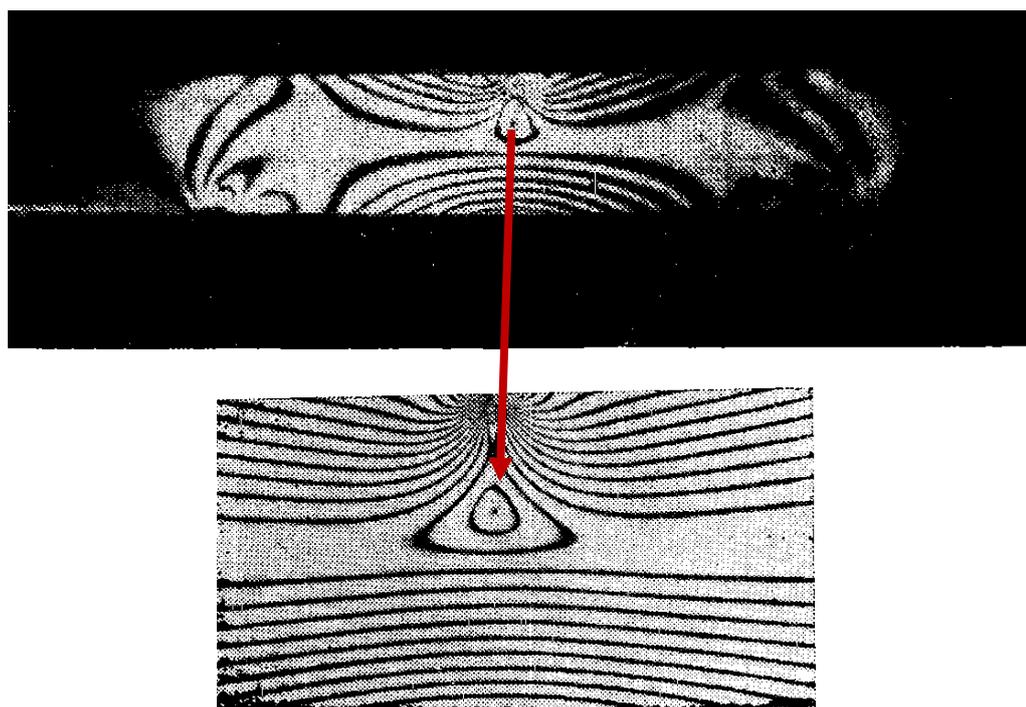


Рисунок 1.4.10 — Распределение напряжений в балке при приложении силы к её центру

Рисунок 1.4.11, *а* показывает распределение напряжений в пластине ступенчатой ширины при действии осевого растяжения. Видно, что максимальное напряжение сосредоточено у конца галтели. На рисунке 1.4.11, *б* показана та же пластина, подвергнутая чистому изгибу, с помощью силы, приложенной к концу пластины.

Несмотря на наглядность и информативность метода фотоупругих покрытий, в промышленности нужны датчики, имеющие цифровой или аналоговый выход для подключения к различным системам контроля. Среди существующих

промышленно выпускаемых датчиков можно выделить три основные группы: тензорезисторные (металлические и полупроводниковые), оптоволоконные и пьезоэлектрические [63, 93 123]. Анализ основных параметров таких датчиков (коэффициент тензочувствительности, динамический диапазон, минимальная регистрируемая деформация) в сравнении с пьезооптическими датчиками представлен в разделах 3.1 и 3.5.

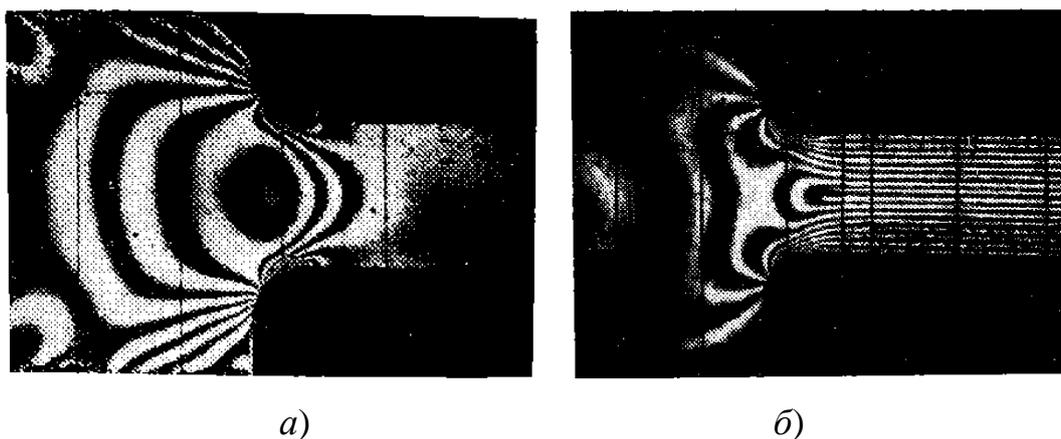


Рисунок 1.4.11 — Распределение напряжений в пластине переменного сечения при растягивающем (*a*) и изгибающем (*б*) напряжении

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 1

1. Оптико-поляризационные методы измерения физических величин являются наиболее чувствительными методами в силу высокой чувствительности поляризации света к изменению состояния вещества.

2. Создано множество оптико-электронных устройств и методик измерения различных физических величин, превосходящих по параметрам аналоги на других принципах, показывающих преимущества и перспективность данных методов.

3. Детекторы терагерцового диапазона находятся в стадии быстрого развития, и требуют дальнейшего совершенствования для достижения промышленно пригодных образцов.

4. Пьезооптические датчики практически не используются в промышленности, хотя обладают чувствительностью на три порядка выше, чем тензорезисторные. Поэтому важной задачей удовлетворения возрастающих потребностей промышленности является развитие технологий пьезооптических датчиков деформации.

ГЛАВА 2 КОНВЕРТЕР ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНФРАКРАСНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МЕТОДИКА ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВАРИАНТЫ РЕГИСТРАЦИИ ТГц-ИЗЛУЧЕНИЯ

2.1 Преобразователь (конвертер) ТГц-излучения в ИК-излучение

В данной части работы была поставлена задача создания преобразователя терагерцового излучения в инфракрасное излучение (которое может быть зарегистрировано с помощью имеющихся на сегодняшний день инфракрасных матричных приемников), обладающего высокой чувствительностью к терагерцовому излучению на заданной (рабочей) длине волны, пространственным разрешением, чувствительностью к поляризации излучения, малым временем отклика.

Поставленная задача решена тем, что преобразователь выполнен в виде ультратонкого (не менее чем в 50 раз меньше рабочей длины волны терагерцового излучения) резонансного поглотителя [124, 125, 126, 127, 128, 129]. Поглотитель представляет собой многослойную структуру на основе диэлектрического слоя. Со стороны падения терагерцового излучения на поверхности диэлектрического слоя выполнен металлизированный топологический рисунок, образующий частотно избирательную поверхность (ЧИП) [130]. С обратной стороны диэлектрического слоя нанесен сплошной слой с металлической проводимостью. Диэлектрический слой с ЧИП с одной стороны и металлическим слоем с другой стороны образуют резонансный поглотитель с коэффициентом поглощения на рабочей длине волны близким к единице (более 0.9). Топология ЧИП и толщина диэлектрического слоя определяют заданное положение максимума поглощения и заданную ширину линии поглощения терагерцового излучения, при этом суммарная толщина резонансного поглотителя много меньше длины волны терагерцового излучения [128]. Такие поглотители принято называть в литературе *метаматериалом*, так как его диэлектрические свойства искусственно заданы с помощью топологии металлического рисунка [130, 131, 132]. На рисунке 2.1.1

приведены примеры топологий ЧИП, используемых для создания поглотителей и фильтров ТГц-диапазона.

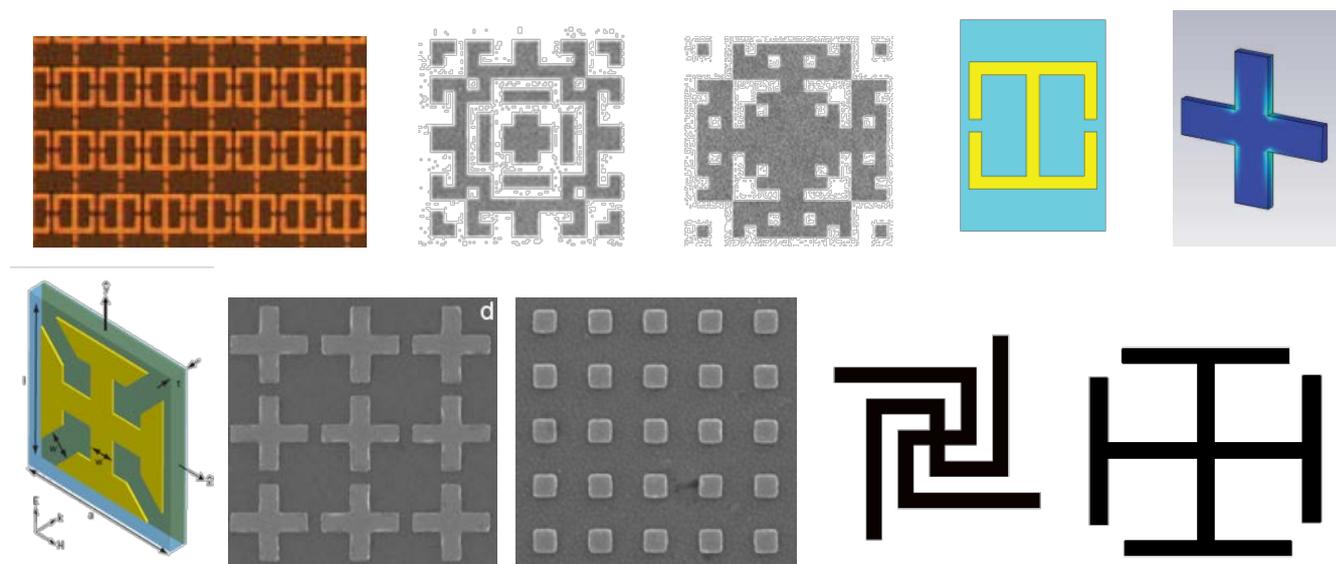


Рисунок 2.1.1 — Примеры топологии частотно-избирательных поверхностей

На рисунке 2.1.2 показаны спектры поглощения некоторых поглотителей из метаматериала, работающих в широком диапазоне электромагнитного излучения: от микроволн, десятки ГГц, до оптического диапазона, вплоть до ближнего ИК-диапазона с длиной волны ~ 1.6 мкм [131].

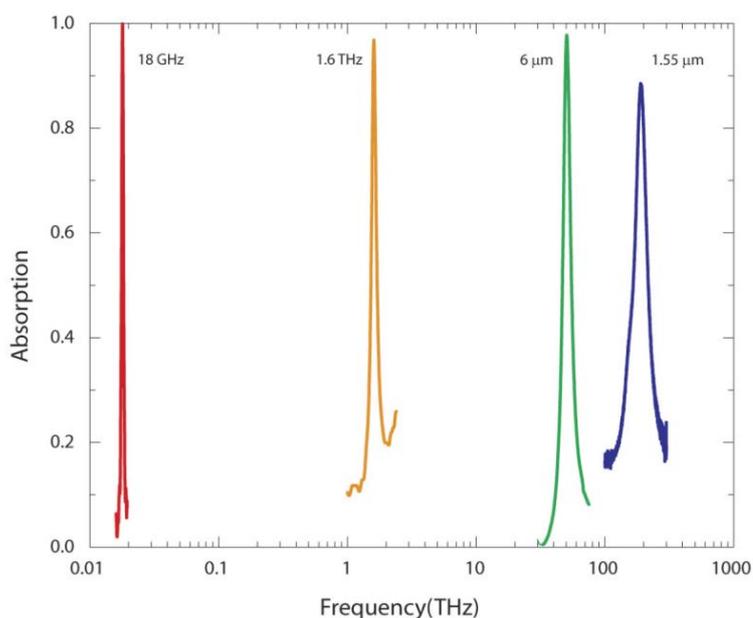


Рисунок 2.1.2 — Экспериментальное поглощение нескольких идеальных поглотителей из метаматериала, работающих в широком электромагнитном спектре от микроволнового до оптического [131]

Выполнение резонансного поглотителя в виде ультратонкой структуры, содержащей ЧИП, связано с тем, что для реализации режима измерений в реальном времени с высокой чувствительностью поглощающий слой должен обладать достаточно малой теплоемкостью (малой толщиной) и близким к единице коэффициентом поглощения для терагерцового излучения.

Методика создания резонансных поглотителей, использованных в данной работе для создания преобразователя ТГц-излучения в тепловое ИК-излучение, подробно описана в работах [132, 133] и кратко представлена на рисунке 2.1.3, любезно предоставленном авторами из работы [133]. Полипропиленовая пленка (PP) фиксируется на несущей стеклянной подложке (1). Далее на её поверхность наносятся: тонкий адгезионный подслой титана и слой алюминия толщиной 0.4 мкм (2). На следующих стадиях (3–6) проводится стандартная процедура контактной фотолитографии: на поверхность алюминия методом центрифугирования наносится слой фоторезиста, толщиной 0.6 мкм (3); после сушки слой фоторезиста облучается УФ-излучением через соответствующий фотошаблон и проявляется в растворе КОН.

На следующем этапе (7) маска из фоторезиста задубливается в термошкафу при температуре 120°C в течение 30 минут. Далее не закрытый фоторезистом слой алюминия удаляется химическим травлением (8), после чего удаляется оставшийся фоторезист и на поверхности полипропиленовой плёнки остаётся металлический рисунок (9). На обратную сторону полипропиленовой плёнки наносится сплошной алюминиевый слой толщиной 0.4 мкм (10-11). Полученная структура закрепляется на оправку (12) для последующего формирования на сплошном слое алюминия эмиссионного слоя с высокой излучательной способностью в инфракрасном диапазоне с коэффициентом эмиссии (серости), близким к единице.

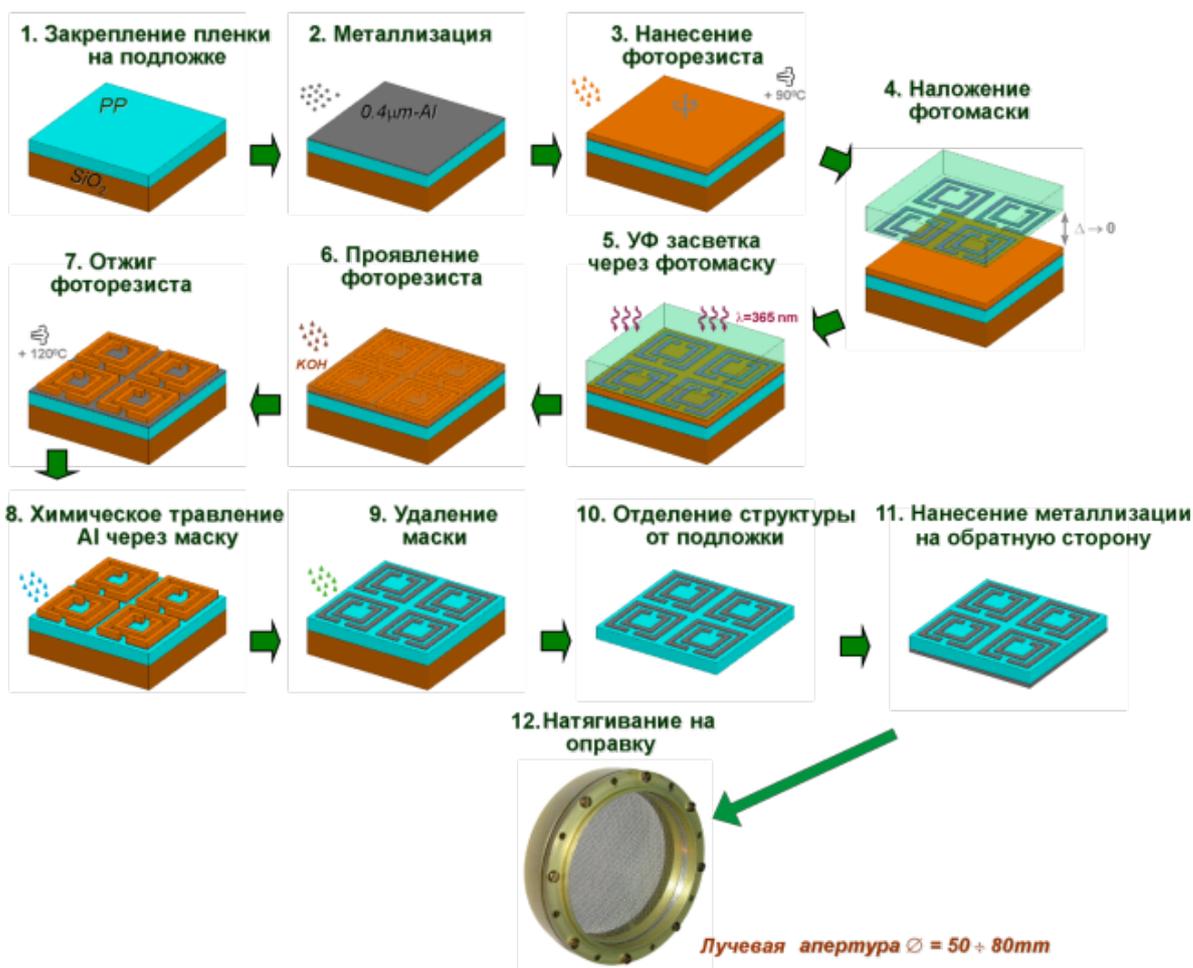


Рисунок 2.1.3 — Технологические стадии создания тонкопленочного резонансного поглотителя (рисунок взят из [133])

2.2 Методика изготовления ТГц-ИК-конвертеров

При работе преобразователя при комнатной температуре ($T=300\text{ K}$), излучающий слой должен иметь максимум излучения в районе $\lambda=10\text{ мкм}$. Примером излучающего слоя может быть слой углеродсодержащего материала (графит, сажа, медная или золотая чернь), обладающие коэффициентом серости (черноты, эмиссии), близким к единице [134].

Для изготовления эмиссионного слоя с минимально возможной толщиной и высоким коэффициентом эмиссии использовались смеси графита и полимерных компонентов со средним размером зерна менее 5 мкм . Смесь наносилась на обратную сторону поглотителя электрострикционным методом и затем отжигалась при температуре $90\text{--}120^\circ\text{C}$ для закрепления на поглотителе. При

температуре ниже 90°C зерна плохо спекались с подложкой и между собой и осыпались. В диапазоне температур $90\text{--}120^{\circ}\text{C}$ зерна хорошо спекались и прочно удерживались на подложке. Спекание обеспечивалось за счет размягчения полимерной основы смеси, но без ее расплавления. При этом структура эмиссионного слоя сохранялась зернистой, с развитой поверхностью, что обеспечивало высокий коэффициент эмиссии, который в этом диапазоне температур слабо менялся и лежал в области $0.86\text{--}0.92$. При повышении температуры отжига выше 130°C полимерная основа смеси начинала расплавляться, формировался сплошной блестящий слой и коэффициент эмиссии значительно снижался. Итоговая толщина эмиссионного слоя составила $20\text{--}40$ мкм с теплопроводностью значительно ниже, чем структура поглотителя. Измеренный терморадиометром ТРМ «И» коэффициент эмиссии был не хуже 0.9 .

Конвертеры изготавливались с рабочими апертурами $32\text{--}80$ мм. На рисунке 2.2.1 показан внешний вид конвертеров с рабочей апертурой 50 мм со стороны поглощающего слоя (2.2.1 *а*) и со стороны эмиссионного слоя (2.2.1 *б*).



Рисунок 2.2.1 — Примеры конвертеров в оправе с рабочей апертурой 50 мм, *а* – со стороны поглощающего слоя (метапоглотителя), *б* – со стороны эмиссионного слоя

На рисунке 2.2.2 показаны изображения эмиссионного слоя под микроскопом с разным увеличением. Из рисунков 2.2.2 и 2.2.3 можно заключить, что эмиссионный слой имеет структуру, близкую к однородной, и содержит небольшое количество локальных дефектов, которые слабо влияют на качество получаемого ИК-изображения.

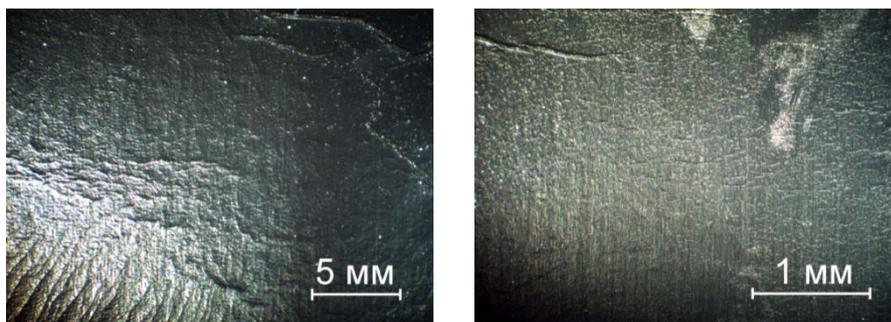


Рисунок 2.2.2 — Изображения эмиссионного слоя под микроскопом с разным увеличением

На рисунке 2.2.3 показана структура преобразователя с однородным излучающим слоем, где *1* – диэлектрический слой, *2* – частотно избирательная поверхность, которая представляет собой топологический рисунок, выполненный в слое металла, обеспечивающий резонансное поглощение на заданной длине волны терагерцового излучения, *3* – слой с металлической проводимостью, *4* – слой, излучающий инфракрасное излучение, *5* – терагерцовое излучение, *6* – инфракрасное излучение.

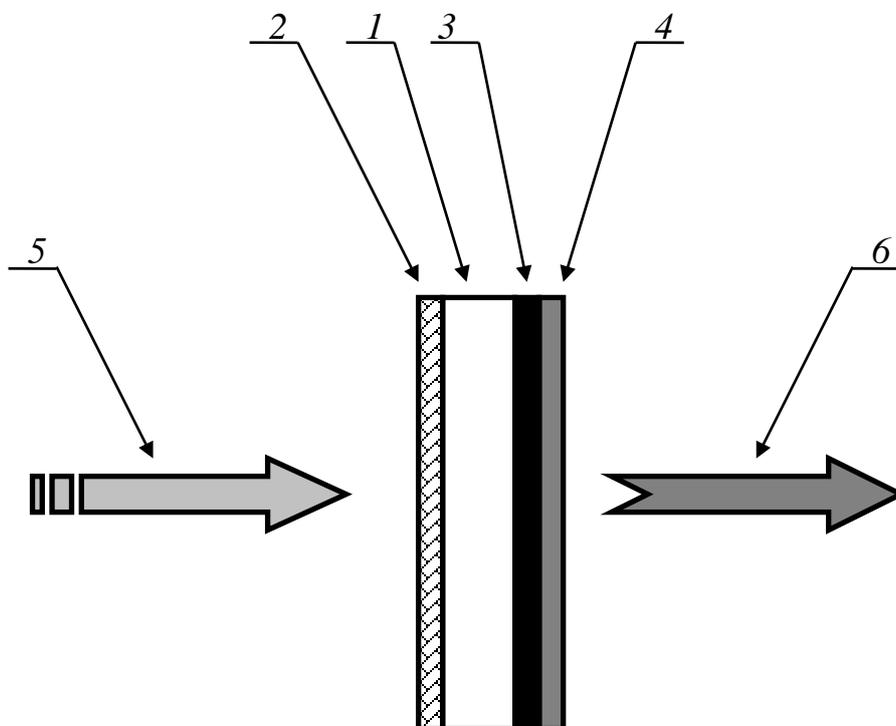


Рисунок 2.2.3 — Структура преобразователя с излучающим слоем

Преобразователь работает следующим образом. Терагерцовое излучение 5 поглощается резонансным поглотителем (слои $1+2+3$), что приводит к нагреву преобразователя. Нагрев преобразователя приводит к увеличению интенсивности теплового (инфракрасного) излучения со стороны излучающего слоя 4. Таким образом, изменение энергии терагерцового излучения приводит к изменению энергии инфракрасного излучения. Другими словами, терагерцовое излучение преобразуется в инфракрасное.

2.3 Варианты построения ТГц-детекторов на основе различных конструкций ТГц-ИК-конвертера

Возможны два варианта топологии металлического рисунка:

1) Для реализации *поляризационно-независимого* режима ЧИП содержит изотропную (не чувствительную к направлению поляризации) топологию, имеющей резонанс для заданной длине волны терагерцового излучения.

2) Для реализации *поляризационной чувствительности* на заданной длине волны, ЧИП содержит анизотропную топологию, обеспечивающую поляризационно-зависимый коэффициент поглощения резонансного поглощающего слоя.

Положительной особенностью технологии изготовления конвертера является возможность создания конвертеров с большой рабочей апертурой (диаметром > 80 мм), что важно для получения качественного изображения излучения с длиной волны ~ 1 мм.

На рисунке 2.3.1 а показана схема реализованного конвертера, состоящего из несущей полипропиленовой плёнки (ППн) [127].

На плёнке, со стороны падения ТГц-излучения, сформирован металлический рисунок (ЧИП), а с обратной стороны нанесена сплошная металлизация. На сплошной слой металла нанесён излучающий слой с коэффициентом эмиссии > 0.9 . На рисунке 2.3.1 б показан пример ЧИП в виде «бесконечного» набора расщеплённых металлических «колец» [135, 136], использованный в данной работе [127]. В качестве металлического слоя использовались слои алюминия

толщиной 0.3–0.5 мкм, в качестве несущего слоя диэлектрика использовались плёнки полипропилена толщиной в диапазоне 10–20 мкм.

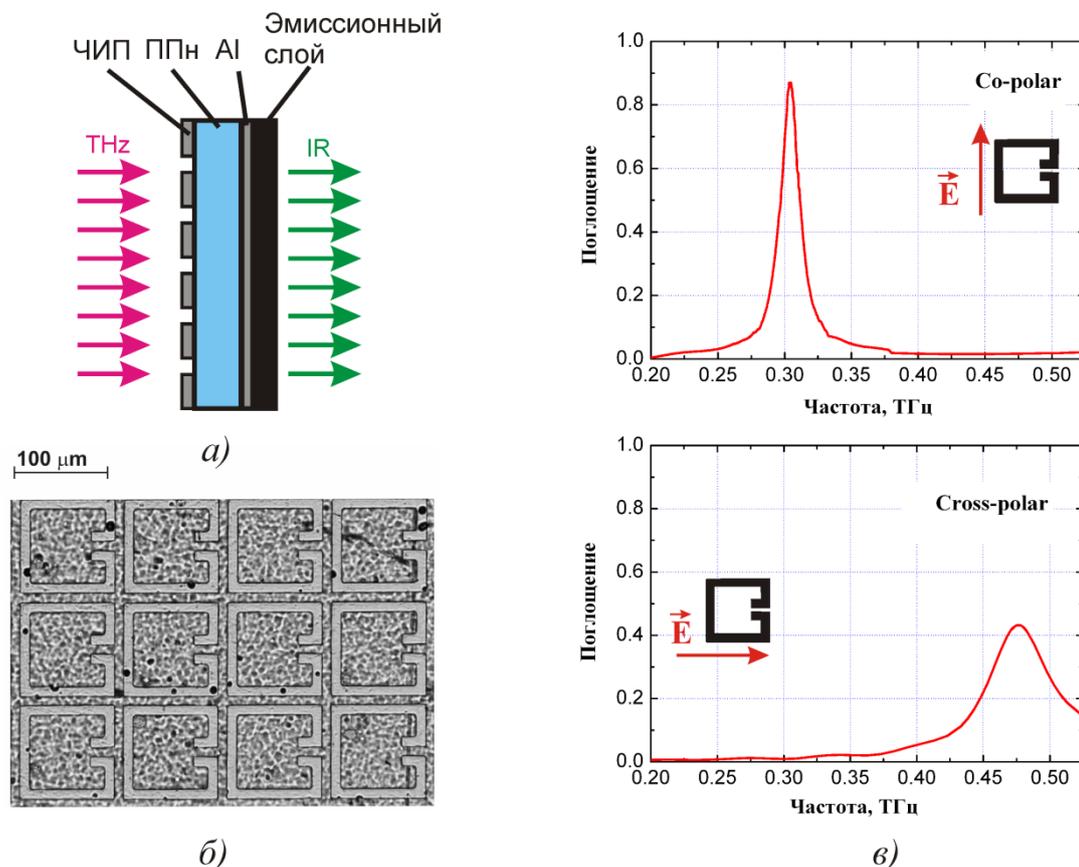


Рисунок 2.3.1 — ТГц–ИК-конвертер [127],

- а) – схема ТГц–ИК-конвертера, ЧИП – частотно избирательная поверхность, ППн – полипропилен, Al – алюминиевый слой, ЧИП, ППн и Al вместе образуют ультратонкий резонансный поглотитель – метаматериал,
- б) – вид сверху на топологию ЧИП в виде расщеплённых колец,
- в) – спектральные зависимости поглощения для двух ортогональных поляризаций, стрелками указаны направления поляризации падающей волны ТГц-излучения

Ключевой особенностью поглощающей является ее малая толщина l по сравнению с рабочей длиной волны λ ТГц-излучения, что позволяет обеспечить низкую теплоемкость и, тем самым, высокую чувствительность и быстродействие детектора. В работе [137] экспериментально продемонстрирована возможность достижения отношений $\lambda/l \sim 180$ и более, что позволяет уменьшить толщину метаструктуры до величины масштаба 10 микрон и ниже. На рисунке 2.3.1 в

приведены экспериментально измеренные спектральные зависимости коэффициентов поглощения для двух ортогональных поляризаций падающего излучения, демонстрирующие высокое спектральное и поляризационное разрешение на рабочей частоте 0.3 ТГц [127].

Отладка технологии и изготовление экспериментальных образцов конвертеров на основе тонких полипропиленовых плёнок выполнялись в отделе фотохимических технологий Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» под руководством Гельфанда Александра Витальевича. В том числе: изготовление эмиссионного слоя проводилось Лазорским Павлом Александровичем; нанесение слоёв алюминия заданной толщины и с заданной проводимостью на мягких полипропиленовых плёнках выполнялась Таныгиной Дарьей Сергеевной, которым автор выражает благодарность за сотрудничество.

Регистрация многоспектрального (цветного) изображения существенно расширяет информативность получаемого изображения и широко используется в видимом и инфракрасном диапазонах излучения. Современные цифровые фото- и видеокамеры содержат кремниевые матричные структуры с пикселями, чувствительными к красному, зелёному и синему цвету, что позволяет достаточно точно регистрировать и воспроизводить цветные изображения, видимые глазом. В инфракрасной технике многоспектральные системы повышают контраст изображения и степень распознавания объектов наблюдения. Добавление функции поляризационной чувствительности в систему регистрации изображения улучшает контраст изображения и в некоторых случаях позволяет обнаруживать объекты, невидимые в неполяризованном свете [138], что используется, например, в поляризационной микроскопии.

Аналогичные задачи получения многоспектрального и поляризационно-чувствительного изображения стоят и в терагерцовой области излучения в связи с быстрым развитием технологии и науки в этой области.

Из литературы известны многоспектральные системы для миллиметрового диапазона длин волн, основанные на каскаде поглотителей из метаматериалов, стоящих друг за другом [139]. Данные системы работают при криогенных

температурах и предназначены, главным образом, для космических исследований. Получение многоспектральных изображений с поляризационной чувствительностью в наземных условиях требует разработки неохлаждаемых, недорогих, простых в производстве и эксплуатации систем, способных работать в режиме реального времени.

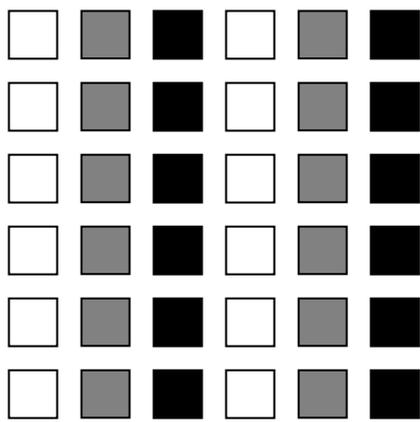
В работе [140] было показано, что на диэлектрической плёнке одной толщины могут быть размещены фрагменты частотно избирательных поверхностей с резонансным поглощением излучения на различных частотах и с различной поляризационной чувствительностью.

Задачей данной работы является создание многоспектрального матричного преобразователя терагерцового излучения в инфракрасное излучение (которое может быть зарегистрировано с помощью имеющихся на сегодняшний день инфракрасных матричных приемников), обладающего пространственным, спектральным, поляризационным разрешением, а также малым временем отклика.

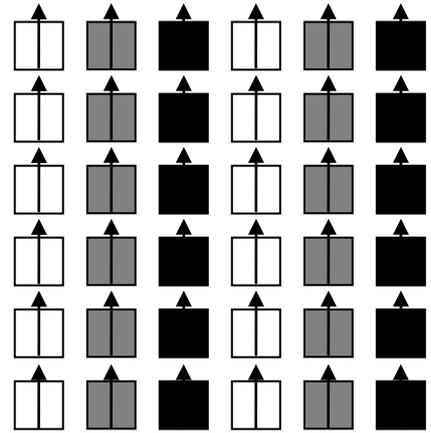
Поставленная задача решена тем, что, в отличие от односпектрального конвертера (рис. 2.3.112, б), частотно избирательная поверхность выполнена в виде матрицы фрагментов с различными топологическими рисунками, обеспечивающими различные спектральные и/или поляризационные чувствительности. Каждый фрагмент ЧИП в совокупности с диэлектрической плёнкой, сплошным металлическим слоем и эмиссионным слоем образуют пиксели матрицы преобразователя, обладающие различной спектральной и/или поляризационной чувствительностью.

Размер пикселя в плоскости преобразователя выбирается близким к длине волны регистрируемого излучения с тем, чтобы увеличить количество пикселей многоспектрального преобразователя при заданном размере матрицы и, тем самым, повысить пространственное разрешение.

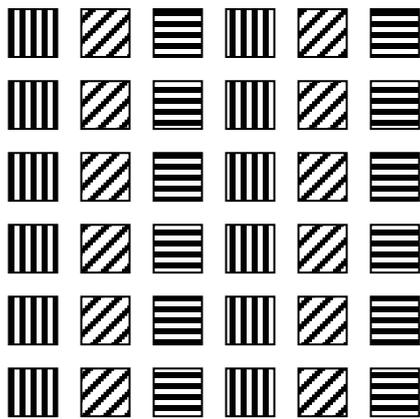
На рисунке 2.3.2, а, б, в, г показаны фрагменты матриц пикселей для реализации описанных режимов работы:



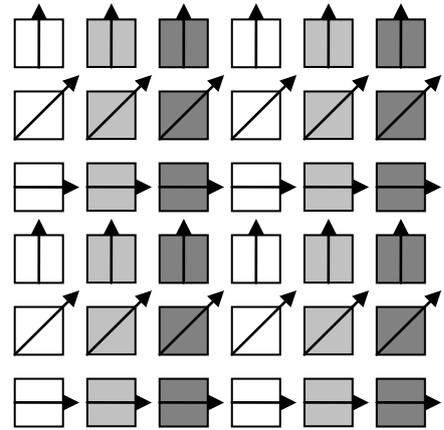
(a)



(б)



(e)



(z)

Рисунок 2.3.2 — Матричные структуры поглотителей для реализации многоспектрального и поляризационно-зависимого режимов работы конвертера

Для реализации *многоспектрального поляризационно-независимого* режима матрица содержит пиксели двух и более типов с поглощающими слоями с изотропной топологией ЧИП, имеющих резонанс для различных длин волн терагерцового излучения (рис. 2.3.2, a).

Для реализации режима *спектрофотометра* – измерителя спектральной зависимости регистрируемого излучения, все пиксели матричной структуры имеют различные спектральные чувствительности в заданном диапазоне длин волн.

Для реализации *многоспектрального поляризационно-чувствительного* режима матрица содержит пиксели двух и более типов с поглощающими слоями с анизотропной топологией ЧИП, имеющих резонанс для различных длин волн

терагерцового излучения (рис. 2.3.2, б). Направление поляризации излучения, соответствующее максимальному поглощению показано стрелками. При ортогональном направлении поляризации падающего излучения поглощение будет равняться нулю. Таким образом, данный тип резонансного поглотителя выполняет одновременно и роль поляризационного фильтра.

Для реализации режима *монохроматического поляриметра* с пространственным разрешением (измерителя эллипса поляризации поглощаемого излучения на заданной длине волны) матрица содержит пиксели трех типов с поглощающими слоями с анизотропной (чувствительной к направлению поляризации) топологией ЧИП, имеющих резонанс для трёх направлений вектора поляризации терагерцового излучения с заданной длиной волны, повёрнутых относительно друг друга на 45 градусов (рис. 2.3.2 в). Направление поляризации, соответствующее максимальному поглощению, показано направлением штриховки. Наличие трёх пикселей с анизотропной ЧИП, имеющих резонансное поглощение на одной длине волны, но для трёх разных направлений поляризации, повёрнутых относительно друг друга на заданный угол, является необходимым и достаточным условием для однозначного определения эллипса поляризации поглощаемого излучения.

Реализация режима *многоспектрального поляриметра* осуществляется комбинацией в одной матрице пикселей с анизотропной топологией ЧИП, имеющих резонанс для разных длин волн и направлений вектора поляризации терагерцового излучения (рис. 2.3.2, г).

Для уменьшения теплоотдачи поглотителя за счёт теплопроводности окружающего воздуха, преобразователь может быть помещен в вакуумную камеру, имеющую входное окно, прозрачное для терагерцового излучения, и выходное окно, прозрачное для инфракрасного излучения.

Схема получения изображений с помощью предлагаемого матричного преобразователя показана на рисунке 2.3.3 [141].

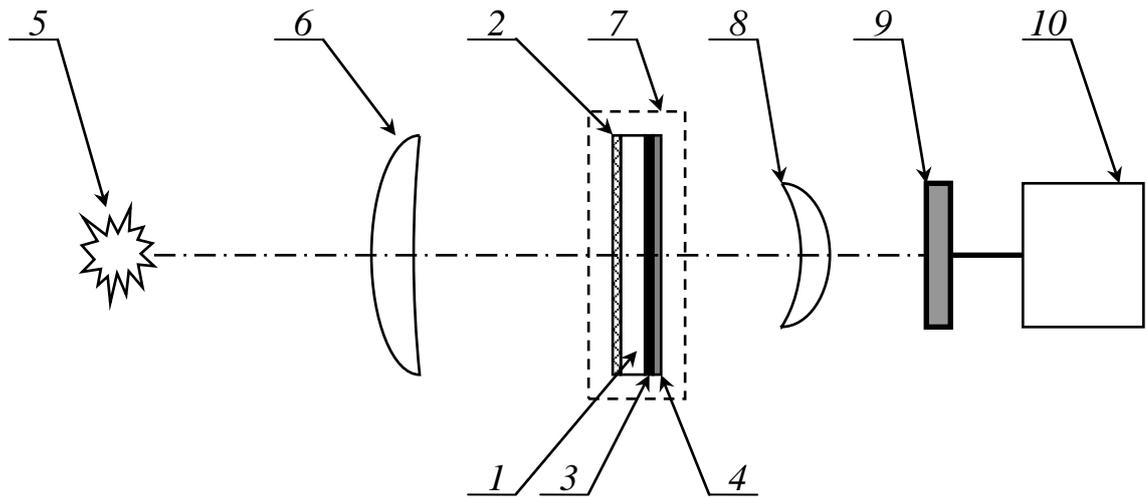


Рисунок 2.3.3 — Схема получения изображения с помощью многоспектрального ТГц–ИК-конвертера

На рисунке показаны: *1* – диэлектрический слой, *2* – частотно избирательная поверхность, которая представляет собой топологический рисунок, выполненный в слое металла, обеспечивающий резонансное поглощение на заданной длине волны терагерцового излучения, *3* – слой с металлической проводимостью, *4* – эмиссионный слой, излучающий инфракрасное излучение, *5* – источник терагерцового излучения, *6* – терагерцовый объектив, *7* – вакуумная камера, *8* – инфракрасный объектив, *9* – инфракрасная камера, *10* – блок обработки изображения.

Для уменьшения *блюминга*, эффекта расплывания теплового поля в плоскости поглотителя за счёт его конечной теплопроводности, и повышения качества получаемого изображения, в поглотителе могут быть выполнены сквозные разрезы в промежутках между пикселями, не нарушающие целостности структуры поглотителя. Схема разрезов показана на рисунке 2.3.4, где *1* – пиксели преобразователя, *2* – сквозные разрезы. Более подробно разработанная методика изготовления разрезов методом лазерной резки описана ниже.

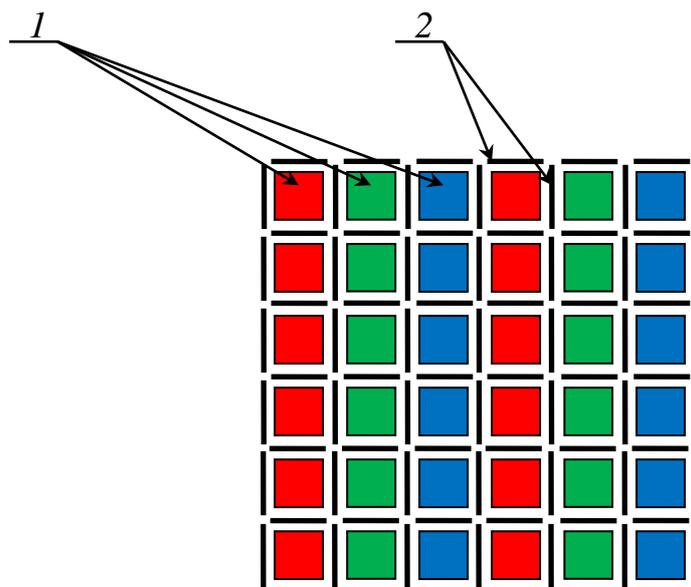


Рисунок 2.3.4 — Многоспектральный конвертер с разрезами, 1 – пиксели преобразователя с различной спектральной чувствительностью, 2 – сквозные разрезы

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 2

Разработанные матричные ТГц-ИК-конвертеры, позволяют создавать ТГц-детекторы на их основе и ИК-камеры для регистрации ТГц-излучение с высокой обнаружительной способностью, пространственным разрешением, спектральным разрешением и поляризационной чувствительностью, в режиме реального времени и без глубокого охлаждения. Результаты исследований ТГц-детекторов и полученные характеристики приведены в Главе 8.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТГц→ИК КОНВЕРТЕРЕ

Очевидно, что основные характеристики конвертера, коэффициент ТГц→ИК преобразования, быстродействие, линейность, пространственное разрешение определяются теплофизическими процессами в структуре конвертера после поглощения ТГц-излучения. В настоящей работе исследование теплофизических процессов было проведено методами численного моделирования. Численные расчеты по поручению и под руководством автора были выполнены младшим научным сотрудником Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» Загубисало Петром Станиславовичем и представлены в работах [142, 143, 144, 145, 146].

По результатам моделирования получены оценки минимальной обнаруживаемой мощности ТГц-излучения (в зарубежной литературе noise equivalent power (NEP)) и времени отклика детектора, содержащего ТГц–ИК-конвертер и ИК-камеру. Под предельными значениями характеристик подразумевается возможность их достижения в условиях размещения конвертера в вакуумной камере, что предотвращает потери энергии за счет теплопроводности газовой среды, и использования регистрирующей ИК-системы с температурным разрешением ~ 40 мК, которое достигается в современных образцах ИК-систем, доступных на рынке. Математическое моделирование процессов нагревания и остывания конвертера под действием ТГц-излучения проводилось с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics. Также моделировался процесс расплывания теплового поля вдоль конвертера благодаря латеральной теплопроводности, т. е. эффект аналогичный блюмингу изображения в матричных фотоприёмных устройствах. Проведены расчеты диапазона линейности выходного сигнала приемника.

3.1 Математическая модель для описания теплофизических процессов в конвертере

Для расчета зависимостей характеристик конвертера от толщины слоя диэлектрика была рассмотрена радиально-симметричная модель конвертера. На рисунке 3.1 показана схема конвертера в цилиндрической системе координат.

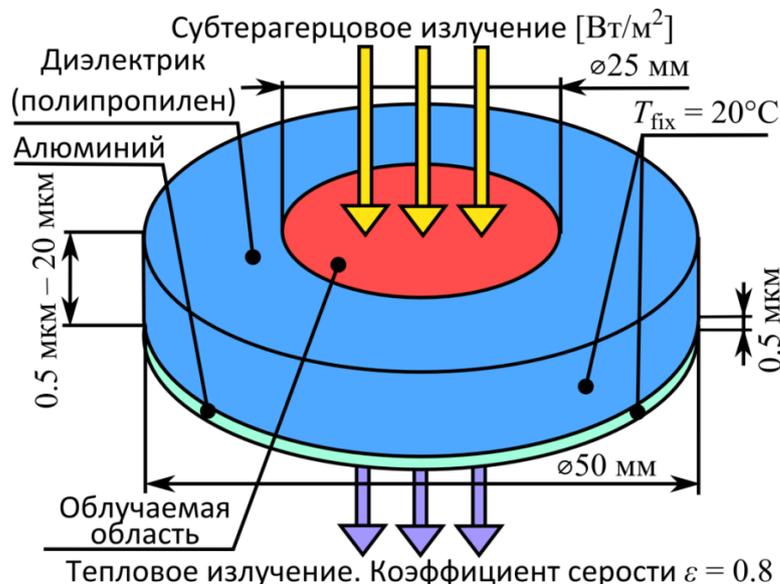


Рисунок 3.1 — Геометрическая радиально-симметричная модель конвертера в цилиндрической системе координат. Начало системы координат внизу в центре конвертера, ось z направлена вверх. Условные обозначения: $T_{\text{фик}}$ – фиксированная температура по периметру конвертера, ε – коэффициент серости поверхности алюминия, красным цветом обозначена облучаемая область

Начало системы координат внизу в центре конвертера, ось z направлена вверх. Конвертер находится в вакууме. Диаметр конвертера равен 50 мм, основой его является слой диэлектрика (в нашем случае плёнка полипропилена). Снизу на диэлектрик нанесен слой алюминия толщиной 0.5 мкм. Присутствием металла на поверхности диэлектрика, обращённой к фронту ТГц-излучения, пренебрегалось, так как его вклад в теплоёмкость конвертера мал, равно как мал вклад и в теплопроводность, поскольку топологический рисунок метаповерхности состоит из электрически изолированных элементов. В модели также пренебрегалось толщиной эмиссионного слоя. Считалось, что эмиссионный слой получен

соответствующей обработкой поверхности металлического слоя, при этом предполагалось, что металлический слой не меняет свои теплофизические свойства.

В настоящей модели предполагается, что освещаемая ТГц-излучением область представляет собой круг диаметром 25 мм в центре конвертера (верхняя сторона). На данную область подается импульс ТГц-излучения длительностью 3 секунды, который полностью поглощается. Задача решалась для различных амплитуд плотности мощности ТГц-излучения, в диапазоне от 0.3 Вт/м^2 до 10^4 Вт/м^2 . При расчёте учитывалась теплопроводность слоев конвертера и тепловое излучение со стороны, противоположной падающему излучению. Тепловое излучение со стороны падающего излучения не рассматривалось, принималось, что коэффициент серости данной поверхности равен нулю. Это обосновано тем, что коэффициенты серости алюминия и полипропилена, составляющих поверхность поглотителя, очень малы по сравнению с коэффициентом серости эмиссионного слоя. Температура по периферии конвертера принималась фиксированной и равной 293.15 К. Начальная температура так же полагалась равной 293.15 К.

Для данного конвертера решалась задача теплопроводности в цилиндрической системе координат со следующим дифференциальным уравнением:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T = k \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (3.1)$$

$T(t, r, z)$ – температура, t – время, r – радиус, z – толщина,

$\rho(z)$ – плотность, $k(z)$ – коэффициент теплопроводности,

$C_p(z)$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Область определения функции T :

$$t \in [0, t_{\text{last}}], r \in [0, R], z \in [0, h_{\text{al}} + h_{\text{pp}}],$$

$R = 25 \times 10^{-3} \text{ м}$ – радиус конвертера,

$h_{\text{al}} = 0.5 \times 10^{-6} \text{ м}$ – толщина слоя алюминия,

$h_{\text{pp}} \in [0.5 \times 10^{-6}, 20 \times 10^{-6}] \text{ м}$ – толщина слоя полипропилена,

$$h_{pp} \in [0.5 \times 10^{-6}, 20 \times 10^{-6}]$$

$t_{last} = 20$ с – время, до которого производился расчет.

$$(\rho, C_p, k) = \begin{cases} (\rho_{al}, C_{p,al}, k_{al}), & 0 < z < h_{al} \\ (\rho_{pp}, C_{p,pp}, k_{pp}), & h_{al} < z < h_{al} + h_{pp} \end{cases}$$

ρ_{al}, ρ_{pp} – плотность алюминия и полипропилена, соответственно,

$C_{p,al}, C_{p,pp}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении алюминия и полипропилена, соответственно,

k_{al}, k_{pp} – коэффициенты теплопроводности алюминия и полипропилена, соответственно.

Значения вышеперечисленных параметров представлены в таблице 3.1.

Начальная температура конвертера равнялась 293.15 К,

$$T|_{t=0} = T_{fix},$$

$T_{fix} = 293.15$ К – температура окружающей среды,

Таблица 3.1 — Значения параметров, использованных в моделировании

Материал	Плотность	Удельная теплоемкость при постоянном давлении	Коэффициент теплопроводности
	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$C_p, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$k, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Полипропилен	900	1575.5	0.1295
Алюминий	2700	893.6	236

Граничные условия:

1. граничные условия сопряжения при $z = h_{al}$:

$$\lim_{\Delta z \rightarrow h_{al}^-} T|_{z=\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow h_{al}^+} T|_{z=\Delta z},$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow h_{al}^-} k_{al} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow h_{al}^+} k_{pp} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\Delta z},$$

означают равенство температур и тепловых потоков на границе между полипропиленом и алюминием,

- по внешней боковой границе пластины температура полагалась фиксированной и равной 293.15 К,

$$T|_{r=R} = T_{\text{fix}},$$

- на верхнюю поверхность конвертера (со стороны полипропилена) в круг радиусом 12.5 мм подается импульс излучения с плотностью мощности P , пластина имеет коэффициент поглощения равный 1 и коэффициент серости $\varepsilon = 0$, что подразумевает полное поглощение падающего излучения и отсутствие теплового излучения:

$$k_{\text{pp}} \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=h_{\text{al}}+h_{\text{pp}}} = f(t) g(r) p = P(t, r), \quad g(r) = \begin{cases} 1, & 0 \leq r \leq R/2 \\ 0, & R/2 < r \leq R \end{cases},$$

в этом уравнении слева – тепловой поток через поглощающую поверхность конвертера, справа – распределение плотности мощности падающего излучения по поверхности и во времени.

$p \in [0.3, 10^4]$ Вт/м² – амплитуда плотности мощности приходящего ТГц-излучения.

Функция распределения плотности мощности падающего излучения во времени $f(t)$ бралась достаточно гладкой формы, чтоб уменьшить влияние паразитарных осцилляций, возникающих в решении при использовании разрывной функции (рис. 3.2). Функция $f(t)$ изображена на рисунке 3.2 и по суммарной энергии эквивалентна прямоугольному импульсу с центром в точке $(t_\rho + t_{\text{on}})/2$, величиной 1 и длительностью 3 секунды, где:

$t_{\text{on}} = 3$ с – эффективное время излучения,

$t_\rho = 1.5$ с – ширина переходной зоны,

$$f(t) = \text{erf}^+(t, 0) \text{erf}^-(t, t_{\text{on}}), \quad (3.2)$$

$$\left| t_{\text{on}} - \int_0^{t_{\text{on}}+t_{\text{trans}}} f(t) dt \right| < 10^{-4},$$

$$\text{erf}_\pm(t, t_0) = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \text{erf} \left(4.5 \frac{(t - t_\rho/2) - t_0}{t_\rho} \right), \quad \text{erf}(x) = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt,$$

$$f_0(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t - t_p/2 \leq t_{on}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases},$$

4. поверхность алюминия (с нижней стороны конвертера) имеет коэффициент серости равный 0.8 и является источником теплового излучения, которое задается в виде граничного условия:

$$k_{al} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = \varepsilon \sigma (T_{fix}^4 - T^4|_{z=0}),$$

$\sigma = 1.380648813 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

$\varepsilon = 0.8$ – коэффициент серости.

5. Отсутствие других слагаемых в граничных условиях 3 и 4 говорит о том, что конвертер находится в вакууме и не производит теплообмена с окружающей средой другими способами, кроме как указано в пунктах 2, 3, 4.

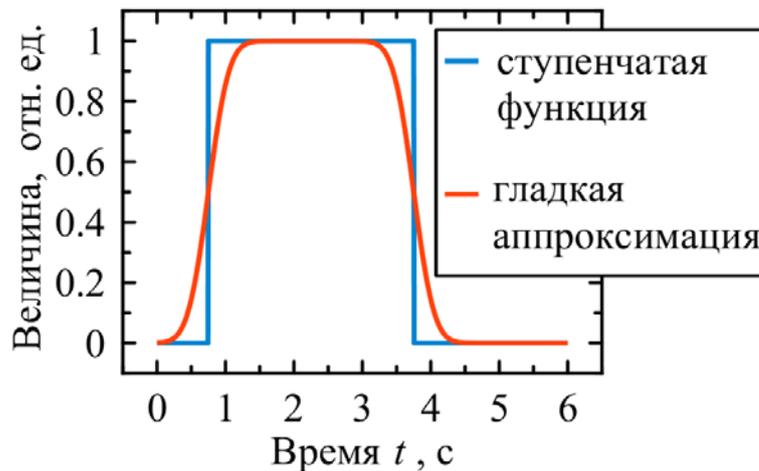


Рисунок 3.2 — Ступенчатая функция $f_0(t)$ (пунктир) и ее гладкая аппроксимация $f(t)$ (сплошная линия). По оси абсцисс – время, по оси ординат – значение функций в условных единицах

Данное дифференциальное уравнение с граничными условиями записано для цилиндрической системы координат с учетом того, что задача осесимметричная. Задача решалась методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics на временном отрезке от 0 до 20 секунд.

3.2 Временные зависимости изменения температуры от толщины слоя диэлектрика

На рисунке 3.3 показаны временные зависимости изменения температуры ΔT для конвертеров с различной толщиной диэлектрика от 0.5 до 20 мкм. Значения толщин указаны во вставке.

Из рисунка видно, что максимальное изменение температуры ΔT_{\max} увеличивается с уменьшением толщины диэлектрического слоя. Также видно, что время отклика (время нагрева и остывания) уменьшается с уменьшением толщины диэлектрика, что является очевидным результатом уменьшения теплоёмкости конвертера.

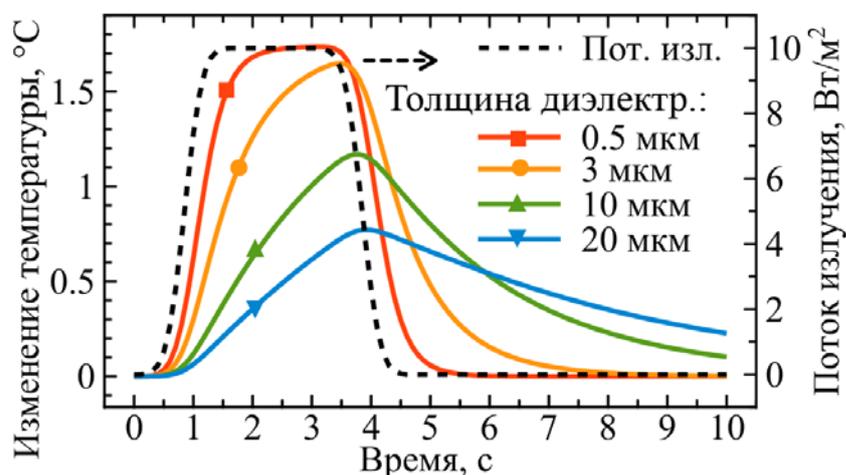


Рисунок 3.3 — Зависимости изменения температуры (ΔT , К) от времени в центре конвертера для различных толщин слоя полипропилена (PP). Пунктирной линией показана временная зависимость плотности мощности ТГц-излучения (P , Вт/м²) в центре конвертера (шкала справа)

3.3 Чувствительность и быстродействие конвертера

На рисунке 3.4 показаны зависимости максимального изменения температуры (ΔT_{\max}) в центре конвертера и характерного времени отклика (τ) от толщины диэлектрического слоя, полученные из зависимостей, часть из которых показана на рисунке 3.3. Характерное время τ рассчитывалось из аппроксимации моделированных временных зависимостей нагрева и остывания функциями $1 - \exp(-t/\tau)$ и $\exp(-t/\tau)$, соответственно. Следует отметить, что моделированные

временные зависимости достаточно хорошо описываются данными экспоненциальными функциями. Значения τ для процессов нагрева и остывания совпадают.

Из рисунка видно, что характерное время отклика является линейной функцией толщины диэлектрика, что соответствует линейной зависимости времени отклика от теплоёмкости диэлектрика. Таким образом, на время отклика конвертера определяющим образом влияет теплоёмкость диэлектрика, а теплоёмкость металлического слоя практически не сказывается ввиду малой теплоёмкости алюминия и малой его толщины. Кроме того, из рисунка видно, что для обеспечения режима реального времени для работы конвертера толщина диэлектрика должна быть менее 3 мкм (τ менее 1 секунды). Зависимость ΔT_{\max} от толщины диэлектрика имеет нелинейный характер и насыщается при уменьшении толщины диэлектрика менее 3 мкм, что объясняется влиянием фиксированной толщины металлического слоя.

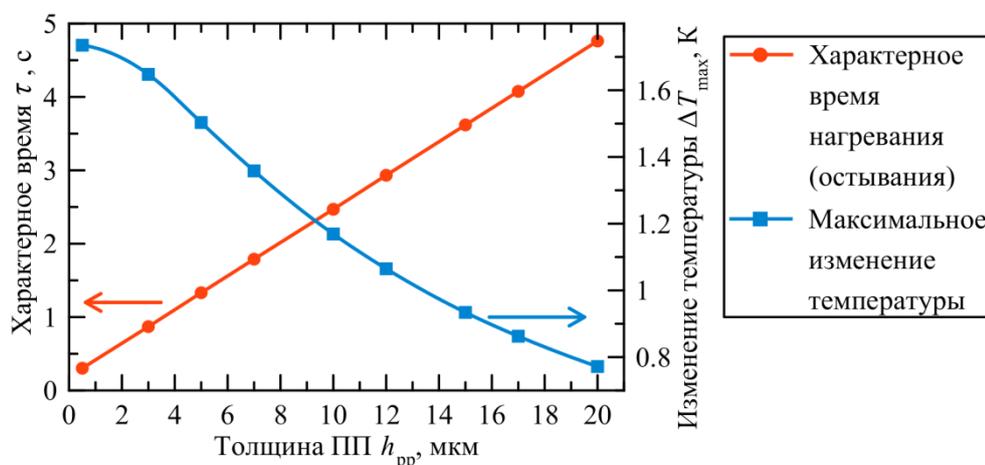


Рисунок 3.4 — Зависимости максимального изменения температуры (ΔT_{\max} , К) в центре конвертера и характерного времени (τ , с) от толщины диэлектрического слоя (h_{pp} , мкм)

Зная ΔT_{\max} конвертера и температурное разрешение ИК-камеры (noise-equivalent temperature difference (NETD)), можно рассчитать зависимость минимальной обнаруживаемой плотности мощности от толщины диэлектрика, т.е. такую величину амплитуды плотности мощности ТГц-излучения, которая

вызывает изменение температуры конвертера равное NETD ИК-камеры, в нашем случае на 40 мК (рис. 3.5).

Из рисунка видно, что зависимость с хорошей точностью является линейной при толщине диэлектрика более 5 мкм. При меньших толщинах диэлектрика зависимость насыщается из-за влияния фиксированного слоя металла. При толщине диэлектрика 3 мкм минимальная обнаруживаемая амплитуда плотности мощности составила 0.25 Вт/м^2 , что соответствует величине мощности, приходящейся на пиксель размером $1 \times 1 \text{ мм}^2$ (соответствует рабочей длине волны) $\text{NEP} = 2.5 \times 10^{-7} \text{ Вт}$. Для сравнения с современными болометрическими ИК-камерами можно рассчитать мощность 0.25 Вт/м^2 на пиксель размером $15 \times 15 \text{ мкм}$, что дает $\text{NEP} = 5.6 \times 10^{-11} \text{ Вт}$. Полученная величина соответствует лучшим образцам современных тепловизионных камер. Таким образом, чувствительность детектора на основе конвертера и ИК-камеры не уступает современному уровню тепловизионных детекторов.

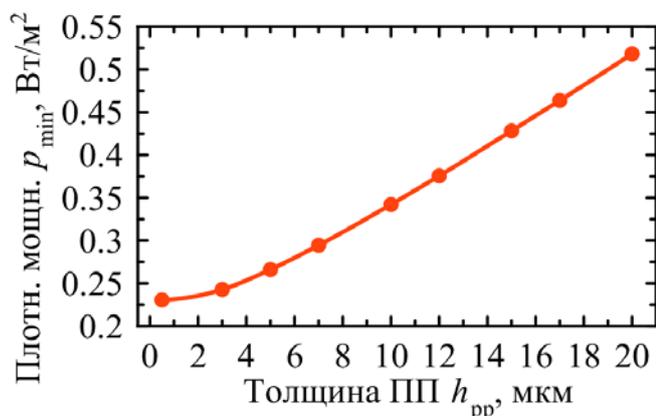


Рисунок 3.5 — Минимальная регистрируемая амплитуда плотности мощности (p_{\min} , Вт/м²) в зависимости от толщины слоя полипропилена (h_{pp} , мкм).

Температурное разрешение ИК-камеры считалось равным 40 мК

3.4 Эффективность конверсии терагерцового излучения в инфракрасное

Естественным вопросом для конвертера является эффективность конверсии, определяемая как отношение энергии теплового излучения (E_{out}) к падающей энергии ТГц-излучения (E_{in}). Программный пакет COMSOL Multiphysics

позволяет смоделировать этот параметр. Эффективность конверсии η (другими словами КПД конверсии) рассчитывалась посредством следующих формул:

$$\eta = 100\% \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}},$$

$$E_{\text{out}} = \int_0^{t_{\text{last}}} \int_0^R \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{fix}}^4) (2\pi r dr) dt,$$

$$E_{\text{in}} = \int_0^{t_{\text{on}} + t_{\text{trans}}} \int_0^R P(t, r) (2\pi r dr) dt \cong t_{\text{on}} p \pi (R/2)^2 \cong 0.0147262 \text{ Дж},$$

$p = 10 \text{ Вт/м}^2$ – амплитуда плотности мощности падающего излучения.

Временная зависимость плотности мощности указана на рисунке 3.3, время суммирования энергии теплового излучения $t_{\text{last}} = 20 \text{ с}$.

Результаты моделирования приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 — Эффективность конверсии

Толщина диэлектрика h_{pp} , м	Расчётная эффективность конверсии (отношение излученной энергии к поглощенной) η , %
3×10^{-6}	92.2
10×10^{-6}	92.0
20×10^{-6}	88.9

Из таблицы 3.2 видно, что конвертер обладает весьма хорошей эффективностью – потери менее 10%. Уменьшение эффективности конверсии при толщине диэлектрика 20 мкм объясняется тем, что с увеличением толщины слоя полипропилена увеличивается время остывания. Это приводит к тому, что за счет латеральной теплопроводности через боковую границу конвертера успевают уйти большее количество энергии и, тем самым, уменьшается доля энергии ушедшей через тепловое излучение.

3.5 Линейность преобразования

Другой важной характеристикой любого детектора является линейность преобразования. Поскольку инфракрасная камера является линейным детектором по температуре наблюдаемого объекта, то линейность конвертера оценивалась по линейности зависимости максимального изменения температуры (ΔT_{\max}) от амплитуды падающей мощности ТГц-излучения. На рисунке 3.6 показана расчётная зависимость ΔT_{\max} от амплитуды плотности мощности падающего ТГц-излучения p .

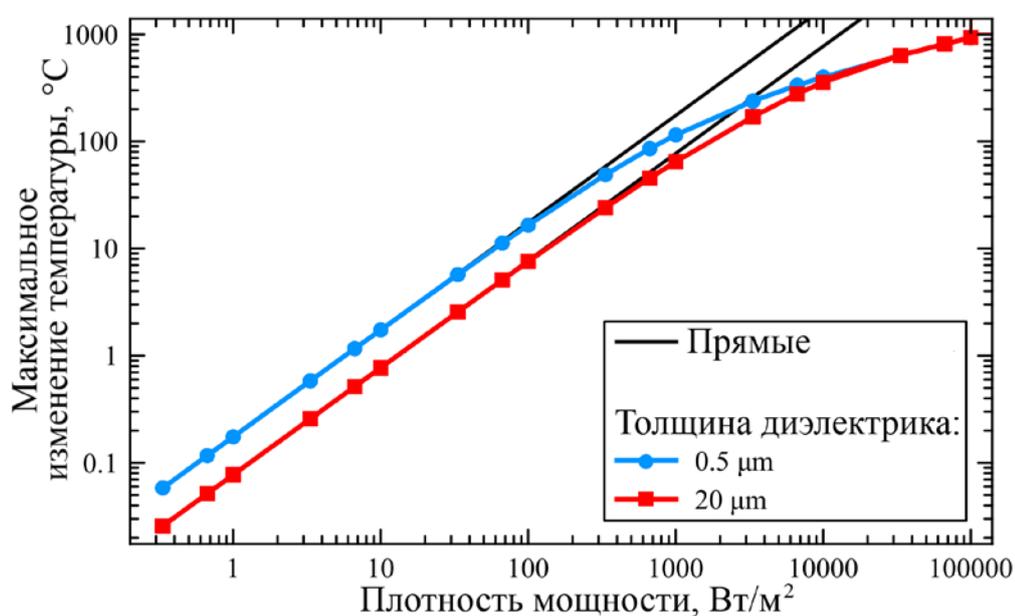


Рисунок 3.6 — Зависимость максимального изменения температуры конвертера (ΔT_{\max} , К) от амплитуды плотности мощности излучения (p , Вт/м²) для толщин конвертера 0.5 и 20 мкм

Из рисунка видно, что для указанных толщин диэлектрика линейность детектора составляет заведомо более трёх порядков, что является достаточно хорошим показателем. Насыщение зависимости наступает только при изменении температуры более, чем на 50 К, что лежит за пределами реальных рабочих температур конвертера.

3.6 Влияние латеральной теплопроводности на пространственное разрешение конвертера

Одной из важных характеристик матричного детектора изображения является эффект расплывания изображения (блюминг), обусловленный электрической или тепловой связью соседних пикселей, и характерен для матричных детекторов всех типов. В случае описываемого конвертера расплывание изображения обусловлено латеральной теплопроводностью вдоль структуры конвертера. Для исследования данного эффекта задача была видоизменена. Цилиндрическая система координат была заменена на декартовую систему, а конвертер рассматривался не круглой, а квадратной апертуры. В прямоугольной системе координат удобнее разбить структуру конвертера на условные прямоугольные пиксели, чтобы исследовать процесс расплывания изображения. Размер ТГц-пикселя выбирался равным около 1 мм, т.е. масштаба рабочей длины волны излучения.

При рассмотрении квадратного конвертера нам пришлось уменьшить его размер по сравнению с круглым конвертером из-за ограничений возможностей программного пакета COMSOL Multiphysics. На рисунке 3.7 показана схема конвертера в декартовой системе координат. Начало системы координат внизу в центре конвертера, ось z направлена вверх, оси x и y параллельны сторонам. Длина стороны квадратного конвертера равна 24 мм, основой его является слой диэлектрика (в нашем случае полипропилена). Снизу на диэлектрик нанесен слой алюминия толщиной 0.5 мкм. Конвертер «условно» разделён на квадратные пиксели с размером стороны 1.2 мм. Освещаемая ТГц-излучением прямоугольная область занимает центральные 10×10 пикселей. Временная зависимость плотности мощности ТГц-излучения задаётся уравнением (3.2) и на рисунке 3.2 показана сплошной линией. Амплитуда импульса мощности равнялась $p = 10 \text{ Вт/м}^2$.

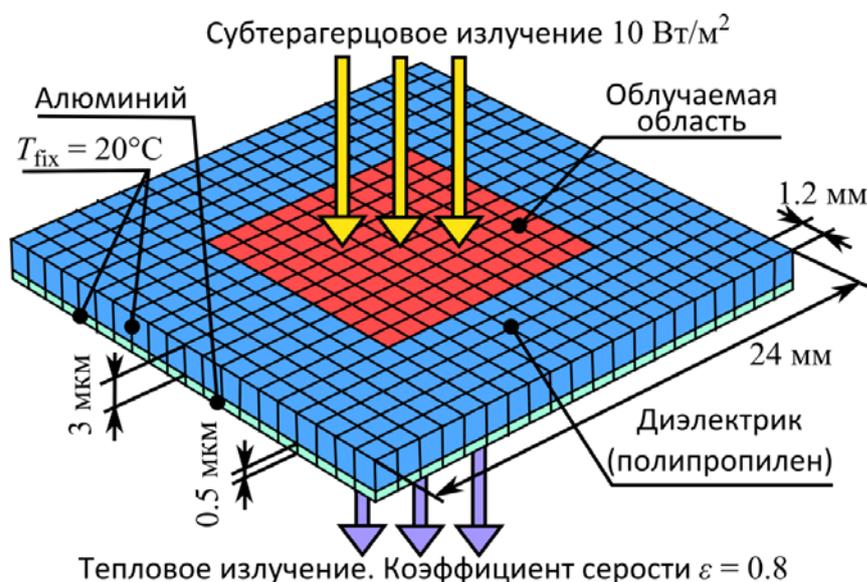


Рисунок 3.7 — Геометрическая модель квадратного конвертера. Начало системы координат внизу в центре конвертера, ось z направлена вверх, оси x и y параллельны сторонам. Условные обозначения: T_{fix} – фиксированная температура по периметру конвертера, ε – коэффициент серости поверхности алюминия, красным цветом обозначена облучаемая область

При расчёте учитывалась теплопроводность слоев конвертера и тепловое излучение со стороны, противоположной падающему излучению. Конвертер также находится в вакууме. Тепловое излучение со стороны падающего излучения также не рассматривалось, считая коэффициент серости данной поверхности равным нулю. Температура по периферии конвертера принималась фиксированной и равной 293.15 К. Начальная температура так же полагалась равной 293.15 К.

На рисунке 3.8 показано рассчитанное пространственное распределение изменения температуры по поверхности описанного конвертера с диэлектриком толщиной 3 мкм. Черным квадратом ограничена освещаемая область. Из рисунка видно, что тепловое поле значительно расплывается. Такое распределение будет приводить к значительному расплыванию получаемого изображения. Для уменьшения данного эффекта был рассмотрен конвертер со сквозными разрезами, не нарушающими целостности всей структуры. Разрезы имеют вид штриховых

линий, расположенных на границах «условных» пикселей, формируя тем самым матричную структуру из реальных пикселей.

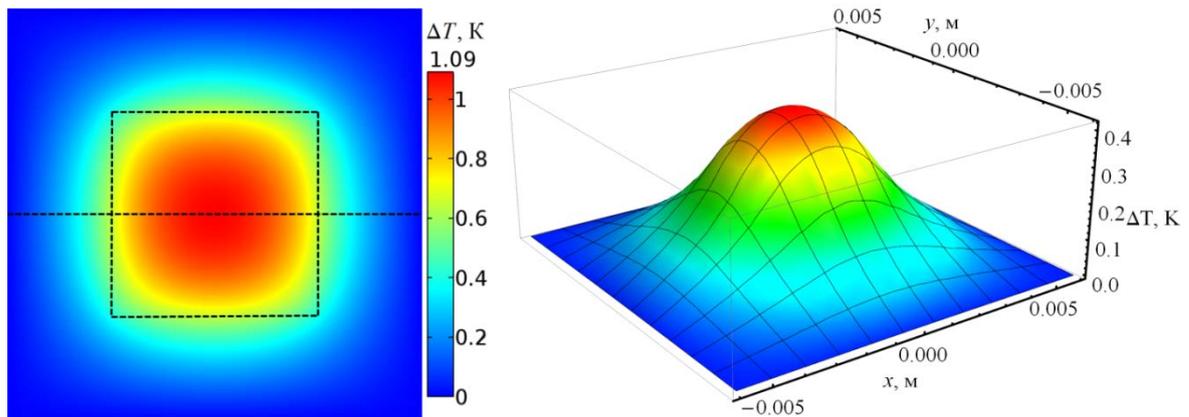


Рисунок 3.8 — Распределение величины изменения температуры ΔT по поверхности квадратного конвертера. Вдоль пунктирной линии брался разрез для дальнейших построений. Черным квадратом ограничена облучаемая область.

Разрезы, в зависимости от технологии их изготовления, могут быть разного типа. Первый тип – сквозные разрезы изготавливаются во всей структуре после формирования всех слоев конвертера. Второй тип – разрезан только алюминиевый слой на изолированные квадраты. Расстояние между квадратами бралось равным ширине сквозных разрезов в первом случае. Полипропилен при этом не разрезается. Третий тип – комбинация первых двух, алюминиевый слой разрезан на изолированные квадраты, а в полипропилене изготовлены сквозные разрезы в виде штриховых линий в промежутках между пикселями.

Для рассмотрения конвертера с разрезами задача должна быть видоизменена. Задача теплопроводности в данном случае описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T = k \left(\frac{\partial T}{\partial x^2} + \frac{\partial T}{\partial y^2} + \frac{\partial T}{\partial z^2} \right), \quad (3.3)$$

$T(t, x, y, z)$ – температура, t – время, z – толщина,

x, y – координаты вдоль сторон конвертера,

$\rho(z)$ – плотность, $k(z)$ – коэффициент теплопроводности,

$C_p(z)$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении.

Область определения функции T :

$$t \in [0, t_{\text{last}}], \quad x, y \in [-a/2, a/2], \quad z \in [0, h_{\text{al}} + h_{\text{pp}}],$$

$d_{\text{pix}} = 1.2 \times 10^{-3}$ м – размер стороны одного пикселя,

$a = 20 d_{\text{pix}} = 24 \times 10^{-3}$ м – размер стороны конвертера,

$h_{\text{al}} = 0.5 \times 10^{-6}$ м – толщина слоя алюминия,

$h_{\text{pp}} = 3 \times 10^{-6}$ м – толщина слоя полипропилена,

$t_{\text{last}} = 10$ с – время, до которого производился расчет.

$$(\rho, C_p, k) = \begin{cases} (\rho_{\text{al}}, C_{p,\text{al}}, k_{\text{al}}), & 0 < z < h_{\text{al}} \\ (\rho_{\text{pp}}, C_{p,\text{pp}}, k_{\text{pp}}), & h_{\text{al}} < z < h_{\text{al}} + h_{\text{pp}} \end{cases}$$

$\rho_{\text{al}}, \rho_{\text{pp}}$ – плотность алюминия и полипропилена, соответственно,

$C_{p,\text{al}}, C_{p,\text{pp}}$ – удельная теплоемкость при постоянном давлении алюминия и полипропилена, соответственно,

$k_{\text{al}}, k_{\text{pp}}$ – коэффициенты теплопроводности алюминия и полипропилена, соответственно.

Значения этих коэффициентов указаны в таблице 3.1.

Начальная температура конвертера равнялась 293.15 К,

$$T|_{t=0} = T_{\text{fix}},$$

$T_{\text{fix}} = 293.15$ К – температура окружающей среды,

Граничные условия:

1. граничные условия сопряжения при $z = h_{\text{al}}$:

$$\lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^-} T|_{z=\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^+} T|_{z=\Delta z},$$

$$\lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^-} k_{\text{al}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\Delta z} = \lim_{\Delta z \rightarrow h_{\text{al}}^+} k_{\text{pp}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=\Delta z},$$

означают равенство температур и тепловых потоков на границе между полипропиленом и алюминием,

2. по внешней боковой границе конвертера температура полагалась фиксированной и равной 293.15 К,

$$T|_{S_{\text{side}}} = T_{\text{fix}},$$

$S_{\text{side}} = S \cap \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid |x| = a / 2 \vee |y| = a / 2\}$ – внешняя боковая граница конвертера, где S – поверхность конвертера с учетом всех разрезов.

3. поверхность алюминия (с нижней стороны конвертера) имеет коэффициент серости равный 0.8, и является источником теплового излучения, которое задается в виде граничного условия:

$$k_{\text{al}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{S_{\text{em}}} = \varepsilon \sigma (T_{\text{fix}}^4 - T^4|_{S_{\text{em}}}),$$

$\sigma = 1.380648813 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана,

$\varepsilon = 0.8$ – коэффициент серости,

$S_{\text{em}} = S \cap \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid z = 0\}$ – поверхность, с которой происходит тепловое излучение, где S – поверхность конвертера с учетом всех разрезов.

4. на верхнюю поверхность конвертера (со стороны полипропилена) в центральные 10×10 пикселей подается импульс излучения с амплитудой плотности мощности 10 Вт/м^2 . Причем, поглощение осуществляется только в тех местах полипропилена, которые закрыты слоем алюминия с противоположной стороны. Верхняя поверхность конвертера имеет коэффициент поглощения ТГц-излучения равный 1 и коэффициент серости $\varepsilon = 0$, что подразумевает отсутствие теплового излучения:

$$k_{\text{pp}} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{S_{\text{in}}} = f(t) g(x) g(y) p = P(t, x, y),$$

$$S_{\text{in}} = S_{\text{em}} + (0, 0, h_{\text{al}} + h_{\text{pp}}),$$

В этом уравнении слева – тепловой поток через поглощающую поверхность пластины, справа – распределение плотности мощности падающего излучения по поверхности и во времени.

S_{in} – поверхность, на которой поглощается проходящее излучение, совпадающая с поверхностью S_{em} с точностью до сдвига по оси z .

$$g(s) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |s| \leq 5 d_{\text{pix}} \\ 0, & 5 d_{\text{pix}} < |s| \leq 10 d_{\text{pix}} \end{cases}$$

$p = 10 \text{ Вт/м}^2$ – амплитуда плотности мощности проходящего ТГц-излучения,

Функция распределения мощности падающего излучения во времени $f(t)$ бралась той же самой, что и в уравнении (6), опять же достаточно гладкой формы, чтоб уменьшить влияние паразитарных осцилляций, возникающих в решении при использовании разрывной функции. Функция $f(t)$ изображена на рисунке 3.2.

5. На всех остальных поверхностях полагались граничные условия теплоизолированности, т.к. конвертер находится в вакууме.

$$\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \Big|_{S \setminus (S_{\text{side}} \cup S_{\text{em}} \cup S_{\text{in}})} = 0,$$

Данное дифференциальное уравнение, с граничными условиями для декартовой системы координат, решалось методом конечных элементов на временном отрезке от 0 до 10 секунд.

На рисунке 3.9 показаны распределения изменения температуры (ΔT) на поверхности конвертера при $t = 3.2$ с (в этот момент температура максимальная) для различных видов разрезов конвертера.

На рисунке 3.9, *а* показано распределение ΔT для конвертера с разрезами первого типа – сквозные разрезы во всех слоях. Из рисунка видно, что расплывание теплового поля остается существенным, благодаря высокой теплопроводности металла, оставшегося в перемычках между пикселями. На рисунке 3.9, *б* показано распределение ΔT для конвертера с разрезами второго типа – алюминий разрезан на изолированные квадраты, а полипропилен не разрезан. Из рисунка видно, что расплывание существенно уменьшилось, несмотря на то, что в полипропилене разрезы отсутствуют. Таким образом, полученные данные свидетельствуют об определяющем влиянии слоя алюминия на расплывание теплового поля, несмотря на его малую толщину.

На рисунке 3.9, *в* показано распределение ΔT для конвертера с разрезами третьего типа – алюминий разрезан на изолированные квадраты, а в полипропилене изготовлены сквозные разрезы, не нарушающие целостности структуры конвертера. Из рисунка видно, что в последнем расплывание теплового поля минимально.

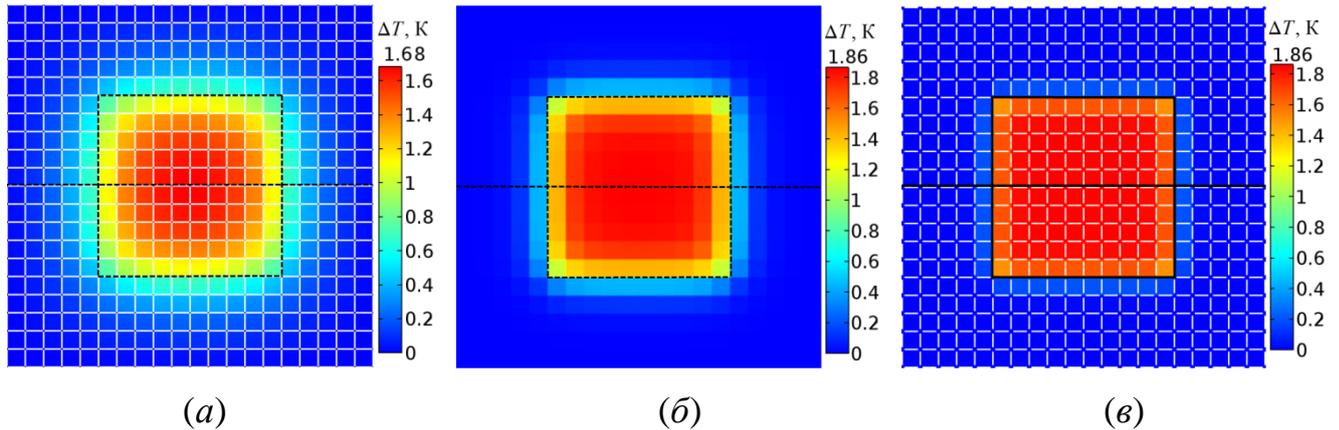


Рисунок 3.9 — Распределение изменения температуры (ΔT) на поверхности конвертера при $t = 3.2$ с (в этот момент температура максимальная) для различных видов разрезов конвертера. Вдоль серой линии брался разрез для дальнейших построений. Квадратом в центре ограничена облучаемая область
 Виды разрезов:

- а) – сквозные разрезы во всех слоях,
- б) – алюминий разрезан на изолированные квадраты, а полипропилен не разрезан,
- в) – алюминий разрезан на изолированные квадраты, а в полипропилене изготовлены сквозные разрезы.

Для количественного представления процесса расплывания на рисунке 3.10 вверху показаны разрезы пространственных распределений ΔT , показанных на рисунке 3.8 и рисунке 3.9. Разрезы проводились вдоль серых линий, указанных на рисунке 3.8 и рисунке 3.9. На рисунке 3.10 внизу показаны те же разрезы, нормированные на максимум. Цифрами на рисунке 2.3.9 показаны 1 – конвертер без разрезов, 2 – конвертер со сквозными разрезами по всем слоям, 3 – алюминий разрезан на изолированные квадраты, а полипропилен не разрезан, 4 – алюминий разрезан на изолированные квадраты, а в полипропилене изготовлены сквозные разрезы в виде штрихов. Черным цветом показана освещённая излучением область конвертера (см. рис. 3.8).

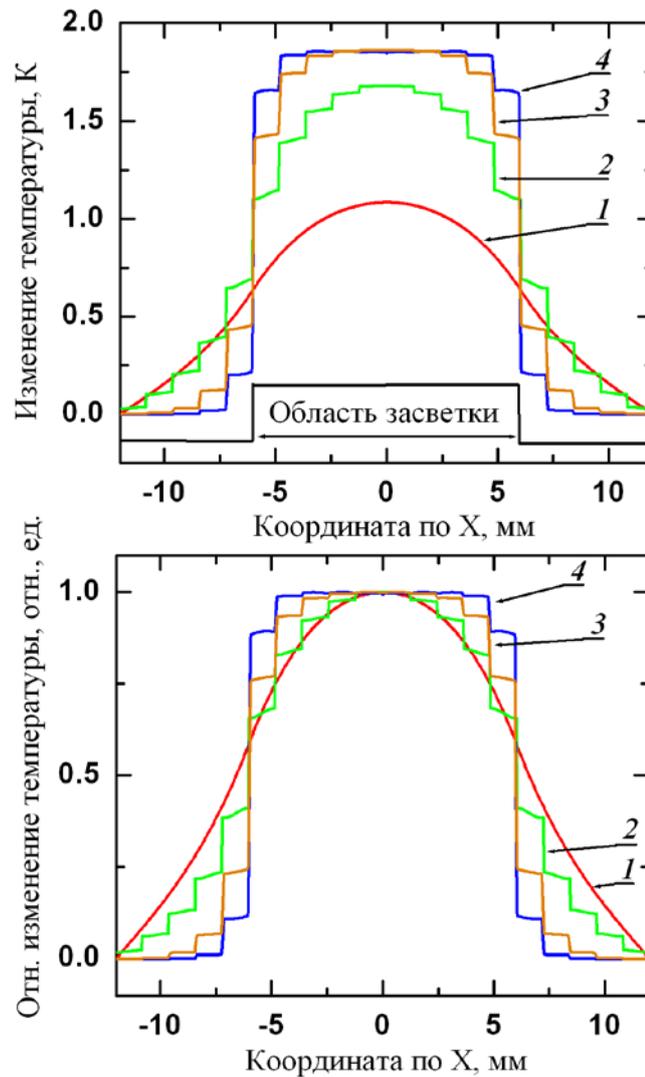


Рисунок 3.10 — Разрезы пространственных распределений ΔT , представленных на рисунке 3.8 и рисунке 3.9. Вверху исходные разрезы, внизу – нормированные на максимум,

1 – конвертер без разрезов,

2 – конвертер со сквозными разрезами по всем слоям,

3 – алюминий разрезан на изолированные квадраты, а полипропилен не разрезан,

4 – алюминий разрезан на изолированные квадраты, а в полипропилене изготовлены сквозные разрезы в виде штрихов

Также, из рисунка видно, что сквозные разрезы не обеспечивают существенного уменьшения эффекта расплывания. Зато расплывание резко уменьшается, если алюминиевый слой разрезан на изолированные квадраты, даже без сквозных разрезов в полипропиленовой плёнке. Это свидетельствует о том,

что алюминиевый слой, несмотря на малую толщину 0.4–0.5 мкм по сравнению с полипропиленовой плёнкой 3 мкм, вносит определяющий вклад в эффект расплывания изображения. Так же видно, что оптимальные разрезы (кривая 4 на рисунке 3.10) приводят к увеличению изменения температуры почти в два раза. К тому же, из рисунка 3.10 вверху видно, что и чувствительность (ΔT) для конвертера с разрезами алюминия на изолированные квадраты без разреза полипропилена уменьшается меньше по сравнению со сквозными разрезами всей структуры.

3.7 Эффективность конверсии терагерцового излучения в инфракрасное для конвертера с разрезами

Для конвертера с разрезами, также как и для конвертера без разрезов, рассчитывалась эффективность конверсии.

$$\eta = 100\% \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}}, \quad E_{\text{out}} = \int_0^{t_{\text{last}}} \iint_{S_{\text{em}}} \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{fix}}^4) dx dy dt,$$

$$E_{\text{in}} = \int_0^{t_{\text{on}} + t_{\text{trans}}} \iint_{\mathbb{R}^2} P(t, x, y) dx dy dt \cong t_{\text{on}} p (10 d_{\text{pix}})^2 = 0.00108 \text{ Дж},$$

S_{em} – поверхность, с которой происходит тепловое излучение.

$p = 10 \text{ Вт/м}^2$ – амплитуда плотности мощности падающего излучения.

Временная зависимость плотности мощности указана на рисунке 3.2, время суммирования энергии теплового излучения $t_{\text{last}} = 10 \text{ с}$. Результаты моделирования приведены в таблице 3.3. Из таблицы видно, что эффективность конверсии квадратного конвертера без разрезов меньше, чем круглого конвертера, рассчитанного выше. Это связано с тем, что расстояние между освещённой областью и краем конвертера с фиксированной температурой для квадратного конвертера в два раза меньше, чем для круглого, тем самым поток тепла, уходящего вдоль конвертера и не участвующего в тепловом излучении выше, что даёт уменьшение эффективности конверсии.

Таблица 3.3 — Величина эффективности конверсии от типа разрезов

п/п	Вид разрезов	Эффективность конверсии η , %
1	Разрезов нет (на боковой границе фиксированная температура)	62.3
2	В алюминии и диэлектрике разрезы длиной 1.08 мм и шириной 0.1 мм.	78.1
3	Алюминий разрезан на изолированные ячейки (ширина разреза 0.1 мм), в диэлектрике разрезов нет.	82.6
4	Алюминий разрезан на изолированные ячейки (ширина разреза 0.1 мм), в диэлектрике разрезы длиной 0.9 мм и шириной 0.1 мм.	82.8

Изготовление разрезов любого типа приводит к увеличению эффективности конверсии, что естественно. Следует отметить, что эффективность конверсии конвертеров по п.3 и п.4 таблицы 3.3 (отличие в присутствии (отсутствии) разрезов в полипропилене) практически одинаковы, что свидетельствует о слабом влиянии теплопроводности по слою полипропилена на эффективность конверсии.

3.8 Оценка вклада теплообмена с воздушной средой и величины тепловой связи между пикселями

С помощью моделирования было показано, что вклад теплопроводности окружающей воздушной среды (теплопроводность плюс конвекция), пренебрежимо мал из-за медленности процесса по сравнению с радиационным и латеральным кондуктивным тепловым потоком. Была изготовлена специальная вакуумная камера для ТГц-конвертера и экспериментально было показано, что присутствие (отсутствие) воздуха практически не сказывается на чувствительности и быстродействии регистрации подвижного изображения.

Важным параметром матричных тепловых детекторов является величина межпиксельной тепловой связи, обусловленной перетеканием тепловой энергии между двумя соседними пикселями матричной структуры. Чем меньше эта связь, тем меньше эффект блюминга, тем лучше качество получаемого изображения. Величина межпиксельной связи может быть оценена исходя из простой схемы одного пикселя с разрезами и её эквивалентной тепловой схемы, показанные на рисунке 3.11 [147].

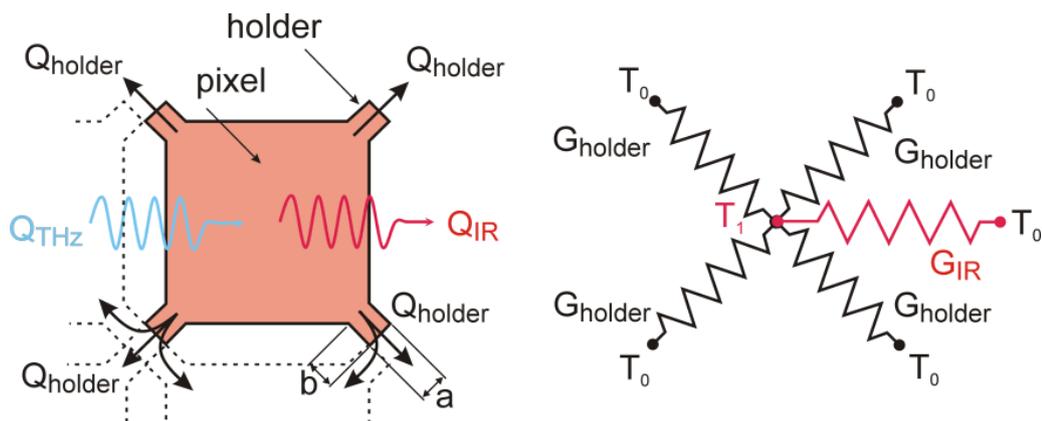


Рисунок 3.11 — Схема пикселя конвертера со сквозными разрезами для оценки потоков тепла между соседними пикселями (слева) и эквивалентная тепловая схема (справа)

Каждый пиксель состоит из конвертера квадратной формы, который через переключки-держатели шириной a и длиной b соединен с соседними пикселями. В поглотителе выделяется тепловая энергия, равная величине потока энергии терагерцового излучения (Q_{THz}) при условии величины коэффициента поглощения равного единице. Данная энергия уходит из пикселя за счет теплопроводности через переключки-держатели (Q_{holder}) и за счет теплового излучения (Q_{IR}), при условии нахождения пикселя в вакууме. Пунктирной линией показаны соседние пиксели. Эквивалентная тепловая схема пикселя показана на рисунке 3.11 справа, где G_{holder} – величина теплового сопротивления переключки-держателя, G_{IR} – эквивалентное «сопротивление» теплового излучения, T_0 – температура соседних пикселей, T_1 – температура пикселя вследствие поглощения излучения.

Потоки энергии, обусловленные теплопроводностью через перемычки-держатели Q_{holder} , определяется уравнением:

$$Q_{\text{holder}} = k \frac{S}{L} \Delta T = k \frac{a \times d}{b} \Delta T, \quad (3.4)$$

где k – коэффициент теплопроводности материала конвертера, S – сечение держателя, d – толщина держателя (конвертера), $\Delta T = T_1 - T_0$ – изменение температуры пикселя в результате поглощения излучения. Согласно схеме на рисунке 3.11 тепловой поток Q_{holder} через один держатель распределяется между тремя соседними пикселями, а каждый пиксель соединен с одним соседним пикселем с помощью двух держателей. Следовательно, теплопроводность от одного пикселя до другого соседнего пикселя равна $2 \times (Q_{\text{holder}} / 3)$. Предположим, что держатель состоит только из полипропиленовой пленки толщиной $d = 20$ мкм, $a = b$, $k = 0.15$ Вт / (м×К) для полипропилена. Такое предположение обусловлено возможностями технологии лазерной резки (см. раздел 2.3 ниже) удалить металлический и эмиссионный слой с перемычек, не затронув пленку полипропилена. Используя эти параметры, получаем выражение для межпиксельной связи:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пиксел-пиксел}} &= 2 \times Q_{\text{holder}}/3) \frac{1}{\Delta T} = \frac{2}{3} k \times d = \\ &= \frac{2}{3} \times 0.15 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \times \text{К}} \times 20 \times 10^{-6} \text{м} = 2 \frac{\text{мкВт}}{\text{К}} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Данная величина считается приемлемой для получения качественного изображения.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 3

В работе проведено моделирование теплофизических процессов в структуре ТГц-ИК-конвертера, возникающих при освещении конвертера ТГц-излучением, с целью определения предельных характеристик детектора изображения на основе данного конвертера и инфракрасной камеры. Моделирование позволило определить следующие параметры: минимальную обнаруживаемую мощность

детектируемого излучения (NEP), время отклика, эффективность конверсии. Моделировались также процессы расплывания изображения. Полученные значения минимальной обнаруживаемой плотности мощности 0.25 Вт/м^2 соответствуют лучшим современным тепловым детекторам. Время отклика оказалось достаточно большим: около 1 секунды при толщине диэлектрика 3 микрометра и толщине металла 0.5 микрометра. Однако, полученная с помощью моделирования, линейная зависимость времени срабатывания от толщины указывает путь для повышения быстродействия детектора – дальнейшее уменьшение толщины диэлектрика. С точки зрения теории резонансного поглотителя толщина ограничивается только технологическими возможностями изготовления конструкции конвертера. Эффективность конверсии оказалась достаточно высокой – потери в конвертере при его оптимальной конфигурации не превышают 20%. Эффект расплывания изображения может быть существенно уменьшен изготовлением соответствующих разрезов в структуре конвертера. Таким образом, полученные при помощи моделирования параметры детектора изображения на основе описанного конвертера показывают перспективность данного подхода для создания односпектральных и многоспектральных детекторов терагерцового излучения.

ГЛАВА 4 ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ РЕЗКА В ТЕХНОЛОГИИ ТГц→ИК КОНВЕРТЕРА

Разработка методик лазерной резки по поручению автора была выполнена Лоншаковым Евгением, на тот момент сотрудником Института лазерной физики СО РАН [148, 149].

Для разработки технологии лазерной резки многослойной структуры конвертера использовались две установки.

4.1 Установки для лазерной резки структуры конвертера

Установка лазерной резки №1

Оптическая схема установки и внешний вид приведены на рисунках 4.1 и 4.2.

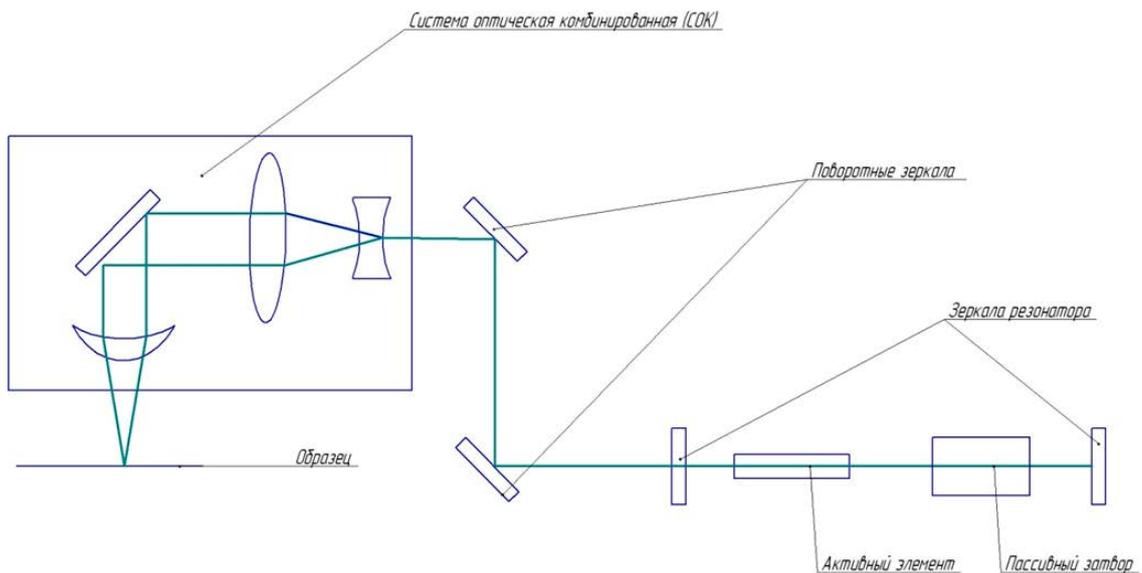


Рисунок 4.1 — Оптическая схема установки лазерной резки с ламповой накачкой

Установка обладает следующими характеристиками:

Средняя мощность излучения в свободном режиме генерации 49,5 Вт. В режиме модуляции добротности 25 Вт. Частота работы лазера 100 Гц. Длительность импульса лампы составляет 250 мкс. Модуляция добротности осуществляется введением в резонатор кристаллов LiF играющих роль пассивного затвора (рис.4.3).



Рисунок 4.2 — Внешний вид установки лазерной резки с ламповой накачкой

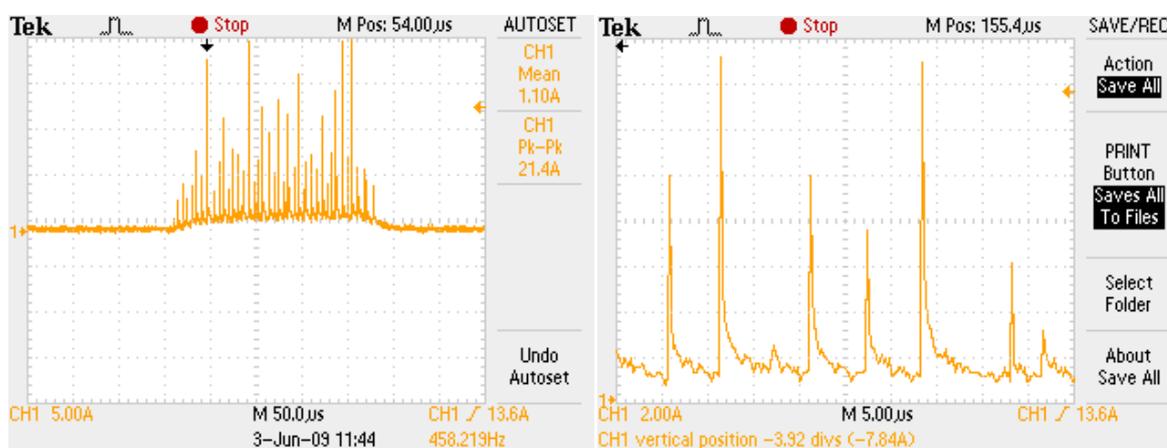


Рисунок 4.3 — Осциллограммы световых импульсов с пассивной модуляцией добротности установки №1

Установка лазерной резки №2

Установка VITROLUX-UC состоит из закрытого лазерного излучателя, оптическая схема которого представлена на рисунке 4.4, и координатного стола со сканирующей головкой. Диодный блок посредством волокна и фокусирующей головки осуществляет непрерывную накачку активного элемента, в котором развивается генерация при открытии электрооптического затвора. Частота работы затвора составляет 2 кГц. Длительность импульсов составляет 15-20 нс. В данной схеме используется внрезонаторное однопроходное удвоение частоты излучения. Остаточное излучение на длине волны 1064 нм подавляется селективной оптикой. Средняя мощность излучения установки составляет 3 Вт.

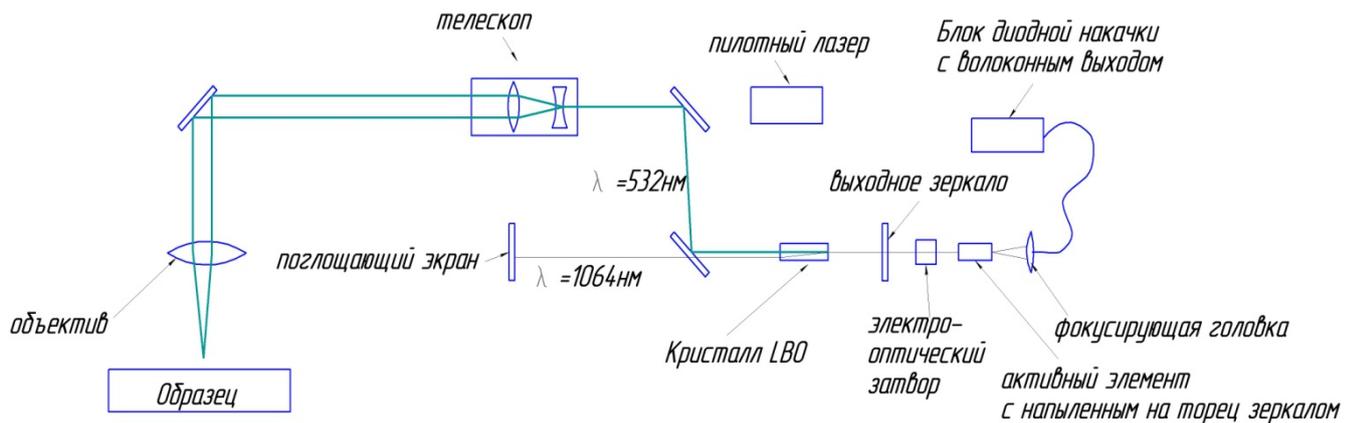


Рисунок 4.4 Схема установки лазерной резки с диодной накачкой

4.2 Идеология выбора режима лазерной резки многослойной структуры

Сложность реза многослойной структуры при помощи лазера обусловлена разностью таких свойств материалов как: коэффициент поглощения лазерного излучения, температура испарения, прочность на растяжения, тепловые коэффициенты расширения, скорость распространения тепловой волны и т.д. Указанные различия в свойствах материалов слоев приводят к ряду проблем при резке образца. В нашем случае основными проблемами является осыпание слоя чернения и разрушение металлического слоя вследствие распространения тепловой волны вдоль поверхности структуры при мощностях, необходимых для реза полипропилена. В случае реза трехслойной структуры металл-полипропилен-графит необходимо выбирать режим, оптимальный для реза полипропилена, т.к. именно этот слой является каркасным, при этом не нарушать прилегающие слои металла и графита.

На рисунке 4.5 приведен спектр пропускания полипропилена. Из рисунка видно, что поглощение тем выше, чем меньше длина волны, поэтому рез полипропилена наиболее целесообразно проводить при помощи оптического и ультрафиолетового излучения.

Общие соображения по выбору параметров импульса хорошо описаны в статье [150].

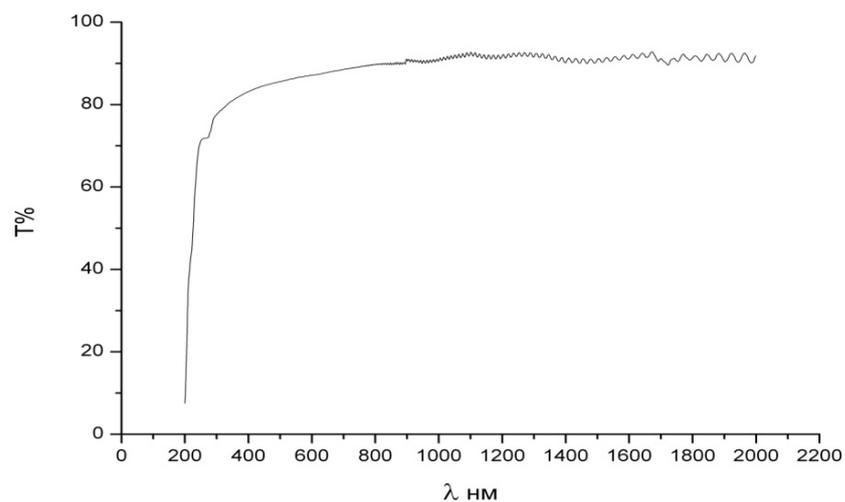


Рисунок 4.5 — Спектр пропускания полипропилена толщиной 30 мкм

4.3 Изготовление структуры конвертера со сквозными разрезами

Наиболее качественные результаты были получены на установке №2 (рисунки 4.6, а, б, в, г).

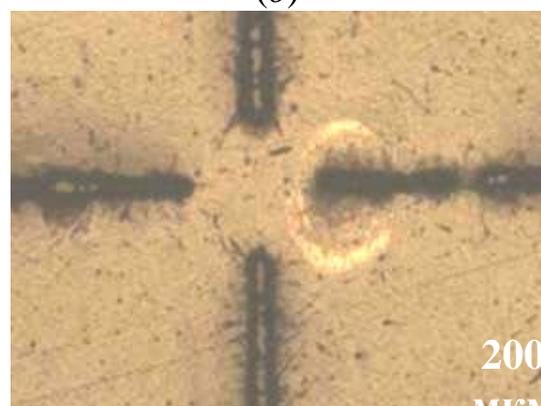
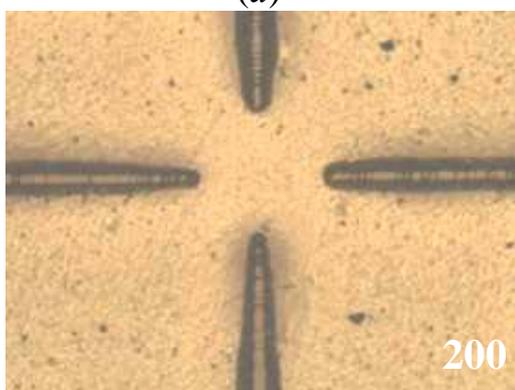


Рисунок 4.6 — Фотографии разрезов

(а) частота 2 кГц. Ток диода накачки $0,75 I_{\max}$; ширина разреза ≈ 400 мкм, ширина разрушенного слоя ≈ 150 мкм,

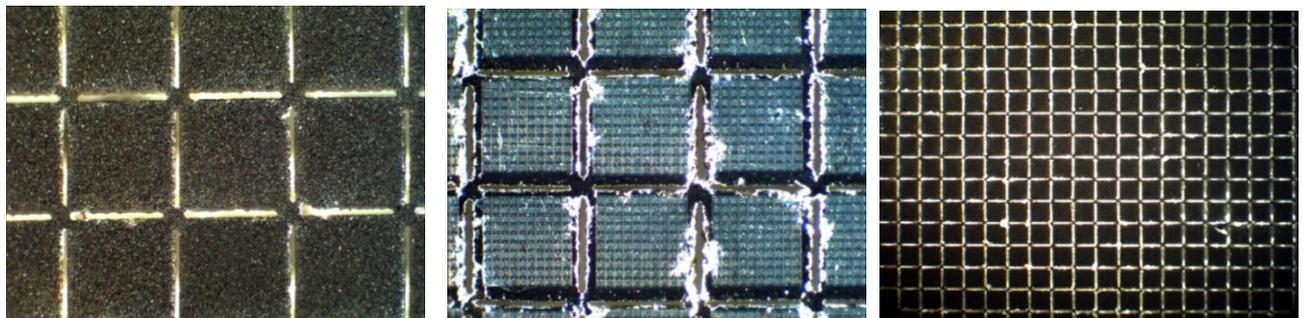
(б) частота 2 кГц. Ток диода накачки $0,625 I_{\max}$; ширина разреза ≈ 200 мкм, ширина разрушенного слоя ≈ 120 мкм,

(в) частота 2 кГц. Ток диода накачки $0,57 I_{\max}$; ширина разреза ≈ 50 мкм, ширина разрушенного слоя ≈ 70 мкм,

(г) частота 2 кГц. Ток диода накачки $0,525 I_{\max}$; ширина разреза ≈ 25 мкм, ширина разрушенного слоя ≈ 35 мкм

Необходимо отметить, что полипропилен чувствителен к нестабильности световых импульсов, вследствие чего установка №2 оказалась более эффективной по сравнению с установкой №1, т.к. последней присущи флуктуации значения энергии в импульсе, вследствие использования пассивного затвора.

На рисунках 4.7, а, б, в показаны фотографии полученных структур со стороны графитового эмиссионного слоя (а), со стороны поглощающего слоя (б) и на просвет, демонстрирующие качество разрезов.



(а)

(б)

(в)

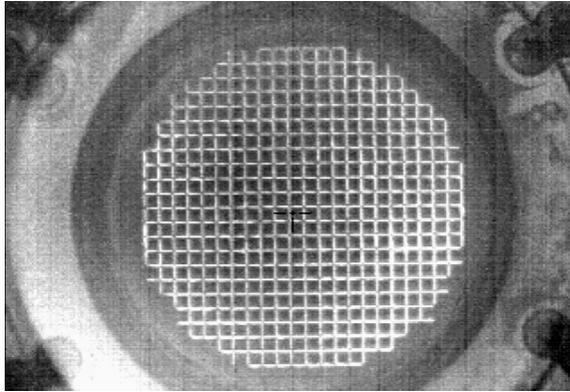
Рисунок 4.7 — Фотографии разрезов, размер ячейки 1×1 мм²,

(а) – вид со стороны графитового слоя,

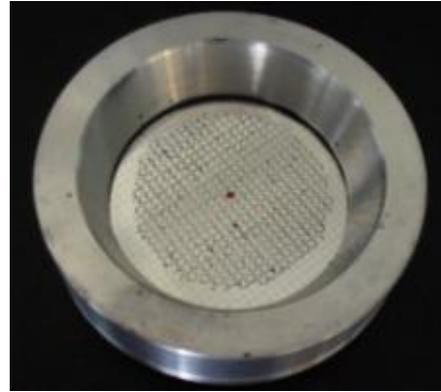
(б) – вид со стороны поглотителя,

(в) – вид структуры конвертера на просвет

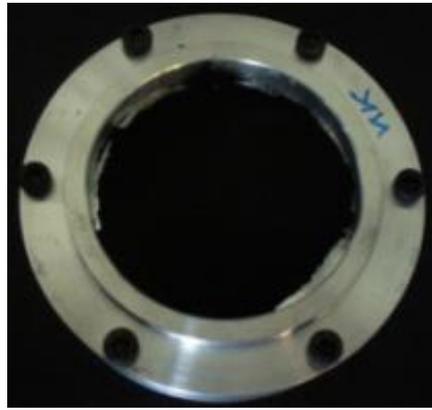
На рисунке 4.8 показан вид поглотителя с разрезами с рабочей апертурой 30 мм в оправе со стороны метапоглотителя (а), (б) и со стороны эмиссионного слоя (в).



(а)



(б)



(в)

Рисунок 4.8 — Фотографии поглотителя с разрезами в оправе, (а), (б) – со стороны поглотителя, (в) – со стороны эмиссионного слоя

Здесь следует вернуться к таблице 2.2.3 и рисунку 2.2.10. Из этих данных следует, что наличие или отсутствие разрезов в слое полипропилена слабо влияет на параметры конвертера – коэффициент эмиссии и расплывание изображения. Это обстоятельство существенно облегчает технологию лазерной резки конвертера, так как в этом случае можно воспользоваться излучением ультрафиолетового лазера небольшой мощности, например импульсным азотным лазером ЛГИ-21 с рабочей длиной волны 0.337 мкм, средней мощностью 200 мВт, длительностью импульса 7 нс. Ультрафиолетовое излучение хорошо испаряет

метал и эмиссионный слой, при этом не оказывает существенного влияния на полипропилен и позволяет получить ширину разреза менее 30 мкм.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 4

Разработанная методика лазерной резки структуры ТГц-ИК-конвертера, содержащего материалы с сильно отличающимися оптическими и теплофизическими параметрами, позволяет изготавливать сквозные разрезы, не нарушающие целостность структуры конвертера, существенно снижающие эффект расплывание изображения и повышающие чувствительность ТГц-детектора. В результате были созданы экспериментальные образцы ТГц-детектора и исследованы его характеристики.

ГЛАВА 5 ДЕТЕКТОР ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ КОНВЕРТЕРА

5.1 Схема визуализации ТГц-излучения

На рисунке 5.1 показана схема визуализации ТГц-излучения.

Пучок ТГц-излучения из источника *1* формируется коллиматором *2* из прозрачного в ТГц-диапазоне материала. В экспериментах в качестве источника излучения использовалась лампа обратной волны (ЛОВ) с перестраиваемой частотой излучения или лавинно-пролетные диоды с фиксированной частотой. После освещения объекта наблюдения *3* изображение объекта проецируется на конвертер *5* с помощью объектива *4*. В результате поглощения ТГц-излучения происходит нагрев конвертера, что приводит к увеличению интенсивности теплового излучения со стороны эмиссионного слоя. Тепловое изображение конвертера регистрируется ИК-камерой, состоящей из инфракрасной проекционной системы *6* и ИК матричного фотоприёмного устройства *7*.

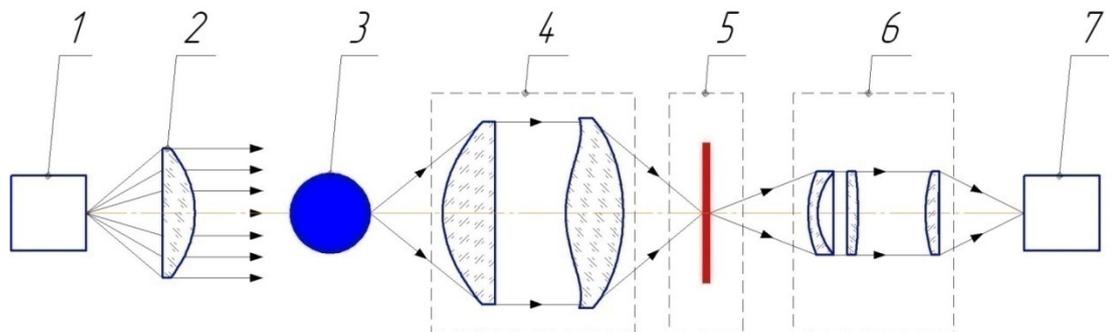


Рисунок 5.1 — Схема визуализации ТГц-излучения в геометрии на просвет. *1* – ТГц-источник; *2* – коллиматор; *3* – объект наблюдения; *4* – ТГц-объектив; *5* – ТГц-ИК-конвертер; *6* – ИК-объектив; *7* – ИК-ФПУ

Для реализации матричного ТГц-приёмника необходимо было разработать соответствующие оптические элементы, такие как ТГц-объектив для проецирования изображения объекта на поверхность ТГц-ИК-конвертера, а также проекционный объектив для передачи теплового изображения обратной поверхности конвертера в плоскость матрицы ИК-камеры. Расчёты объективов по

поручению и под руководством автора выполнил научный сотрудник Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» Хрящев Сергей Валерьевич [151, 152].

В работе решалась задача разработки оптических элементов для получения изображения в ТГц-диапазоне близко расположенных объектов: расстояние от передней поверхности ТГц-объектива до объекта 100 мм, поле зрения 50 мм. Данная схема может найти широкое применение в системах анализа скрытых объектов как альтернатива (или дополнение) рентгеновским системам, так как ТГц-излучение не является ионизирующим, при этом обладает достаточной проникающей способностью. Такие системы могут применяться в комплексе с досмотровыми системами в общественных местах, в строительстве для обнаружения скрытых полостей и трещин, анализа однородности материалов. ТГц-камеры находят применение в медицине и биологии, так как колебательные и вращательные моды сложных молекул находятся именно в ТГц-области спектра [153, 154, 155, 156].

Разработанная в данной работе схема основана на применении фотоприёмного устройства (ФПУ) типа Sofradir Epsilon MW с матрицей на основе соединения кадмий-ртуть-теллур с диагональю 7,2 мм и диапазоном спектральной чувствительности 3,6–4,9 мкм. Температурное разрешение ФПУ ≤ 40 мК, диаметр охлаждаемой диафрагмы 3,4 мм. ФПУ оснащено криостатом Sofradir и холодильной машиной Ricor (рис.5.2).



Рисунок 5.2 — ФПУ Sofradir Epsilon MW

5.2 Терагерцовый объектив

В качестве материалов для изготовления линз ТГц-объектива рассматривались наиболее доступные материалы: полиэтилен высокой плотности (HDPE), полиметилпентен (TPX™) и фторопласт (PTFE). На рисунке 5.3, *а* показаны спектральные характеристики коэффициента поглощения различных полимеров в диапазоне частот 0.3-5 ТГц. На рисунке 5.3, *б* показаны спектральные характеристики коэффициента пропускания этих же полимеров толщиной 10 мм в том же частотном диапазоне.

Наиболее актуальным диапазоном является частотный диапазон 0,1-1,0 ТГц, так как такие волны обладают достаточно высокой проникающей способностью в сочетании с приемлемым пространственным разрешением. Анализ спектральных характеристик отобранных материалов (HDPE, TPX™ и PTFE) в диапазоне 0,1-1,0 ТГц показал, что эти материалы обладают примерно одинаковым коэффициентом пропускания не менее 80% при толщине 10 мм (рис.5.3, *б*).

Поэтому для изготовления линз объектива был выбран фторопласт, как наиболее доступный больших размеров, к тому же, обладающий наименьшим коэффициентом преломления (рис.1.4), что уменьшает потери при отражении от поверхности.

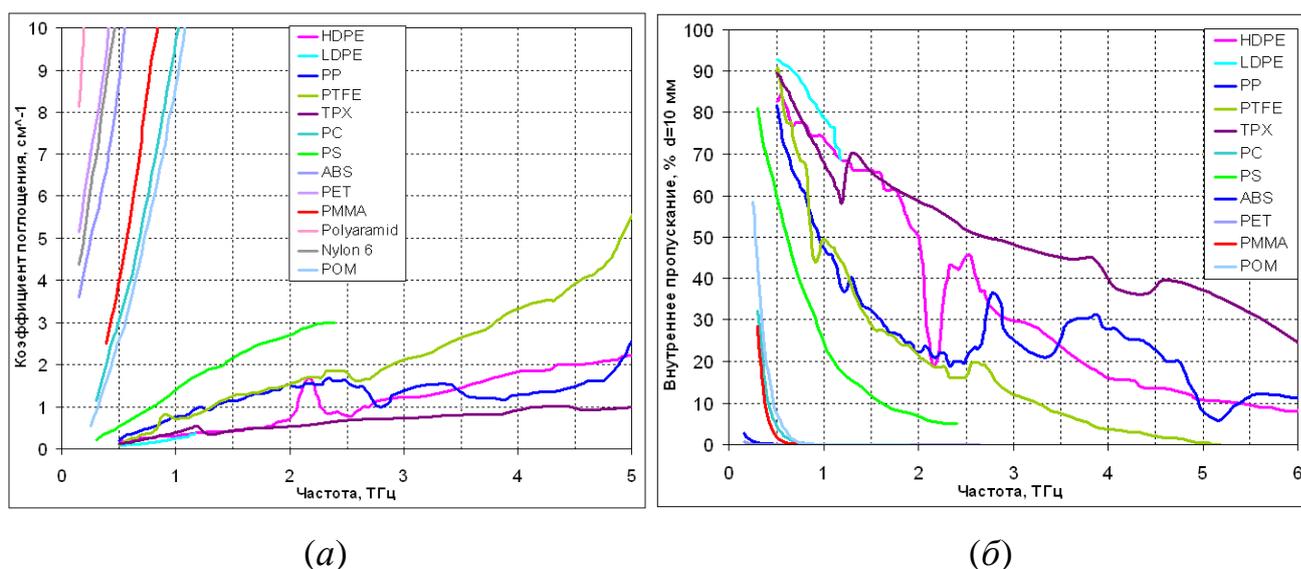


Рисунок 5.3 — Спектральные характеристики

(*а*) – коэффициента поглощения различных полимеров,

(б) – спектральные характеристики коэффициента пропускания этих полимеров при толщине 10 мм

Так как на сегодня отсутствуют технологии просветляющих покрытий для фторопласта, необходимо было свести количество линз к минимуму. При таких условиях качественное изображение на поверхности конвертера можно получить, используя только асферическую форму линз. Оптическая схема ТГц-объектива показана на рисунке 5.5.

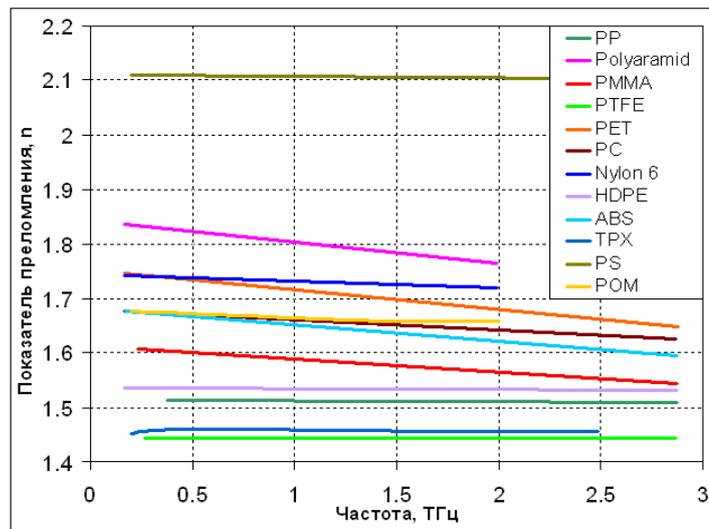


Рисунок 5.4 — Спектральные характеристики коэффициента преломления различных полимеров

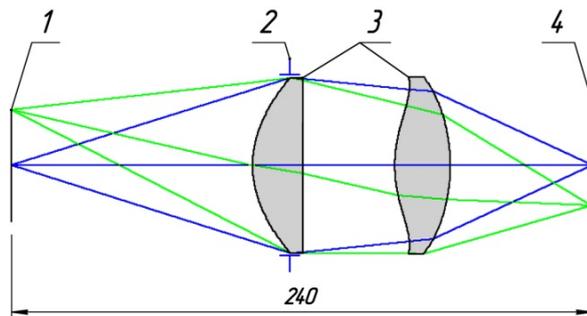


Рисунок 5.5 — Оптическая схема ТГц-объектива. 1 – плоскость объектов наблюдения; 2 – входной зрачок; 3 – асферические линзы; 4 – плоскость метаматериала конвертера.

Использование асферических поверхностей линз, которые описываются полиномом вида $Z(r)=\alpha_1r^2+\alpha_2r^4+\alpha_3r^6$, позволяет получить изображение дифракционного качества по всему полю изображения. Дисперсия показателя преломления фторопласта в ТГц-диапазоне составляет малую величину (рис. 5.4), благодаря чему объектив является ахроматическим для всего участка спектра.

Частотно-контрастная характеристика ТГц-объектива приведена на рисунке 5.6.

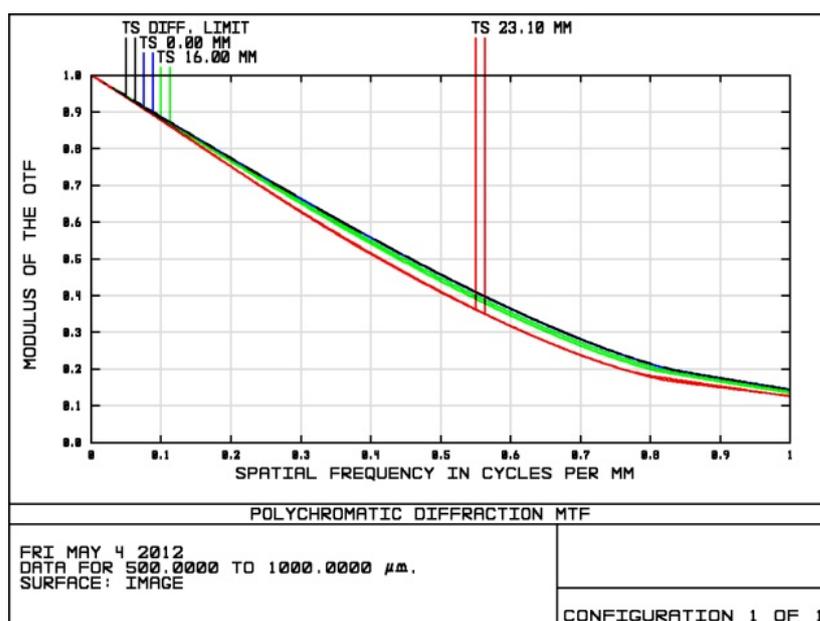


Рисунок 5.6 — Частотно-контрастная характеристика ТГц-объектива. Т и S – меридиональная и сагиттальная ЧКХ, соответствующая указанным размерам объекта наблюдения

5.3 Инфракрасный объектив

Для разработки проекционного ИК-объектива необходимо было решать нетрадиционную задачу передачи изображения. Обычно тепловизионные системы разрабатываются для наблюдения удалённых объектов. Здесь же задачей является передача теплового изображения конвертера на поверхность ИК-матрицы, разнесённых друг от друга на как можно меньшее расстояние для снижения весогабаритных параметров детектора и повышения коэффициента передачи энергии.

Оптическая схема ИК-объектива показана на рисунке 5.7. Оптическая система содержит три линзовых компонента в виде менисков со сферическими поверхностями, первый из которых изготовлен из германия, а два остальных из кремния. В спектральном диапазоне 3,6–4,9 мкм работы ФПУ, дисперсия показателя преломления германия и кремния мала (рис.5.8), что обеспечивает ахроматизацию объектива и коррекцию остальных aberrаций, обеспечивая качество изображения близкое к дифракционному.

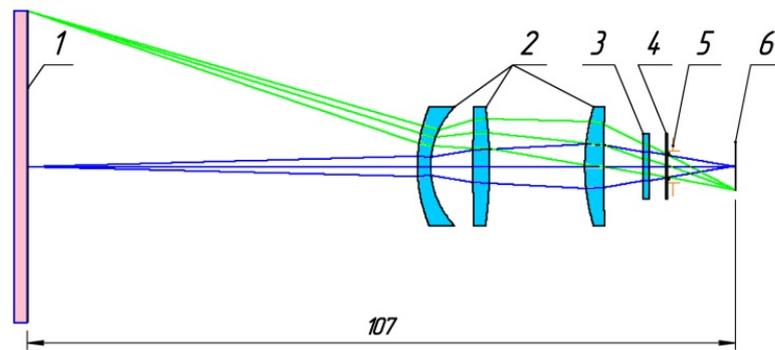


Рисунок 5.7 — Оптическая схема проекционного ИК-объектива. 1 – плоскость эмиссионного слоя конвертера; 2 – оптические компоненты; 3 – окно криостата; 4 – холодный фильтр; 5 – охлаждаемая диафрагма; 6 – плоскость фотоприёмника

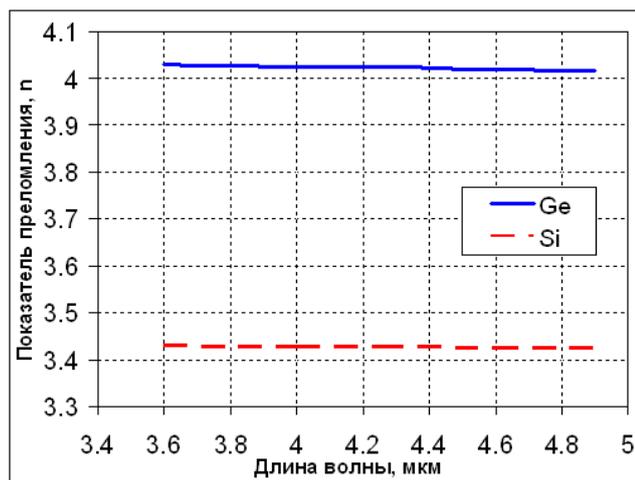


Рисунок 5.8 — Спектральные характеристики коэффициента преломления германия и кремния

В отличие от традиционной схемы расчёта ИК-объектива, в которой промежуточное изображение переносится дополнительной проекционной

системой в плоскость матрицы, расчёт данной схемы произведён без проекционной системы, что обеспечивает минимальное количество линз и высокое температурное разрешение за счёт малых потерь на отражении от линз. Выходной зрачок объектива расположен в плоскости охлаждаемой диафрагмы криостата, что позволяет исключить фоновое излучение от элементов конструкции объектива.

Частотно-контрастная характеристика ИК-объектива приведена на рис.5.9.

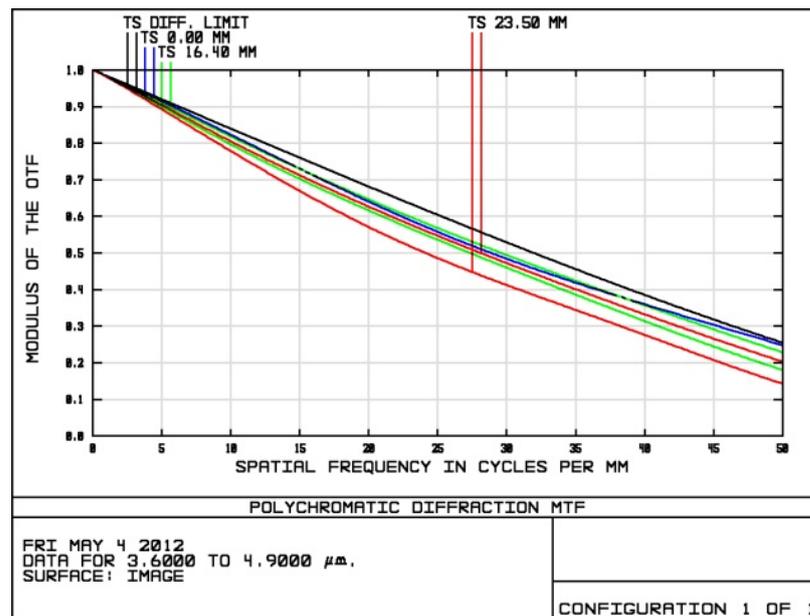


Рисунок 5.9 — Частотно-контрастная характеристика ИК-объектива. Т и S – меридиональная и сагиттальная ЧКХ, соответствующая указанным размерам изображения на конвертере

5.4 Конструкция матричного ТГц-детектора

На рисунке 5.10 показана конструкция и внешний вид реализованного матричного ТГц-детектора на основе ТГц–ИК-конвертера и охлаждаемого ИК-ФПУ Sofradir Epsilon MW. Длина камеры 375 мм, диаметр 110 мм, вес около 3 кг. Питание +12 В постоянного тока. Выходной сигнал: аналоговый видеовыход + цифровой сигнал по интерфейсу USB для передачи и обработки видеоизображения в компьютере. Разработка конструкции ТГц-детектора по поручению автора была выполнена Вергилесом Сергеем Александровичем.

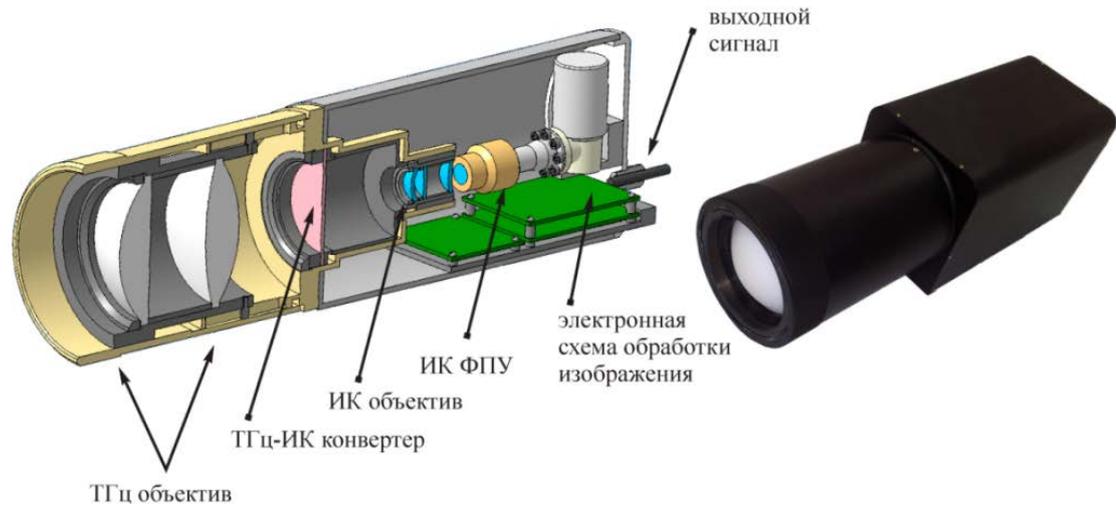


Рисунок 5.10 — Схема (слева) и внешний вид (справа) ТГц-детектора изображения

5.5 Параметры ТГц-детектора изображения

Полученные характеристики ТГц-детектора изображения (теравизора) приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 — Параметры ТГц-детектора

Параметр	Значение
ИК-матрица Размерность Спектральный диапазон чувствительности	384×288 3,6 – 4,9 мкм
Рабочая частота ТГц-детектора $\lambda_{рез}$ в диапазоне частот	0.1–1.0 ТГц
Спектральная селективность $\Delta\lambda_{рез} / \lambda_{рез}$	< 0.05
Поляризационная селективность	> 20 дБ
Мощность ТГц-излучения, эквивалентная шуму (МЭШ, NEP)	10^{-9} Вт/Гц ^{1/2}
Массогабаритные параметры: длина диаметр вес, около	375 мм 110 мм 2.9 кг
Питание	+12 В
Выходной сигнал	Аналоговый + USB

Изготовление разрезов в структуре конвертера значительно уменьшило эффект расплывания (блюминга) ИК-изображения. Усреднение сигналов пикселей ИК-камеры, приходящихся на пиксель ТГц–ИК-конвертера, позволило увеличить соотношение сигнал/шум более чем на порядок (см. раздел 2.5), и, тем самым, обеспечить чувствительность ТГц-детектора на уровне чувствительности тепловых матричных приёмников инфракрасного диапазона ($\lambda = 3 - 10$ мкм), таких как болометрические и пироэлектрические детекторы. Разработанный детектор уступает им по быстродействию – частота кадра не превышает 3 Гц. Повышение кадровой частоты может быть достигнуто дальнейшим снижением толщины ТГц–ИК-конвертера.

Тем не менее, такой прибор может найти применение для контроля профиля пучков в квазиоптических спектрометрах, для контроля рупорно-линзовых антенн, параметров излучения гиротронов и других источников ТГц-излучения. Данный детектор идеально подходит для создания носимых/переносных локальных (2–5 м) детекторов скрытых (замаскированных) объектов под одеждой, в стенах, за преградами, непрозрачными в видимом и ИК-диапазоне. Такие системы могут применяться в строительстве для обнаружения скрытых полостей и трещин, анализа однородности материалов. ТГц-излучение находит применение в медицине и биологии, так как колебательные и вращательные моды сложных молекул находятся именно в ТГц-области спектра. Результаты испытаний и предложения по применению ТГц-детекторов изображения приведены в Главе 8.

5.6 ТГц-детектор с неохлаждаемыми ИК ФПУ

В ходе выполнения работы также были изготовлены ТГц-детекторы с неохлаждаемыми ИК-ФПУ на микроболометрах фирмы ULIS (Франция), L3-Communications (США) и производства ИФП СО РАН (г. Новосибирск) с температурным разрешением ≤ 80 мК и ≤ 100 мК. Схема и внешний вид ТГц-детектора с болометрической камерой производства ULIS (Франция) размерностью 320×240 , размером пикселя 25×25 , спектральным диапазоном

чувствительности 8–14 мкм, температурным разрешением ≈ 80 мК, показан на рисунке 5.11.

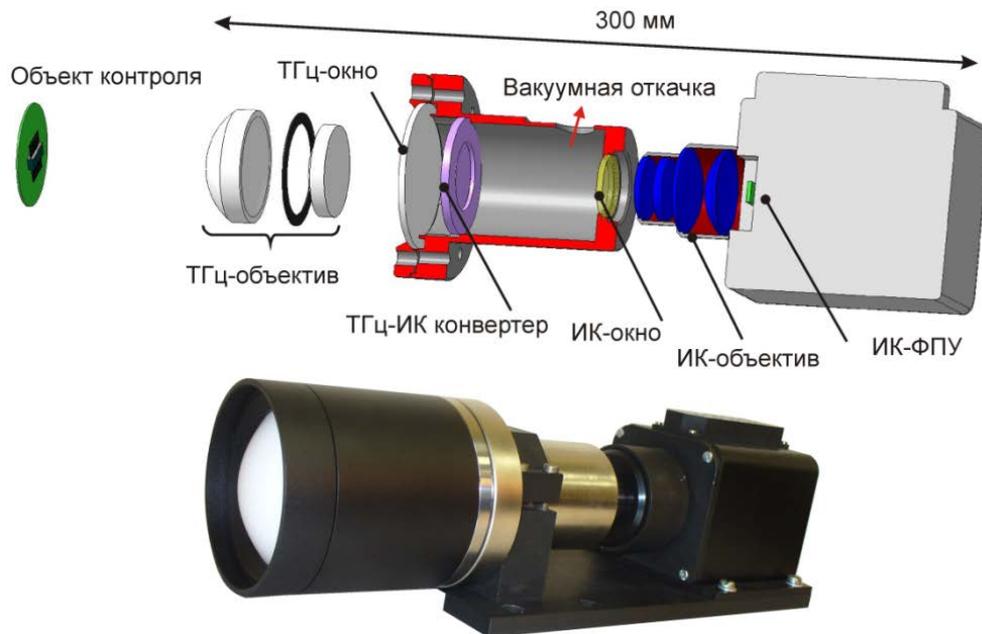


Рисунок 5.11 — Схема (вверху) и внешний вид (внизу) ТГц-детектора изображения на основе неохлаждаемого ИК ФПУ

Для уменьшения теплоотдачи за счёт контакта с воздухом конвертер был помещён в вакуумный объём, ограниченный со стороны падения ТГц-излучения окном из полиэтилена высокой плотности рабочим диаметром 70 мм, а со стороны выхода ИК-излучения – окном из ZnSe диаметром 30 мм. Эксперименты показали, что наличие вакуумного объёма не приводит к значимым улучшениям параметров ТГц-детектора, зато усложняет эксплуатацию. Такие детекторы, естественно, обладают меньшей чувствительностью, зато значительно дешевле и могут использоваться при достаточно больших мощностях подсветки.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 5

Разработанные матричные ТГц-детекторы на основе ТГц-ИК-конвертера и ИК-камеры, позволяют регистрировать ТГц-излучение с высокой обнаружительной способностью, пространственным разрешением, спектральным разрешением и

поляризационной чувствительностью, в режиме реального времени и без глубокого охлаждения; значение минимальной обнаруживаемой плотности мощности $2,5 \times 10^{-5}$ Вт/см² на частоте 1 Гц соответствует лучшим современным тепловым детекторам, спектральное разрешение $\Delta\lambda/\lambda < 5\%$, поляризационное разрешение 20 дБ,

ГЛАВА 6. ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДЕТЕКТОР ТГц- И МИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Пироэлектрические приёмники являются неохлаждаемыми тепловыми фотоприёмниками, используемыми, как правило, для регистрации теплового излучения в диапазоне длин волн 2–20 мкм [157, 158, 159, 160, 161]. Будучи практически неселективными приборами, они часто применяются в ИК-спектрометрах. В последнее время была показана возможность их применения в терагерцовой (ТГц) части оптического диапазона 100–1000 мкм [162, 163, 164, 165, 166]. Для создания пироприёмников ИК- и ТГц-диапазонов исследовано много пироэлектрических материалов, таких как цирконат-титанат свинца, сополимеры винили-денфторида, органические полимеры тетрааминодифенила (ТАДФ), танталат лития (LiTaO_3), ниобат лития (LiNbO_3), соединения KTaNbO_3 , PbZnNbO_3 , PbScTaO_3 , $\text{Sr}_{0.5}\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_2\text{O}_6$ и другие. Идеальный пироэлектрический сенсор помимо большого пироэлектрического коэффициента и малой диэлектрической постоянной должен обладать малой теплоёмкостью. К таким материалам, прежде всего, относится тетрааминодифенил (или дифенил-тетраамина (ДФТА)). В работах [167, 168, 169, 170, 171] были исследованы физико-химические свойства плёнок ДФТА толщиной 0.6–1.0 мкм, полученные методом вакуумного термического напыления, для создания тонкоплёночной мишени в пироэлектрическом электронно-оптическом преобразователе, рассчитанном для регистрации ИК-излучения с рабочим диапазоном 8–14 мкм. Для других материалов, например для танталата лития и ниобата лития, рабочие толщины плёнок существенно больше, так как получают механическим утонением толстой пластины до 25–50 мкм с последующим ионным травлением до 10–20 мкм [172]. Как было показано в [173] заряд, то есть ток, генерируемый пироэлектрическим детектором, увеличивается с уменьшением толщины материала. Кроме того, малая толщина пироэлектрической плёнки обеспечивает малую теплоёмкость сенсора и, следовательно, высокую чувствительность и

быстродействие детектора. На сегодня характеристики пиродетекторов на основе тонких слоёв ТАДФ в ТГц-диапазоне и субТГц-диапазоне не исследовались.

Задачей работы являлось определение спектральных характеристик чувствительности пироэлектрического фотодетектора на основе ТАДФ толщиной 0.6–1.0 мкм в видимом, инфракрасном и терагерцовом диапазонах и выяснение перспектив использования таких детекторов в данных диапазонах.

6.1 Образцы пироэлектрических детекторов

Образцы пироэлектрических детекторов изготавливались на «НПП «Восток», г. Новосибирск, в стандартном корпусе КТ-3 [174]. В качестве материала входного окна использовалась плёнка полиэтилентерефталата (то же, что и лавсан или майлар) толщиной около 70 мкм, предположительно прозрачной в видимом, ИК- и ТГц-диапазонах. Структурная схема пиродетектора показана на рисунке 6.1 *а*.

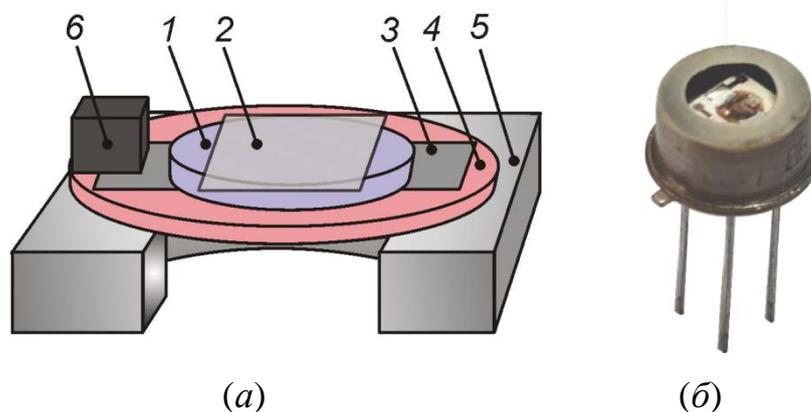


Рисунок 6.1 — Пироэлектрический детектор на основе тетрааминодифенила, *а* – структурная схема, где 1 – слой ТАДФ, 2, 3 – электроды, 4 – несущая полимерная плёнка, 5 – ситалловая подложка, 6 – предусилитель; *б* – внешний вид пироприёмника в корпусе

Фоточувствительный элемент представляет собой конденсатор, где в качестве диэлектрика использован слой ТАДФ (1) толщиной 0.6–1.0 мкм. В качестве верхнего электрода (2) использован полупрозрачный слой алюминия толщиной 0,01 мкм, а для нижнего электрода – слой алюминия толщиной 0,07

мкм (3). Конденсатор размещен на свободно висящей плёнке полиарилатно-эпоксидного лака марки ЛКС толщиной 0,3 мкм (4), закреплённой по краям на ситалловой подложке (5) размером $4 \times 4 \times 1$ мм с отверстием в центре диаметром 2 мм. Такая конструкция позволяет минимизировать теплоотвод от пироплёнки, которая нагревается при поглощении излучения, что увеличивает чувствительность детектора. На ситалловой подложке также размещен предварительный усилитель (6). Размер фоточувствительной площадки составлял 1×1 мм. На рисунке 6.1 б показан внешний вид детектора в корпусе с габаритными размерами без выводов $\varnothing 9 \times 6,6$ мм. Данный детектор подключался к вторичному усилителю и формирователю выходного сигнала с максимальной амплитудой ± 4 В (нагрузка 50 Ом) и максимальным шумом усилителя на уровне 0,3 мВ.

6.2 Измерение спектральных характеристик чувствительности пироприёмника в видимом и ИК-диапазоне

Измерение спектральных характеристик чувствительности пироприёмника в видимом и ИК-диапазоне проводилось на спектрометрическом комплексе на основе монохроматора МДР-41 с рабочим диапазоном длин волн $\lambda = 0,4 - 10$ мкм. В качестве источников излучения для диапазона $\lambda = 0,4 - 2,0$ мкм использовалась кварцевая вольфрам-галогенная лампа, а для диапазона $\lambda = 2,0 - 10$ мкм использовался карбид-кремниевый глобар. Для разных диапазонов λ использовались разные дифракционные решётки: 1500 штрихов на мм для диапазона 0,4–1,0 мкм, 600 штр/мм для 1,0–2,0 мкм, 300 штр/мм для 2,0–4,0 мкм и 150 штр/мм для 4,0–10 мкм, спектральное разрешение составляло около 4, 10, 20 и 40 нм соответственно. Излучение модулировалось с помощью оптико-механического модулятора на частоте 74 Гц, исследуемый фотоприемник освещался равномерно по всей площади, выходной сигнал приемника регистрировался с помощью синхронного усилителя EG&G 5210. Измерения проводились следующим образом. Сначала измерялся спектр отклика исследуемого пироприёмника, затем измерялся спектр опорного пироприёмника

(с калиброванным спектром чувствительности) и первый спектр нормировался на второй. Опорным детектором являлся калиброванный пироэлектрический фотоприёмник Oriel 70123 (Oriel Instruments, США) на основе танталата лития с входным окном CaF_2 и чувствительностью 1000 В/Вт. Абсолютная калибровка вольт–ваттной чувствительности исследуемого пироприёмника проводилась с помощью сфокусированного излучения полупроводникового лазера с длиной волны 650 нм. Схема измерений строилась так, чтобы всё излучение лазера полностью попадало на фотоприёмные площадки обоих пироприёмников.

На рисунке 6.2 *a* показан пример измеренного спектра вольт–ваттной чувствительности пироприёмника в видимом и ИК-диапазоне. Видно, что с одной стороны спектральная зависимость практически ровная во всём диапазоне. С другой стороны зависимость имеет осцилляции в коротковолновой части спектра (0,4–3,0 мкм) и провалы в окрестности длин волн $\lambda \approx 3,4$; 6,8; 7,2 и 8,6 мкм. Также присутствуют небольшие осцилляции в диапазоне от 4,0 до 6,5 мкм.

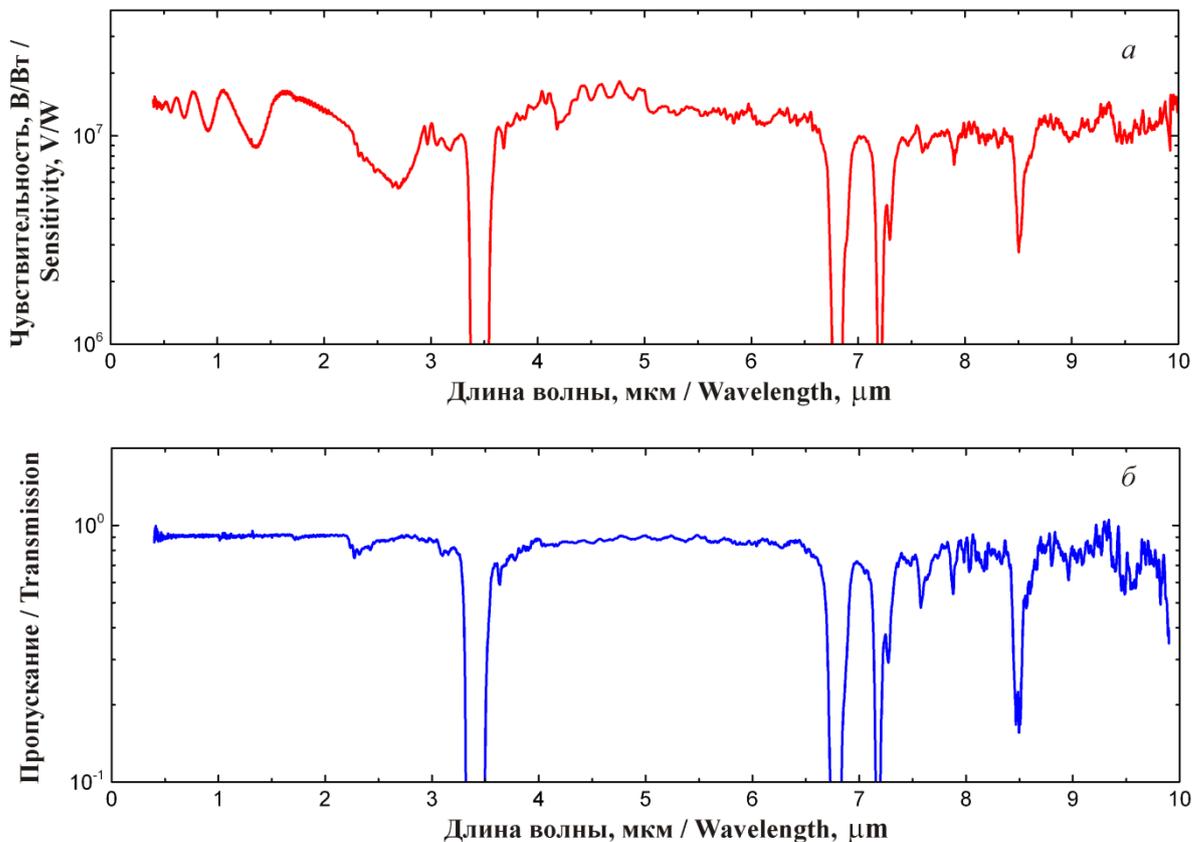


Рисунок 6.2 — *a* – спектр вольт–ваттной чувствительности пироприёмника, *б* – спектр пропускания майларовой плёнки

Увеличение шума в диапазоне 8–10 мкм связано с уменьшением энергии излучения источника (глобар + монохроматор) в этом диапазоне. Осцилляции могут быть связаны с интерференцией световых лучей, например, в пироэлектрической пленке или в майларовой пленке входного окна. Выяснение причин наблюдаемых осцилляций и их устранения требует дополнительных исследований, которые будут выполнены в дальнейшей работе. Причиной провалов, можно предположить, является поглощение в майларовом окне. Для проверки этого предположения был измерен спектр пропускания плёнки майлара, который показан на рисунке 6.2 б. Видно, что провалы в спектрах хорошо совпадают и связаны с линиями поглощения майлара. Спектральные характеристики майларовых плёнок в данном диапазоне ранее не исследовались, полученные результаты являются новыми и их необходимо учитывать при конструировании детекторов с майларовым окном.

Вольт–ваттная чувствительность предложенного пироприёмника находится в диапазоне $\approx 0,5–1,5 \times 10^7$ В/Вт. Вольт–ваттная чувствительность пироэлектрического фотоприёмника Oriel 70123 составляла $1,0 \times 10^3$ В/Вт и эквивалентная мощность шума в единичной полосе (noise equivalent power, NEP) на уровне 3×10^{-9} Вт/Гц^{1/2}. Максимальный шум исследуемого пироприёмника составлял 6.0 мВ, что при полученной средней вольт–ваттной чувствительности $1,0 \times 10^7$ В/Вт даёт $NEP = 6 \times 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}. Что, примерно, в пять раз ниже NEP калибровочного детектора.

6.3 Измерения в ТГц-диапазоне

Измерения в ТГц-диапазоне проводилось на квазиоптическом спектрометре с набором ламп обратной волны (ЛОВ) в качестве перестраиваемых источников монохроматического излучения с общим рабочим диапазоном частот излучения $\nu = 100–1000$ ТГц ($\lambda = 300–3000$ мкм). Измерения проводились при модуляции излучения с частотой 23 Гц оптико-механическим модулятором. Опорным детектором служил калиброванный оптико-акустический приёмник (ОАП), по-

другому называемый ячейкой Голея, производства Microtech Instruments, Inc. (США). Измерения проводились по аналогичной методике: сначала измерялся спектр отклика исследуемого пироприёмника, затем спектр ячейки Голея, далее первый спектр нормировался на второй. Следует отметить, что диаметр фоточувствительной площадки ячейки Голея составляет примерно 6 мм и этого достаточно, чтобы поглотить весь поток излучения. Размер фоточувствительной площадки пироприёмника составляет 1×1 мм и это меньше размера светового пятна в плоскости пироприёмника. Поэтому для корректного сравнения чувствительностей ячейки Голея и пироприёмника был измерен профиль пучка излучения и определена доля мощности, приходящейся на фоточувствительную площадку пироприёмника. На частоте $\nu = 626$ ГГц доля составила 27 % от общей мощности излучения. Поэтому при сравнении абсолютных чувствительностей сигнал с пироприёмника умножался на коэффициент $1/0,27 = 3,7$. Данная частота была выбрана потому, что на ней пространственное распределение мощности излучения по площади пучка было наиболее близким к распределению Гаусса и имело минимальную ширину на полувысоте. На других частотах форма распределения мощности отличалась от распределения Гаусса в более значительной степени и имело большую ширину. Таким образом, проведённая калибровка чувствительности нового пироприёмника является оценкой снизу.

На рисунке 6.3 *a* показан фрагмент спектральных зависимостей отклика пироприёмника и ячейки Голея, измеренных на ЛОВ-спектрометре. Видно, что все спектры, включая спектр ячейки Голея, имеют ярко выраженный линейчатый характер, который связан с линейчатым спектром излучения ЛОВ [175, 176].

При определённых частотах излучение практически отсутствует, например, в диапазоне 750–830 ГГц, а там где излучение регистрируется — амплитуда отклика пироприёмника в 2–5 раз превышает сигнал от ячейки Голея. При этом, как говорилось ранее, на фоточувствительную площадку пироприёмника попадает только часть излучения, в отличие от ячейки Голея, которая поглощает всё излучение.

В результате, при нормировке спектра пироприёмника на спектр ячейки Голея в местах, где полезный сигнал отсутствует, возрастает роль шумов, что проявляется как шум высокой амплитуды, показанный на рисунке 6.3 б (см. диапазон 750–830 ГГц, обозначенный стрелками). Чтобы уменьшить вклад таких шумов была проведена математическая обработка нормированных спектров методом быстрого преобразования Фурье (FFT – Fast Fourier Transform) с окном 50. На рисунке 6.4 приведён пример спектра отклика пироприёмника во всём измеренном диапазоне частот 100–1000 ГГц, обработанном по данной методике. Пики, показанные стрелками, являются артефактами нормировки в случае отсутствия полезного сигнала и не должны учитываться.

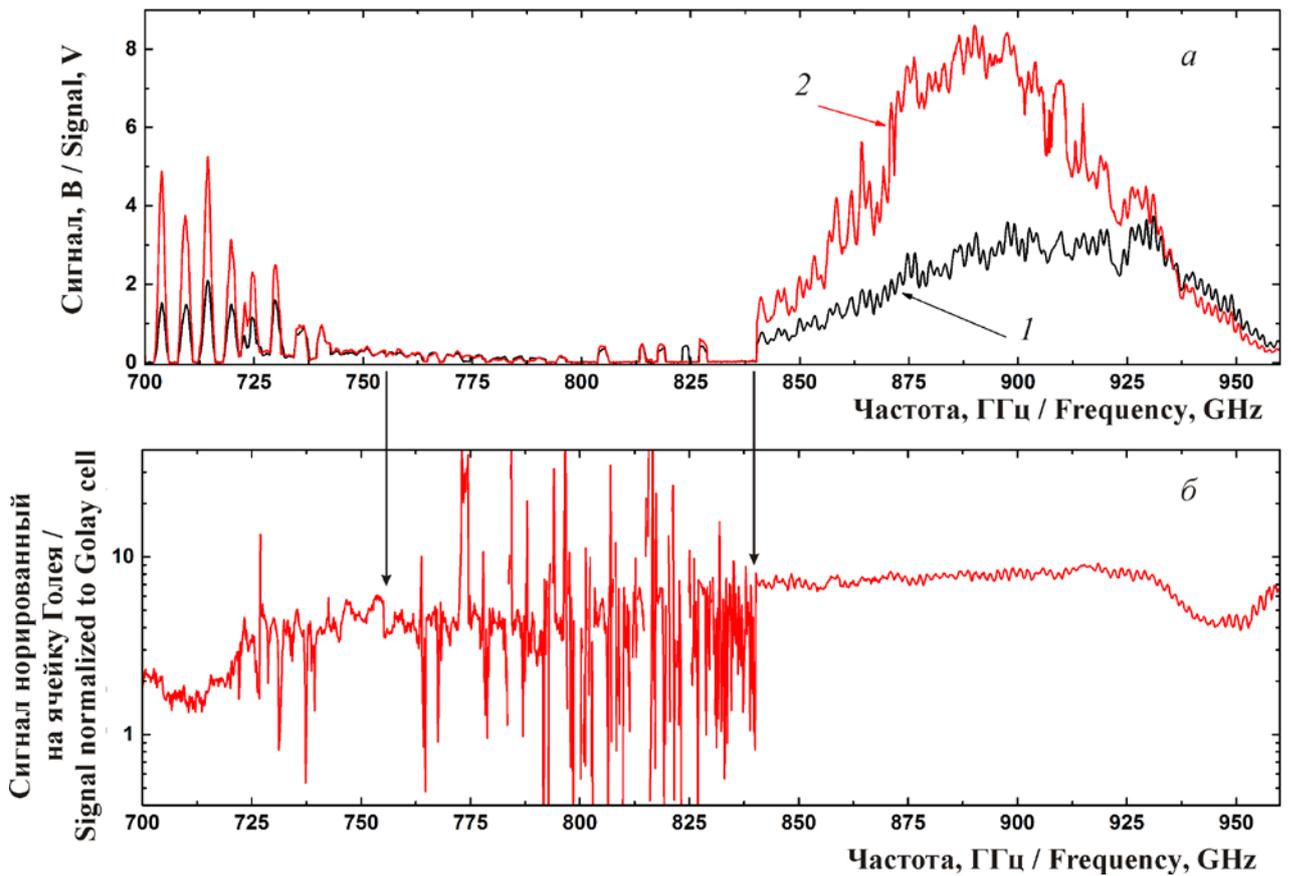


Рисунок 6.3 — Фрагмент спектров отклика ячейки Голея и пироприёмника, *а* — исходные спектры ячейки Голея (1) и пироприёмника (2); *б* — спектр отклика пироприёмника, нормированный на сигнал ячейки Голея

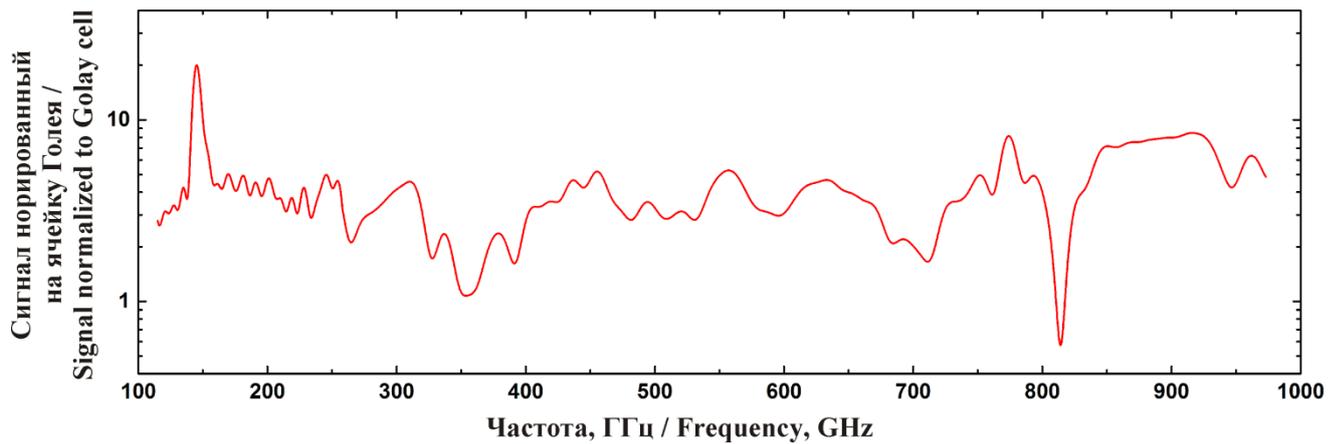


Рисунок 6.4 — Спектр отклика пироприёмника, нормированный на сигнал ячейки Голя и сглаженный методом быстрого преобразования Фурье. Стрелками показаны артефакты нормировки

Из рисунка видно, что чувствительность пироприёмника в среднем имеет ровную спектральную (или спектрально независимую) характеристику и в 2–8 раз превышает чувствительность ячейки Голя, который является наиболее чувствительным детектором в данном диапазоне.

Спектральная независимость чувствительности пироприёмника с толщиной чувствительного слоя 1 мкм в диапазоне длин волн 0,4–10 мкм и 300–3000 мкм не может быть объяснена поглощением в пироэлектрической плёнке тетрааминодифенила. Вероятно, поглощение возникает в верхнем полупрозрачном электроде из алюминия, толщиной 0,01 мкм, и обусловлено аномальным скин-эффектом. Известно, что оптические характеристики металлических плёнок, толщина которых меньше толщины скин-слоя, не зависят от частоты излучения [177, 178, 179], а поглощение при определённом соотношении толщины и проводимости слоя может достигать 50%. В этом случае такая структура пироприёмника является идеальной для сверхширокополосного приёмника с чувствительностью от ультрафиолетового диапазона до миллиметрового диапазона.

6.4 Амплитудно-частотная характеристика пироприёмника

На рисунке 6.5 приведена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) пироприёмника, измеренная при синусоидальной форме засветки и нормированная на максимум при частоте 100 Гц (кривая 1). Синусоидальная форма засветки обеспечивалась с помощью механического прерывателя, размер окна которого примерно совпадал с поперечным размером пучка излучения. Полученная характеристика определяется параметрами предварительного усилителя, расположенного на чипе сенсора (позиция (б) на рисунке 6.1 а). Данный усилитель имеет полосу частот пропускания 60–400 Гц с максимумом на 100 Гц.

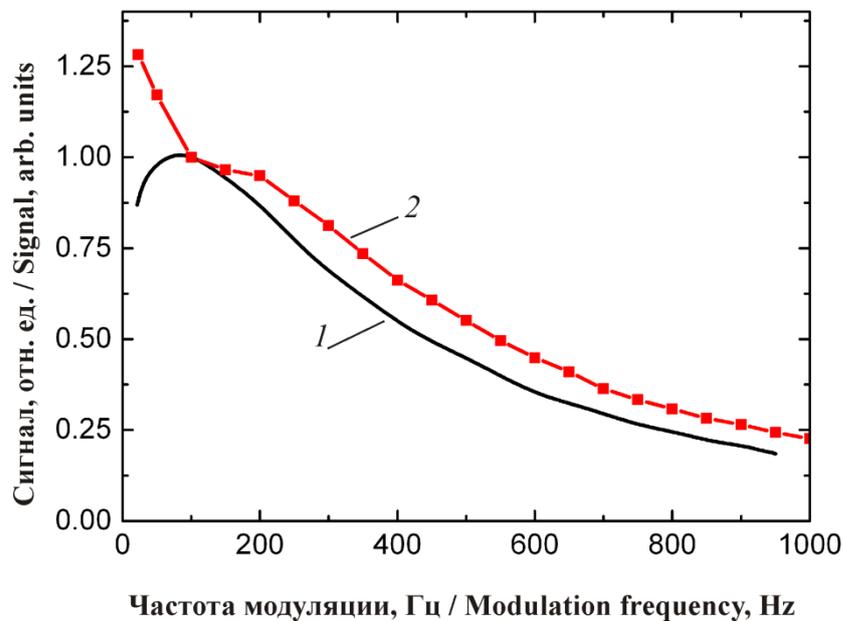


Рисунок 6.5 — Амплитудно-частотные характеристики пироприёмника при синусоидальной засветке (1) и при прямоугольной засветке (2)

При использовании пироприёмников в активных системах, как правило, с подсветкой прямоугольной формы, необходимо знать, как трансформируется АЧХ детектора. На рисунке 6.5 показана АЧХ пироприёмника при засветке источником на основе лавинно-пролётного диода с частотой излучения 140 ГГц (кривая 2). Модуляция проводилась подачей импульсов прямоугольной формы в систему питания источника. Полученная характеристика нормировалась на сигнал при частоте модуляции 100 Гц, так же как и для зависимости (1). Видно, что

формы характеристик (1) и (2) похожи при частоте модуляции более 200 Гц. При этом сигнал при прямоугольной засветке превышает сигнал при синусоидальной засветке. При низких частотах, менее 100 Гц, характеристики ведут себя по-разному – при синусоидальной засветке сигнал падает, а при прямоугольной засветке растёт.

Данное отличие в поведении АЧХ обусловлено тем, что при прямоугольной засветке, в отличие от синусоидальной, в сигнале присутствует широкий набор частот, независимо от частоты модуляции, поэтому при частоте модуляции менее 100 Гц в сигнале засветки присутствуют сигналы с более высокими частотами, которые дают добавку к сигналу на частоте модуляции. Это также объясняет и прирост сигнала при частотах более 100 Гц. В нашем случае полученная АЧХ пироприёмника определяется частотными характеристиками предварительного усилителя, расположенного на чипе сенсора. Однако известно, что пироэлектрические детекторы могут работать на частотах более 10 кГц, так как скорость отклика пироэлектрика ограничена лишь частотой колебательной поляризации кристаллической решётки (около 10^{12} Гц) [157]. Для расширения полосы пропускания детектора необходимо менять параметры предусилителя.

В итоге, в данной работе исследованы спектральные характеристики чувствительности нового пироэлектрического детектора излучения на основе слоёв тетрааминодифенила толщиной 1 мкм в диапазонах длин волн 0,4–10 мкм и 300–3000 мкм. Показано, что вольт-ваттная чувствительность такого пироприёмника имеет относительно ровную характеристику во всем измеренном диапазоне. Полученная мощность эквивалентная шуму составила $\approx 6 \times 10^{-10}$ Вт/Гц^{1/2}, что в 2–8 раз ниже, чем для известных пироэлектрических детекторов и ячейки Голея. Обнаружено, что плёнка майлара, использованная в качестве входного окна детектора, имеет линии поглощения в ИК-диапазоне, что необходимо учитывать при конструировании приборов. Измерение амплитудно-частотной характеристики показало, что полоса пропускания пироприёмника составляет около 500 Гц на уровне 0.7, определяется предварительным

усилителем на чипе сенсора и может быть расширена за счёт изменения параметра предусилителя.

Использование компактных вторичных усилителей и многоканального блока питания позволит строить относительно недорогие системы для спектрорадиометрических измерений в научных и технологических исследованиях. Также такие детекторы перспективны для построения компактных систем безопасности для выявления скрытых опасных объектов – оружия, взрывных устройств и др., использующих высокую проникающую способность ТГц-излучения. Такие системы привлекательны тем, что не оказывают ионизирующего воздействия на живые организмы и обладают приемлемым пространственным разрешением [180, 181].

Таким образом, данный пироэлектрический приёмник имеет хорошие перспективы для использования в широком спектральном диапазоне, от видимого до миллиметрового излучения, в спектрометрах для научных исследований, в промышленности для оперативного контроля источников ТГц-излучения, а также в системах безопасности и других системах, использующих видимое, ИК- и ТГц-излучение.

На рисунке 6.6 показана зависимость величины выходного сигнала от мощности падающего излучения, которая демонстрирует линейность зависимости в диапазоне трёх порядков.

Таким образом, проведено исследование спектральных и амплитудно-частотных характеристик чувствительности пиродетекторов на основе плёнок тетрааминодифенила толщиной 0.6–1.0 мкм. Результаты исследований показали, что в диапазоне частот излучения 0.1–1.0 ТГц чувствительность данных детекторов в несколько раз превышает чувствительность ячейки Голя, наиболее чувствительного детектора в данном спектральном диапазоне. Учитывая, что пироэлектрические датчики используются для калибровки спектрометров в спектральном диапазоне 0.2 – 25 мкм [182], можно сказать, что предложенные ТГц-пиродетекторы обладают сверхширокополосной чувствительностью в диапазоне четырех порядков длин волн от 0.2 мкм до 2500 мкм. Результаты

исследований характеристик пироэлектрических детекторов на основе тонких слоёв тетрааминодифенила опубликованы в работах [183, 184, 185]

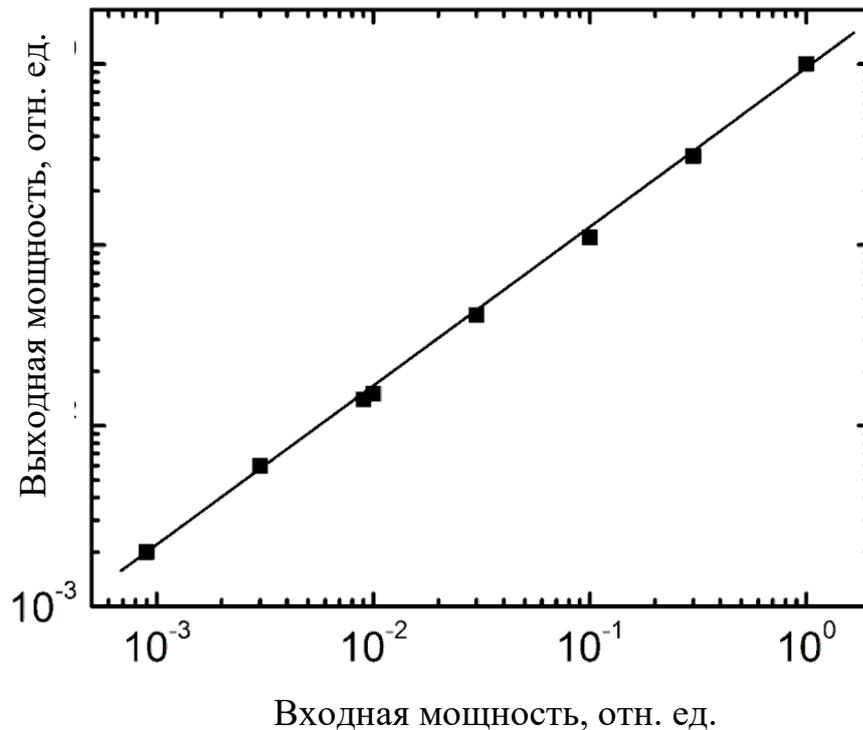


Рисунок 6.6 — Зависимость величины выходного сигнала детектора от мощности падающего миллиметрового излучения

Использование компактных вторичных усилителей и многоканального блока питания позволяет строить относительно недорогие системы для спектрорадиометрических измерений в научных и технологических исследованиях. Также такие детекторы перспективны для построения компактных систем безопасности для выявления скрытых опасных объектов – оружия, взрывных устройств и др.

Автор выражает благодарность А.В. Глухову, В.М. Гайлесу и В.А. Рыжову за изготовление экспериментальных образцов детектора, К. В. Дорожкину и В. И. Суслеу за помощь в экспериментах, П. С. Загубисало за проведение математических расчетов.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 6

Одиночные пироэлектрические детекторы на основе тетрааминодифенила имеют: диапазон спектральной чувствительности 0,4–2500 мкм; вольт-ваттную чувствительностью $> 10^5$ В/Вт; полосу пропускания до 500 Гц.

ГЛАВА 7 РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЬЕЗООПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ СВЕРХЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Данная глава посвящена разработке и исследованию пьезооптических преобразователей для высокочувствительных датчиков механических напряжений. Изложены теоретические основы методов тензометрии с использованием датчиков на разных физических принципах. Проведен теоретический сравнительный анализ коэффициентов тензочувствительности для тензорезисторных, пьезоэлектрических, волоконно-оптических, пьезооптических датчиков механических напряжений. Рассмотрены основные схемы тензометрических датчиков. Представлены результаты разработки и исследования параметров пьезооптических преобразователей новой конструкции для сверхчувствительных датчиков механических напряжений.

7.1 Теоретический анализ коэффициентов тензочувствительности для датчиков механических напряжений на основе различных физических принципов

7.1.1 Тензорезисторные датчики

Повторим вывод коэффициента тензочувствительности для тензорезисторных преобразователей (Глава 1). Сопротивление R проводника длиной L , площадью поперечного сечения S с удельным сопротивлением ρ определяется выражением

$$R = \rho \frac{L}{S}. \quad (7.1.1)$$

При приложении силы вдоль проводника его длина увеличивается ($L + dL$), а поперечное сечение уменьшается ($S - dS$) (рис. 7.1.1). Относительное изменение сопротивления dR/R определяется соотношением

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S}. \quad (7.1.2)$$

В случае упругой деформации dS/S определяется формулой [63]:

$$\frac{dS}{S} = -2\nu \frac{dL}{L} + \nu^2 \left(\frac{dL}{L}\right)^2, \quad (7.1.3)$$

где ν – коэффициент Пуассона, обычно равный 0.3 [63].

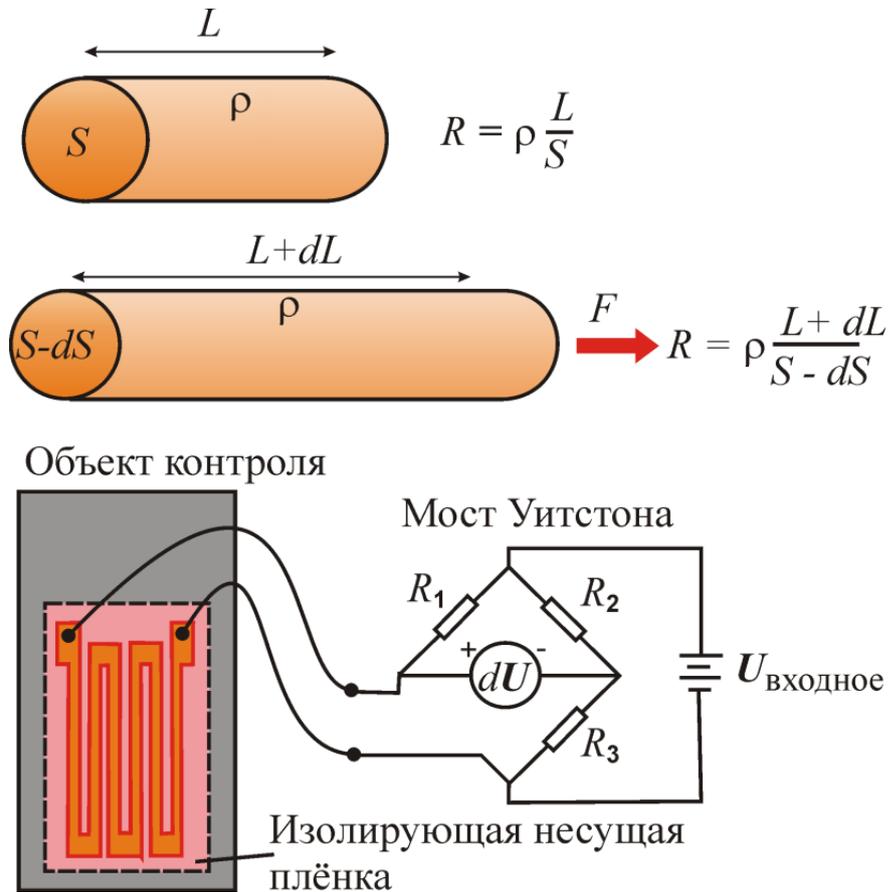


Рисунок 7.1.1 — Тензорезистивный эффект и тензорезисторный датчик деформации, включенный в мост Уитстона

Коэффициент тензочувствительности S_A (в зарубежной литературе Gauge Factor (GF)) связывает величину относительной деформации с величиной относительного изменения измеряемого параметра (сигнала) и определяется выражением

$$\frac{dU}{U} = \frac{dR}{R} = S_A \frac{dL}{L}, \quad (7.1.4)$$

где U – опорное напряжение питания и dU – величина изменения измеряемого напряжения (рис.7.1.1). В выражении (7.1.4) предполагается, что электрический ток $I = \text{const}$.

Подстановка (7.1.3) в (7.1.2), а затем в (7.1.4) даёт выражение для коэффициента тензочувствительности тензорезисторных датчиков:

$$S_A = \frac{dR/R}{dL/L} = \frac{d\rho/\rho}{dL/L} + 1 + 2\nu - \nu^2 \left(\frac{dL}{L} \right). \quad (7.1.5)$$

Из соотношения (7.1.5) видно, что коэффициент тензочувствительности S_A не зависит от конструкции датчика, а определяется только свойствами материала, из которого изготовлен датчик ($d\rho/\rho$). Типичные значения коэффициента тензочувствительности лежат в диапазоне $S_A = 2 - 4$ [63] (см. также таблицу 1.4.1 в Главе 1).

Следует отметить, что тонкие металлические плёнки, полимерные структуры и клеи обладают низким порогом пластической деформации, что приводит к таким неустранимым негативным эффектам как гистерезис, нелинейность показаний, деградация параметров со временем, драматическая чувствительность к перегрузкам.

В последние годы быстро растёт потребность в высокоточных и устойчивых к перегрузкам датчиках деформации для управления различными механизмами и процессами в промышленности и тензорезистивные датчики не соответствуют современным требованиям.

7.1.2 Волоконно-оптические датчики

Быстрое развитие волоконно-оптических технологий привело к появлению датчиков деформации, которые устойчивы к воздействию окружающей среды и обладают электромагнитной помехоустойчивостью [186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196]. Чувствительным элементом датчиков является волоконная брэгговская решетка (ВБР), представляющая собой оптическое волокно, в котором реализовано периодическое изменение показателя преломления. При прохождении света через такую структуру часть его с

определённой длиной волны $\lambda_{\text{Брэгг}}$, отражается, а остальная часть проходит дальше. Длина волны $\lambda_{\text{Брэгг}}$ отражённого света называется брэгговская длина волны и определяется соотношением $\lambda_{\text{Брэгг}} = 2nL$, где n – эффективный показатель преломления оптического волокна, L – расстояние между решётками или период решётки. При растяжении-сжатии волокна меняется расстояние L и показатель преломления n , что приводит к изменению $\lambda_{\text{Брэгг}}$, которое регистрируется оптической системой.

Коэффициент тензочувствительности волоконно-оптических датчиков деформации определяется по аналогии с тензорезисторными [196]:

$$S_A = \frac{d\lambda_{\text{Брэгг}}/\lambda_{\text{Брэгг}}}{dL/L}, \quad (7.1.6)$$

где $d\lambda_{\text{Брэгг}}$ – изменение длины волны $\lambda_{\text{Брэгг}}$ отражённого света при деформации волоконной решетки, dL/L – относительная деформация последней.

Согласно [196] коэффициент тензочувствительности волоконно-оптического датчика деформации составляет около 0,78, что заметно меньше, чем для тензорезисторных датчиков. Как и в предыдущем случае, он не зависит от конструкции датчика.

7.1.3 Пьезоэлектрические датчики

Пьезоэлектрический датчик преобразует механическое усилие в электрический сигнал, его действие основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, который заключается в возникновении поляризации диэлектрика под действием механических напряжений. Величина плотности наведенного электрического заряда, возникающего на поверхности пьезоэлемента под действием внешней нагрузки, описывается уравнением [197]

$$\Delta q = d_{ij}\sigma = d_{ij}E \frac{dL}{L}. \quad (7.1.7)$$

где Δq – поверхностная плотность заряда, d_{ij} пьезоэлектрический модуль, представляющий собой тензор размерностью 3×6 , с типичными значениями компонентов в диапазоне 10^{-10} – 10^{-12} Кл/Н [197], σ – величина напряжения в

материале под действием внешней нагрузки, E – модуль Юнга пьезоэлектрического материала. По аналогии с (7.1.5) коэффициент тензочувствительности S_A для пьезоэлектрических датчиков обратно пропорционален относительной деформации dL/L и может быть определен как

$$S_A = \frac{\Delta q}{\varepsilon} = d_{ij}E \quad (7.1.8)$$

Из соотношения (7.1.8) следует, что величина S_A также не зависит от конструкции датчика и определяется только свойствами материала пьезоэлемента. В таблице 7.1.1 приведены величины пьезоэлектрических модулей d_{ij} , модулей Юнга E и рассчитанных по формуле (7.1.8) коэффициентов тензочувствительности S_A для некоторых материалов, наиболее широко используемых для изготовления пьезоэлектрических датчиков [198].

Именно S_A (а не пьезомодуль d_{ij}) является объективным параметром чувствительности пьезоэлектрических датчиков при сравнении с чувствительностью датчиков к деформации на других физических принципах. Например, пьезомодуль для электроактивных полимеров более чем на два порядка превышает пьезомодули других пьезоматериалов. Однако это преимущество сводится практически к нулю малым модулем упругости, и в итоге коэффициент тензочувствительности становится на два порядка меньше, чем у других материалов. Из таблицы видно, что коэффициент тензочувствительности для пьезоэлектрических датчиков по порядку величины сравним с коэффициентом для тензорезисторных датчиков.

Таблица 7.1.1 — Параметры некоторых пьезоэлектрических материалов

Материал	d_{ij} , 10^{-12} Кл/Н	E , ГПа	S_A [198]
Пьезокерамика: Цирконато-титанат свинца (ЦТС, PZT):			
ЦТС-19	160 – 330	70	11.2 – 23.1
ЦТС-21	40 – 100	90	2.8 – 7

ЦТСНВ-1	160 – 400	64	10.2 – 26.6
PZT-5A (США)	274 – 593	60	16.4 – 35.6
PZT-6A (США)	80 – 189	94	7.5 – 17.8
PZT-6B (США)	27 – 71	111	3.0 – 7.8
Кристаллический кварц	2.33	78.7	0.16
Титанат бария BaTiO ₃	78	100	7.8
Твердые растворы (K, Na)NbO ₃	80 – 160	104 – 123	8.3 – 19.7
Неполярные полимеры (ПТФЭ, ПП, полиэтилен, каучуки)	0.1 – 1	1 – 3	0.1 – 3×10 ⁻³
Полярные полимеры (поликарбонат, поливинилхлорид)	20 – 40	2.3 – 3.5	0.05 – 0.14
Электроактивные полимеры	30 000	6 – 1000×10 ⁻⁶	< 0.03

7.1.4 Пьезооптические датчики

Как уже говорилось в Главе 1, пьезооптический эффект (эффект фотоупругости) заключается в анизотропном изменении коэффициента преломления вещества под действием осевой нагрузки. Приложенная сила приводит к анизотропному изменению коэффициента преломления (двулучепреломлению) изначально изотропной среды благодаря деформации электронных оболочек атомов. В результате свет, распространяющийся в плоскости, перпендикулярной вектору силы, имеет разные скорости для поляризаций вдоль и поперёк вектора силы [199]. Разница в величине коэффициентов преломления света для двух ортогональных поляризаций пропорциональна разнице напряжений в двух ортогональных осях:

$$\Delta n = n_o - n_e = K(\sigma_x - \sigma_y) = K\Delta\sigma \quad (7.1.9)$$

где n_o и n_e – коэффициенты преломления для «обычного» и «необычного» лучей, K – пьезооптический коэффициент (упругооптическая постоянная) с типичным значением $10^{-11} - 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$ для большинства оптических материалов, σ_x и σ_y – напряжения вдоль и поперёк приложенной силе в плоскости, перпендикулярной направлению распространения света [199]. Данная разница в коэффициентах преломления приводит к разнице фаз для двух ортогональных поляризаций световой волны, прошедшей напряженный материал:

$$\Delta = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta n = \frac{2\pi d}{\lambda} K\Delta\sigma = \frac{2\pi d}{\lambda} KE\varepsilon, \quad (7.1.10)$$

где d – расстояние, пройденное лучом в напряженном материале, λ – длина волны света, E – модуль Юнга материала, $\varepsilon = \Delta L/L$ – относительная деформация оптического материала, $\Delta\sigma = E \cdot \varepsilon$ – закон Гука. Уравнение (7.1.10) описывает величину пьезооптического эффекта.

Величина коэффициента тензочувствительности S_A для пьезооптического датчика может быть определена по аналогии с тензорезисторным датчиком, где измеряемым параметром является величина dU/U , эквивалентная величине dR/R (7.1.4). Измеряемым параметром пьезооптического эффекта является величина разности фаз Δ , обусловленная напряжениями (7.1.10) и измеряемая методами эллипсометрии [200]. Таким образом, выражение для коэффициента тензочувствительности пьезооптического датчика принимает вид:

$$S_A = \frac{\Delta}{\varepsilon} = \frac{2\pi d}{\lambda\varepsilon} K\Delta\sigma = \frac{2\pi d}{\lambda} KE. \quad (7.1.11)$$

Из соотношения (7.1.11) видно, что коэффициент тензочувствительности для пьезооптического датчика зависит *не только* от материала (K , E), но и от толщины фотоупругого элемента (d), используемой длины волны излучения (λ), а величина $\Delta\sigma = \sigma_y - \sigma_x$, как будет показана в разделе 3.3, зависит от конструкции чувствительного элемента преобразователя – фотоупругого элемента (ФЭ) и может быть увеличена оптимизацией его формы.

Если в качестве ФЭ использовать плавный кварц ($K = 3.5 \times 10^{-12} \text{ Па}^{-1}$, $E = 70 \text{ ГПа}$) толщиной $d = 4 \text{ мм}$ и светодиод с $\lambda = 660 \text{ нм}$, то коэффициент тензочувствительности $S_A^{\text{расч}}$ может быть рассчитан согласно (7.1.11).

$$S_A^{\text{расч}} = \frac{2\pi \cdot 4 \cdot 10^{-3}}{0.66 \cdot 10^{-6}} 3.5 \cdot 10^{-12} \cdot 7 \cdot 10^{10} = 9330. \quad (7.1.12)$$

Полученный коэффициент более чем на *три порядка* превышает типичные значения для тензорезисторных датчиков $S_A = 2 - 4$.

Плавный кварц, хоть и не обладает большим пьезооптическим коэффициентом по сравнению с кристаллами и полимерами ($K = 2.8 - 4.5 \times 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$) [201], тем не менее, имеет большой практический интерес, так как обладает высоким значением порога разрушения на сжатие, что обеспечивает устойчивость к перегрузкам [202]. В плавном кварце отсутствует пластическая деформация и изменение параметров со временем. Поэтому в таких датчиках не должно быть гистерезиса, нелинейности и деградации параметров со временем. К тому же, технология обработки плавного кварца хорошо развита и широко применяется.

Несмотря на то, что пьезооптический преобразователь известен давно, в научной литературе отсутствуют данные о промышленном применении датчиков данного типа и об экспериментально определенном коэффициенте тензочувствительности, что затрудняет оценку его преимуществ по сравнению с датчиками на других физических принципах, которые широко применяются в промышленности.

Поэтому в данной работе теоретически, экспериментально и с помощью численного моделирования был проведен анализ основных параметров пьезооптического преобразователя: коэффициент тензочувствительности, чувствительность к силе и деформации, величина динамического диапазона.

7.2 Пьезооптические преобразователи

Преимущества пьезооптических преобразователей над тензорезисторными датчиками деформаций известно достаточно давно [203]. В 70-х годах прошлого столетия в Институте механики Московского государственного университета им.

М. В. Ломоносова под руководством И. И. Слезингера разрабатывались пьезооптические измерительные преобразователи различных конфигураций, и появилось множество публикаций на эту тему. Рассмотрим некоторые из них.

В авторском свидетельстве [204] предлагается схема преобразователя, показанная на рисунке 7.2.1, а, которая, по мнению авторов, обладает стабильностью к изменению температуры окружающей среды.

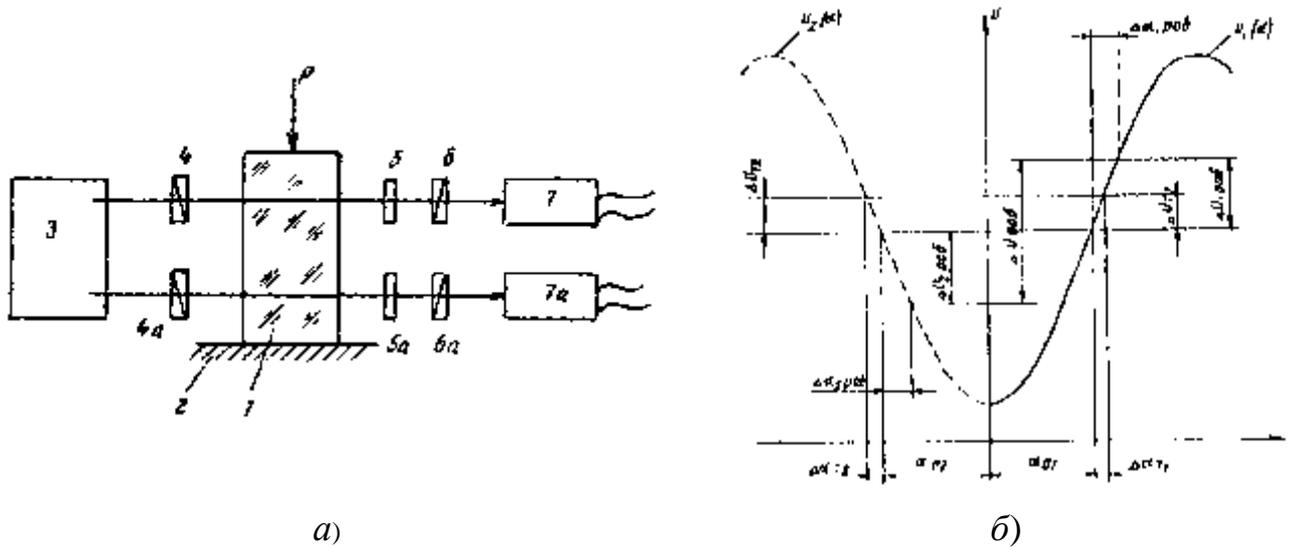


Рисунок 7.2.1 — Схема пьезооптического преобразователя (а) и зависимость выходного сигнала от разности фаз (б)

Фотоупругий чувствительный элемент 1 одним торцом закреплён на корпусе 2 преобразователя, а к другому его торцу приложена измеряемая нагрузка P . Поляризационно-оптическая система представляет собой два оптических канала, которые содержат единый источник света 3; единый или отдельные поляризаторы 4 и 4а, оптическая ось которых наклонена под углом 45 градусов к оси нагрузки на фотоупругий элемент; фазовые пластинки 5 и 5а, причём ось наибольшей скорости пластинки 5 параллельна, а ось наибольшей скорости пластинки 5а перпендикулярна оси нагрузки; единый или отдельные анализаторы 6 и 6а, плоскость пропускания которых расположена в обоих каналах одинаково с плоскостью поляризации поляризаторов; фотоприёмники 7 и 7а, включённые дифференциально.

На рисунке 7.2.1, б показана зависимость выходного сигнала от разности фаз, возникающей под действием нагрузки на фотоупругий элемент.

Под влиянием изменения температуры окружающей среды происходит одинаковое изменение оптических свойств фазовых пластинок, что приводит к изменению разности фаз в каждом канале. За счёт предложенной ориентации фазовых пластинок изменение температуры приводит к одновременному увеличению, либо уменьшению выходного сигнала фотоприёмников в каждом канале на одинаковую величину. Следовательно, при дифференциальном подключении фотоприёмников изменения сигналов фотоприёмников компенсируют друг друга.

В авторском свидетельстве №567965 [205] предлагается конструкция фоточувствительного элемента (рис.7.2.2), содержащего основание 1, пята 3 и вставку 2 из фотоупругого материала. Для уменьшения температурных напряжений в материале вставки концевые части пяты и основания, контактирующие со вставкой, выполнены в виде группы консольных стержней 4, перпендикулярных стыкуемой поверхности. Стержни выполнены различной толщины, находящейся в обратной зависимости от расстояния до оси вставки. Центральный стержень, с целью увеличения жёсткости в поперечном направлении, выполнен переменного поперечного сечения, уменьшающегося к стыкуемой поверхности (рис.7.2.2). Крайние стержни основания и пяты выполнены длиннее остальных, образуя буртик, охватывающий вставку.

При изменении температуры окружающей среды детали 1, 2, 3 изменяют свои размеры. Поскольку жёсткость концевых частей основания и пяты в поперечном направлении мала и участки контакта в пределах каждого стержня невелики, возникающие при этом напряжения намного меньше, чем в случае сплошного контакта. При работе фотоупругого элемента на изгиб (рис.7.2.2 внизу) для сохранения высокой жёсткости фотоупругого элемента в измерительном направлении центральный стержень выполнен в виде сплошной трапеции, меньшее основание которой обращено к поверхности стыка. Симметричное расположение стержней оптимально в смысле температурных

напряжений, а так же позволяет создать симметрию распространения тепловых потоков и симметрию напряжений.

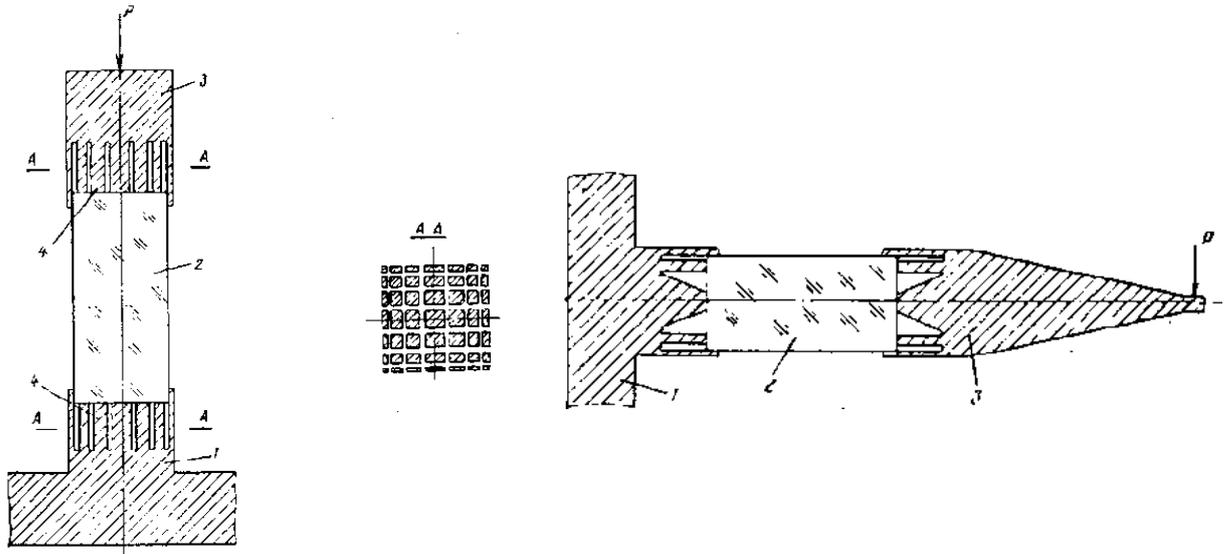


Рисунок 7.2.2 — Схема фотоупругого элемента с элементами крепления на объекте контроля, детали 1 – основание, 2 – фотоупругий элемент, 3 – пята, 4 – стержни

В авторском свидетельстве №1536196 [206] предложен пьезооптический датчик, схема которого показана на рисунке 7.2.3.

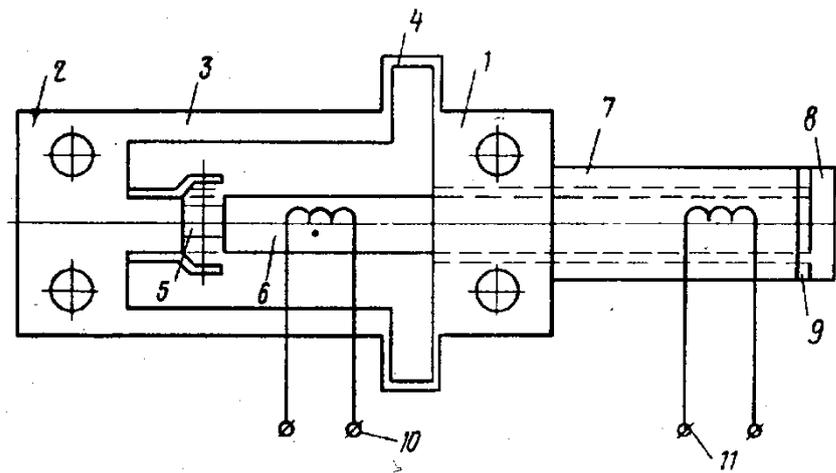


Рисунок 7.2.3 — Схема пьезооптического датчика с термокомпенсацией с помощью нагревательных элементов, 1, 2 – опорные платы, 3 – соединительные элементы имеющие поперечные утоньшённые участки 4, 5 – фотоупругий элемент, 6, 7 – стержни, 8 – фланец, 9 – теплоизолирующая прокладка, 10 и 11 – нагревательные элементы

Датчик содержит опорные платы 1, 2 для крепления на контролируемом объекте, связанные между собой соединительными элементами 3, имеющие поперечные утоньшённые участки 4. Между фотоупругим элементом 5 и опорной плитой 1 установлены два стержня 6 и 7. Стержни расположены соосно оси нагрузки, причем один стержень выполнен в виде полого цилиндра, а другой – в виде сплошного цилиндра, частично расположенного внутри полого. Стержень 6 с одной стороны контактирует с фотоупругим элементом 5, а с другой стороны с помощью фланца 8 через теплоизолирующую прокладку 9 соединён со стержнем 7. Другой конец стержня 7 закреплён на плате 1. Деформация контролируемого объекта передается через сплошной и полый цилиндры на чувствительный элемент, выполненный из фотоупругого материала, что приводит к изменению величины светового потока, прошедшего сквозь фотоупругий элемент и падающего на фотоприемник, и, соответственно к изменению электрического сигнала на выходе фотоприемника по синусоидальному закону в зависимости от величины деформации. Температурная компенсация в данном измерителе осуществляется с помощью двух нагревательных элементов 10 и 11, расположенных на обоих цилиндрах, подключенных дифференциально к усилителю электронной схемы измерителя.

Попытки разработки промышленно пригодных датчиков деформации на основе пьезооптических измерительных преобразователей известны в литературе [207, 208, 209, 210]. В патентах Discenzo F. M. US5723794 и US6948381 описана оптическая система для регистрации деформации кручения, которая включает втулку из фотоупругого материала, охватывающую часть вращающегося вала, и другие элементы системы (рис.7.2.4).

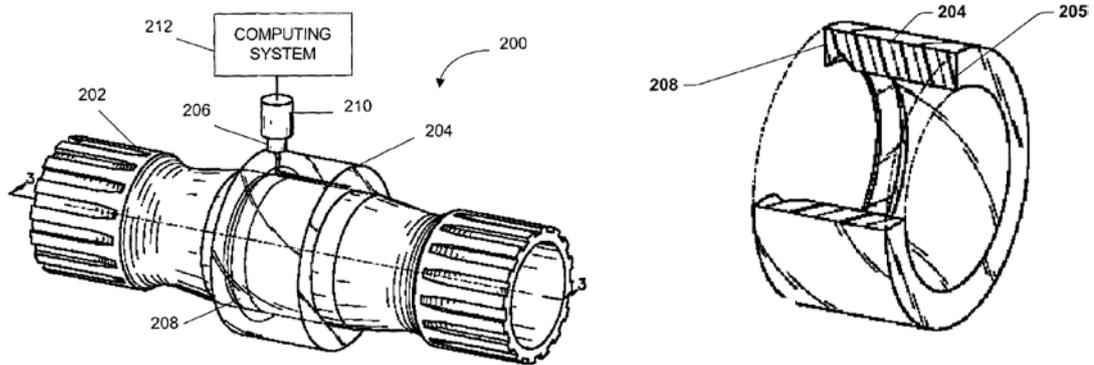


Рисунок 7.2.4 — Система измерения напряжений кручения вращающегося вала, 202 – вращающийся вал, 204 – фотоупругий материал, 206 – источник света, 208 – вырез, 210 – система ввода данных, 212 – вычислительная система [209]

Фотоупругий материал в виде рукава (204) жестко закреплён на поверхности вала (202), что обеспечивает передачу деформаций, возникающих на валу, на фотоупругий материал. В результате возникающих напряжений в фотоупругом материале в оптической системе (206, 210) возникает сигнал, который далее анализируется системой обработки сигнала (212). Данная система предназначена, главным образом, для измерения деформаций кручения, возникающих при работе вала. Однако описанная система не позволяет разделить сигналы, связанные с изменением крутящего момента от сигналов, связанных с изменением температуры. При изменении температуры вала и фотоупругого материала, в последнем будут возникать напряжения, связанные с разницей в коэффициентах температурного расширения материала вала и фотоупругого материала. Эта разница весьма значительна для материалов фотоупругого элемента, приведенных в патенте Discenzo F. M. Например, температурный коэффициент линейного расширения для поликарбоната составляет 65×10^6 м/градус, а для стали $11,6 - 12,8 \times 10^6$ м/градус. Это означает, что при изменении температуры вала и фотоупругого материала увеличение размера фотоупругого материала более чем в пять раз превышает увеличение размеров вала. Это неизбежно приведёт к возникновению значительных напряжений в фотоупругом материале, которые не связаны с изменением величины внешних напряжений (нагрузок). В результате, в оптической системе будет возникать сигнал, не связанный с изменением

крутящего момента, а обусловленный изменением температуры. Описанная оптическая система не позволяет отделить один сигнал от другого. В результате, система регистрации может выдать ложный сигнал.

В итоге, по ряду причин, прежде всего технологического характера, эти разработки не привели к появлению пьезооптических тензодатчиков, способных конкурировать с тензорезисторными датчиками в соотношении цена / качество.

Следует отметить, что во всех работах Исаака Исаевича Слезингера [203, 204, 205, 206, 207] и других авторов, касающиеся конструкции пьезооптического детектора, форма фотоупругого элемента не обсуждается. Как правило, это форма параллелепипеда, с одной стороны параллелепипед приклеен к основанию, а к противоположной стороне прикладывается измеряемая нагрузка. Автору не известны работы по анализу распределения напряжений в фотоупругом элементе с целью оптимизации его формы. В качестве материала фотоупругого элемента обычно рассматриваются кристаллы, например фосфид галлия, обладающий пьезооптическим коэффициентом в пять раз выше ($K \approx 17.3 \times 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$) и модулем упругости в два раза выше ($\sim 150 \text{ ГПа}$), чем плавленый кварц [201]. Однако кристаллы обладают низким порогом разрушения (раскалывания), дорогие и сложны в обработке. Твердые полимеры, например, поликарбонат, используемые в качестве материала для фотоупругого элемента [201], несмотря на высокий пьезооптический коэффициент, дешевизну и простоту обработки, имеют низкий порог пластической деформации и «плывут» под действием нагрузки. Поэтому полимеры обладают теми же недостатками, что и тензорезисторные датчики: гистерезис, деградация параметров со временем и под нагрузкой, низкий динамический диапазон и т.д.

Несмотря на достаточно большое количество опубликованных работ, в основном патентов, на рынке не появился пьезооптический датчик деформации, удовлетворяющий условиям промышленной эксплуатации. Одна из основных причин – появление на рынке относительно дешевых и простых в эксплуатации тензорезисторных датчиков. Однако тензорезисторные датчики обладают рядом неустраняемых недостатков и не отвечают современным требованиям в

промышленности. Еще одна причина – попытки разработать надежный пьезооптический датчик столкнулись с технологическими проблемами, связанными с прецизионным изготовлением компонентов датчика, точностью сборки датчика, а так же с достижением конкурентоспособности в ценовом плане.

Команде разработчиков компании ООО «Фирма ПОДИЙ» удалось решить основные проблемы разработки пьезооптического датчика, и в данной работе представлены результаты исследований пьезооптического датчика деформаций.

7.3 Пьезооптические преобразователи новой конструкции

7.3.1 Пьезооптический датчик деформации в виде пластины

Первой задачей в разработке пьезооптического преобразователя новой конструкции было создание тензометрического преобразователя, который с одинаково высокой чувствительностью работает на сжатие и на растяжение и в котором для достижения термокомпенсации не требуется дополнительных устройств.

Поставленная задача решена за счёт того, что нагрузочный элемент преобразователя, передающий нагрузку с объекта контроля на фотоупругий элемент преобразователя, представляет собой пластину, обеспечивающую концентрацию напряжений на фотоупругом элементе, фотоупругий элемент закреплен в пластине в заведомо нагруженном состоянии и таким образом, что, действие исходной силовой нагрузки осуществляется в двух взаимно перпендикулярных направлениях [211].

Конструкция преобразователя поясняется рисунком 7.3.1, где: 1 – фотоупругий элемент, 2 – нагрузочный элемент (пластина), 3 – монтажные отверстия. Пластина имеет утоньшение в месте крепления фотоупругого элемента 1. Фотоупругий элемент 1 закреплен в пластине 2 с помощью конуса Морзе.

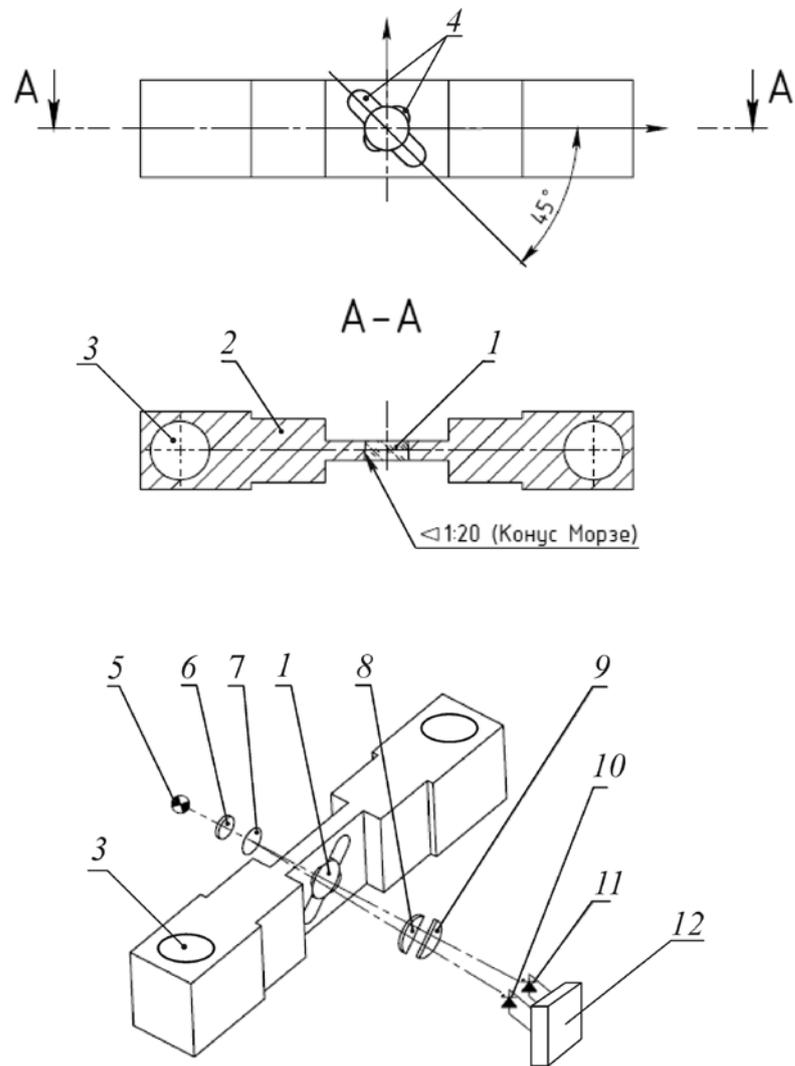


Рисунок 7.3.1 — Схема пьезооптического преобразователя с нагрузочным элементом в виде пластины

В центре пластины выполнены два перпендикулярных друг другу сквозных разреза разной длины 4 , не нарушающих целостность пластины, оси которых составляют 45° к оси нагружения X , центры разрезов совпадают с центром конусного отверстия для крепления фотоупругого элемента 1 . Благодаря разрезам, фотоупругий элемент зажат в четырех точках, расположенных в двух взаимно перпендикулярных направлениях X и Y .

Закрепление фотоупругого элемента в пластине в заведомо нагруженном состоянии обеспечивает работу тензометрического преобразователя, как на сжатие, так и на растяжение, действие исходной силовой нагрузки в двух взаимно перпендикулярных направлениях обеспечивает неизменность распределения

напряжений в фотоупругом элементе при деформациях, связанных с изменением температуры, что, в свою очередь, обеспечивает температурную независимость сигнала.

На рисунке 7.3.1 внизу показано расположение остальных элементов пьзооптического преобразователя, где 5 – источник света (светодиод), 6 – поляризатор, 7 – четвертьволновая пластина, 8, 9 – анализаторы, 10, 11 – фотоприёмники, 12 – электронная система обработки сигнала.

Для повышения эффективности передачи измеряемой деформации на фотоупругий элемент пластина имеет переменное сечение, в частности, в месте крепления фотоупругого элемента имеет утоньшение.

Крепление фотоупругого элемента в пластине в заведомо нагруженном состоянии обеспечено выполнением в центре пластины конусовидного отверстия, ось которого лежит в плоскости перпендикулярной оси нагрузки, при этом фотоупругий элемент выполнен в виде усеченного конуса, причем углы конуса отверстия и конуса фотоупругого элемента совпадают и равны конусу Морзе.

Действие исходной силовой нагрузки в двух взаимно перпендикулярных направлениях достигнуто за счет того, что в центре пластины выполнены два взаимно перпендикулярных сквозных разреза, не нарушающих целостности пластины, оси которых составляют 45° к оси нагрузки. Центры разрезов совпадают с центром конусного отверстия для крепления фотоупругого элемента. Благодаря разрезам, фотоупругий элемент зажат в четырех точках, расположенных в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Снижение влияния изменения температуры на показания преобразователя достигнуто тем, что вышеупомянутые сквозные разрезы имеют разную длину.

В качестве материала фотоупругого элемента использован плавленный кварц, обладающий высоким порогом разрушения на сжатие, что обеспечивает высокий динамический диапазон измерений деформаций и надежность преобразователя.

На рисунке 7.3.2 показан внешний вид пьзооптических датчиков деформации серии УПС-10 (слева) и УПС-12 (справа), состоящих из самого датчика и блока электронной обработки сигнала.



Рисунок 7.3.2 — Внешний вид устройства пьезооптических датчиков деформации серии УПС-10 (вверху) и УПС-12 (внизу)

Высокая чувствительность к деформации позволяет размещать датчик не под полом кабины лифта или на других ее частях, как тензорезисторные, а на несущих конструкциях лебедки лифта (на раме) в машинном отделении. Для определения наиболее подходящего места монтажа датчика деформации была разработана методика, основанная на математическом моделировании деформаций рамы лебедки различной конструкции с помощью программ трехмерного промышленного проектирования, предназначенных для разработки машиностроительных деталей и комплексов: SolidWorks, AutoCAD Inventor, T-Flex CAD.

На рисунке 7.3.3 вверху показана модель рамы лебедки OTIS 13VTR-M для лифта грузоподъемностью 630 кг, взятая для моделирования распределения деформаций при нагрузке кабины лифта.

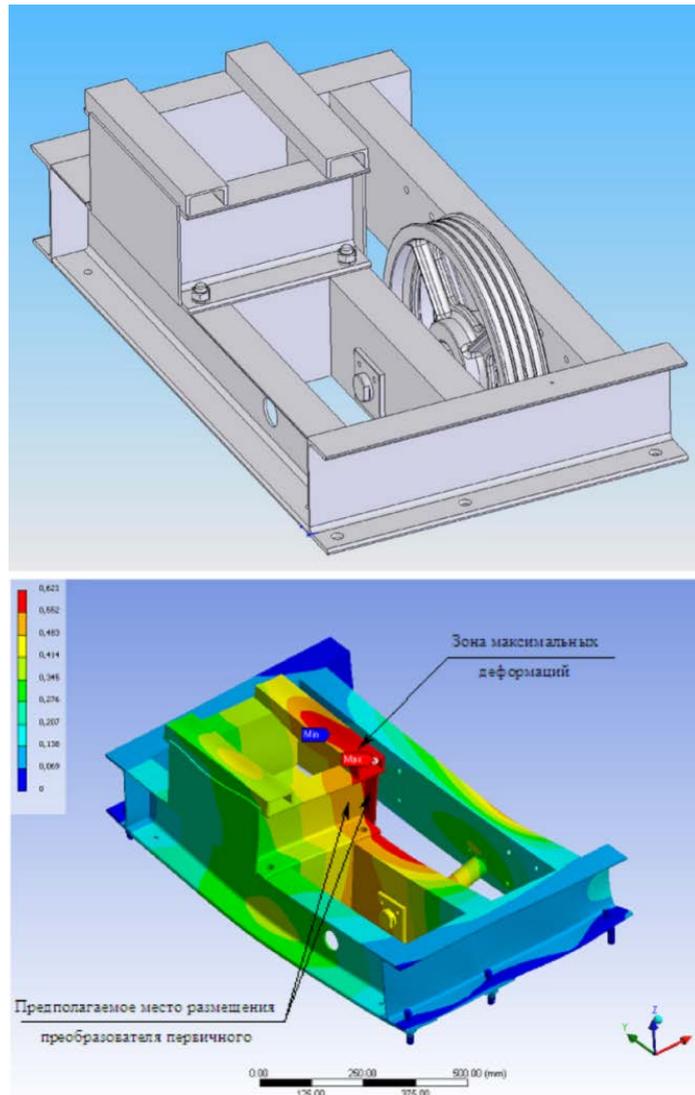


Рисунок 7.3.3 — Трехмерная модель рамы лебедки OTIS 13VTR-M для лифта грузоподъемностью 630 кг (вверху) и результат моделирования распределения деформаций в раме при нагрузке кабины (внизу).

На рисунке 7.3.3 внизу показаны результаты расчета. Из рисунка видно, что наибольшая деформация происходит в центральной части рамы, где и нужно устанавливать датчик.

На рисунке 7.3.4 показан способ крепления датчика на раме лебёдки лифта для контроля степени загрузки кабины.

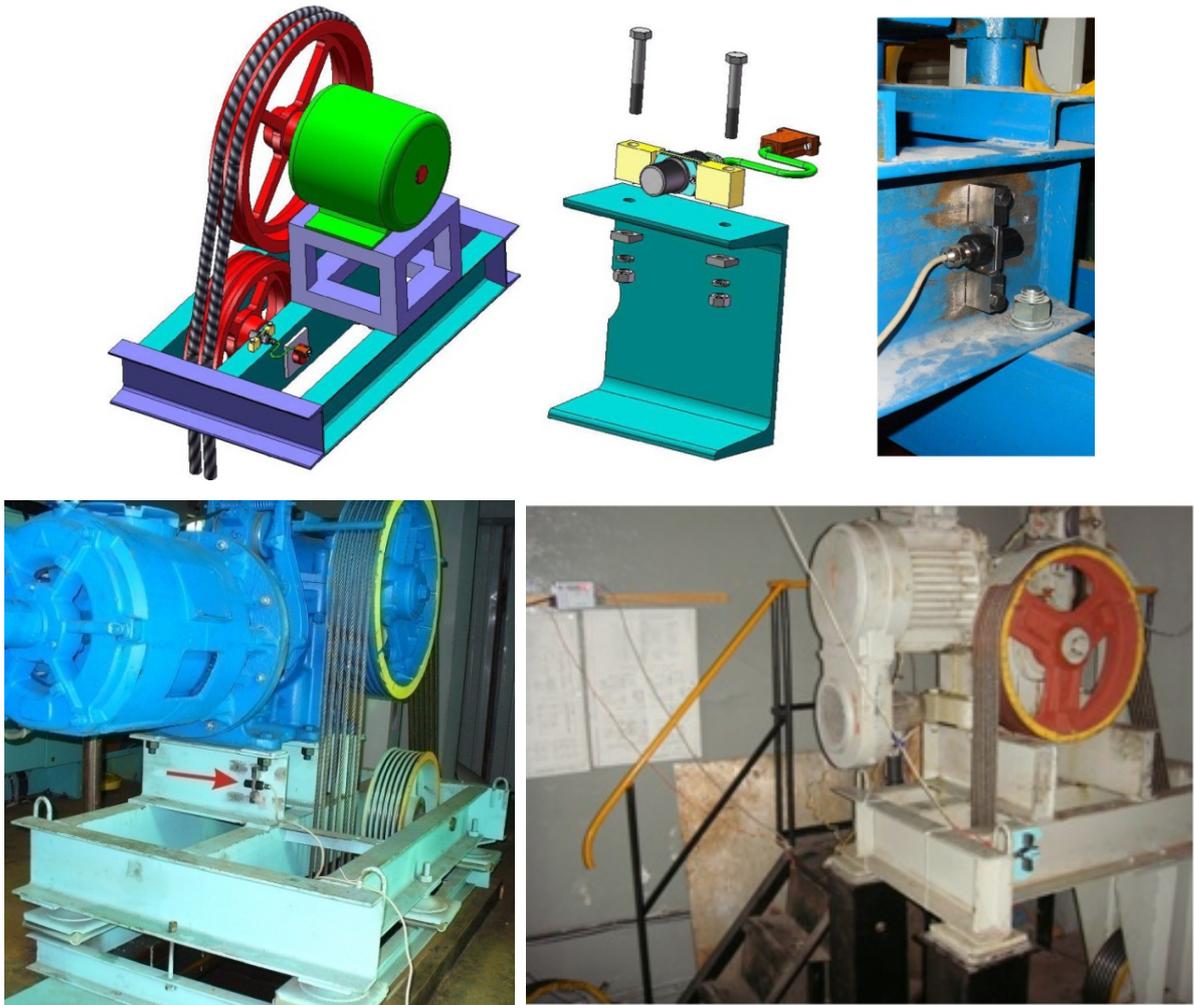


Рисунок 7.3.4 — Способ монтажа пьезооптического датчика на раме лебедки лифта: на полке швеллера и на стенке швеллера.

Основные технические характеристики пьезооптического датчика деформации указаны в таблице 7.3.1.

Таблица 7.3.1 — Параметры пьезооптического датчика деформации на основе пластины

Параметр	Значение
Грузоподъемность лифта	240 ... 10000 кг
Электрическое питание	14...30В
Максимальная погрешность преобразования от номинальной грузоподъемности лифта	0,5%

Степень защиты оболочек составных частей УПС-12	IP65
Рабочий диапазон температур	-10°C +55°C
Средний полный срок службы, не менее	25 лет
Количество релейных выходов *	4
Потребляемая мощность, не более	4 В·А
Подключение к лифтовой станции посредством последовательного интерфейса	CAN, RS485, RS232
Программное обеспечение для калибровки устройства от компьютера по каналу USB	в комплекте
Программное обеспечение для проверки качества монтажа направляющих в шахте лифта	опция
Программное обеспечение для настройки режимов разгона и торможения	опция

** По согласованию с заказчиком могут быть изготовлены устройства с другим количеством релейных дискретных выходов или с непрерывным аналоговым выходом.*

7.3.2 Пьезооптический датчик в виде цанги

Второй задачей в разработке пьезооптического преобразователя новой конструкции было создание тензометрического преобразователя, который с одинаково высокой чувствительностью измеряет деформации, возникающие в двух взаимно перпендикулярных направлениях и в котором за счет конструкции достигается эффект термокомпенсации, в том числе, для случая использования различных материалов нагрузочного элемента и контролируемого объекта. Поставленная задача решена за счет того, что нагрузочный элемент датчика представляет собой полый цилиндр с четырьмя продольными разрезами, не нарушающими целостности цилиндра, а фотоупругий элемент пьезооптического преобразователя закреплен в цилиндре таким образом, что оптическая ось пьезооптического преобразователя совпадает с осью цилиндра и перпендикулярна

плоскости измеряемых деформаций [212]. Формы нагрузочных элементов в виде цанги и способы крепления фотоупругого элемента показаны на рисунке 7.3.5.

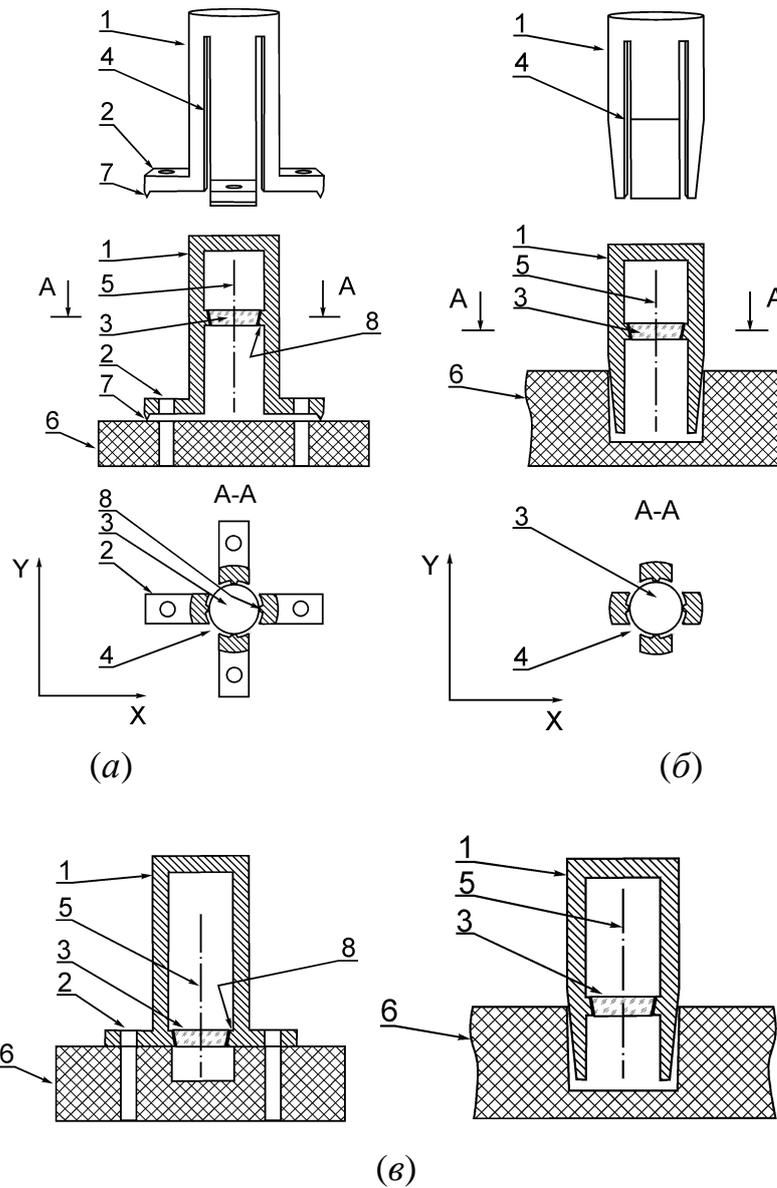


Рисунок 7.3.5 — Нагрузочные элементы в виде цанги и способы крепления в них фотоупругого элемента

Наличие четырех продольных разрезов в полном цилиндре нагрузочного элемента обеспечивает закрепление фотоупругого элемента в пластине в заведомо нагруженном состоянии за счет того, что внешний диаметр фотоупругого элемента, превышает внутренний диаметр посадочного места внутри полого цилиндра на величину, достаточную для жесткого крепления за счет упругости стенок цилиндра. При монтаже фотоупругого элемента внутри нагрузочного

элемента стенки цилиндра упруго раздвигаются, благодаря четырем разрезам в цилиндре и упругости материала цилиндра. После монтажа фотоупругий элемент зажат стенками цилиндра, что обеспечивает работу тензометрического датчика, как на сжатие, так и на растяжение. Четыре продольных разреза в полom цилиндре нагрузочного элемента обеспечивают также действие исходной силовой нагрузки на фотоупругий элемент в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Это, в свою очередь, обеспечивает неизменность распределения напряжений в фотоупругом элементе при деформациях, связанных с изменением температуры, как самого цилиндра, так и контролируемого объекта, что, в свою очередь, обеспечивает температурную независимость сигнала.

Фотоупругий элемент может иметь форму цилиндра или усеченного конуса.

Для повышения надежности крепления фотоупругого элемента и повышения чувствительности преобразователя посадочное место фотоупругого элемента может быть образовано выступами на внутренней поверхности цилиндра, которые в случае выполнения фотоупругого элемента в виде усеченного конуса, образуют конусовидное отверстие, ось которого совпадает с осью цилиндра, причем углы конуса отверстия и конуса фотоупругого элемента совпадают и равны конусу Морзе, а средний диаметр фотоупругого элемента, превышает средний диаметр отверстия на величину, достаточную, для жесткого крепления за счет упругости стенок цилиндра.

Выступы на внутренней поверхности цилиндра обеспечивают концентрацию напряжений на фотоупругом элементе в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что повышает чувствительность преобразователя. Для большей концентрации напряжений на фотоупругом элементе выступы выполнены в виде ребер с уменьшенной площадью контакта с фотоупругим элементом.

Нагрузочный элемент снабжен наружными выступами с монтажными отверстиями для крепления к контролируемому объекту. Для повышения надежности крепления нагрузочного элемента на наружных выступах могут быть выполнены зубья, лежащие в одной плоскости.

На рисунке 7.3.5, *а* показана конструкция датчика с фотоупругим элементом 3, выполненным в виде конуса Морзе, на внутренней поверхности цилиндра нагрузочного элемента имеются ребра 8 с уменьшенной площадью контакта с фотоупругим элементом 3, образующие конус Морзе для крепления фотоупругого элемента 3.

Фотоупругий элемент может также быть выполненным в виде цилиндра, внешний размер которого превышает размер посадочного места на заданную величину (рис. 7.3.5).

В некоторых случаях измерения напряжений, например, в железобетонной балке, более удобным способом крепления нагрузочного элемента является его закрепление внутри монтажного отверстия, выполненного в контролируемом объекте, которое может быть как сквозным, так и глухим. В этом варианте конструкции датчика наружная поверхность полого цилиндра нагрузочного элемента выполнена в виде конуса Морзе. Монтажное отверстие в контролируемом объекте может иметь форму цилиндра или конуса Морзе, при этом средний диаметр монтажного отверстия должен быть равен среднему диаметру конуса Морзе нагрузочного элемента.

На рисунке 7.3.5, *б* показан вариант конструкции датчика с нагрузочным элементом 1, у которого внешняя поверхность выполнена в виде конуса Морзе для крепления внутри монтажного отверстия, в контролируемом объекте 6.

Наибольшая эффективность передачи деформации на фотоупругий элемент достигается в конструкции, обеспечивающей расположение фотоупругого элемента на уровне поверхности контролируемого объекта (рис. 7.3.5, *в*).

7.3.3 Пьезооптический датчик с герметичным корпусом

В случае использования датчика деформации в условиях повышенной запылённости и влажности конструкция преобразователя должна обеспечивать герметичность пьезооптического преобразователя без ухудшения чувствительности тензометрического датчика. Данная задача решена за счёт того, что нагрузочный элемент представляет собой сплошной полый цилиндр из

упругого материала с толщиной стенок, обеспечивающей необходимую упругость нагрузочного элемента в направлении измеряемых деформаций и определяющую чувствительность тензометрического датчика, который с торцов герметично закрыт, а с внешней стороны снабжен жесткими выступами, расположенными симметрично относительно оси цилиндра, предназначенными для крепления тензометрического датчика на контролируемом объекте и передачи деформации этого объекта на фотоупругий элемент [213].

Описание герметичного датчика поясняется рисунком 7.3.6 *а, б, в.*, где *1* — нагрузочный элемент (сплошной цилиндр), *2* — наружные выступы с монтажными отверстиями (два, четыре или более), *3* — фотоупругий элемент.

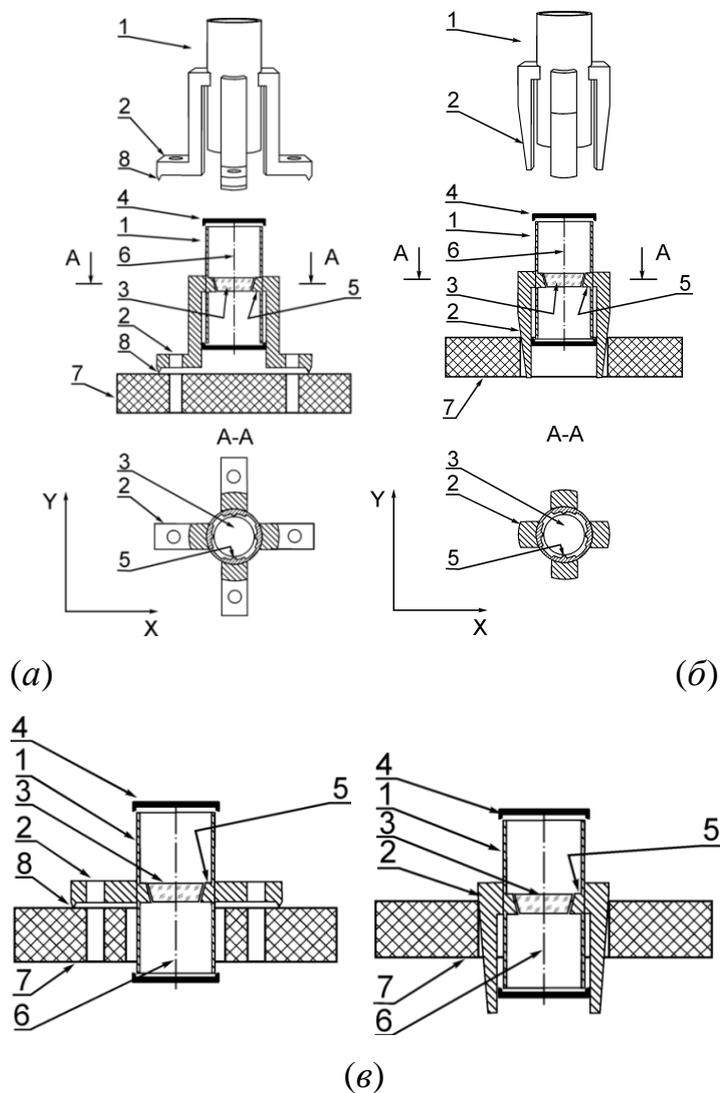


Рисунок 7.3.6 — Схема пьезооптического преобразователя с нагрузочным элементом в виде герметичной цанги

Торцы цилиндра *1* герметично закрываются крышками *4*. На внутренних стенках цилиндра нагрузочного элемента выполнены выступы *5*, также образующие цилиндрическую поверхность (посадочное место) для крепления фотоупругого элемента, при этом ось фотоупругого элемента и ось цилиндра посадочного места совпадают.

Благодаря упругости стенок цилиндра, фотоупругий элемент зажат в направлении *X* (в случае в двух наружных выступов) или в двух взаимно перпендикулярных направлениях *X* и *Y* (в случае четырёх и более наружных выступов). Пьезооптический преобразователь расположен внутри цилиндра так, что его оптическая ось *b* совпадает с осью цилиндра. Для повышения надежности крепления нагрузочного элемента *1* к контролируемому объекту *7* на наружных выступах *2* выполнены зубья *8*.

На рисунке 7.3.6 *a*, показана конструкция тензометрического датчика с фотоупругим элементом *3*, выполненным в виде конуса Морзе, на внутренней поверхности цилиндра нагрузочного элемента выступы *5* выполнены в форме ребер с уменьшенной площадью контакта с фотоупругим элементом *3*, образующие конус Морзе для крепления фотоупругого элемента *3*.

На рисунке 7.3.6 *б* показан вариант конструкции тензометрического датчика с нагрузочным элементом *1*, у которого внешняя поверхность наружных выступов выполнена в виде конуса Морзе для крепления внутри монтажного отверстия, в контролируемом объекте *7*.

На рисунке 7.3.6 *в* показана конструкция тензометрического датчика, в котором фотоупругий элемент *3* расположен на уровне поверхности контролируемого объекта *7*.

7.3.4 Пьезооптический датчик с термокомпенсацией

Третьей задачей в разработке пьезооптического преобразователя новой конструкции было создание тензометрического преобразователя, в котором, во-первых, закрепление фотоупругого элемента в изначально нагруженном состоянии осуществляется более простым, по сравнению с конусом Морзе,

способом, а во-вторых, термокомпенсация обеспечивалась более надежным способом.

Поставленная задача решена за счет того, что нагрузочный элемент представляет собой пластину с цилиндрическим отверстием в центре, в котором регулируемо зажат фотоупругий элемент цилиндрической формы в направлении действия измеряемых деформаций с помощью двух стержней расчетной длины из материала с коэффициентом температурного расширения большим, чем соответствующий коэффициент пластины, обеспечивающих неизменность величины исходного сжатия от изменения температуры [214].

Описание устройства поясняется рисунком 7.3.7.

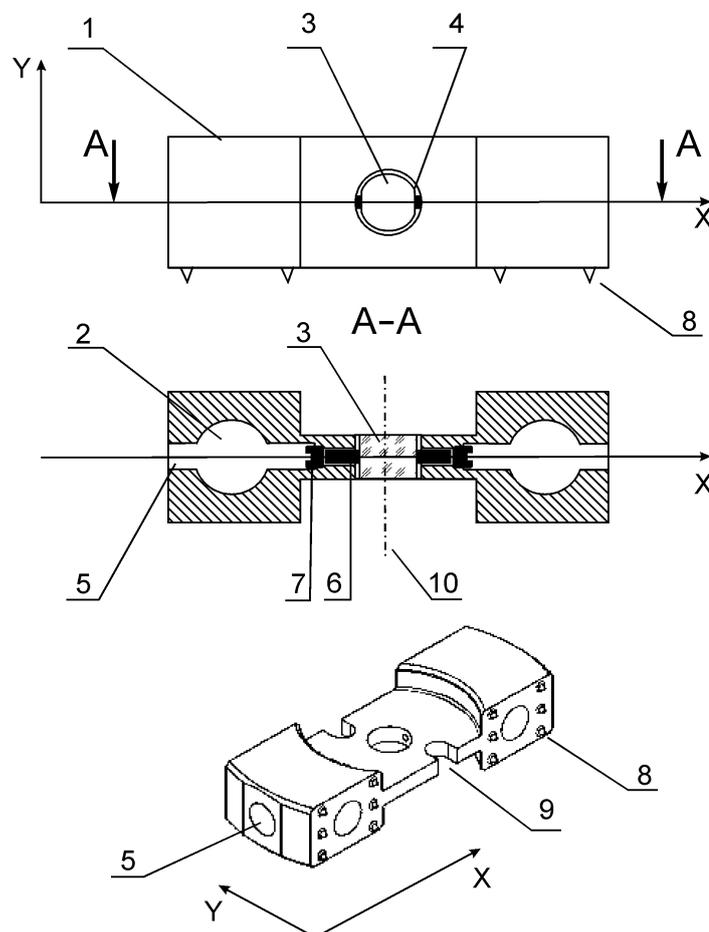


Рисунок 7.3.7 — Схема пьезооптического преобразователя термокомпенсирующими стержнями

На рисунке показана конструкция датчика с фотоупругим элементом, выполненным в виде цилиндра с двумя симметрично расположенными лысками,

где 1 – нагрузочный элемент (пластина), 2 – монтажные отверстия, 3 – фотоупругий элемент, 4 – лыски. В пластине выполнены два отверстия 5, в которые вставляются стержни 6, которые зажимаются винтами 7. Для повышения надежности крепления нагрузочного элемента 1 к контролируемому объекту на поверхности пластины, обращенной к нагрузочному элементу, выполнены зубья 8. Для уменьшения жесткости нагрузочного элемента в направлении измеряемых деформаций, в пластине сделаны пазы 9. Оптическая ось пьезооптического преобразователя показана линией 10.

Материал стержней и их длина выбираются таким образом, чтобы с изменением температуры изменение суммарной длины стержней L_{cm} и ширины фотоупругого элемента $L_{фэ}$ равнялось с достаточной точностью изменению расстояния между местами крепления стержней в нагрузочном элементе (пластине) L_{nl} . Другими словами, относительное удлинение пластины равняется относительному удлинению конструкции стержень – фотоупругий элемент – стержень. Если пластина изготовлена из материала с коэффициентом линейного расширения $\alpha_{пл}$, стержни имеют коэффициент линейного расширения $\alpha_{ст}$, а коэффициент линейного расширения фотоупругого элемента $\alpha_{фэ}$ то вышеизложенное условие можно записать следующим образом:

$$\Delta L_{nl}(T) = \Delta L_{cm}(T) + \Delta L_{фэ}(T), \quad (7.3.1)$$

$$\alpha_{nl} \cdot L_{nl} \cdot \Delta T = \alpha_{cm} \cdot L_{cm} \cdot \Delta T + \alpha_{фэ} \cdot L_{фэ} \cdot \Delta T. \quad (7.3.2)$$

Учитывая, что $L_{nl} = L_{cm} + L_{фэ}$, получаем суммарную длину стержней:

$$L_{cm} = \frac{\alpha_{nl} - \alpha_{фэ}}{\alpha_{cm} - \alpha_{nl}} \cdot L_{фэ}. \quad (7.3.3)$$

Таким образом, при соблюдении условий согласно уравнению (7.3.3), при изменении температуры датчика на фотоупругом элементе не будут возникать дополнительные напряжения и, таким образом, достигается эффект независимости показаний датчика от температуры.

Для примера, рассмотрим пластину, изготовленную из стали ШХ15 с коэффициентом линейного температурного расширения $\alpha_{пл} = 11.9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;

фотоупругий элемент диаметром $L_{фэ} = 6$ мм, изготовленный из плавленного кварца с $\alpha_{фэ} = 0.395 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; стержни, изготовленные из нержавеющей стали с $\alpha_{ст} = 16.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Тогда, подставляя значения в формулу (7.3.3), получаем суммарную длину стержней $L_{ст} = 14.68$ мм. Если стержни изготавливаются одинаковой длины, то длина одного стержня составляет $L_{ст} / 2 = 7.34$ мм.

Начальная нагрузка на фотоупругом элементе обеспечивается винтами, вкручиваемыми в пластину, и зажимающими стержни, между которыми расположен фотоупругий элемент. Винты изготавливаются из материала пластины.

Нагрузочный элемент (пластина) с пьезооптическим преобразователем закрепляется на контролируемом объекте таким образом, чтобы ось стержней совпадала с направлением измеряемых деформаций контролируемого объекта. Деформация контролируемого объекта передается на пластину, затем на стержни и через них – на фотоупругий элемент пьезооптического преобразователя, оптическая ось которого лежит в плоскости, перпендикулярной направлению измеряемых деформаций.

Нагрузочный элемент снабжен монтажными отверстиями для крепления к контролируемому объекту. Для повышения надежности крепления нагрузочного элемента на его поверхности, контактирующей с контролируемым объектом, выполнены зубья, лежащие в одной плоскости.

Для повышения чувствительности датчика к деформации, в пластине изготовлены пазы, не нарушающие её целостности, которые уменьшают жёсткость пластины в направлении измеряемых деформаций и не вносящие искажений в передачу деформации на фотоупругий элемент.

Для обеспечения надёжного контакта стержней с фотоупругим элементом, на поверхности цилиндра выполнены симметрично расположенные плоские площадки (лыски), в которые упираются стержни.

Так как фотоупругий элемент зажат с помощью стержней, имеющих плоский торец, то нет необходимости изготавливать конус Морзе, что сопряжено с серьёзными технологическими трудностями. Так как фотоупругий элемент

изначально сжат, то датчик с одинаковой чувствительностью работает как на сжатие, так и на растяжение. Длина стержней подбирается таким образом, чтобы выполнить условие формулы (7.3.3), при этом изменения размеров элементов нагрузочного элемента, связанные с изменением температуры, не приводят к дополнительным напряжениям на фотоупругом элементе, то есть достигается эффект термокомпенсации. За счёт крепления фотоупругого элемента с помощью стержней расчетной длины достигается упрощение конструкции и обеспечивается более надёжная компенсация напряжений, связанных с изменением температуры датчика.

7.3.5 Оптимизация формы фотоупругого элемента

Как было показано в разделе 3.1, коэффициент тензочувствительности пьезооптического преобразователя зависит от его конструкции, а именно: от используемой рабочей длины волны светодиода, толщины и конфигурации фотоупругого элемента, определяющие величину напряжений в рабочей области фотоупругого элемента. Поэтому в данной работе была поставлена задача оптимизации конструкции фотоупругого элемента с целью увеличения напряжений в рабочей области и, тем самым, увеличения чувствительности к деформации. Рассмотрим схему пьезооптического преобразователя (ПП), приведенную на рисунке 7.3.8 [215]. ПП состоит из оптически связанных элементов: источника света (1), обычно это светодиод, поляризатора (2), четвертьволновой пластины (3), фотоупругого элемента (ФЭ) (4), двух анализаторов (5), и двух фотоприёмников (6).

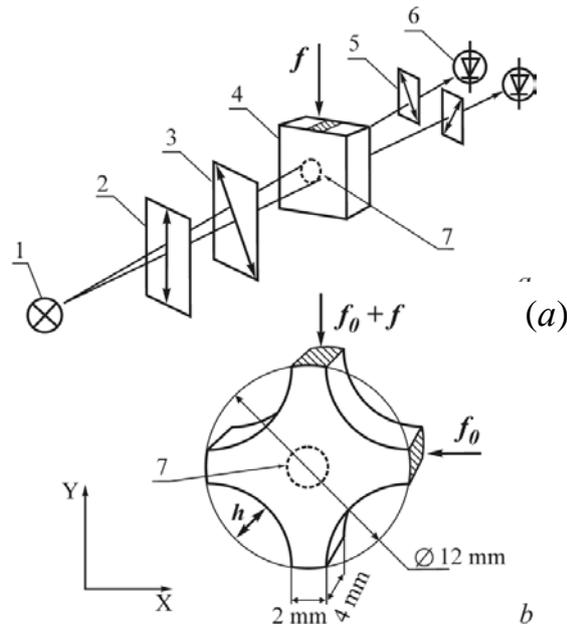


Рисунок 7.3.8 — Схема пьезооптического преобразователя:

(а) – оптическая схема преобразователя, 1 – источник света, 2 – поляризатор, 3 – четвертьволновая пластина, 4 – фотоупругий элемент, к которому прикладывается измеряемая внешняя сила f , 5 – анализаторы, 6 – фотоприемники, 7 – рабочая область фотоупругого элемента;

(б) – формы фотоупругого элемента и схема приложения силы f , f_0 — сила предварительного двухосного сжатия

Изначально неполяризованный световой поток Φ_0 от светодиода (1) после прохождения поляризатора (2) и четвертьволновой пластины (3) приобретает круговую поляризацию и проходит сквозь ФЭ. Далее, после прохождения двух анализаторов (5), оптические оси которых перпендикулярны друг другу, световые потоки Φ_1 и Φ_2 попадают на фотоприёмники (6). При приложении нагрузки к ФЭ вдоль одной из его осей возникают дополнительные напряжения σ_x и σ_y в центральной части ФЭ. В результате возникает дополнительная разность фаз Δ между взаимно перпендикулярными компонентами поляризации луча, прошедшего сквозь ФЭ, обусловленная двулучепреломлением (3.6) и (3.7). Изменение фазы поляризации приводит к изменению интенсивности световых потоков, падающих на фотоприёмники (Φ_1 , Φ_2) и, соответственно, электрических сигналов на выходе фотоприемников (I_1 , I_2), что приводит к изменению

выходного сигнала преобразователя, пропорционального $(I_1 - I_2) / (I_1 + I_2) \sim \Delta$, величина которого пропорциональна величине $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$ (3.7), то есть, величине измеряемого напряжения (деформации) [215].

Ключевым элементом пьезооптического преобразователя является фотоупругий элемент (ФЭ), который бывает разных форм: параллелепипед [202–207], усеченный конус или цилиндр [211–214]. Фотоупругий элемент крепится в нагрузочном элементе (на рисунке не показан), с помощью которого внешняя нагрузка передается на ФЭ. Рабочей областью ФЭ является только та область, проходя через которую, свет попадает на фотоприемники (штриховая окружность на рисунке 7.3.8, позиция 7). Остальная часть ФЭ не принимает участия в формировании выходного сигнала. В литературе не известны исследования, направленные на выяснение влияния формы ФЭ и способа его крепления в нагрузочном элементе на распределение напряжений в рабочей области ФЭ, которые определяют чувствительность преобразователя.

В данной работе методами численного моделирования проведено исследование распределения напряжений в ФЭ разных конструкций, возникающих при приложении внешней нагрузки, с целью определения оптимальной формы ФЭ, максимально передающей внешнее прикладываемое напряжение в рабочую область ФЭ.

В качестве материала ФЭ был выбран плавленый кварц. Для моделирования были рассмотрены различные формы ФЭ (рис.7.3.9): прямоугольная в плане (а), круглая (б) и крестообразные формы ФЭ (в) – (е) одинакового поперечного размера 12 мм (рис. 7.3.8) [216]. Толщина ФЭ всех форм бралась одинаковой и равной $d = 4$ мм. Размеры ФЭ брались исходя из размеров реально используемых ФЭ. Крестообразная форма ФЭ так же варьировалась изменением величины «углубления» h , показанного на рисунке 7.3.9, d , которая отсчитывалась по радиусу от окружности, описывающей крестообразные ФЭ.

Разность фаз между продольными и поперечными компонентами поляризации после прохождения напряженного оптического материала толщиной d рассчитывалась согласно выражению (3.7). Расчеты величины $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$

проводились методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Внешняя сила F прикладывалась к ФЭ крестообразной формы в направлении оси Y однородно к торцу шириной 2 мм и глубиной 4 мм (заштрихованная область на рисунке 7.3.8). Такая же площадка использовалась для приложения силы к круглому и квадратному ФЭ для корректного сравнения. Тем не менее, в большинстве известных конструкций пьезооптических преобразователей ФЭ имеет форму параллелепипеда, и нагрузка к нему прикладывается однородно ко всему торцу. Используются даже специальные дополнительные приспособления, чтобы обеспечить однородность прилагаемой нагрузки.

При проведении моделирования ФЭ предварительно сжимался в направлении осей X и Y с одинаковой силой f_0 (рис.7.3.8, *b*). Создание исходного напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях позволяет, во-первых, работать ФЭ одинаково эффективно как на сжатие, так и на растяжение. Во-вторых, действие исходной силовой нагрузки в двух взаимно перпендикулярных направлениях обеспечивает неизменность распределения напряжений в фотоупругом элементе при деформациях, связанных с изменением температуры, что, в свою очередь, обеспечивает температурную независимость сигнала [211]. На рисунке 7.3.9 показаны результаты численного моделирования напряжений в ФЭ разной формы при одинаковой внешней силе $f = 4$ Н и силе предварительного сжатия $f_0 = 1$ Н. Значения сил выбирались достаточно произвольно, так как от их величины качественная картина распределения напряжений в ФЭ не зависит. Для каждой формы ФЭ приведены изолинии $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$. Численные значения величины $\Delta\sigma$ указаны на рисунке цифрами в МПа. Величина «углубления» h на рисунке 7.3.9, *в, г, д, е* равнялась 1.1 мм, 2.55 мм, 3.0 мм и 4.0 мм, соответственно. Исходя из реальных конструкций пьезооптических преобразователей, мы взяли размер рабочей области ФЭ равный $\varnothing 2.3$ мм. Данная область показана на рисунке 7.3.8 штриховой окружностью (позиция 7). Напряжения только в этой области определяют величину выходного электрического сигнала, т. е. чувствительность преобразователя. Выходной

сигнал пьезооптического преобразователя пропорционален величине напряжений $\Delta\sigma_p$, усредненной по рабочей области диаметром 2.3 мм.

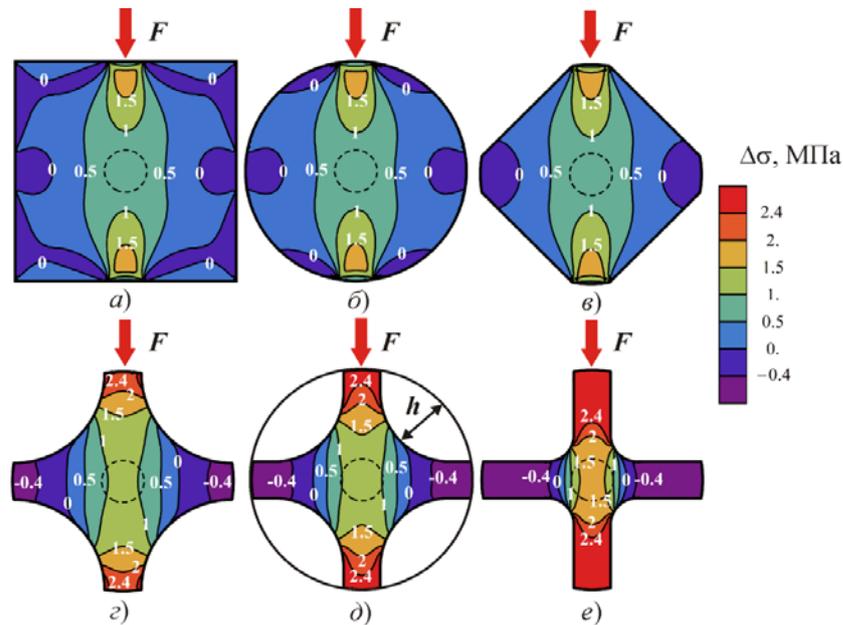


Рисунок 7.3.9 — Изолинии величины разности напряжений $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$ (в МПа) для фотоупругих элементов разных форм:

- (a) – квадрат,
- (б) – круг,
- (в) – ромб $h = 1.1$,
- (г) – крест при $h = 2.55$ мм,
- (д) – крест при $h = 3.0$ мм,
- (е) – крест при $h = 4.0$ мм.

Из рисунка видно, что как для квадратной, так и для круглой формы ФЭ напряжения сконцентрированы на периферии ФЭ, вблизи областей его касания с нагрузочным элементом пьезооптического датчика деформации, в котором закреплен ФЭ, и значительно спадают к центру ФЭ. В то время как световой пучок проходит именно через рабочую область ФЭ, т.е. в области минимальных напряжений.

Из рисунка также видно, что при переходе от квадратной формы ФЭ к круглой форме картина напряжений практически не меняется. При переходе же к крестообразной форме и по мере увеличения «углубления» h напряжения

увеличиваются и перераспределяются ближе к центру ФЭ, то есть в ту актуальную область, где проходит световой луч. Следует отметить, что перераспределение поля напряжений происходит при одинаковой внешней силе, т. е. только за счет изменения формы ФЭ. На рисунке 7.3.10 приведена зависимость величины $\Delta\sigma_{\text{ср}} (1)$ ($\Delta\sigma$, усредненная по рабочей области ФЭ) от формы ФЭ и величины «углубления» h .

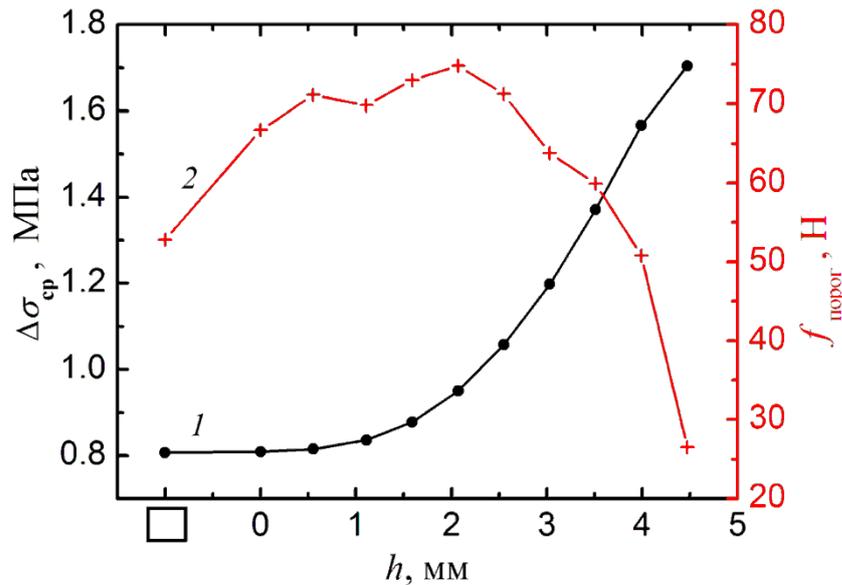


Рисунок 7.3.10 — Зависимость напряжений в рабочей области ФЭ $\Delta\sigma_{\text{ср}}$ и порога разрушения $f_{\text{порог}}$ от величины «углубления» h :

1 — зависимость величины разности напряжений $\Delta\sigma_{\text{ср}}$, усредненной по рабочей области ФЭ,

2 — зависимость величины порога разрушения $f_{\text{порог}}$ от величины «углубления» h .

Значения $\Delta\sigma_{\text{ср}}$ и $f_{\text{порог}}$ для квадратной формы фотоупругого элемента показаны квадратом на оси абсцисс. Расчетные точки соединены прямыми линиями для удобства восприятия

Величина $\Delta\sigma_{\text{ср}}$ для квадратной формы ФЭ при приложении внешней силы к площадке 2×4 мм соответствует квадрату на оси абсцисс. При приложении внешней силы однородно ко всему торцу квадратного ФЭ площадью 12×4 мм дает величину $\Delta\sigma_{\text{ср}}$ вдвое меньшую по сравнению с площадкой 2×4 мм. Таким образом, приложение однородной нагрузки ко всей поверхности ФЭ не

эффективно с точки зрения повышения чувствительности пьезооптического преобразователя. Из рисунка видно, что переход от квадратной к круглой форме ФЭ не дает выигрыша в $\Delta\sigma_{\text{ср}}$. При значениях «углубления» h от 0 примерно до 2 мм рост величины $\Delta\sigma_{\text{ср}}$ также незначителен. Резкое увеличение напряжений в актуальной области начинается с величины h более 2 мм. Таким образом, эффективность крестообразной формы ФЭ начинает сказываться примерно с формы, показанной на рисунке 7.3.9, *г* ($h = 2.55$ мм). Увеличение напряжений в рабочей области здесь составляет около 38%, а для формы ФЭ, показанной на рисунке 7.3.9, *е* ($h = 4.0$ мм), напряжения увеличиваются почти вдвое. Примерно на эту же величину растет и выходной сигнал преобразователя.

Однако, очевидно, что увеличение «углубления» будет приводить к снижению механической прочности ФЭ к прилагаемым нагрузкам. Для исследования этой проблемы были проведены численные расчеты порога разрушения ФЭ в зависимости от его формы. Расчеты также проводились методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics. Величина напряжений, возникающих в ФЭ разных форм, сравнивалась с пределом прочности кварца, равным 51.7 МПа [217]. На рисунке 7.3.10 (кривая 2) показана зависимость величины пороговой силы $f_{\text{порог}}$, при которой происходит разрушение ФЭ. Из рисунка видно, что при переходе от квадратной формы ФЭ к круглой порог разрушения увеличивается и продолжает расти даже при увеличении «углубления» h вплоть до 2 мм. При дальнейшем увеличении h порог разрушения $f_{\text{порог}}$ начинает уменьшаться. При h равном примерно 4 мм порог сравнивается с порогом для квадратной формы и далее начинает резко уменьшаться. Некоторые немонотонности в зависимости $f_{\text{порог}}(h)$ связаны с качественным изменением формы ФЭ: переход от выпуклых поверхностей к вогнутым и далее с появлением плоских участков на боковых поверхностях ФЭ. Из полученной зависимости можно сделать вывод, что увеличение «углубления» вплоть до 4 мм (форма ФЭ соответствует 7.3.9, *д*) не приводит к снижению прочностных характеристик ФЭ по сравнению с квадратной формой, при этом наблюдается существенный рост напряжений в рабочей области ФЭ.

Таким образом, в работе показано, что использование крестообразной формы ФЭ в пьезооптическом преобразователе позволяет значительно увеличить значение напряжений в рабочей области ФЭ при одном и том же внешнем усилии, тем самым увеличить чувствительность преобразователя. При этом ФЭ сохраняет свои прочностные характеристики.

7.3.6 Пьезооптический преобразователь с собственным унифицированным корпусом

В предыдущих конструкциях пьезооптических преобразователей нагрузочный элемент является одновременно и корпусом пьезооптического преобразователя, поэтому при изменении конструкции нагрузочного элемента нужно менять конструкцию всего датчика, включая пьезооптический преобразователь. Поэтому следующей *задачей* разработки конструкции пьезооптического преобразователя является создание преобразователя имеющего собственный унифицированный корпус, и который может быть использован с нагрузочными элементами разных конструкций, при этом габаритный размер пьезооптического преобразователя в плоскости измеряемых напряжений не превышает размер фотоупругого элемента.

Поставленная задача решена за счет того, что фотоупругий элемент преобразователя имеет в плане крестообразную форму, фронтальные поверхности которого, параллельные направлению измеряемых усилий, являются оптически плоскими, а боковые поверхности ФЭ имеют постоянный и/или переменный радиус кривизны, при этом пьезооптический преобразователь имеет собственный корпус, который представляет собой цилиндр диаметром меньше, чем внешний диаметр ФЭ и в котором выполнены отверстия, сквозь которые торцы боковых поверхностей ФЭ выступают за внешние габариты цилиндра, а в нагрузочном элементе напротив этих выступов на уровне размещения ФЭ выполнены четыре сквозных резьбовых отверстия, расположенные в плоскости перпендикулярной оси цилиндра и под углом 90 градусов относительно друг друга, под винты, обеспечивающие изначальную силовую нагрузку на ФЭ, при этом система

преобразования величины напряжений на ФЭ в электрический сигнал пьезооптического преобразователя включает механизмы вращения поляризатора и четвертьволновой пластины [218].

На рисунке 7.3.11 показан крестообразный фотоупругий элемент (ФЭ), описанный выше.

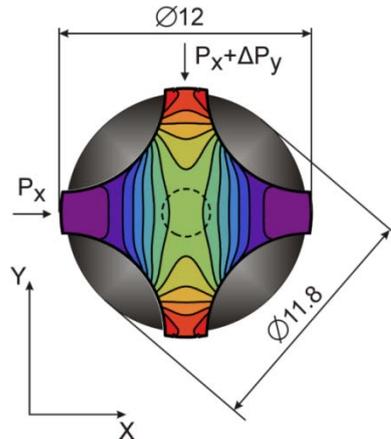


Рисунок 7.3.11 — Фотоупругий элемент в виде креста

Изначально ФЭ упруго сжат в направлении осей X и Y усилиями $P_x = P_y$. Рабочее (измеряемое) усилие ΔP_y прилагается вдоль оси Y. Данная конструкция ФЭ имеет два существенных преимущества. Во-первых, как показано выше, такая форма приводит к увеличению напряжения $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$, в центральной части ФЭ по сравнению с круглым ФЭ при одинаковой внешней нагрузке. Увеличение напряжений происходит именно в той части ФЭ, где проходит световой пучок преобразователя. Например, для формы ФЭ, показанного на рисунке 7.3.11 (внешний диаметр ФЭ 12 мм, глубина «врезки» составляет $d = 2.55$ мм, при этом радиус «врезки» равен 5 мм) увеличение $\Delta\sigma$ по сравнению с круглым ФЭ составляет 32%. То есть, такая форма ФЭ приводит к увеличению эффективности преобразователя. Во-вторых, данная форма ФЭ позволяет разместить узлы крепления элементов пьезооптического преобразователя в промежутках между боковыми поверхностями ФЭ (серые области на рисунке 7.3.11), не выходя за габариты внешнего диаметра ФЭ. Таким образом, поперечный размер пьезооптического преобразователя не будет превышать диаметр ФЭ.

На рисунке 7.3.12 показан пример конструкции пьезооптического преобразователя с поперечными габаритами, не превышающими размер ФЭ.

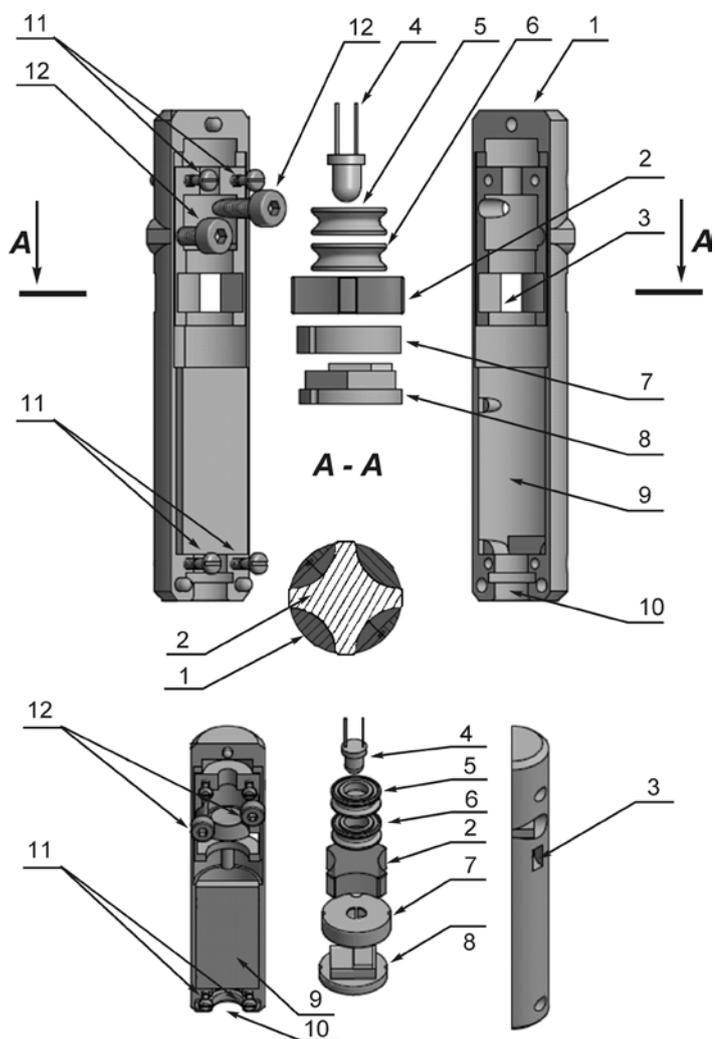


Рисунок 7.3.12 — Схема пьезооптического преобразователя в виде капсулы

Несущей конструкцией является корпус преобразователя (поз. 1) в виде капсулы, собранной из двух половинок. В капсуле размещается крестообразный ФЭ (поз.2) таким образом, что торцы ФЭ через соответствующие отверстия в капсуле (поз.3) выступают наружу на пределы внешнего диаметра капсулы (вид А-А). Для внешнего диаметра ФЭ равного 12 мм диаметр капсулы составляет 11,8 мм. Внутри капсулы в соответствующих посадочных местах размещаются светодиод (поз.4), поляризатор с механизмом вращения (поз.5), четвертьволновая пластина с механизмом вращения (поз.6), диафрагма с двумя анализаторами (поз.7), фотодиод с несколькими (не менее двух) фоточувствительными

элементами (поз.8), блок электронной обработки сигнала (поз.9). Капсула содержит отверстие (поз.10) для вывода сигнального кабеля через герметичный разъем, крепежные винты (поз.11) и винты механизма вращения (поз.12).

Сборка пьезооптического преобразователя производится следующим образом. В одну из половинок капсулы в соответствующие посадочные места укладываются узлы пьезооптического преобразователя: светодиод, поляризатор, четвертьволновая пластина, фотоупругий элемент, диафрагма, анализаторы, фотодиод, блок электронной обработки сигнала. Соединительные провода светодиода укладываются в соответствующие канавки в капсуле.

Сигнальный провод выводится через выходное отверстие. Затем накладывается вторая половинка капсулы и обе половинки стягиваются винтами (поз.11). С целью обеспечения герметичности капсулы зазоры между торцами фотоупругого элемента и соответствующими отверстиями в капсуле (поз.3) промазываются герметиком (например, однокомпонентным герметиком ВГО-1). Кроме того, герметик обеспечивает дополнительную фиксацию фотоупругого элемента. Наличие герметика не влияет на работу преобразователя, так как герметик остается достаточно мягким и находится в местах, не влияющих на распределение напряжений в фотоупругом элементе при приложении рабочих нагрузок. Вращение поляризатора и четвертьволновой пластины при настройке пьезооптического преобразователя осуществляется с помощью винтов (поз.12) по принципу червячной передачи, причем роль червяка выполняет винт, а роль червячного колеса выполняет корпус поляризатора или четвертьволновой пластины, снабженный соответствующей резьбой (рис. 7.3.13). Винты снабжены стопорным кольцом, фиксирующим винт в капсуле.

В качестве материала капсулы использован пластик (например, полистирол или капролон), так как его легче обрабатывать по сравнению с металлом. Такая конструкция изготовлена из ABS или PLA пластика с помощью 3D принтера. В качестве материала поляризатора и анализаторов использованы поляризационные пленки Polaroid. В качестве материала четвертьволновой пластины использована пленка слюды заданной толщины, обеспечивающей сдвиг фазы на 90 градусов

между двумя взаимно перпендикулярными поляризациями светового луча. Блок обработки сигнала имеет как аналоговый выход, так и цифровой выход.

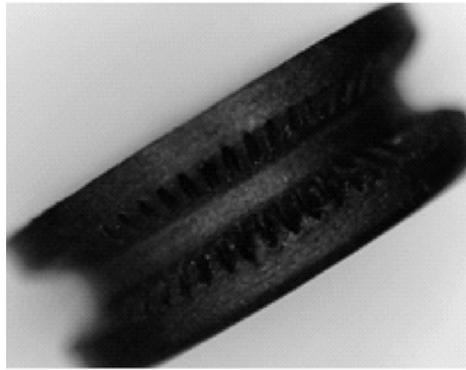


Рисунок 7.3.13 — Корпус поляризатора и четвертьволновой пластины в виде червячного колеса

На рисунке 7.3.14 изображен разработанный тензометрический преобразователь, который включает в себя описанный пьезооптический преобразователь (поз.1) и нагрузочный элемент (поз.13) для крепления тензометрического преобразователя на контролируемом объекте. Нагрузочный элемент представляет собой полый цилиндр (поз.13) с четырьмя симметрично расположенными разрезами (поз.14), не нарушающими целостности цилиндра. Не разрезанная часть цилиндра содержит внешнюю резьбу (поз.15) для наворачивания крепежной гайки (поз.16). Цилиндр имеет четыре внешних выступа (поз.17) со сквозными резьбовыми отверстиями (поз.18), расположенными в плоскости перпендикулярной оси цилиндра и под углом 90 градусов относительно друг друга.

Начальная нагрузка на фотоупругом элементе обеспечивается винтами (поз.19), вкручиваемыми в данные отверстия, и зажимающими фотоупругий элемент с фиксированным усилием. Винты изготавливаются из материала нагрузочного элемента. Внешняя поверхность цилиндра содержит конус (от 1 до 5 градусов) (поз.20), причем средний диаметр конуса равен диаметру монтажного отверстия в контролируемом объекте (поз.21). Для обеспечения скольжения при наворачивании гайки используется шайба (поз.22).

На рисунке 7.3.15 показан пример расположения крестообразного фотоупругого элемента в нагрузочном элементе (остальные элементы пьезооптического преобразователя отсутствуют для наглядности).

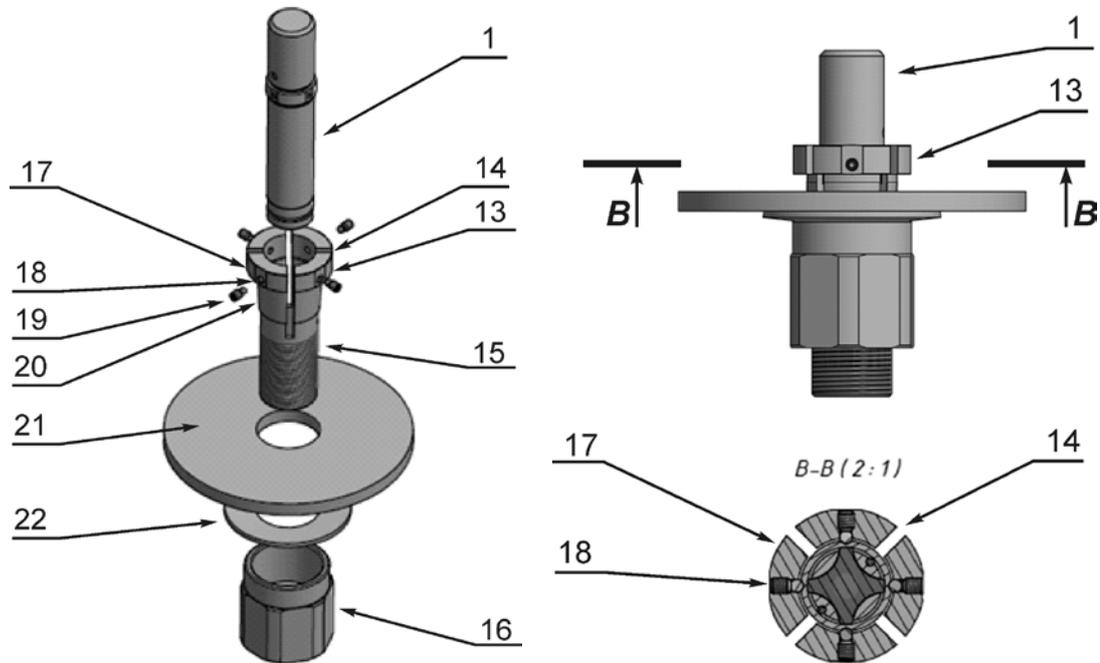


Рисунок 7.3.14 — Тензометрический преобразователь в виде капсулы и один из способов его монтажа на контролируемом объекте с помощью цангового нагрузочного элемента

На рисунке 7.3.16 показано вспомогательное устройство (поз. 23), применяемое при монтаже тензометрического преобразователя на контролируемом объекте.

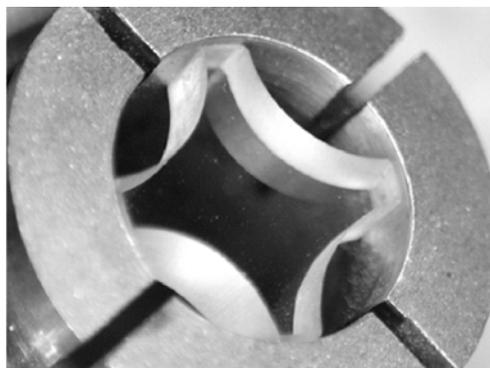


Рисунок 7.3.15 — Расположение фотоупругого элемента в цанговом нагрузочном элементе, остальные элементы преобразователя отсутствуют для наглядности

Монтаж тензометрического преобразователя на контролируемом объекте производится следующим образом. В контролируемом объекте, например, в конструкции, содержащей металлическую пластину, изготавливается отверстие диаметром, равным среднему диаметру конуса нагрузочного элемента. Преобразователь вставляется в подготовленное отверстие и закрепляется с противоположной стороны гайкой с фиксированным усилием. Для обеспечения скольжения при наворачивании гайки используется шайба (поз.22 на рисунке 7.3.14).

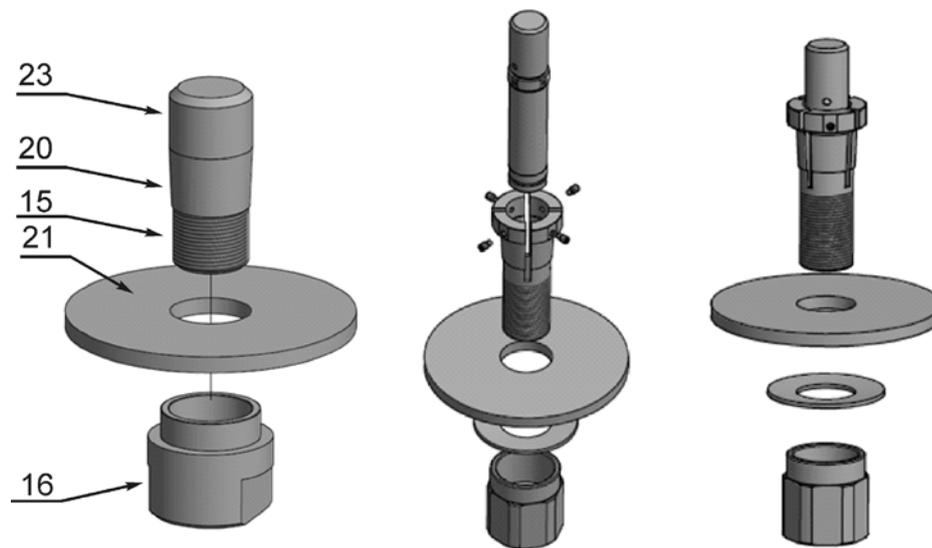


Рисунок 7.3.16 — Методика подготовки посадочного места и установка датчика

Для обеспечения однородности контакта нагрузочного элемента с контролируемым объектом используется устройство, показанное на рисунке 7.3.16 (поз.23). Устройство представляет собой винт, содержащий конус, равный по величине конусу на нагрузочном элементе (поз.20), а так же внешнюю резьбу, аналогичную резьбе на нагрузочном элементе (поз.15). Данное устройство вставляется в отверстие в контролируемом объекте, диаметр которого равен среднему диаметру конуса нагрузочного элемента и зажимается гайкой (поз.16) с контролируемым усилием, обеспечивающим пластическую деформацию материала контролируемого объекта. В результате деформации стенок отверстия, во-первых, формируется конусное отверстие, совпадающее с конусом

нагрузочного элемента, во-вторых, материал стенок отверстия уплотняется, что предотвращает его дальнейшую пластическую деформацию. В результате обеспечивается надежный однородный контакт между нагрузочным элементом и контролируемым объектом.

Материал винта должен иметь величину порога пластической деформации больше, чем материал контролируемого объекта, например закаленная сталь 65Г.

На рисунке 7.3.17 показано охрannое кольцо (поз. 24), используемое для предотвращения скалывания торцов фотоупругого элемента при затяжке его винтами.

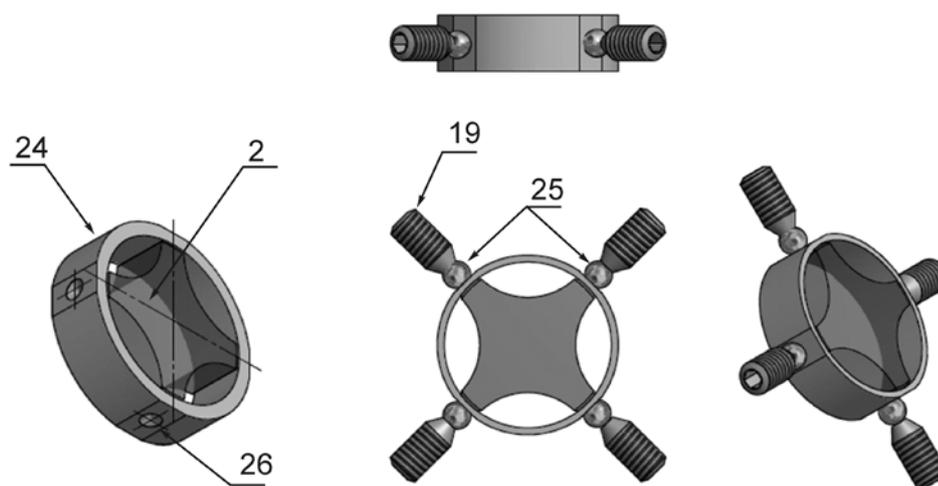


Рисунок 7.3.17 — Фотоупругий элемент в охрannом кольце и способ его крепления с помощью винтов и шариков

Внутренний диаметр кольца меньше внешнего диаметра фотоупругого элемента на заданную величину. При этом винты упираются не в ФЭ, а в металлическое кольцо и усилие более равномерно распределяется по контактной площадке ФЭ. В качестве материала кольца использован инвар 36Н, так как его температурный коэффициент расширения близок к коэффициенту температурного расширения кварца. В результате при изменении температуры ФЭ плотность контакта между ФЭ и кольцом будет оставаться неизменной.

Для получения еще более однородного контакта между винтом и ФЭ использованы шарики заданного диаметра, которые вставляются между винтом и

охранным кольцом (поз.25). При этом в охранном кольце в соответствующих местах изготавливаются лунки (поз.26), задающие центр приложения силы к охранному кольцу и к ФЭ.

На рисунке 7.3.18 показан способ монтажа охранного кольца.

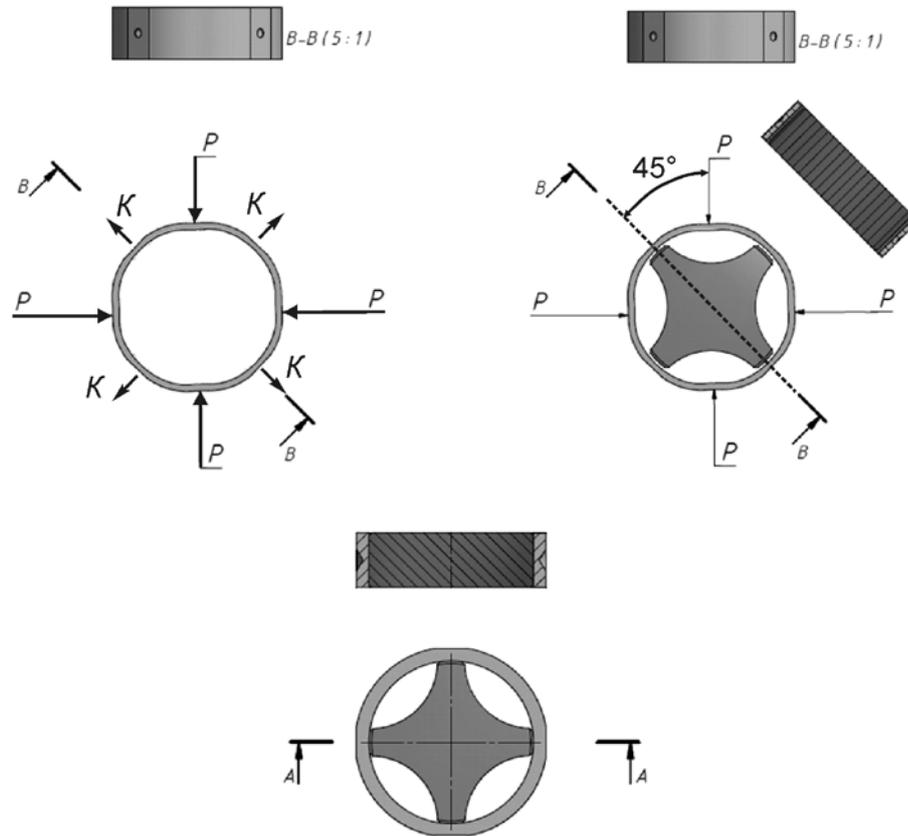


Рисунок 7.3.18 — Способ монтажа фотоупругого элемента в охранное кольцо

Охранное кольцо зажимается в двух взаимно перпендикулярных направлениях, составляющих 45 градусов с осями монтируемого ФЭ, как показано стрелками *P*. В результате охранное кольцо сжимается вдоль осей затяжки, при этом в направлении осей ФЭ охранное кольцо увеличивает свой диаметр (стрелки *K*). Затем внутрь кольца устанавливается ФЭ, и затяжка отпускается. В результате охранное кольцо равномерно обжимает ФЭ, так как его внутренний диаметр меньше внешнего диаметра ФЭ на заданную величину. Для обеспечения надежного контакта торцы ФЭ, перед установкой в охранное кольцо, промазываются силикатным клеем с последующим термическим отжигом. В

результате обеспечивается однородный контакт между ФЭ и охранным кольцом и равномерное распределение усилий по площади выступа ФЭ при затяжке его винтами.

На рисунке 7.3.19 показана схема еще одного нагрузочного элемента. Нагрузочный элемент (поз.13), представляет собой полый цилиндр с четырьмя продольными разрезами, не нарушающими целостности цилиндра (похож на нагрузочный элемент, показанный на рис.7.3.6).

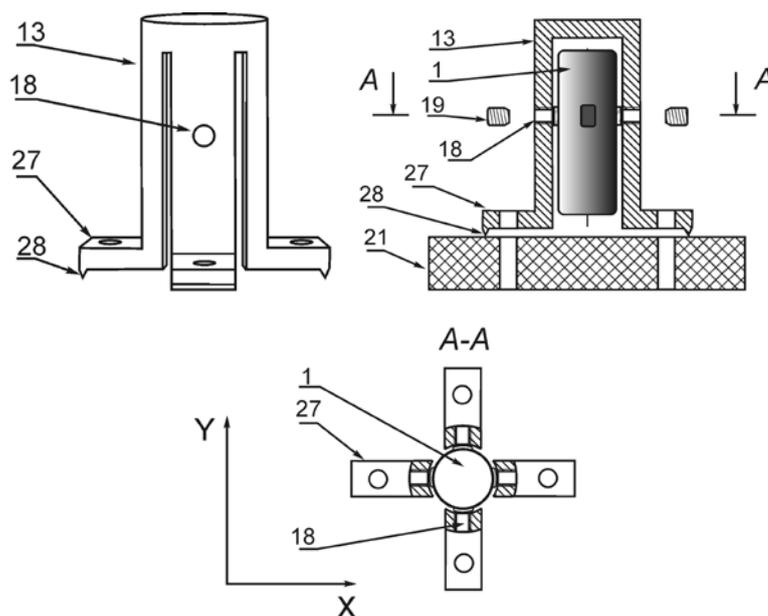


Рисунок 7.3.19 — Пьезооптический преобразователь в виде капсулы в нагрузочном элементе в виде цанги для крепления на поверхности контролируемого образца

В стенках цилиндра на уровне крепления фотоупругого элемента выполнены четыре сквозные резьбовые отверстия (поз.18), лежащие в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра и расположенные под углом 90 градусов относительно друг друга. Пьезооптический преобразователь в капсуле (поз.1) расположен внутри цилиндра так, что его оптическая ось совпадает с осью цилиндра. Фотоупругий элемент, расположенный в капсуле, зажимается винтами (поз.19), вкручиваемыми в отверстия (поз.18) с контролируемым усилием.

Нагрузочный элемент снабжен наружными выступами (поз.27) с монтажными отверстиями для крепления к контролируемому объекту. Для

повышения надежности крепления нагрузочного элемента на наружных выступах могут быть выполнены зубья, лежащие в одной плоскости (поз.28).

Нагрузочный элемент с пьезооптическим преобразователем закрепляется на контролируемом объекте таким образом, чтобы ось пьезооптического преобразователя была перпендикулярна плоскости измеряемых деформаций. Деформация контролируемого объекта передается стенкам цилиндра и через них – фотоупругому элементу пьезооптического преобразователя.

Пьезооптический преобразователь данной конструкции работает следующим образом. Преобразователь закрепляют на контролируемом объекте с помощью нагрузочного элемента и гайки (поз. 13, 16 на рисунке 7.3.14). Деформация растяжения или сжатия, возникающая в контролируемом объекте в направлении X или Y (рис. 7.3.11), передается на фотоупругий элемент через стенки нагрузочного элемента и винты, что приводит к дополнительному сжатию ($+\Delta$) или растяжению ($-\Delta$) фотоупругого элемента. В результате в пьезооптическом преобразователе возникает дополнительная разность фаз $\pm\Delta$ между взаимно перпендикулярными компонентами поляризации луча, прошедшего сквозь фотоупругий элемент, что приводит к изменению электрического сигнала на выходе фотоприемника пьезооптического преобразователя, который регистрируется и обрабатывается блоком обработки сигнала.

На рисунке 7.3.20 показан внешний вид пьезооптического датчика деформации с нагрузочным элементом в виде цанги серии УПС -15.



(a)



(б)

Рисунок 7.3.20 — внешний вид УПС-15

(а) – внешний вид преобразователя в цилиндрическом корпусе, установленного в нагрузочный элемент в виде цанги,

(б) – внешний вид вторичного преобразователя

На рисунке 7.3.21 показан пример крепления УПС-15 на раму лебедки лифта для контроля степени загрузки кабины лифта и других параметров, которые подробно описаны в Главе 5.

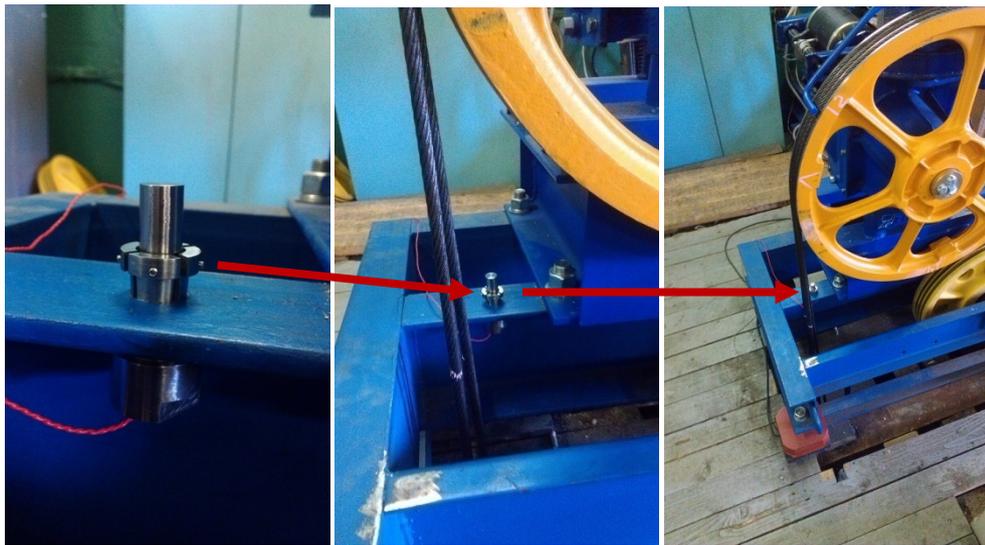


Рисунок 7.3.21 — Пример монтажа датчика на раме лебедки лифта

7.3.7 Устройство для измерения комбинированных деформаций

Традиционные методы измерений деформаций, конструкции фотоупругих элементов и пьезооптических датчиков предназначены для измерения одного из видов существующих деформаций: либо деформации сжатия-растяжения, либо деформации изгиба, либо деформации кручения. Исходя из особенностей каждого вида деформаций, выбираются соответствующие конструкции фотоупругих элементов и нагрузочных элементов. Нагрузочный элемент предназначен для передачи деформации контролируемого объекта на фотоупругий элемент (ФЭ) пьезооптического преобразователя.

Для измерения деформаций кручения известна конструкция, в которой фотоупругий элемент представляет собой втулку из фотоупругого материала, охватывающую часть вращающегося вала [219, 220]. Он жестко закреплён на

поверхности вала, что обеспечивает передачу деформаций, возникающих на валу, на фотоупругий материал. В результате возникающих напряжений в фотоупругом материале в оптической системе, в которую встроены фотоупругий элемент, возникает сигнал, который далее анализируется системой обработки сигнала. Данная система предназначена для измерения деформаций кручения, возникающих при работе вала.

Для измерения одноосных деформаций сжатия известны фотоупругие элементы в форме параллелепипеда [221]. В данных датчиках конструкция нагрузочного элемента выбирается такой, чтобы обеспечивать однородную нагрузку на одну из граней фотоупругого элемента в направлении, перпендикулярном оптической оси пьезооптического преобразователя.

Для измерения напряжений сжатия-растяжения, возникающих в двух взаимно перпендикулярных направлениях, известен фотоупругий элемент в виде цилиндра, усеченного конуса [222] или имеющего крестообразную форму [216]. В данных конструкциях фотоупругий элемент изначально сжат в двух взаимно перпендикулярных направлениях, что обеспечивает его работу, как на сжатие, так и на растяжение, а также температурную компенсацию сигнала при изменении температуры контролируемого объекта. Конструкция нагрузочных элементов в данных датчиках предназначена для передачи деформации на фотоупругий элемент в двух взаимно перпендикулярных направлениях, лежащих в плоскости, перпендикулярной оптической оси пьезооптического преобразователя.

Недостатками описанных способов измерения деформаций является то, что существующие конструкции датчиков деформации позволяют измерять либо деформации, возникающие по одной выделенной оси, либо в двух взаимно перпендикулярных направлениях, либо деформации кручения. Данные датчики не позволяют одинаково эффективно измерять деформации сжатия-растяжения, изгиба и кручения, возникающие в контролируемом объекте в произвольном направлении.

В данной работе была поставлена задача создания такой формы фотоупругого элемента, конструкции пьезооптического преобразователя и

способа измерения деформаций любого вида (сжатия-растяжения, изгиба, кручения), возникающих в контролируемом объекте в любом направлении.

Поставленная задача решена за счет того, что фотоупругий элемент пьезооптического преобразователя имеет в плане звездообразную форму с неограниченным количеством лучей с единым центром, причем поверхности фотоупругого элемента, перпендикулярные оптической оси пьезооптического преобразователя, выполнены плоскопараллельными, а боковые поверхности фотоупругого элемента – либо плоскими, либо имеют постоянный и/или переменный радиус кривизны [223].

Отношение линейного размера фотоупругого элемента, в плоскости перпендикулярной оптической оси преобразователя, к его толщине, как показали оценки, должно лежать в пределах 2–5.

Поверхности торцов лучей могут быть плоскими, либо образовывать цилиндрическую поверхность, либо могут иметь сферически выпуклую или сферически вогнутую форму.

Конструкция заявляемого тензометрического преобразователя поясняется рисунками 7.3.22–7.3.26, где:

- 1 – внутренняя часть фотоупругого элемента,
- 2 – боковые поверхности фотоупругого элемента,
- 3 – торцы лучей фотоупругого элемента,
- 4 – промежутки между боковыми поверхностями фотоупругого элемента,
- 5 – внешняя часть фотоупругого элемента,
- 6 – связующее вещество,
- 7 – сферические упоры,
- 8 – установочные гнезда для сферических упоров,
- 9 – шариковый или роликовый подшипник,
- 10 – несущие элементы пьезооптического преобразователя,
- 11 – источник света,
- 12 – поляризатор,
- 13 – фазовая пластина,

- 14 – анализатор,
- 15 – фотодетектор,
- 16 – оптическая ось пьезооптического преобразователя,
- 17 – корпус пьезооптического преобразователя,
- 18 – отверстия в корпусе пьезооптического преобразователя,
- 19 – нагрузочный элемент,
- 20 – регулировочные винты,
- 21 – установочные гнезда в винтах для фиксации сферических упоров.

На рисунке 7.3.22, *а* показан пример фотоупругого элемента (ФЭ), который в плане имеет звездообразную форму (поз.1), боковые поверхности которого (поз.2) имеют переменный радиус кривизны, а поверхности торцов (поз.3) образуют цилиндрическую поверхность.

Данная конструкция ФЭ имеет ряд существенных преимуществ. Во-первых, такая форма ФЭ позволяет измерять деформации, возникающие в любом направлении в плоскости, перпендикулярной оптической оси пьезооптического преобразователя. Во-вторых, как показали расчеты, такая форма приводит к увеличению напряжения $\Delta\sigma = \sigma_x - \sigma_y$, в центральной части ФЭ по сравнению с круглым ФЭ при одинаковой внешней нагрузке. Увеличение напряжений происходит именно в той части ФЭ, где проходит световой пучок поляризованного света преобразователя. То есть, такая форма ФЭ приводит к увеличению эффективности преобразователя. В-третьих, данная форма ФЭ позволяет разместить узлы крепления элементов пьезооптического преобразователя в промежутках между боковыми поверхностями ФЭ (поз.4), не выходя за габариты внешнего диаметра ФЭ. Таким образом, поперечный размер пьезооптического преобразователя не будет превышать диаметр ФЭ, что позволяет использовать пьезооптический преобразователь в собственном корпусе с нагрузочными элементами различной конструкции.

На рисунке 7.3. 22, *б* показан пример фотоупругого элемента, состоящего из двух частей – внутренней (поз.1) и внешней (поз.5).

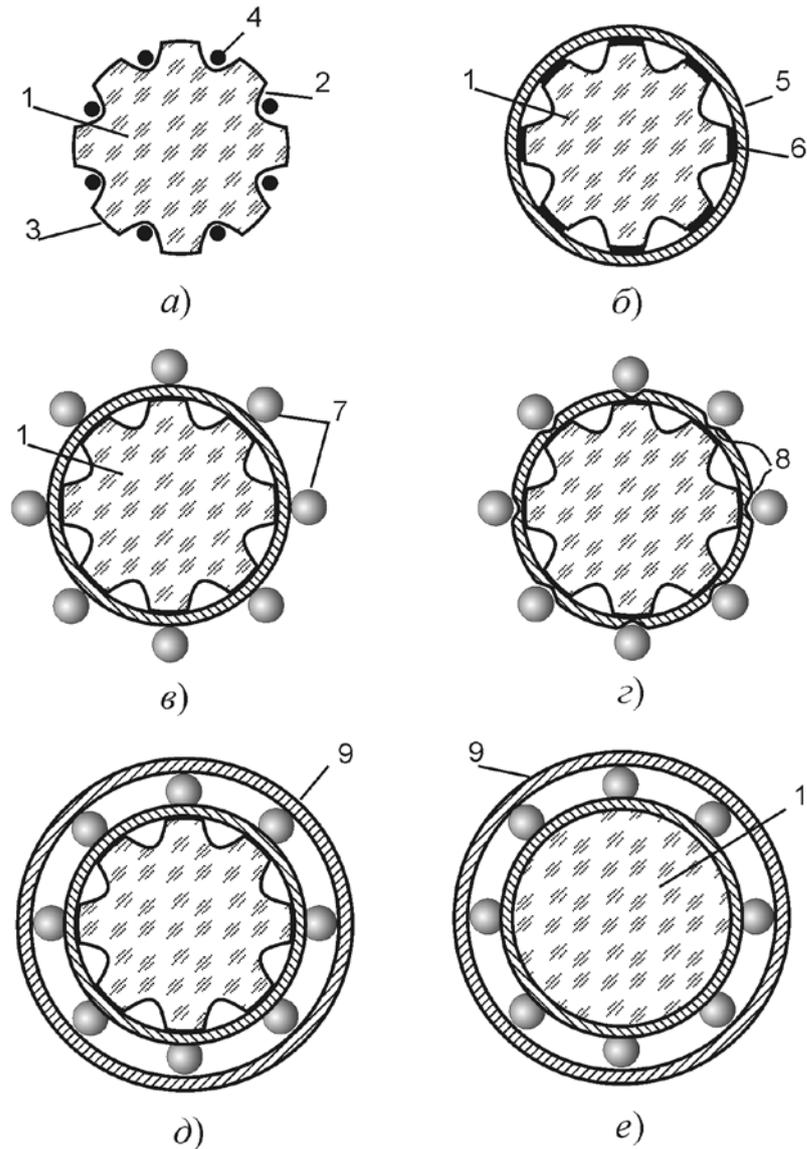


Рисунок 7.3.22 — Фотоупругие элементы разной конструкции

Внутренняя часть имеет звездообразную форму и выполнена из оптически прозрачного материала, а внешняя часть выполнена в виде кольца. Внешний диаметр внутренней части, и внутренний диаметр внешней части совпадают или отличаются на заданную величину. Зазор между частями в области торцов звезды может быть заполнен отвердевающим связующим веществом, обеспечивающим однородность контакта (поз.б).

Внешняя часть фотоупругого элемента выполнена из материала, способного к упругой деформации и имеющего коэффициент температурного расширения, близкий к соответствующему коэффициенту материала внутренней части

фотоупругого элемента. При этом внешняя часть фотоупругого элемента имеет заданную жесткость в зависимости от диапазона измеряемых деформаций и конструкции нагрузочного элемента. Жесткость кольца обеспечивает напряжения в фотоупругом элементе, возникающие при приложении измеряемой нагрузки, ниже порога хрупкого разрушения или пластической деформации материала, из которого изготовлен фотоупругий элемент.

Жесткость внешней части определяется по формуле:

$$K = F/\Delta x_{\text{порог}} = c \cdot F \cdot E / (\sigma_{\text{порог}} \cdot D), \quad (7.3.4)$$

где K – жесткость внешней части в направлении прилагаемой силы F , $\Delta x_{\text{порог}}$ – пороговая деформация разрушения или пластической деформации материала внутренней части фотоупругого элемента, E – модуль Юнга внутренней части фотоупругого элемента, $\sigma_{\text{порог}}$ – порог разрушения или пластической деформации материала внутренней части фотоупругого элемента, D – длина внутренней части фотоупругого элемента в направлении прилагаемой силы, c – коэффициент запаса прочности, который определяет, во сколько раз напряжения, возникающие во внутренней части фотоупругого элемента, меньше порогового значения.

Внутренняя и внешняя части фотоупругого элемента могут иметь одинаковую или разную высоту в зависимости от конструкции нагрузочного элемента.

На рисунке 7.3.22, *в* показан пример размещения сферических упоров (поз.7) по периферии фотоупругого элемента, состоящего из двух частей. Сферические упоры располагаются напротив торцов лучей для наиболее эффективной передачи деформаций на внутреннюю часть фотоупругого элемента (поз.1).

На рисунке 7.3.22, *г* показан пример фотоупругого элемента, во внешней части которого напротив торцов лучей внутренней части выполнены установочные гнезда (поз.8) для фиксированной посадки сферических упоров.

На рисунке 7.3.22, *д* показан пример фотоупругого элемента, внешняя часть которого представляет собой либо шариковый, либо роликовый подшипник (поз.9).

На рисунке 7.3.22, *e* показан пример фотоупругого элемента, внешняя часть которого представляет собой либо шариковый, либо роликовый подшипник (поз.9), а внутренняя часть выполнена в виде цилиндра (поз.1).

Жесткость внутреннего и внешнего кольца подшипника выбирается в зависимости от диапазона измеряемых деформаций и конструкции нагрузочного элемента. Жесткость колец должна обеспечивать напряжения в фотоупругом элементе, возникающие при приложении измеряемой нагрузки, ниже порога хрупкого разрушения или пластической деформации материала, из которого изготовлен фотоупругий элемент. Жесткость рассчитывается по формуле (7.3.4).

На рисунке 7.3.23 показан пример закрепления элементов пьезооптического преобразователя с использованием промежутка между лучами звездообразного фотоупругого элемента (поз.4).

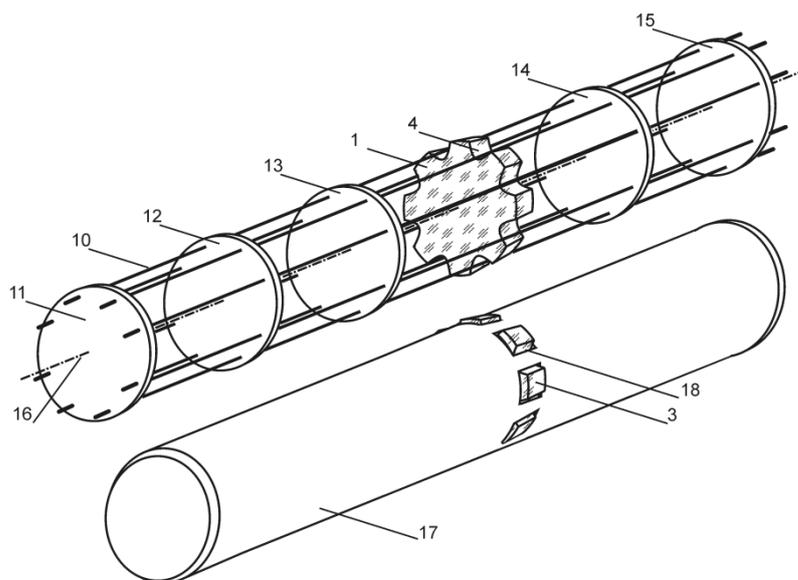


Рисунок 7.3.23 — Пример крепления элементов пьезооптического преобразователя с использованием промежутка между лучами звездообразного фотоупругого элемента и вид преобразователя в унифицированном корпусе

Несущие элементы (поз.10) по числу промежутков образуют каркас, в котором располагаются источник света (поз.11), поляризатор (поз.12), фазовая пластина (поз.13), фотоупругий элемент (поз.1), анализатор (поз.14), фотодетектор (поз.15). Использование общего каркаса позволяет обеспечить надежную фиксацию всех элементов преобразователя относительно его оптической оси

(поз.16). Каркас располагается в корпусе (поз.17), поперечный размер которого в плоскости, перпендикулярной его оптической оси не превышает диаметр фотоупругого элемента, торцы которого (поз.3) выступают за габариты корпуса через специально выполненные отверстия (поз.18).

На рисунке 7.3.24 показан пример закрепления фотоупругого элемента в нагрузочном элементе (поз.19) с помощью регулировочных винтов (поз.20), расположенных напротив каждого из сферических упоров (поз.7). Винты могут иметь на своем конце посадочные гнезда для фиксации сферических упоров (поз.21).

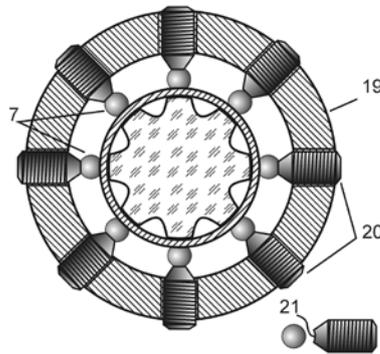


Рисунок 7.3.24 — Крепление фотоупругого элемента в нагрузочном элементе (поз.19) с помощью регулировочных винтов (поз.20), расположенных напротив каждого из сферических упоров (поз.7).

На рисунке 7.3.25 показан пример закрепления фотоупругого элемента в нагрузочном элементе в виде цангового зажима (поз.19).

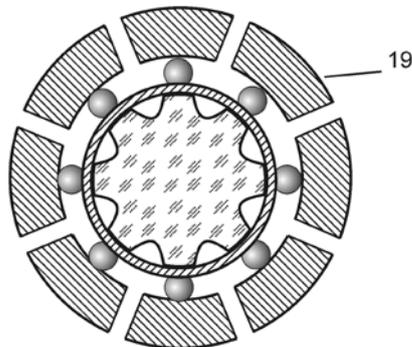


Рисунок 7.3.25 — Крепления фотоупругого элемента в нагрузочном элементе в виде цангового зажима (поз.19)

На рисунке 7.3.26 показан пример закрепления фотоупругого элемента в нагрузочном элементе комбинированного вида – цангового зажима (поз.19) с винтами (поз.20).

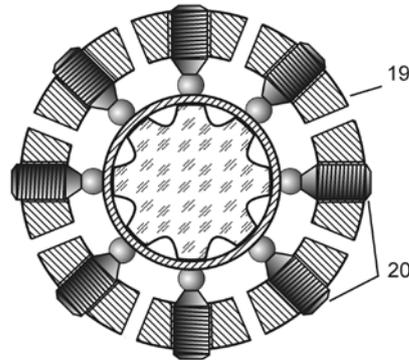


Рисунок 7.3.26 — Крепления фотоупругого элемента в нагрузочном элементе комбинированного вида – цангового зажима (поз.19) с винтами (поз.20)

7.4 Исследование параметров пьезооптических преобразователей экспериментально и с помощью численного моделирования

7.4.1 Моделирование преобразования световой волны при прохождении оптических элементов пьезооптического преобразователя

Построенная математическая модель позволила рассчитать преобразования световой волны при прохождении оптических элементов преобразователя, величину напряжений в ФЭ и определить коэффициент тензочувствительности и другие параметры разработанного пьезооптического датчика [224].

Оптическая схема пьезооптического преобразователя, взятая для моделирования прохождения световой волны через его оптические элементы, приведена на рисунке 7.4.1, где LED – источник света (обычно светодиод), Pol – поляризатор, $\lambda/4$ – четвертьволновая пластина, PE – фотоупругий элемент, к которому прикладывается внешняя сила f , An1, An2 – анализаторы, оптические оси которых ориентированы под углом 90° друг к другу, PD1, PD2 – фотоприемники, $\theta_{Pol} = 0^\circ$ – ориентация оптической оси поляризатора относительно оси X, $\theta_{\lambda/4} = -45^\circ$ – ориентация оптической оси четвертьволновой

пластины, $\theta_{PE} = 0^\circ$ – ориентация оси фотоупругого элемента, $\theta_{An1} = -45^\circ$ и $\theta_{An2} = 45^\circ$ – ориентации оптических осей анализаторов. Все элементы расположены параллельно оси Z .

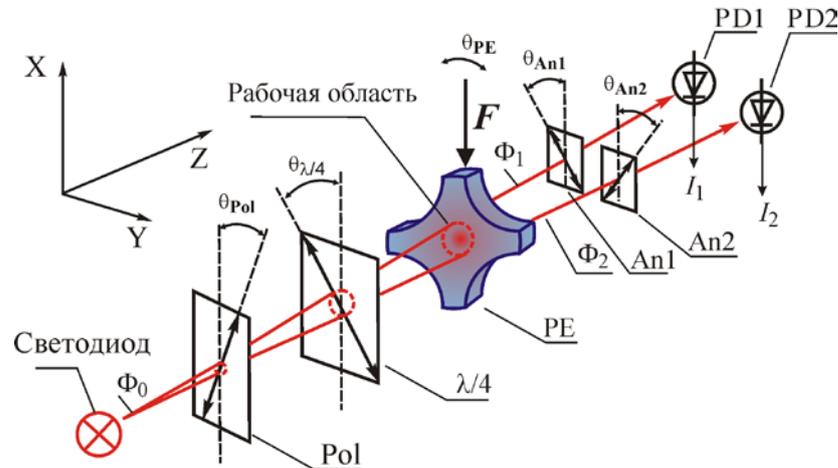


Рисунок 7.4.1 — Оптическая схема пьезооптического преобразователя для моделирования прохождения световой волны через его оптические элементы

Расчеты проводились с использованием пакета программ Wolfram Mathematica™ и учитывались конструктивные параметры преобразователя (таблица 7.4.1): диаграмма излучения светодиодов, размеры светочувствительных областей фотодиодов, преломление света в ФЭ, расстояния между элементами преобразователя.

Таблица 7.4.1 — Геометрические параметры пьезооптического преобразователя

Элемент	Параметр
Светодиод	LEDVS665NJ2 (First Sensor, США)
Расстояние СД-Поляризатор	7.8 мм
Расстояние Поляризатор- $\lambda/4$	2.5 мм
Расстояние $\lambda/4$ -ФЭ	2.25 мм
Расстояние ФЭ-Анализаторы	1.8 мм
Расстояние Анализаторы-Фотоприёмники	1.36

Толщина $\lambda/4$	40 ± 2 мкм
Рабочая апертура $\lambda/4$	3 мм
Толщина ФЭ	4 мм
Размер рабочей области ФЭ	$\varnothing 2.3$ мм
Длина светового пути	19.71 мм
Фотодиод	QP10-6 (First Sensor, США), фоточувст. площадка 4×2.45 мм ²

Из множества различных вычислительных методов, позволяющих справляться с громоздкими количественными расчетами, наиболее успешным и наглядным является формализм Мюллера с параметрами Стокса, где используется матричная алгебра для описания амплитудных и поляризационных преобразований электромагнитной волны [195, 225]. Свет при таком подходе характеризуется вектором Стокса (\mathbf{s}), а элементы схемы – линейными преобразованиями (матрицами) Мюллера. Связь интенсивности света (Φ), степени поляризации (p) и параметров эллипса поляризации (ψ, χ) света (рис. 7.4.2) с параметрами Стокса описываются выражением (3.1.1).

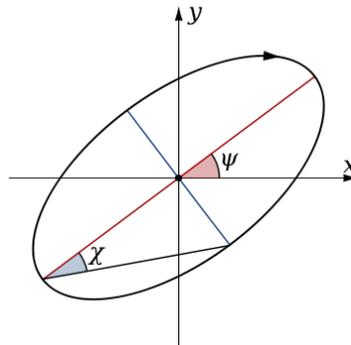


Рисунок 7.4.2 — Эллипс поляризации и описывающие его параметры

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_z^2 + A_y^2 \\ A_z^2 - A_y^2 \\ 2A_z A_y \cos \delta \\ 2A_z A_y \sin \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Phi \\ \Phi p \cos 2\psi \cos 2\chi \\ \Phi p \sin 2\psi \cos 2\chi \\ \Phi p \sin 2\chi \end{bmatrix}, \quad (7.4.1)$$

где s_0, s_1, s_2, s_3 – компоненты вектора Стокса, A_z и A_y – компоненты амплитуды электромагнитной волны, δ – фаза волны.

Поляризатор и анализаторы описываются линейным преобразованием (7.4.2) в случае, когда поляризаторы расположены перпендикулярно падающим лучам света, лучи параллельны оси Z . Быстрая ось поляризаторов расположена под углом θ , отсчитываемым от оси X к оси Y .

$$\mathbf{P}(\theta) = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \cos 2\theta \sin 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (7.4.2)$$

Четвертьволновая пластина и фотоупругий элемент описываются матрицей для линейного запаздывания (7.4.3) в случае, когда элементы расположены перпендикулярно падающим лучам света, лучи параллельны оси Z . Быстрая ось элементов расположена под углом θ , отсчитываемым от оси X к оси Y . Запаздывание $\delta = \delta_y - \delta_x$.

$$\mathbf{R}(\theta, \delta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \cos \delta \sin^2 2\theta & (1 - \cos \delta) \cos 2\theta \sin 2\theta & -\cos \delta \sin 2\theta \\ 0 & (1 - \cos \delta) \cos 2\theta \sin 2\theta & \cos \delta \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta & \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin \delta \sin 2\theta & -\cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (7.4.3)$$

Матрица Мюллера для рефракции (7.4.4) использована для каждого элемента оптической схемы:

$$\mathbf{T}(\phi, \psi) = \frac{\sin 2\phi \sin 2\psi}{2(\sin \phi_+ \cos \phi_-)^2} \begin{bmatrix} \cos^2 \phi_- + 1 & \cos^2 \phi_- - 1 & 0 & 0 \\ \cos^2 \phi_- - 1 & \cos^2 \phi_- + 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \cos \phi_- & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \cos \phi_- \end{bmatrix} \quad (7.4.4)$$

Матрица Мюллера для рефракции света, падающего под прямым углом, имеет вид (7.4.5).

$$\mathbf{T}_\perp(n) = \frac{4n}{(n+1)^2} \mathbf{E} = \frac{4n}{(n+1)^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7.4.5)$$

где ϕ – угол падения, ψ – угол преломления, $\phi_\pm = \phi \pm \psi$,

$n_1 \sin \phi = n_2 \sin \psi$ – закон Снеллиуса,

$n = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления,

\mathbf{E} – единичная матрица.

Для простоты рассмотрим два луча света, выходящие из светодиода. Один из лучей проходит через первый анализатор и попадает на первый фотоприёмник, а второй – через второй анализатор и попадает на второй фотоприёмник. Будем считать их лучами плоской волны, то есть пренебрегаем тем, что источник света точечный и считаем, что оба луча падают перпендикулярно элементам схемы. В таком случае преобразование светового луча при прохождении каждого оптического элемента будет выглядеть следующим образом.

Светодиод. Неполяризованный свет, выходящий из светодиода, имеет интенсивность Φ_0 и степень поляризации $p = 0$. Вектор Стокса (7.4.1) для него будет иметь вид:

$$\mathbf{s}_{\text{LED}} = \Phi_0 \mathbf{e}_1 = \Phi_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Поляризатор. Для обеспечения круговой поляризации света после прохождения поляризатора быстрая ось в (7.4.2) выбирается $\theta_{\text{Pol}} = 0$. Преобразование Мюллера на поляризаторе:

$$\mathbf{P}(\theta_{\text{Pol}}) = \mathbf{P}(0).$$

Четвертьволновая пластина. Для обеспечения круговой поляризации быстрая ось в (7.4.3) выбирается $\theta_{\lambda/4} = -\pi/4$. Запоздывание ($\delta_{\lambda/4}$) же выбирается так, чтобы давать $\pi/2$ с точностью до 2π :

$$\delta_{\lambda/4} = 2\pi d \Delta n / \lambda \approx \pi/2 + 2\pi M, \quad M \in \mathbb{Z}.$$

- здесь d – длина хода лучей (в нашем случае толщина слюдяной пластины $d = 40$ мкм),
- λ – длина волны света. В случае конкретной выбранной модели пиковая длина волны светодиода $\lambda = 660$ нм при 20°C ,
- $\Delta n = n_o - n_e = 0.038$ – характеристика двулучепреломления четвертьволновой пластины,
- M – целое неотрицательное число.

Таким образом, преобразование Мюллера на четвертьволновой пластине:

$$\mathbf{R}(\theta_{\lambda/4}, \delta_{\lambda/4}) = \mathbf{R}\left(\theta_{\lambda/4}, \frac{2\pi d \Delta n}{\lambda}\right) \approx \mathbf{R}\left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right). \quad (7.4.6)$$

Преломление на входной границе фотоупругого элемента (ФЭ). С учётом упрощающих условий (двулучевая модель) пропускание света через границу ФЭ даётся линейным преобразованием $\mathbf{T}_{\perp}(n)$, см. (5), где n – относительный показатель преломления кварца:

$$\mathbf{T}_{\perp}(n) = \frac{4n}{(n+1)^2} \mathbf{E},$$

где \mathbf{E} – единичная матрица.

Фотоупругий элемент (ФЭ). Сила f прикладывается под углом $\theta_{PE} = 0$, отсчитываемым от оси X к оси Y . То есть ФЭ ориентируется так, чтобы главная ось напряжений (та ось, напряжения по которой, подлежат измерению) в нем была параллельна оси X . Δ_{PE} – сдвиг фазы, обусловленный прохождением света через ФЭ. Преобразование Мюллера (3) на ФЭ приобретает вид:

$$\mathbf{R}(\theta_{PE}, \Delta_{PE}) = \mathbf{R}(0, \Delta_{PE}).$$

Преломление на выходной границе фотоупругого элемента (ФЭ). Аналогично преломлению на входной границе ФЭ:

$$\mathbf{T}_{\perp}(n) = \frac{4n}{(n+1)^2} \mathbf{E}.$$

Анализатор №1. Анализатор №1 ориентирован под углом $\theta_{An1} = -\pi/4$. Преобразование Мюллера (2) для него приобретает вид:

$$\mathbf{P}(\theta_{An1}) = \mathbf{P}\left(-\frac{\pi}{4}\right).$$

Анализатор №2. Анализатор №2 ориентирован под углом $\theta_{An2} = \pi/4$. Преобразование Мюллера (7.4.2) для него приобретает вид:

$$\mathbf{P}(\theta_{An2}) = \mathbf{P}\left(\frac{\pi}{4}\right).$$

Фотоприемник №1. Интенсивность света получается взятием первой компоненты вектора Стокса:

$$\langle \mathbf{e}_1, \mathbf{s} \rangle = \left\langle \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} \right\rangle = s_0$$

Сигнал фотоприёмника равен интенсивности пришедшего света, умноженной на чувствительность фотоприемника q :

$$I_{\text{PD1}} = q \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{s}_{\text{An1}} \rangle,$$

где \mathbf{s}_{An1} – вектор Стокса (1) света, пришедшего на фотоприёмник.

Фотоприемник №2. Аналогично фотоприёмнику №1:

$$I_{\text{PD2}} = q \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{s}_{\text{An2}} \rangle.$$

Теперь подставим все преобразования Мюллера и посчитаем I_{PD1} и I_{PD2} :

$$\begin{aligned} I_{\text{PD1}} &= q \frac{(4n)^2}{(n+1)^4} I_0 \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{P}\left(-\frac{\pi}{4}\right) \mathbf{R}(0, \Delta) \mathbf{R}\left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right) \mathbf{P}(0) \mathbf{e}_1 \rangle = \\ &= 4n^2 q I_0 \frac{1 + \sin \Delta_{\text{PE}}}{(n+1)^4}, \end{aligned} \quad (7.4.7)$$

$$\begin{aligned} I_{\text{PD2}} &= q \frac{(4n)^2}{(n+1)^4} I_0 \langle \mathbf{e}_1, \mathbf{P}\left(\frac{\pi}{4}\right) \mathbf{R}(0, \Delta) \mathbf{R}\left(-\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}\right) \mathbf{P}(0) \mathbf{e}_1 \rangle = \\ &= 4n^2 q I_0 \frac{1 - \sin \Delta_{\text{PE}}}{(n+1)^4}, \end{aligned} \quad (7.4.8)$$

Выходной сигнал преобразователя. Электронная схема обработки сигнала обеспечивает измерение дифференциального сигнала I_{Δ} :

$$I_{\Delta} = k \frac{I_{\text{PD1}} - I_{\text{PD2}}}{I_{\text{PD1}} + I_{\text{PD2}}}, \quad (7.4.9)$$

где k – коэффициент пропорциональности. В итоге, после подстановки (7.4.7) и (7.4.8) в (7.4.9) сигнал после электронной схемы принимает вид:

$$I_{\Delta} = k \sin \delta_{\lambda/4} \sin \Delta_{\text{ФЭ}} \approx k \Delta, \quad \text{при } \delta_{\lambda/4} \text{ и } \Delta_{\text{ФЭ}} \ll 1, \quad (7.4.10)$$

Из выражения (7.4.10) видно, что изменения выходного сигнала ∂I_{Δ} пропорциональны изменению величины фазы $\partial \Delta$, обусловленному изменением напряжений в фотоупругом элементе.

7.4.2 Устройство электронной обработки сигнала пьезооптического преобразователя

Задача разработки электронной схемы заключалась в создании миниатюрного устройства обработки сигнала с пьезооптического преобразователя с малым энергопотреблением, позволяющим объединить его в единой конструкции с пьезооптическим преобразователем. В качестве электронной схемы формирования выходного сигнала пьезооптического преобразователя была выбрана схема [226], показанная на рисунке 7.4.3.

Устройство обработки сигнала содержит два преобразователя ток-напряжение (5, 6), преобразующие ток фотоприёмников (3, 4) в напряжение, суммирующий усилитель (8), выходной сигнал которого пропорционален сумме сигналов с фотоприёмников $I_{PD1} + I_{PD2}$, и дифференциальный усилитель (7), выходной сигнал которого пропорционален разности сигналов с фотоприёмников $I_{PD1} - I_{PD2}$, источник опорного напряжения (10), усилитель сигнала обратной связи (9), обеспечивающий постоянство сигнала с выхода суммирующего усилителя путем управления интенсивностью источника света (1), при этом выходным сигналом устройства является выходной сигнал дифференциального усилителя (см. выражение (3.18)).

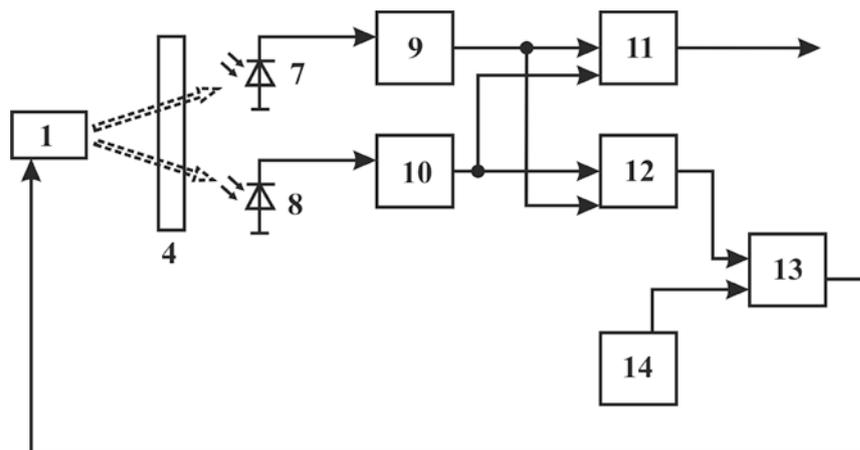


Рисунок 7.4.3 — Электронная схема обработки сигнала пьезооптического преобразователя принципиальная:

- 1 – источник света;
- 2 – фотоупругий элемент;

- 3, 4 – фотоприёмники;
- 5, 6 – преобразователи сигналов фотоприёмников ток-напряжение;
- 7 – дифференциальный усилитель;
- 8 – суммирующий усилитель;
- 9 – усилитель сигнала ошибки;
- 10 – источник опорного напряжения. Другие элементы пьезооптического преобразователя не показаны.

Предлагаемая схема устройства обработки сигнала содержит петлю отрицательной обратной связи, состоящей из усилителя обратной связи (9), сигнал с которого поступает на источник света (1), и источника опорного напряжения (10). Сигнал с выхода суммирующего усилителя (8) поступает на вход усилителя сигнала ошибки (9). На второй вход усилителя сигнала ошибки поступает сигнал от источника опорного напряжения (10). Сигнал с выхода усилителя сигнала ошибки (9), пропорциональный разности этих напряжений, поступает на источник света (1), управляя его интенсивностью таким образом, чтобы сигнал суммирующего усилителя был равен опорному напряжению. Тем самым достигается постоянство величины суммарного сигнала с фотоприёмников и, таким образом, отпадает необходимость математической процедуры нормировки разностного сигнала на величину суммарного сигнала (см. формулу 3.18). В результате отпадает необходимость применения вычислительного устройства, что приводит к уменьшению количества электронных компонентов, что повышает надёжность схемы, снижает энергопотребление и улучшает массогабаритные параметры схемы. За счет объединения устройства обработки сигнала с пьезооптическим преобразователем в единой конструкции повышается устойчивость к воздействию внешних электромагнитных помех.

Так как устройство обработки сигнала поддерживает сумму фототоков $I_{PD1} + I_{PD2}$ постоянной, благодаря наличию отрицательной обратной связи, выражение (3.18) преобразуется к виду

$$I_{\Delta} = k^*(I_{PD1} - I_{PD2}), \quad (7.4.11)$$

где $k^* = k/(I_{PD1} + I_{PD2})$ – новый коэффициент, определяемый при калибровке датчика.

Таким образом, предлагаемая электронная схема, определяющая конструкцию устройства обработки сигнала, позволяет достичь: миниатюризации преобразователя, упрощения конструкции, повышения её надежности и точности измерения деформаций, снижения стоимости устройства. С целью миниатюризации устройства обработки сигнала применялись микросхемы, объединяющие в своем корпусе упомянутые выше электронные компоненты.

С целью облегчения подключения датчика к удалённым приемникам сигнала в устройство обработки сигнала добавлены элементы, реализующие стандартный интерфейс подключения к устройствам сбора данных – интерфейс аналоговой токовой петли, от которой он же может быть и запитанным, ввиду малого потребляемого тока. Так как существуют интерфейсы аналоговой токовой петли реализованы в одном миниатюрном корпусе, то этот интерфейс интегрирован в корпус пьезооптического преобразователя. Интерфейс аналоговой токовой петли позволяет осуществлять двухпроводное соединение с удаленным приёмником сигнала.

7.4.3 Моделирование напряжений и деформаций в фотоупругом элементе

Моделирование пространственного распределения напряжений $\Delta\sigma = \sigma_y - \sigma_x$ в фотоупругом элементе и величины деформации ФЭ под действием внешней силы F проводилось методом конечных элементов с использованием пакета программ COMSOL Multiphysics [224]. На рисунке 7.4.4 показана 3D модель фотоупругого элемента в охранном кольце [224].

Охранное кольцо обеспечивает более равномерного распределения усилия по поверхности торца ФЭ и уменьшения вероятности скалывания. К модели прикладывалась внешняя сила F посредством стальных клиньев в форме усеченного конуса как показано на рис. 7.4.4. Данная схема приложения силы максимально близка к реальному устройству преобразователя и ромба. Расчет

производился только для одной восьмой части модели (рис.7.4.4, б) в связи с симметричностью задачи. На рис.7.4.4 в приведены геометрические параметры 3D модели. Толщина ФЭ и охранного кольца составляла 4 мм. Соответственно, толщина 1/8 части модели равнялась 2 мм. В модели использовались граничные условия, определяемые условиями эксперимента, описанного выше.

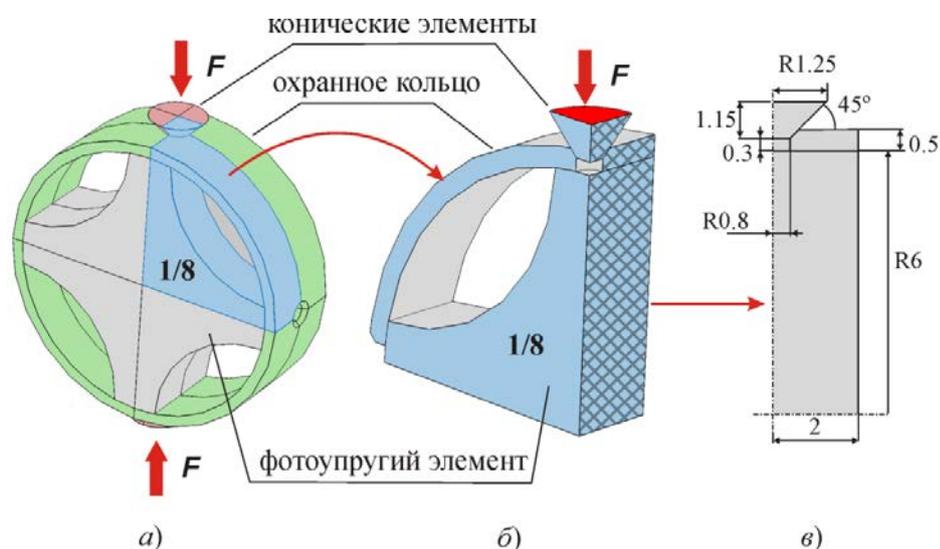


Рисунок 7.4.4 — 3D модель фотоупругого элемента в охранном кольце из стали.

Сила F приложена к верхнему и нижнему коническим элементам, передающим нагрузку на фотоупругий элемент:

- (а) – полноразмерная модель,
- (б) – 1/8 часть модели, используемой для моделирования,
- (в) – размеры 1/8 части модели, идентичные реальным размерам фотоупругого элемента.

Расчёт деформации ФЭ вдоль оси приложения силы и пространственное распределение напряжений в рабочей области ФЭ производился численным моделированием методом конечных элементов с помощью пакета COMSOL Multiphysics и были использованы встроенные в пакет параметры материалов.

7.4.4 Устройство и методика измерений для экспериментального определения основных параметров пьезооптического преобразователя

В работе было сконструировано специальное устройство (далее «ромб») для нагрузки фотоупругого элемента калиброванной силой в направлении, перпендикулярном оптической оси пьезооптического преобразователя [224]. На рисунке 7.4.5 приведена фотография (а) и схема (б) ромба с размерами в миллиметрах.

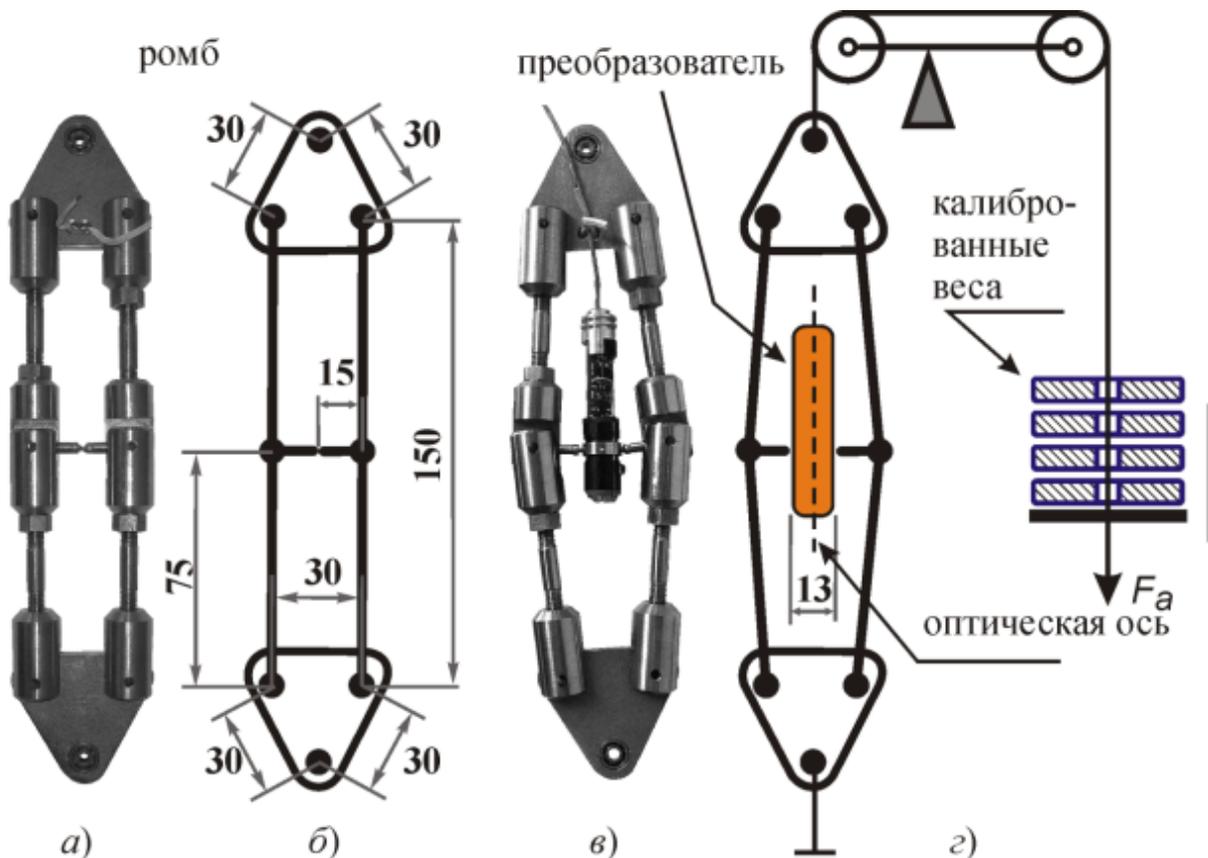


Рисунок 7.4.5 — Устройство для нагрузки фотоупругого элемента пьезооптического преобразователя калиброванным весом:

- (а) – фото устройства (ромба);
- (б) – схема ромба с размерами в миллиметрах;
- (в) – фото ромба с закреплённым преобразователем;
- (г) – схема приложения калиброванной силы к ромбу;

1 – оптическая ось преобразователя;

2 – выступы ромба, упирающиеся в торцы фотоупругого элемента.

Ромб с закрепленным преобразователем (рис. 7.4.5, *в*) помещается в устройство для приложения калиброванной силы, показанное на фото на рисунке 7.4.6, *а*. Ромб с одной стороны (снизу) жестко закреплён, а к другой стороне вдоль основной оси симметрии ромба прикладывается калиброванная сила, которая создаётся с помощью рычажного механизма с калиброванными грузами (Рис. 7.4.6, *б*, *в*). Рычажной механизм имеет коэффициент передачи силы 1:8. Калиброванный вес составляет 0.1 кгс.

Таким образом, вес, прилагаемый к ромбу, составляет

$$F_a = 0.1(\text{кгс}) \times 8 = 0.8 \text{ кгс} (7.848 \text{ Н}). \quad (7.4.12)$$

Конструкция ромба обеспечивает приложение силы к фотоупругому элементу датчика в направлении перпендикулярно оптической оси пьезооптического преобразователя.

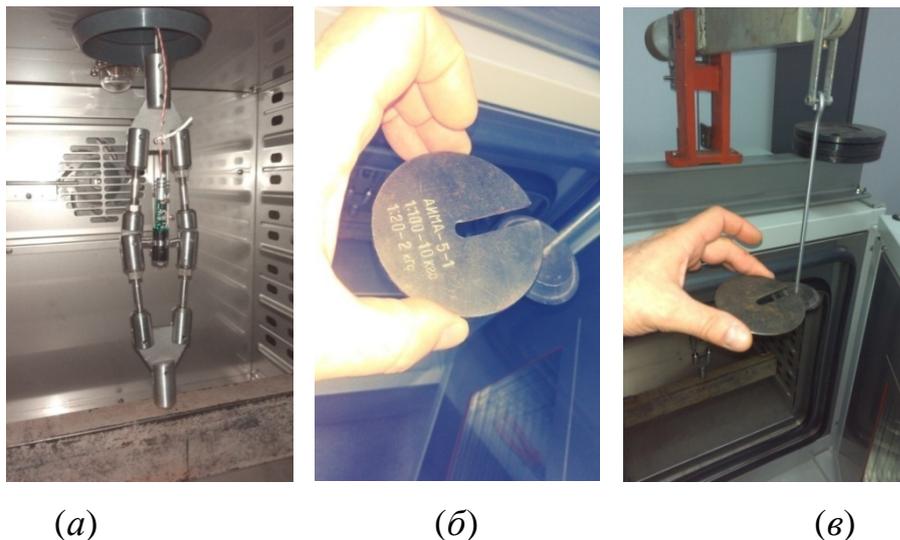


Рисунок 7.4.6 — Схема крепления ромба и способ приложения силы к ромбу:
(а) – ромб с закреплённым преобразователем деформации в климатической камере;
(б) – используемый калиброванный вес;
(в) – способ приложения калиброванной силы к рычажному механизму.

Ромб с преобразователем помещались в климатическую камеру (рис. 7.4.7) для проведения экспериментов при контролируемой температуре.

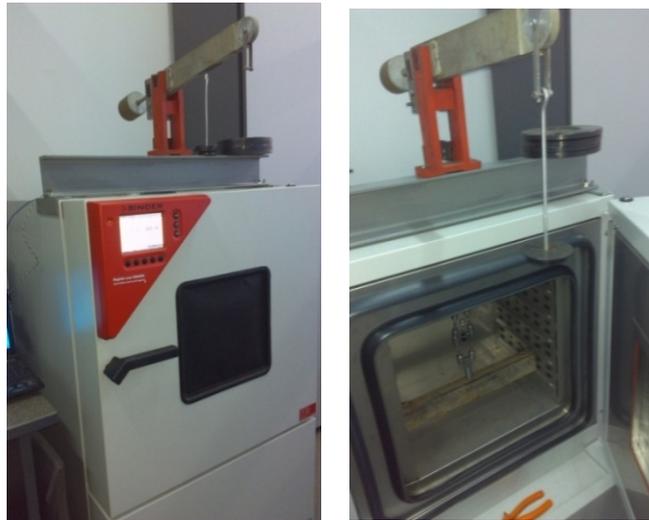


Рисунок 7.4.7 — Климатическая камера BINDER серии МК 53 (Е2.1) для температурных испытаний.

Характеристики климатической камеры приведены в таблице 7.4.2.

Выход пьезооптического преобразователя подключался к входу мультиметра Agilent 34461A для регистрации выходного сигнала с преобразователя и записи временных зависимостей величины сигнала в компьютер (рис. 7.4.8).

Таблица 7.4.2 — Температурные характеристики климатической камеры BINDER серии МК 53 (Е2.1).

Параметр	Значение
Диапазон температур (°С)	– 40 ÷ +180
Флуктуация температуры (± К)	0,4 ÷ 2,0
Вариация температуры (± °С)	0,1 ÷ 0,5
Средняя скорость нагрева согласно заводским нормам (К/мин.) от –40 °С до +180 °С	4,6
Средняя скорость охлаждения согласно заводским нормам (К/мин.) от +180 °С до –40 °С	4,1
Макс. тепловая компенсация при 25 °С (W)	500



Рисунок 7.4.8 — Мультиметр и компьютер для сбора и записи данных.

7.4.5 Расчёт силы, прикладываемой к фотоупругому элементу преобразователя

На рисунке 7.4.9 показана схема сил, возникающих в системе ромб с закреплённым преобразователем, при приложении калиброванной силы F_a .

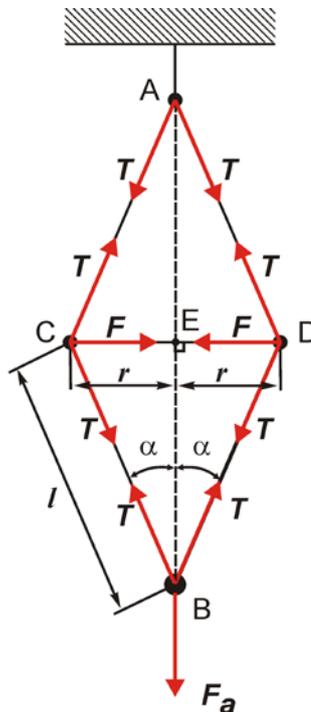


Рисунок 7.4.9 — схема сил в ромбе с закреплённым преобразователем деформации при приложении калиброванной силы F_a .

T – сила натяжения плеча ромба;

l – длина плеча ромба;

r – радиус преобразователя;

α – угол между плечом ромба и вертикальной осью;

F_a – калиброванная сила, приложенная к ромбу вдоль оптической оси преобразователя;

F – искомая сила, приложенная к преобразователю перпендикулярно оптической оси пьезооптического преобразователя.

При расчете полагалось, что ромб закреплен в верхней точке А, а к точке В прикладывалась калиброванная сила F_a . Ромб в точках А, В, С, D имеет шарниры без трения. Расстояние между точками С и D соответствует диаметру фотоупругого элемента преобразователя деформации. Для простоты в задаче рассматривался радиус фотоупругого элемента $r = CE = ED = CD/2$. Угол α соответствует углу между плечом ромба и вертикальной осью, вдоль которой прилагалась калиброванная сила F_a .

Запишем уравнения для сил в статике:

$$\begin{aligned} F_a - 2T \cos \alpha &= 0, \\ F - 2T \sin \alpha &= 0. \end{aligned} \quad (7.4.13)$$

Выражая T из первого уравнения и подставляя во второе, получаем:

$$F = F_a \operatorname{tg} \alpha. \quad (7.4.14)$$

Тангенс α найдем из прямоугольного треугольника ВЕD, используя теорему Пифагора:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{r}{\sqrt{l^2 - r^2}} \quad (7.4.15)$$

В итоге, для искомой силы F выражение (7.4.14) приобретает вид:

$$F = F_a \frac{r}{\sqrt{l^2 - r^2}} \quad (7.4.16)$$

Подставляя используемые величины:

$$F_a = 7.848 \text{ Н},$$

$$r = 6.5 \text{ мм (с учетом охранного кольца),}$$

$$l = 75 \text{ мм},$$

Получаем величину силы, приложенной к фотоупругому элементу преобразователя деформации:

$$F = 0.68 \text{ Н} \quad (7.4.17)$$

7.5 Результаты исследований пьезооптического преобразователя

В данном разделе приводятся результаты исследований (экспериментальных и с помощью численного моделирования) пьезооптического преобразования с целью определения его параметров назначения.

7.5.1 Минимальная детектируемая сила.

На рисунке 7.5.1, *a* показана типичная зависимость выходного тока преобразователя от времени при изменении нагрузки на преобразователе.

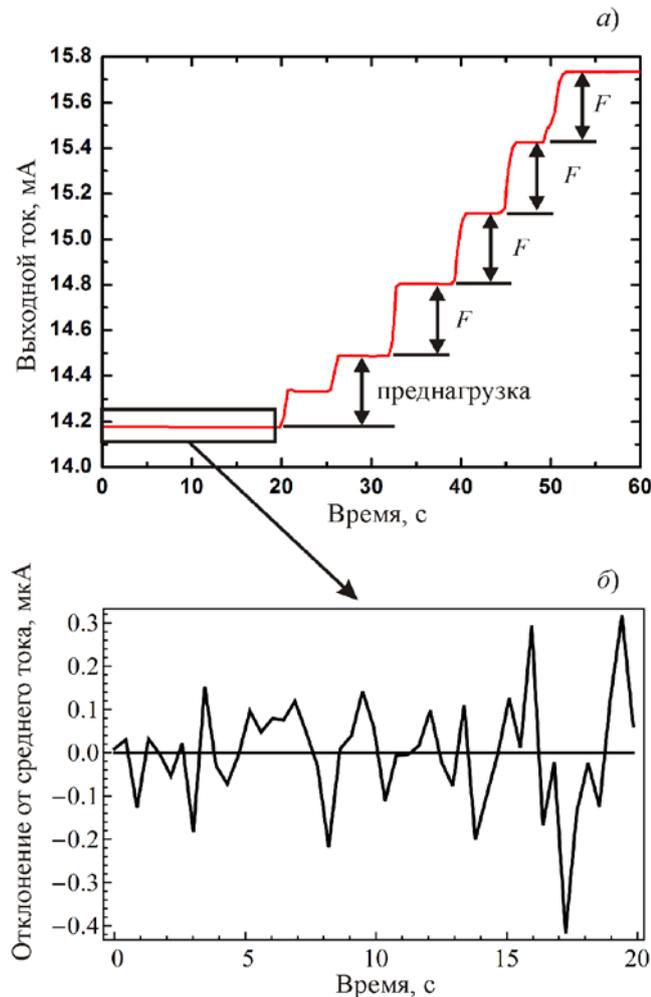


Рисунок 7.5.1 — Экспериментальная временная зависимость выходного сигнала пьезооптического преобразователя:

(а) – при последовательном приложении калиброванных весов;

(б) – первые 20 секунд записи сигнала

Преобразователь нагружался следующим образом. Сначала прикладывался предварительный вес для того, чтобы исключить влияние люфтов в механической системе ромба. Затем последовательно преобразователь нагружался четырьмя одинаковыми весами, дающими каждый силу на преобразователе, равную 0.68 Н. Далее сигнал усреднялся по данным четырем весам. Средняя величина изменения выходного сигнала при приложении силы 0.68 Н составила 300 мкА. Таким образом, коэффициент преобразования силы составил $t = 441$ мкА/Н.

Для расчета минимальной детектируемой силы F_{\min} (дающей изменение сигнала, равное шуму) анализировался случайный шум выходного сигнала (рис. 7.5.1, б). Первые 20 секунд сигнала, до приложения предварительного веса, анализировались с точки зрения стандартного отклонения сигнала согласно нормальному распределению Гаусса.

Обработка сигнала на этом интервале дала величину нормального отклонения

$$\sigma = 0.1278 \text{ мкА},$$

которое принято считать точностью измерения. В результате точность измерения силы или минимальная детектируемая сила составила:

$$F_{\min} = 0.1278 \text{ [мкА]} \times 0.68 \text{ [Н]} / 300 \text{ [мкА]} = 0.00029 \text{ Н} \approx 0.29 \text{ мН}. \quad (7.5.1)$$

7.5.2 Минимальная детектируемая деформация

Величина деформации ФЭ при приложении силы $F_{\min} = 0.29$ мН рассчитывалась численным моделированием методом конечных элементов. Так как рассчитывалась только 1/8 часть модели, благодаря симметрии модели, то прилагаемая сила бралась равной 1/4 от экспериментально приложенной, и которая составила $0.29 \text{ мН} / 4 = 0.073 \text{ мН}$. Точное моделирование с применяемой статической силой 0.073 мН к модели (рис.7.4.4) дает величину деформации вдоль радиуса и вдоль оси приложенной нагрузки – 0.00175 нм. Это значение, на

которое уменьшается радиус ФЭ вдоль оси приложенной силы. Чтобы определить деформацию диаметра ФЭ, результат должен быть умножен на 2.

В итоге величина деформации фотоупругого элемента, полученная численным моделированием, составила

$$\Delta x_{\min} = 0.0035 \text{ нм} = 3.5 \times 10^{-12} \text{ м}. \quad (7.5.2)$$

Следовательно, минимально регистрируемая величина относительной деформации составляет

$$\varepsilon_{\min} = \Delta x_{\min} / x = 3.5 \times 10^{-12} \text{ м} / 12 \times 10^{-3} \text{ м} \approx 2.92 \times 10^{-10}, \quad (7.5.3)$$

где $12 \times 10^{-3} \text{ м}$ – диаметр фотоупругого элемента. Данный результат превышает значения, известные для промышленных датчиков деформации $\varepsilon_{\min} > 10^{-8}$.

7.5.3 Определение коэффициента тензочувствительности пьезооптического преобразователя методом численного моделирования

Численное моделирование напряжений, возникающих в рабочей области фотоупругого элемента под действием силы $F_{\min} = 0.29 \text{ мН}$, дало величину

$$\Delta \sigma = \sigma_y - \sigma_x = 17.11 \text{ Па}. \quad (7.5.4)$$

Зная определённые величины ε_{\min} (7.5.3) и $\Delta \sigma$ (7.5.4), можно определить эффективный модуль упругости $E^{\text{эф}}$ для фотоупругого элемента данной конструкции:

$$E^{\text{эф}} = \frac{\Delta \sigma}{\varepsilon} = \frac{17.11 \text{ Па}}{2.92 \times 10^{-10}} = 58.6 \text{ ГПа}. \quad (7.5.5)$$

Полученная величина $E^{\text{эф}}$ немного меньше, чем для объёмного плавленого кварца $E = 70 \text{ ГПа}$ и является характеристикой конструкции фотоупругого элемента, включая конструкцию стальных клиньев. Для других конструкций величина $E^{\text{эф}}$ будет другой. Поэтому задачей конструирования формы фотоупругого элемента и способа передачи на него внешней силы является получение максимально высокого эффективного модуля упругости $E^{\text{эф}}$. Например, для квадратного и круглого ФЭ из плавленого кварца (рис. 3.3.9, а, б)

величины эффективных модулей упругости примерно равны и составляют $E^{\text{эф}} \approx 42$ ГПа.

Выражение для коэффициента тензочувствительности (3.1.8) принимает вид

$$S_A^{\text{эф}} = \frac{\Delta}{\varepsilon} = \frac{2\pi d}{\lambda} KE^{\text{эф}}. \quad (7.5.6)$$

Теперь необходимо получить выражение для коэффициента тензочувствительности (3.1.8), которое напрямую связано с сигналами с фотодетекторов. Рассмотрим выражение (7.4.9), с коэффициентом пропорциональности $k = 1$:

$$\frac{dI}{I} = \frac{I_1 - I_0}{I_0} = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = S_A^{\text{эф}} \frac{\Delta x}{x}, \quad (7.5.7)$$

где I_0 равен I_1 – сигналу с фотодиода PD1 (3.16) без приложенной силы ($\Delta_{\text{PE}} = 0$) и $S_A^{\text{эф}}$ – смоделированная величина коэффициента тензочувствительности.

Подставляя точные значения параметров четвертьволновой пластины (7.4.6), разницы фаз $\Delta = \Delta_{\text{PE}}$ и величину относительной деформации $\varepsilon_{\text{min}} = \Delta x/x = 2.92 \times 10^{-10}$ вычисляем величину смоделированного коэффициента тензочувствительности:

$$S_A^{\text{эф}} = \frac{\sin \delta_{\lambda/4} \sin \Delta_{\text{PE}}}{\varepsilon_{\text{min}}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{min}}} \sin\left(\frac{2\pi d_{\lambda/4}}{\lambda} \Delta n\right) \sin\left(\frac{2\pi d}{\lambda} K \Delta \sigma\right) = 7389 \quad (7.5.8)$$

Данная величина меньше, чем предсказывает теория $S_A^{\text{расч}} = 9330$. Это связано, во-первых, с фактической толщиной четвертьволновой пластины ($d = 40$ мкм), которая даёт величину первого синуса в (7.5.8) немного меньше единицы ($\sin \delta_{\lambda/4} = 0,947$). Во-вторых, величина $S_A^{\text{эф}}$ связана с выбранной конструкции фотоупругого элемента, что сказывается на величине второго синуса в (7.5.8). Для каждой конструкции ФЭ будет своя величина $S_A^{\text{эф}}$, что подтверждает вывод о том, что коэффициент тензочувствительности для пьезооптического преобразователя зависит от его конструкции.

7.5.4 Экспериментальный коэффициент тензочувствительности

Прямое измерение фототоков с фотодетекторов (PD1, PD2 на рисунке 7.4.1) дало величину экспериментально измеренного коэффициента тензочувствительности:

$$S_A^{\text{экс}} = \frac{I_{\text{PD1}} - I_{\text{PD2}}}{I_{\text{PD1}} + I_{\text{PD2}}} = 7340 \pm 70. \quad (7.5.9)$$

Полученная величина хорошо согласуется с величиной, полученной моделированием $S_A^{\text{эф}} = 7389$, что подтверждает корректность построенной модели и подтверждает высокую величину (на три порядка больше, чем для тензорезисторных датчиков) коэффициента тензочувствительности пьезооптического преобразователя.

7.5.5 Динамический диапазон и запас прочности

В разработанном пьезооптическом преобразователе реализован стандартный интерфейс подключения к устройствам сбора данных, включая удалённые, – интерфейс аналоговой токовой петли. Электронная схема (рис. 7.4.3) обеспечивала диапазон выходного сигнала, пропорционального напряжением в ФЭ, от 4 мА до 20 мА. Мы устанавливали величину выходного тока, соответствующую нулевым деформациям, равную 12 мА, чтобы преобразователь мог работать как на сжатие, так и на растяжение. Если считать рабочий диапазон выходного сигнала I_{range} равный ± 8 мА, то динамический диапазон (DR) равен

$$\text{DR} = I_{\text{range}}/\sigma = 8 \times 10^{-3} \text{ А} / 0.1278 \times 10^{-6} \text{ А} \approx 6.2 \times 10^4. \quad (7.5.10)$$

Полученный динамический диапазон существенно превышает известные величины для промышленных тензорезисторных датчиков деформации ($<10^3$).

Запас прочности определялся численным моделированием величины пороговых значений силы и деформации, приводящих к разрушению фотоупругого элемента из плавленого кварца (см. рисунок 7.3.10). Предел прочности кварца брался равным 51.7 МПа [217] и рассчитывалась величина внешней силы или деформации ФЭ, при которой напряжения в объёме ФЭ

достигают величины предела прочности. В результате моделирования получились следующие величины:

$$\begin{aligned}
 F_{\text{порог}} &= 80 \text{ Н} \\
 \Delta x_{\text{порог}} &= 2 \text{ мкм} = 2 \times 10^{-6} \text{ м} \\
 \varepsilon_{\text{порог}} &= \Delta x_{\text{порог}}/x = 2 \times 10^{-6} \text{ м} / 1.2 \times 10^{-2} \text{ м} = 1.67 \times 10^{-4}
 \end{aligned}
 \tag{7.5.11}$$

Максимальная измеряемая деформация определяется как

$$\Delta x_{\text{max}} = \Delta x_{\text{min}} \times DR = 3.5 \times 10^{-12} \times 6.2 \times 10^4 = 2.1 \times 10^{-7} \text{ м}
 \tag{7.5.12}$$

Таким образом, описанный фотоупругий элемент, при заданном динамическом диапазоне, имеет десятикратный запас прочности.

7.5.6 Чувствительность к силе и деформации

Чувствительность к силе и деформации определяется как наклон кривой преобразования (крутизна преобразования) силы, или деформации, в величину выходного сигнала. Для разработанного в данной работе пьезооптического преобразователя с электронной схемой, показанной на рисунке 7.4.3, чувствительности к силе (измерена экспериментально) и деформации (получена численным моделирование), согласно выражениям (7.4.17) и (7.5.2), получились

$$\begin{aligned}
 S_{\text{сила}} &= 300 \text{ мкА} / 0.68 \text{ Н} \approx 441 \text{ мкА/Н} \\
 S_{\text{деформация}} &= 0.1278 \text{ мкА} / 0.0035 \text{ нм} \approx 36.6 \text{ мкА/нм}
 \end{aligned}
 \tag{7.5.13}$$

Измеренные и полученные численным моделированием параметры пьезооптического преобразователя суммированы в таблице 7.5.1.

Таблица 7.5.1 — Параметры пьезооптического преобразователя

Параметр	Величина
Коэффициент тензочувствительности ($S_A^{\text{расч}}$)	9330
Коэффициент тензочувствительности ($S_A^{\text{эфф}}$)	7389
Коэффициент тензочувствительности ($S_A^{\text{эксп}}$)	7340

Минимальная детектируемая абсолютная деформация, м	3.5×10^{-12}
Минимальная детектируемая относительная деформация, $\Delta x/x$	2.7×10^{-10}
Минимальная детектируемая сила, Н	2.9×10^{-4}
Чувствительность к деформации, мкА/нм	36.6
Чувствительность к силе, мкА/Н	441
Динамический диапазон, не менее	6×10^4
Пороговая деформация разрушения (расчёт), м	2×10^{-6}
Пороговая сила разрушения (расчёт), Н	80

Полученные значения коэффициентов тензочувствительности для датчиков разных типов приведены в таблице 7.5.2.

Таблица 7.5.2 — Коэффициенты тензочувствительности для датчиков механических напряжений различных типов

Тип датчика	Коэффициент тензочувствительности S_A	Зависимость S_A от конструкции датчика
Тензорезисторный металлический	2 – 4	нет
полупроводниковый	6 – 20	
Пьезоэлектрический	0.1 – 35.6	нет
Волоконно-оптический	0.78	нет
Пьезооптический	> 7000	да

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 7

1. В работе теоретически и с помощью численного моделирования детально изучен процесс формирования выходного сигнала пьезооптического преобразователя. Показано, что коэффициент тензочувствительности для пьезооптического преобразователя *зависит* от конструкции преобразователя, в отличие от датчиков на других физических принципах, что открывает пути для дальнейшего совершенствования его параметров и построения высокочувствительных датчиков деформации промышленного применения.
2. Показано, что коэффициент тензочувствительности для пьезооптического преобразователя на два-три порядка выше, чем для датчиков на других физических принципах.
3. В качестве материала фотоупругого элемента выбран плавленный кварц. Несмотря на относительно низкий пьезооптический коэффициент, технология данного материала недорогая и хорошо развита. Благодаря высокому порогу разрушения на сжатие и отсутствию пластической деформации плавленный кварц обеспечивает широкий динамический диапазон, устойчивость к перегрузкам и отсутствие гистерезиса датчика.
4. Крестообразная форма ФЭ пьезооптического преобразователя позволила почти вдвое увеличить чувствительность преобразователя, по сравнению с прямоугольной или круглой формой ФЭ, и компенсировать низкий пьезооптический коэффициент плавленного кварца.
5. Благодаря крестообразной форме фотоупругого элемента, остальные оптические элементы размещены внутри внешнего диаметра фотоупругого элемента. В итоге преобразователь имеет собственный унифицированный корпус, и его технология отделена от технологии нагрузочного элемента, конструкция которого зависит от способа монтажа датчика на контролируемый объект.
6. В смонтированном состоянии фотоупругий элемент изначально сжат в двух ортогональных направлениях, что обеспечивает: бесклеевое силовое

замыкание между нагрузочным элементом и фотоупругим элементом; его работу, как на сжатие, так и на растяжение; практически исключает температурную зависимость выходного сигнала датчика.

7. Электронная схема формирования выходного сигнала датчика находится внутри экранированного корпуса преобразователя и обеспечивает любой стандартный интерфейс. Таким образом, преобразователь является законченным прибором и не требует вторичного преобразователя, как в случае тензорезисторных датчиков.
8. Экспериментально определены основные параметры преобразователя: коэффициент тензочувствительности, минимально детектируемые сила, абсолютная и относительная деформации, динамический диапазон, запас прочности, которые существенно превосходят параметры известных промышленных датчиков.

ГЛАВА 8 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ПРИМЕНЕНИЙ РАЗРАБОТАННЫХ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МЕТОДОВ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

В данной главе приведены результаты испытаний и обсуждаются возможности и перспективы практических применений разработанных специализированных методов и оптико-электронных устройств регистрации электромагнитного излучения в диапазонах длин волн $\lambda \gtrsim 300$ мкм, а также пьезооптических датчиков деформации. Методики испытаний соответствовали российским и международным стандартам испытаний.

8.1 Результаты экспериментальных исследований образцов детекторов терагерцового и субтерагерцового излучения

В результате выполнения работы были изготовлены опытные образцы ТГц-детектора с разными ИК-ФПУ (рис. 8.1.1). Наилучшие результаты показал ТГц-детектор с охлаждаемым ИК-ФПУ Sofradir Epsilon MW, имеющим температурное разрешение ≤ 40 мК и оснащенный криостатом Sofradir и холодильной машиной Ricor (рис. 8.1.1, *a*) [227].

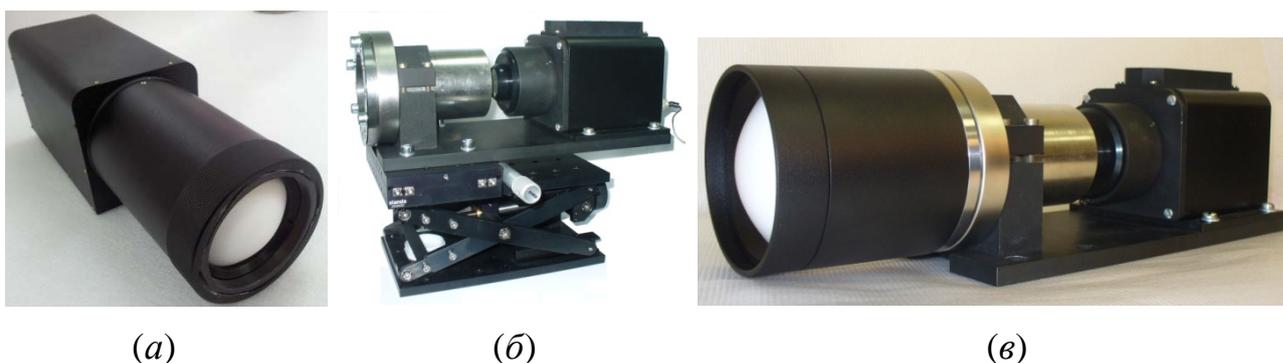


Рисунок 8.1.1 — Экспериментальные образцы ТГц-детекторов; (а) – детектор на основе охлаждаемого ИК-ФПУ, (б), (в) – детекторы на основе неохлаждаемых ИК-ФПУ

Также были изготовлены ТГц-детекторы с неохлаждаемыми ИК-ФПУ на микроболометрах фирмы ULIS (Франция), L3-Communications (США) и

производства ИФП СО РАН (г. Новосибирск) с температурным разрешением ≤ 80 мК и ≤ 100 мК (рис. 8.1.1, б, в). Они, естественно, обладают меньшей чувствительностью, зато значительно дешевле и могут использоваться при достаточно больших мощностях подсветки.

8.1.1 Визуализация монохроматических пучков излучения

На рисунке 8.1.2 показаны изображения профиля пучка излучения, выходящего из лампы обратной волны (ЛОВ). Изображения получены при освещении детектора излучением лампы обратной волны. Программное обеспечение для обработки и отображения получаемого изображения по поручению и под руководством автора было создано заведующим сектором Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» Новгородовым Борисом Николаевичем. Слева приведено изображение пучка излучения с длиной волны 0.9 мм и общей мощностью 2.8 мВт, справа – пучок с длиной волны 1.5 мм и мощностью 4.9 мВт. Из рисунка видно, что профиль пучка с длиной волны 1.5 мм более похож на гауссово распределение, чем пучок с длиной волны 0.9 мм. Информация о профиле пучка излучения весьма важна для настройки квазиоптических трактов спектрометров.

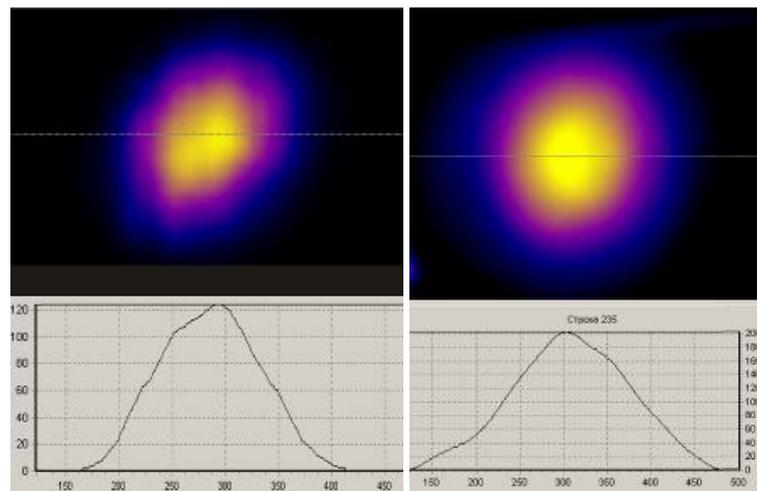


Рисунок 8.1.2 — Профили пучков излучения лампы обратной волны с длиной волны 0.9 мм (слева) и 1.5 мм (справа)

Следует отметить, что размерность матрицы в ИК-камере (в нашем случае 384×288) явно избыточна для получения качественного изображения ТГц-излучения с длиной волны ~ 1 мм на конвертере диаметром ≈ 50 мм. Это даёт возможность повысить соотношение сигнал/шум за счёт усреднения сигналов пикселей ИК-камеры, приходящихся на пиксель конвертера, ограниченного разрезами. На рисунке 8.1.3 слева показано исходное ИК-изображение конвертера с разрезами. Рабочая частота ТГц-излучения равнялась 0.33 ТГц. Размеры пикселей в конвертере составляли 0.9×0.9 мм². В изображении хорошо видны разрезы в конвертере, образующие пиксели ТГц-изображения.

По площади ТГц-пикселя проводилось усреднение сигнала, заполнялись области изображения, соответствующие разрезам. Количество пикселей ИК-фотоприёмника, приходящихся на пиксель конвертера, составляло от 10×10 до 15×15 . В результате усреднения соотношение сигнал/шум возрастает в 10–15 раз. В итоге получалось изображение с однородными квадратами разной интенсивности (пример увеличенного фрагмента такого изображения показан на рисунке 8.1.3 в центре). Для улучшения восприятия изображения проводилось гауссово сглаживание с размером окна порядка 21. Итоговое изображение показано на рисунке 8.1.3 справа. При соответствующей производительности процессора изображения данная обработка может проводиться в режиме реального времени.

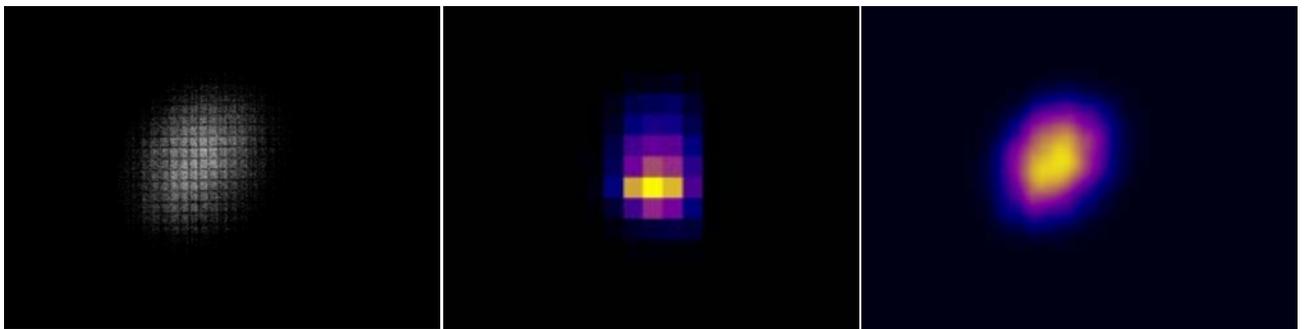


Рисунок 8.1.3 — Исходное изображение пучка с длиной волны 0.9 мм (слева), пример увеличенного изображения с усреднением сигнала пикселей ИК-камеры, приходящихся на пиксель ТГц–ИК-конвертера (в центре), сглаженное изображение (справа)

На рисунке 8.1.4 представлено изображение крестообразной миры длиной 15 мм и шириной 3 мм, полученное описанным приёмником при освещении миры излучением с частотой 205 ГГц (длина волны 1.5 мм) [228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235]. Размытие изображения объекта не превышает дифракционного предела, что подтверждает качество конструкции и изготовления приёмника.

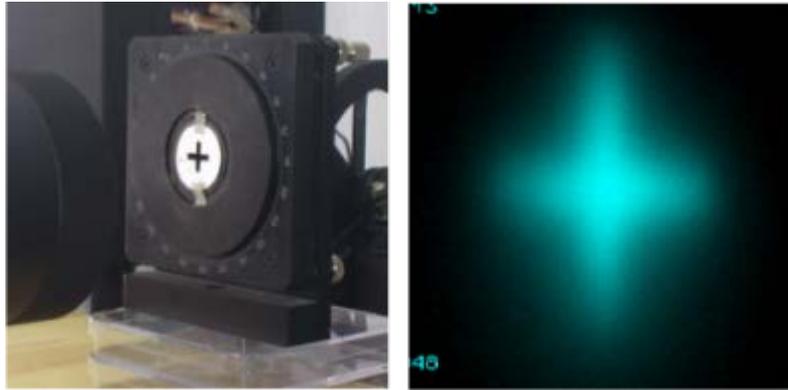


Рисунок 8.1.4 — Крестообразная мира длиной 15 мм и шириной 3 мм (слева), изображение миры, освещенной излучением с длиной волны 1.5 мм (справа)

На рисунке 8.1.5 показаны изображения той же миры, закрытой различными материалами: поролоном толщиной 25 мм, гофропоролоном той же толщины, фанерой толщиной 3 мм.

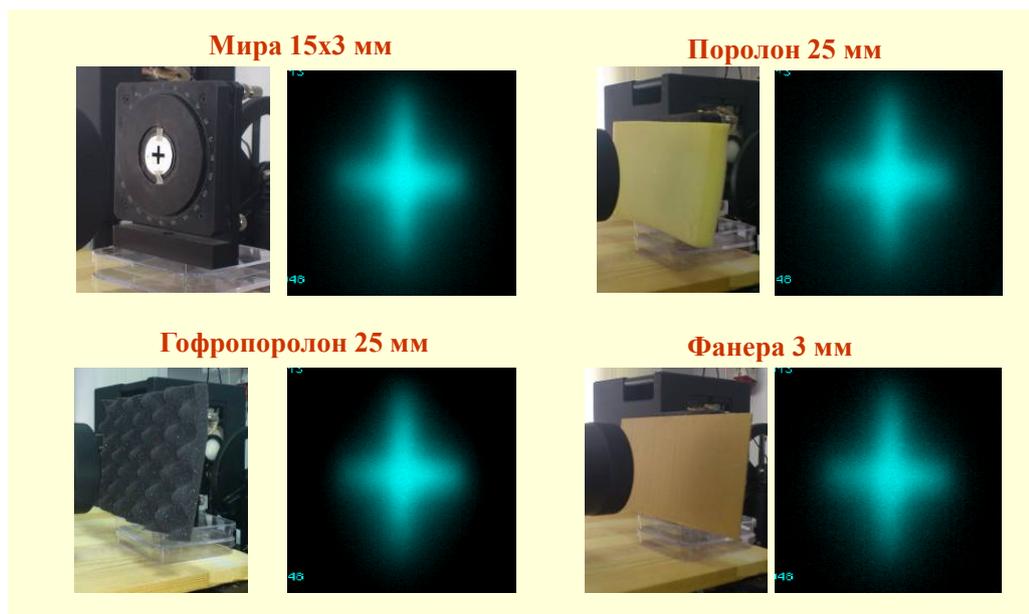


Рисунок 8.1.5 — Изображение крестообразной миры длиной 15 мм и шириной 3 мм, освещенной излучением с длиной волны 1.5 мм и закрытой различными материалами

Из рисунка видно, что излучение с длиной волны 1.5 мм свободно проникает через указанные материалы и не изображение мира не искажается. Данные эксперименты показывают возможность применения данного матричного приёмника для обнаружения и инспекции скрытых объектов.

С помощью изготовленного ТГц-детектора был продемонстрировано поляризационное разрешение детектора [127, 128]. На рисунке 8.1.6 показаны изображения, полученные при различной ориентации поляризации относительно поглотителя. Ослабление сигнала при переходе от co-polar к cross-polar поляризации составило не менее 20 дБ.

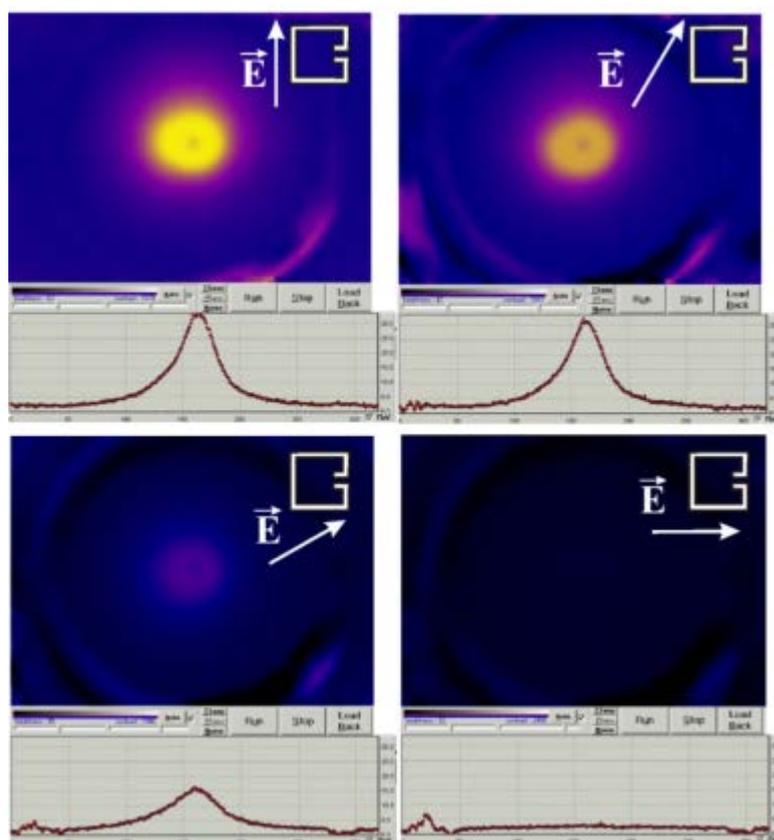


Рисунок 8.1.6 — Изображения сфокусированного пучка излучения с длиной волны 0.9 мм при разной ориентации поляризации пучка (показан стрелкой) относительно топологии поглотителя

На рисунке 8.1.7 приведены стоп-кадры видеозаписи при непрерывном движении пучка излучения с длиной волны 0.9 мм по поверхности конвертера,

которые демонстрируют возможность работы детектора в режиме реального времени.

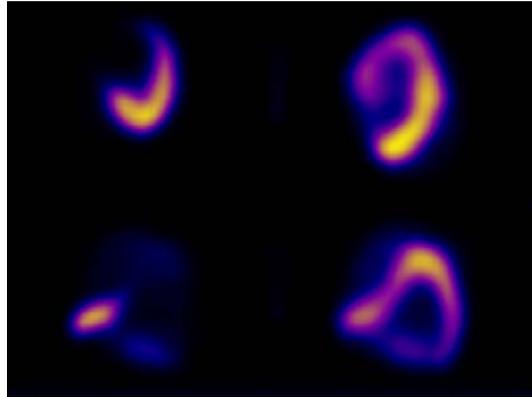


Рисунок 8.1.7 — Стоп-кадры видеозаписи при непрерывном движении пучка по поверхности конвертера

8.1.2 Визуализация многоспектральных пучков излучения

Для одновременной регистрации излучения в различных спектральных диапазонах на предыдущих этапах была разработана схема матричного многоспектрального конвертера, схема которого показана на рисунке 8.1.8 [140].

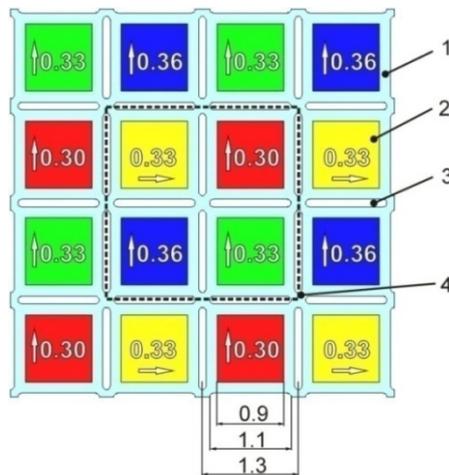


Рисунок 8.1.8 — Схема многоспектрального конвертера с разрезами, 1 – полипропилен, 2 – фрагмент частотно избирательной поверхности, 3 – разрезы, 4 – четырех элементный пиксель, размеры в мм, рабочие частоты и направления поляризации указаны в ТГц и стрелками

На поверхности единой диэлектрической плёнки изготовлены фрагменты частотно-избирательных поверхностей с различной спектральной и

поляризационной чувствительностью. Цифрами указана резонансная частота в ТГц, стрелки указывают направление рабочей поляризации поглотителей.

На рисунке 8.1.9 приведены стоп-кадры видеозаписи при движении пучка излучения с частотой 0.33 ТГц и направлением поляризации под 45 градусов к направлениям рабочих поляризаций фрагментов поглотителей, как показано на рисунке, вдоль поверхности поглотителя. Из рисунка видно, что на облучение реагируют все фрагменты с рабочей частотой 0.33 ТГц (зелёные и жёлтые на рисунке 8.1.8 с обоими направлениями поляризации, и не реагируют соседние фрагменты поглотителей с другими рабочими частотами (красные и синие на рисунке 8.1.8).

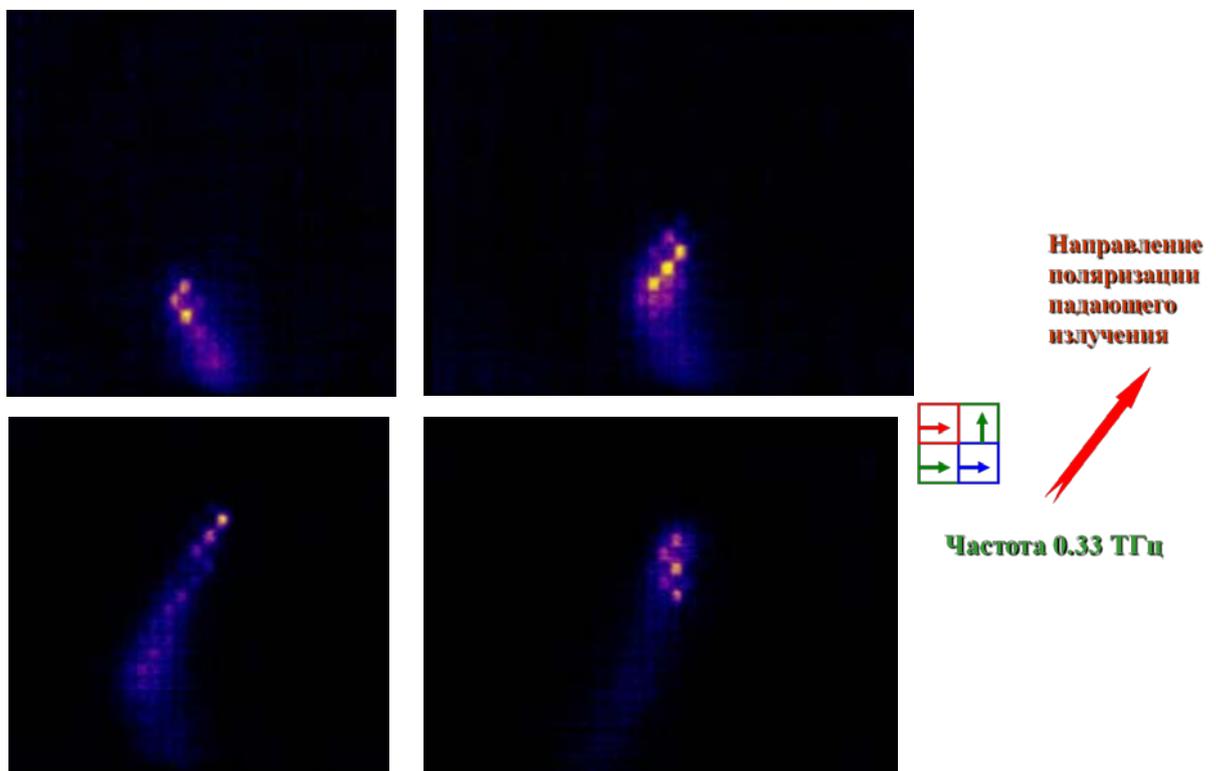


Рисунок 8.1.9 — Стоп-кадры видеозаписи при движении пучка излучения с частотой 0.33 ТГц вдоль поверхности поглотителя

На рисунке 8.1.10 приведены схема расположения фрагментов ЧИП с разной поляризационной и спектральной чувствительностью и стоп-кадры видеозаписи при стационарном пучке при сканировании частоты излучения в диапазоне от ≈ 0.27 ТГц до ≈ 0.38 ТГц.

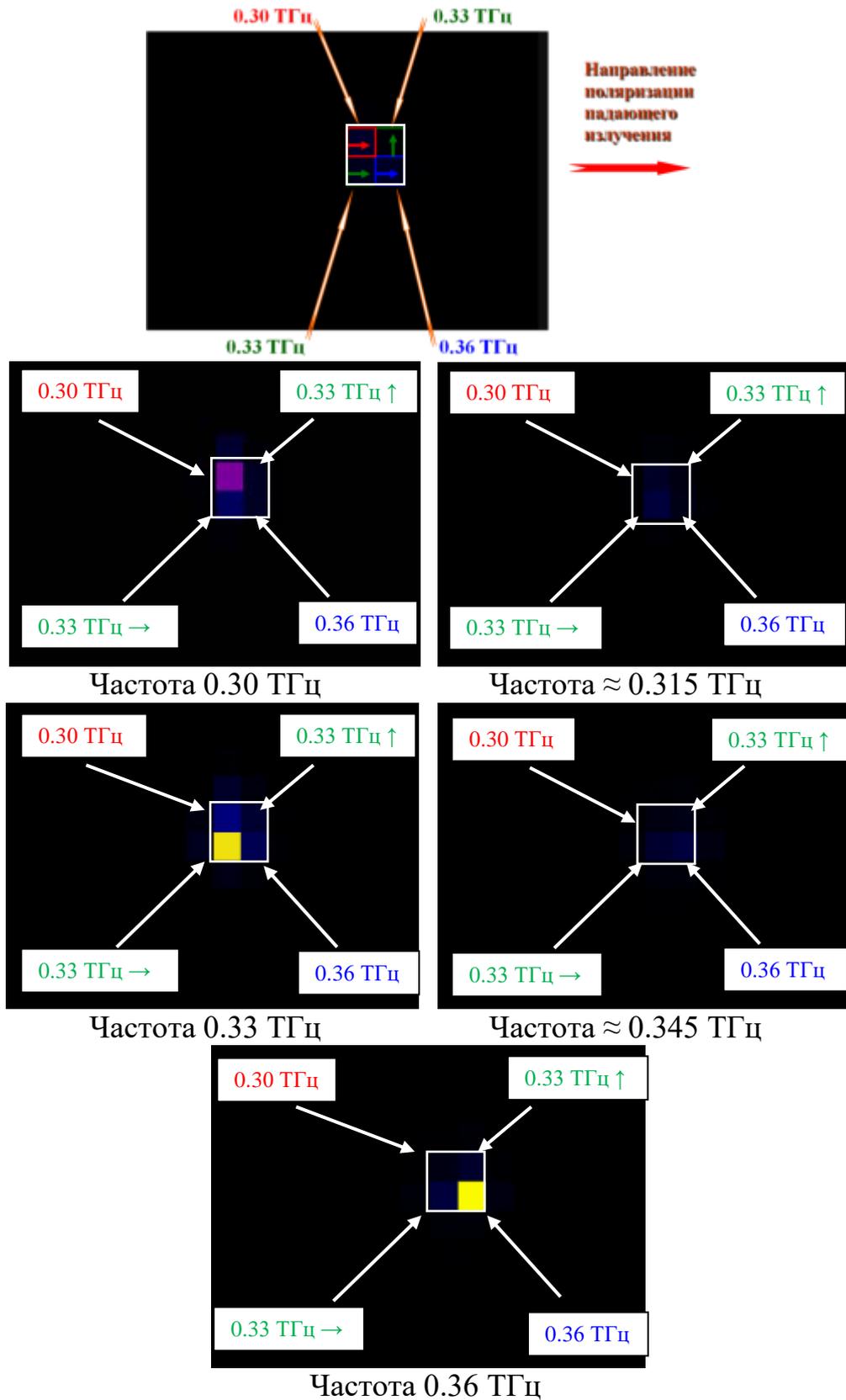


Рисунок 8.1.10 — стоп-кадры видеозаписи при стационарном пучке при сканировании частоты излучения от ≈ 0.27 ТГц до ≈ 0.38 ТГц

В данном конвертере были сделаны сквозные разрезы в виде штрихов для уменьшения межпиксельной связи, обусловленной латеральной теплопроводностью (см. раздел 3.3). Программное обеспечение усредняло сигнал по площади одного «пикселя» – фрагмента ЧИП и строилось изображение без разрезов. Данные рисунки демонстрирую спектральную и поляризационную селективность многоспектрального детектора, а так же хорошее пространственное разрешение. Сигналы от соседних пикселей с другой резонансной частотой связаны с тем, что полоса поглощения каждого пикселя захватывает соседние рабочие частоты [140].

8.1.3 Использование методики визуализации пучков миллиметрового излучения в экспериментах в ИЯФ СО РАН

В Институте ядерной физики СО РАН проводятся исследования в области физики плазмы, где используются мощные импульсы миллиметрового излучения, возбуждаемые гиротроном. Импульс излучения по волноводу направляется в газодинамическую ловушку (рис. 8.1.11). Потери мощности в волноводе в значительной степени определяются формой пучка – чем ближе она к распределению Гаусса, тем меньше потери. С целью исследования пространственного распределения генерируемого пучка был подобран поглотитель с коэффициентом поглощения, малым, чтобы поглотитель не перегревался, и достаточным, чтобы генерировать тепловое поле, которое может быть зарегистрировано тепловизионной камерой на микроболометрах. Для проведения таких экспериментов была разработана специализированная портативная ИК-камера, устойчивая к импульсным радиопомехам высокой мощности, возникающим при генерации импульса излучения. Разработка камеры и изготовление была выполнены по поручению автора сотрудниками Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ»: Гусаченко Анатолий Вячеславович, Морозов Андрей Олегович, Рогова Инга Владимировна. Программное обеспечение для обработки изображения было создано по поручению автора заведующим сектором Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» Новгородовым Борисом Николаевичем.

Газодинамическая ловушка



Параметры ТГц импульса гиротрона:
длина волны 5,5 мм
энергией в импульсе до 200 Дж,
длительностью 200 мкс



Рисунок 8.1.11 — Вид на газодинамическую ловушку в ИЯФ СО РАН (слева), где используются мощные пучки миллиметрового излучения, справа – вид на гиротрон (источник миллиметрового излучения) и установленными детекторами, смотрящими на выходное окно гиротрона

В тепловизоре использовано неохлаждаемое фотоприёмное устройство на основе матрицы микроболометров. Тепловизор оснащен компактным монитором с питанием от аккумуляторной батареи. Монитор закрепляется либо на корпусе тепловизора, либо находится в руках оператора или на рукаве, что позволяет проводить измерения, не удерживая камеру в руках. Видеосигнал с тепловизионной камеры передается на монитор либо по кабелю, либо по радиоканалу. Дальность передачи радиосигнала до 10 м. Тепловизор может закрепляться либо на фотоштативе для стационарной съемки, либо на съемной ручке-штативе для работы с руки (рис. 8.1.12).



Рисунок 8.1.12 — Внешний вид ИК-камеры для регистрации теплового изображения поглотителя и тепловое изображение, полученное камерой

Прибор позволяет исследовать динамические процессы, где происходит достаточно быстрое изменение теплового поля во времени. С этой целью прибор оснащен кольцевой памятью, в которую непрерывно записывается видеосигнал длительностью до 60 секунд. При нажатии управляющей кнопки происходит запись в течение заданного времени (например, 30 секунд) и запись прекращается. В результате в памяти содержится видеосигнал длительностью 60 секунд, при этом 30 секунд записано до нажатия кнопки, а 30 секунд – после нажатия. Это позволяет фиксировать события, наступление которых нельзя предвидеть заранее.

Тепловизор имеет стандартный видеовыход и выход по USB для подсоединения к компьютеру. Изображение с тепловизионной камеры выводится в оттенках серого или в псевдоцвете, а также выводится трёхмерный профиль теплового поля, который можно вращать с помощью компьютерной мыши (рис.8.1.12 внизу). Возможно построения профиля теплового поля по выбранному срезу. На рисунке 8.1.13 приведены стоп-кадры видеосъёмки при генерации в гиротроне импульса излучения длиной волны 5.5 мм, длительностью 200 мкс и мощностью до 200 Дж.

В октябре 2018 года разработанная система поглотитель–ИК-камера была использованы для настройки волноводной линии (СВЧ-тракта) от гиротрона до выхода из тракта. Настройка СВЧ-тракта заключалась в проведении СВЧ-пучка по нужной траектории по зеркалам квазиоптического фильтра и его вводе в волноводную линию строго вдоль оси волновода. На всех этапах требовался контроль пространственного распределения мощности пучка, характеризующий

его волновой фронт, и его положение относительно опорных точек зеркал и оси волновода. В процессе настройки в разных частях волноводной линии устанавливался поглотитель, и регистрировалось пространственное распределение температуры поглотителя после короткого СВЧ-импульса. На рисунке 8.1.14 *а* показан поглотитель, установленный сразу за выходным окном гиротрона; на рисунке 8.1.14 *б* – распределение мощности СВЧ-пучка на выходе из гиротрона; на рисунке 8.1.14 *в* – распределение мощности СВЧ-пучка на выходе из квазиоптического фильтра. В итоге, согласно калориметрическим измерениям, потери мощности в волноводной линии удалось снизить с 10% до 6.5%.

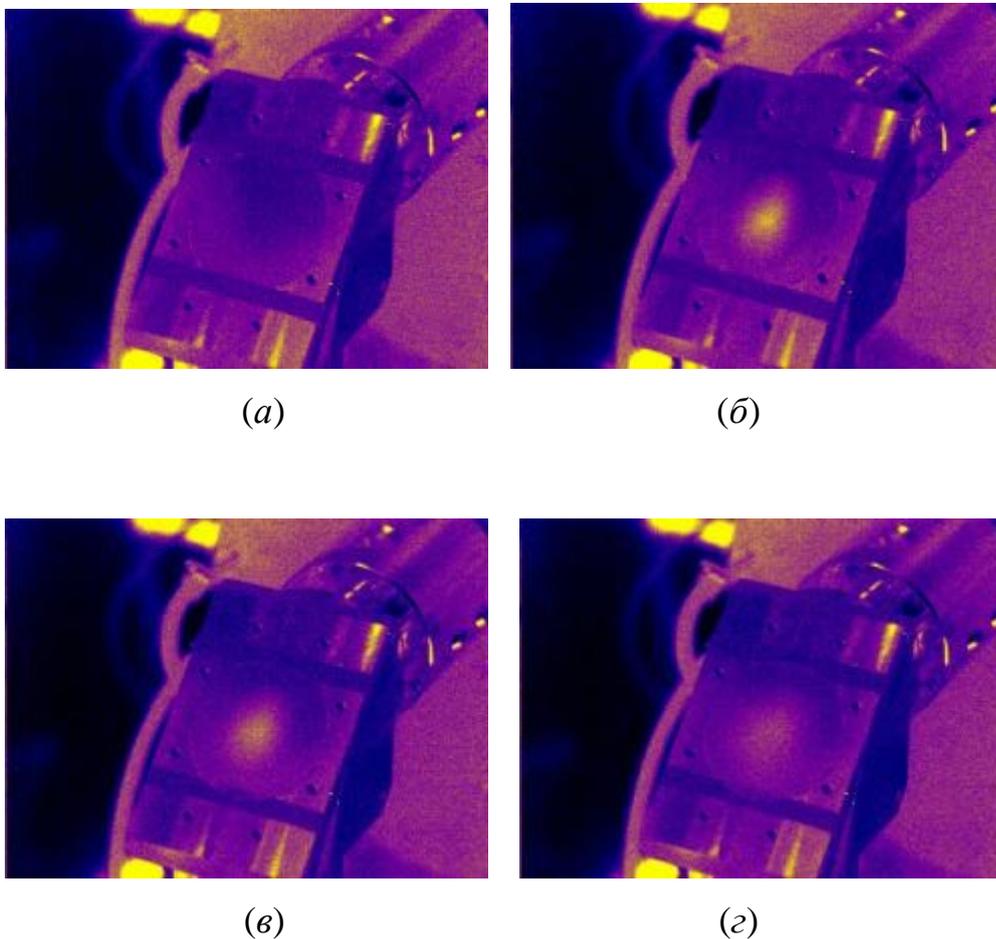


Рисунок 8.1.13 — Стоп-кадры видеосъемки поглотителя, закреплённого на выходном фланце гиротрона

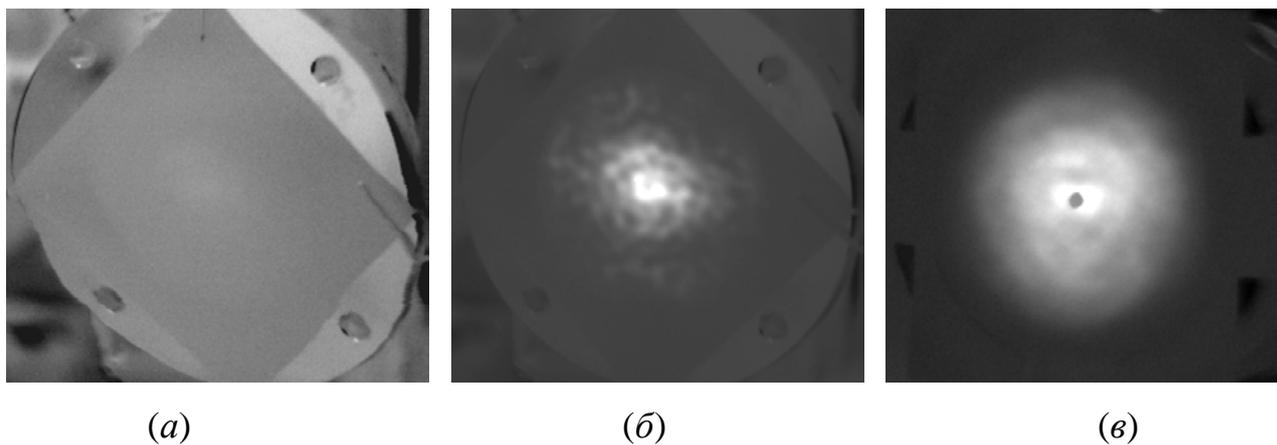


Рисунок 8.1.14 — *a)* – изображение поглотителя на выходном фланце гиротрона, *б)* – изображение профиля мощности СВЧ-излучения на выходе гиротрона, *в)* – изображение профиля мощности на выходе из квазиоптического фильтра

Технические характеристики визуализатора приведены в таблице 8.1.1. Следует отметить, что данная система поглотитель–ИК-камера могут использоваться как для миллиметрового, так и терагерцового диапазона, выбором соответствующего поглотителя.

Таблица 8.1.1 — Технические характеристики ММ-визуализатора

Параметр	Значение
Тепловизионная камера:	
- рабочий спектральный диапазон, мкм	7...14
- минимально обнаруживаемая разность температур при температуре окружающей среды 25 °С, не более	120 мК
- формат матричного фотоприёмника	384 × 288
- размер чувствительного элемента приёмника	25 мкм
- угловое поле зрения изделия:	–
по горизонтали	11 ° ± 5 %;
по вертикали	8 ° ± 5 %.
- время непрерывной работы от комплекта источника питания (2 аккумулятора Li-Ion ICR18650 2 А*ч), ч, не менее	4
- время готовности изделия к работе после включения, не более	5 с
Портативный видеомонитор:	
- тип экрана	LCD
- разрешение	1000×600

- время непрерывной работы от комплекта источника питания (1 аккумулятор Li-Ion ICR18650 2 А*ч), ч, не менее	4
- время готовности изделия к работе после включения, с, не более	5
Кабель видео «теповизионная камера-видеомонитор», шт.	1
Комплект аккумуляторов (3 аккумулятора Li-Ion ICR18650 2 А*ч)	2 компл.
Зарядное устройство, шт.	1
Кейс укладочный, шт.	1
Инструкция по эксплуатации	1

Работа выполнена при частичной поддержке гранта 11.G34.31.0033 Правительства РФ для поддержки научных исследований, проводимых под руководством ведущих учёных в Российских образовательных учреждениях высшего профессионального образования.

8.1.4 Моделирование расплывания теплового изображения

С целью более точного определения пространственного профиля пучка излучения была создана специальная программа, позволяющая по временным зависимостям формы теплового пятна на поглотителе рассчитать исходный профиль пучка излучения. Данная программа по поручению и под руководством автора была создана младшим научным сотрудником Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» Загубисало Петром Станиславовичем.

На рисунке 8.1.15 приведены экспериментальные и расчетные зависимости температуры в центре теплового пятна от времени (слева вверху), срез пространственного распределения теплового пятна в разные моменты времени (слева внизу).

На рисунке 8.1.15 справа показаны: экспериментальное изображение теплового пятна (вверху) и рассчитанный с помощью данной программы профиль пучка (внизу).

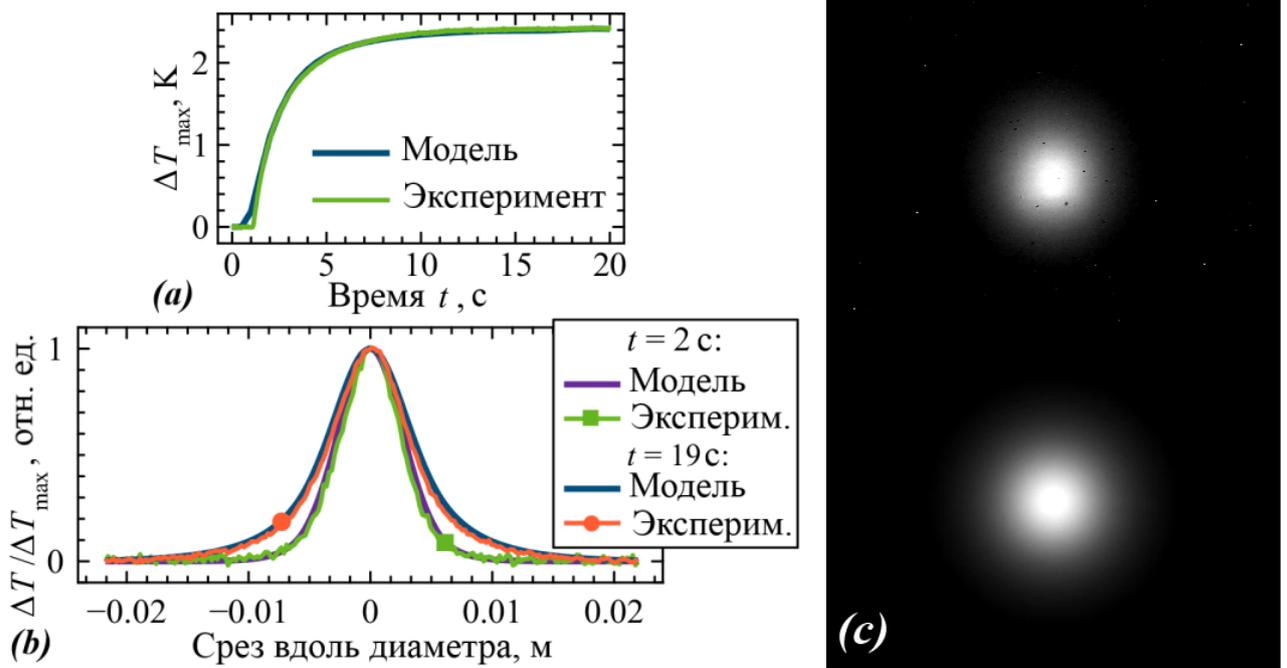


Рисунок 8.1.15 — Экспериментальные и расчетные зависимости температуры в центре теплового пятна от времени (слева сверху), срез пространственного распределения теплового пятна в разные моменты времени (слева внизу), профили пучков: экспериментально измеренный (справа сверху) и рассчитанный (справа внизу)

Можно сделать следующие выводы.

1. Разработана схема визуализации терагерцового излучения на основе конвертера терагерцового (ТГц) излучения в инфракрасное (ИК) излучение и высокочувствительной ИК-камеры.
2. Математическое моделирование теплофизических процессов в структуре конвертера показало, что эффективность конверсии мощности ТГц-излучения в тепловое излучение составляет более 80% при толщине конвертера менее 10 мкм. Таким образом, использование данного конвертера для регистрации изображения в терагерцовой области спектра является перспективным.
3. Разработаны оптические элементы для болометрического приёмника, такие как ТГц-объектив для проецирования изображения объекта на поверхность

ТГц–ИК-конвертера, а так же проекционный объектив для передачи теплового изображения обратной поверхности конвертера в плоскость матрицы ИК-камеры.

4. Предложен способ уменьшения эффекта расплывания теплового изображения конвертера изготовлением соответствующих разрезов в структуре конвертера.
5. Результаты экспериментальных исследований образца болометрического матричного приёмника показали возможность регистрации как односпектральных, так и мультиспектральных пучков ТГц-излучения с пространственным и поляризационным разрешением.

8.2 Предложения по использованию ТГц-визуализатора для построения систем контроля скрытых предметов

Разработанный детектор ТГц-изображения может использоваться для построения относительно недорогих систем *негласного* локального (1–3 м) или дистанционного (5–10 м) контроля скрытых опасных объектов (оружие, взрывные устройства) [232–235]. Оптическая схема предлагаемой системы локального контроля приведена на рисунке 8.2.1. Система состоит из источника излучения (например, лавинно-пролётный диод), асферической линзы, формирующей параллельный пучок заданного диаметра, объекта контроля, асферической линзы, формирующей изображение в плоскости конвертера детектора.

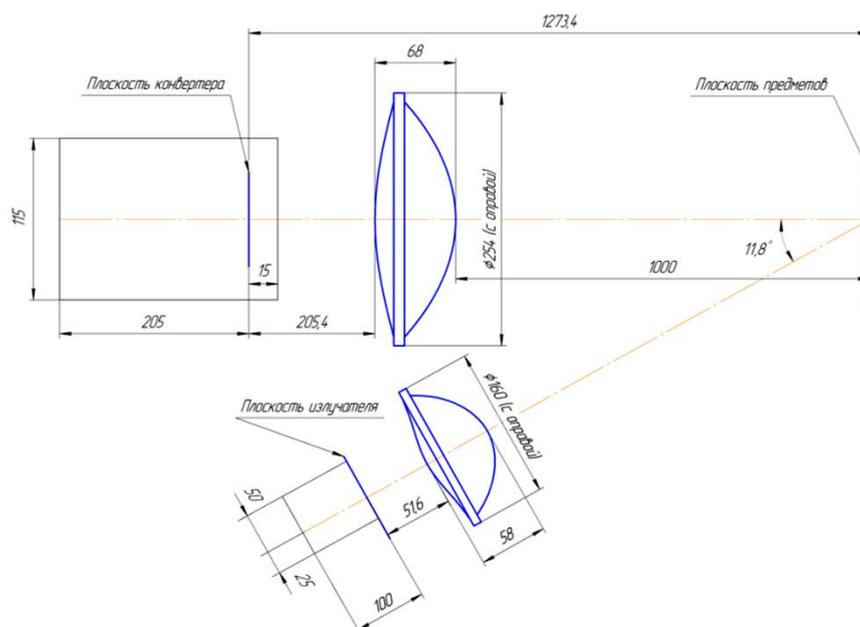


Рисунок 8.2.1 — Оптическая схема системы локального контроля скрытых объектов

На рисунке 8.2.2 приведены фотографии асферических линз из фторопласта и источника 2-мм излучения на основе лавинно-пролетного диода с усилителем и рупорно-линзовой антенной, с выходной мощностью излучения ~ 100 мВт.



Рисунок 8.2.2 — Асферические линзы и источник 2-мм излучения

Пример изображений, полученных с помощью данной системы, показаны на рисунке 8.2.3.

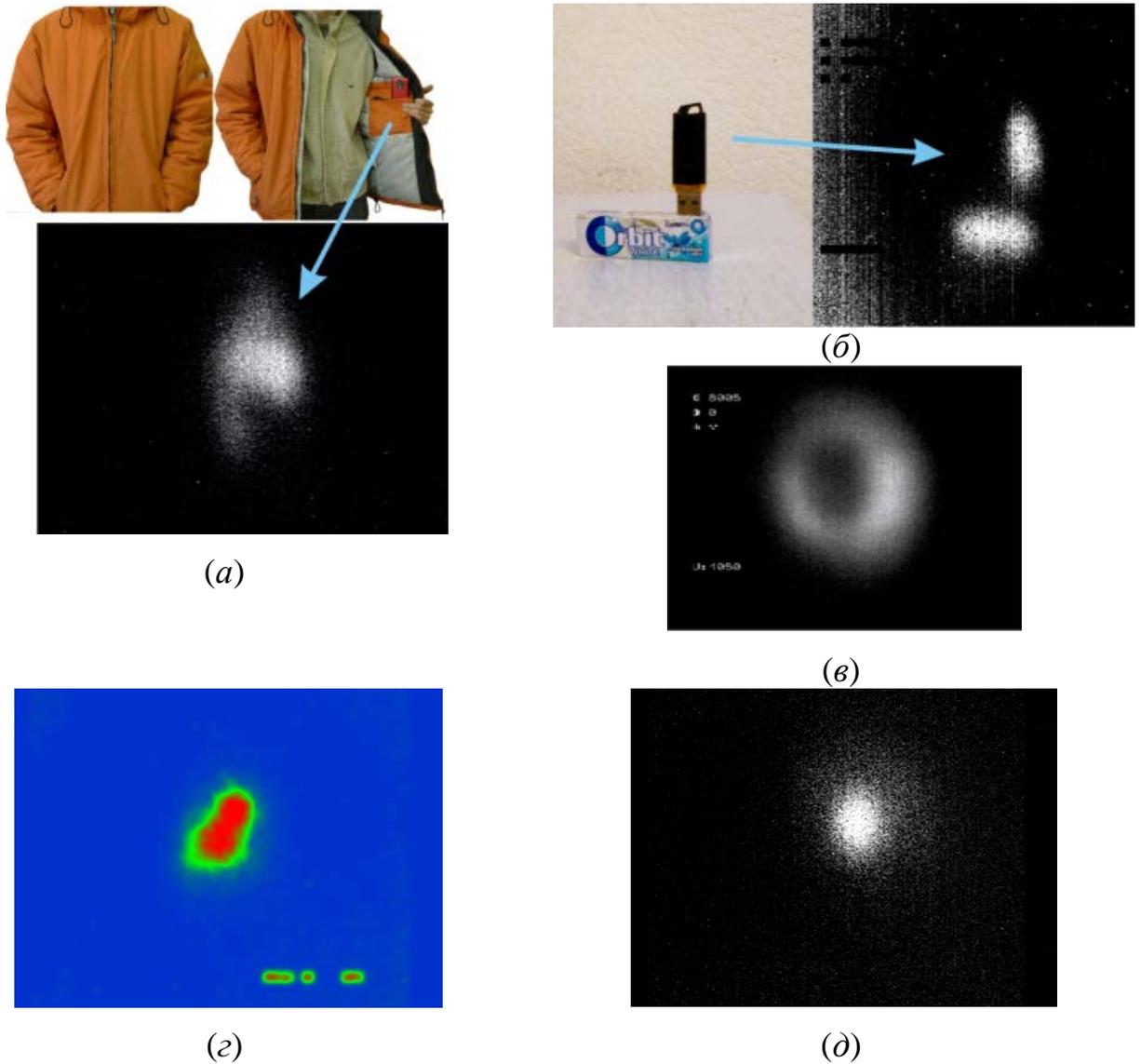


Рисунок 8.2.3 — Примеры изображений, полученных с помощью ТГц-детектора на основе ТГц–ИК-конвертера:

- (а) – блик от сотового телефона во внутреннем кармане куртки,
- (б) – изображение «флэшки», стоящей вертикально на пачке с жевательной резинкой в стандартной пластиковой упаковке,
- (в) – изображение компакт диска под одеждой,
- (г) – изображение пачки сигарет во внутреннем кармане,
- (д) – блик от монеты диаметром 15 мм.

На рисунке 8.2.4 показан прототип носимого устройства контроля скрытых объектов.



Рисунок 8.2.4 — Схема прототипа локального детектора скрытых объектов на основе ТГц-детектора

Устройство, внешне похожее на обычный фонарь, состоит из детектора изображения с входным объективом, по периферии объектива расположены необходимое количество (в данном случае 3) источников излучения, каждый из которых содержит ИК-светодиод для указания места освещения ТГц- (миллиметровым) излучением. Также в корпусе имеется ТВ-камера видимого диапазона для видеонаблюдения объекта контроля. Изображения с видеокamеры и ТГц-детектора передаются по радиоканалу на отдельное устройство отображения – монитор, где изображения совмещаются с помощью программного обеспечения. Так как монитор связан с детектором по радиоканалу, то он может размещаться на удалении от камеры (в нашем случае ≤ 10 м) для удобства оператора. ТГц-детектор может размещаться на опорно-поворотном устройстве, которое может управляться дистанционно.

8.3 Предложения по построению систем контроля скрытых предметов с использованием пироэлектрического детектора миллиметрового диапазона и сверхвысокочастотного модуля с линейно-частотной модуляцией

Одним из перспективных методов обнаружения является использование миллиметрового излучения с длиной волны 1–4 мм. Данное излучение хорошо проникает через одежду, пластики, дерево и другие неметаллические преграды, непрозрачные в видимом и инфракрасном диапазоне. При этом это излучение хорошо отражается металлическими и другими твердыми предметами, например, керамикой, а так же скотчем. Относительно малая длина волны излучения позволяет локализовать объект контроля на дальних расстояниях 5–100 м с достаточным пространственным разрешением.

В данной работе предлагается схема системы и методика её использования для обнаружения металлических или других, хорошо отражающих миллиметровое излучение, предметов, скрытых под одеждой или другими препятствиями, непрозрачными в оптическом диапазоне (рис. 8.3.1) [236].

Носимое или стационарное устройство содержит источник ММ-излучения (например, лавинно-пролетный диод с рупорно-линзовой антенной), пироэлектрический детектор ММ-излучения, высокочувствительную телевизионную камеру, инфракрасную подсветку на основе ИК-светодиода, модуль электронной обработки сигнала и дисплей для вывода видеосигнала и информационных сигналов от детектора. Устройство сконструировано таким образом, что центр видеоизображения на дисплее совпадает с зоной облучения источника излучения. В случае превышения величины отражённого сигнала пироэлектрического детектора излучения выше заданной величины на дисплей выводится информация о степени угрозы. Использование инфракрасной подсветки с длиной волны в области чувствительности камеры обеспечивает круглосуточный режим работы устройства.

Были разработаны схемотехнические принципы построения устройства, разработаны алгоритмы обработки сигналов от пироэлектрического детектора и методы вывода информационных сигналов на дисплей в режиме реального времени. Особое внимание уделено массогабаритным параметрам устройства с целью создания портативной носимой системы с автономным источником питания, которая может использоваться «с руки».

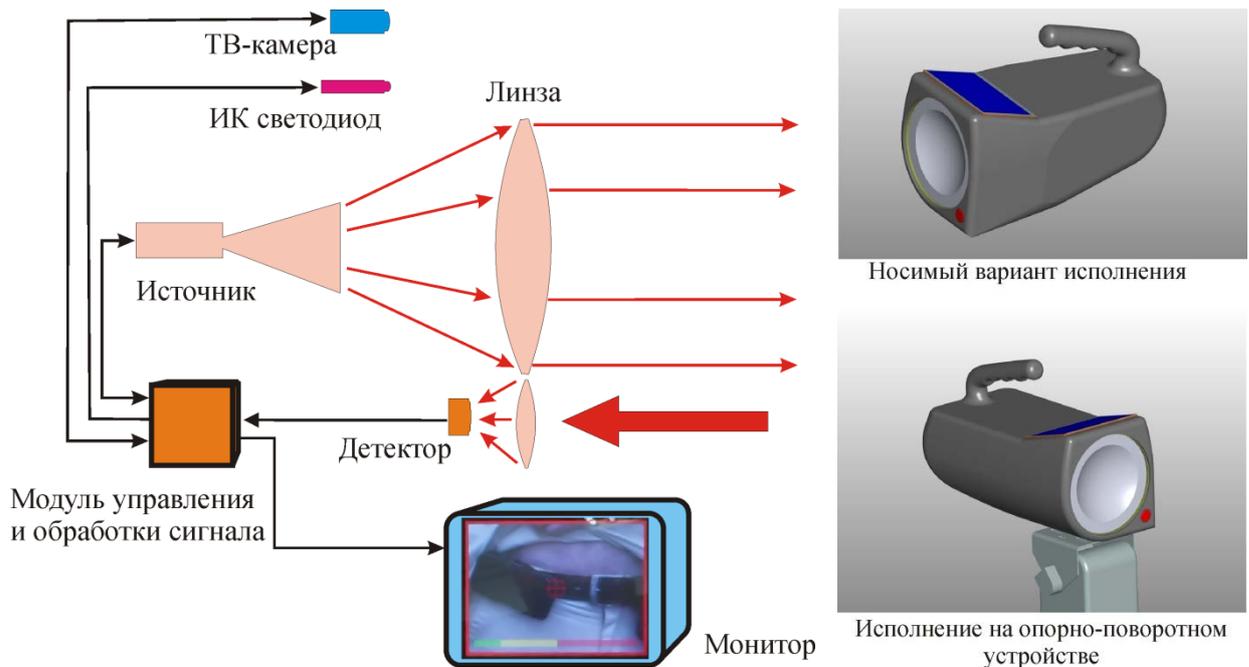


Рисунок 8.3.1 — Схема детектирования скрытых объектов на основе пироэлектрических детекторов ММ-излучения и вид прототипов устройств

При выполнении работы изучены: минимально достижимый угол расходимости ММ излучения, зависимость интенсивности отраженного от объекта контроля излучения от расстояния до объекта, влияние паразитных сигналов, степень локализации опасного объекта, влияние характеристик материала преград, непрозрачных для видимого и ИК-излучения, на вероятность обнаружения и дальность обнаружения.

Продемонстрировано надежное обнаружение поражающих элементов самодельного взрывного устройства, таких как болты и металлические стержни, скрытые под одеждой, на расстоянии, по крайней мере, не менее 3 метров. На

рисунке 8.3.2 приведены стоп-кадры видеоизображения, полученные с помощью макета системы.

В виде объектов наблюдения использованы наручные часы, портмоне и мобильный телефон на ремне, болты на пенопропилене, спрятанные под халатом. Степень угрозы отображается как изменение цвета рамки изображения от зелёного к жёлтому и к красному цвету. Дополнительно выводится горизонтальный индикатор, длина и цвет которого связан с величиной сигнала детектора.

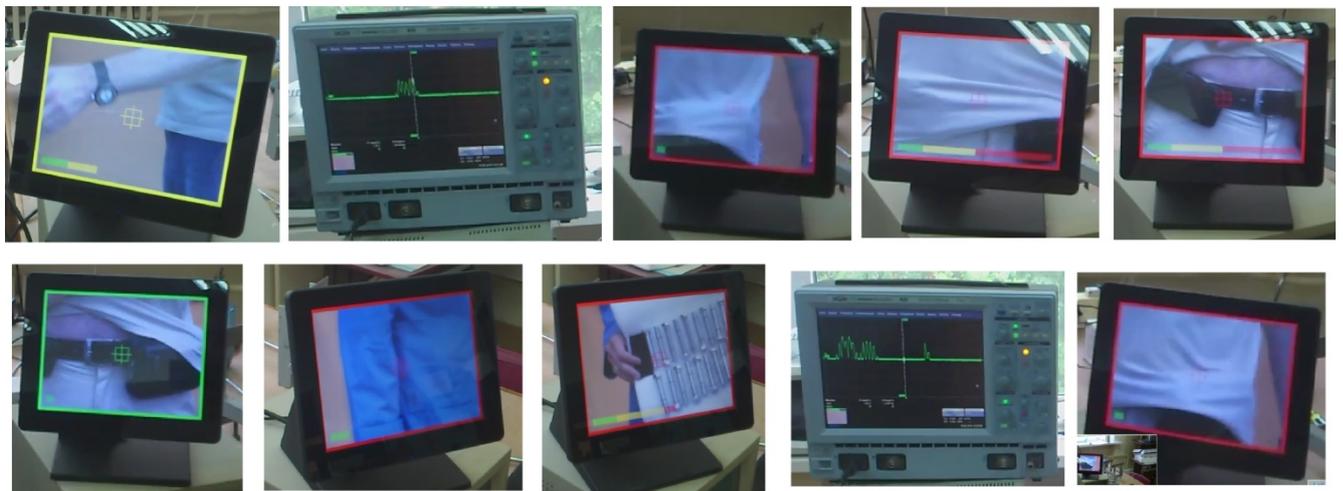


Рисунок 8.3.2 — Стоп-кадры видеосъемки работы устройства

Хорошо известно, что тепловые приёмники в миллиметровом диапазоне ($\lambda \geq 2$ мм) проигрывают в чувствительности радиоэлектронным приёмникам. Наиболее коротковолновым является приёмопередающий СВЧ-модуль с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) излучения с рабочей частотой 93 ГГц (≈ 3 мм). Модуль совмещает в себе источник и приёмник излучения, что делает его удобным для создания малогабаритных приборов.

В настоящей работе был использован приёмопередающий СВЧ ЛЧМ-модуль для создания комплексного носимого устройства дистанционного обнаружения скрытых опасных объектов, таких как оружия, взрывчатых устройств и их компонентов. По функциональному назначению и методики использования устройство похоже на предыдущее, только вместо лавинно-пролётного диода и ТГц-пиродетектора использован единый СВЧ ЛЧМ-модуль. Модуль выгодно

отличается от пироприёмника тем, что обладает в несколько раз большей чувствительностью и позволяет существенно увеличить дальность действия устройства, более 100 м.

Внешний вид СВЧ ЛЧМ-модуля с антенной представлен на рисунке 8.3.3. Устройство (рис. 8.3.4) содержит СВЧ ЛЧМ-модуль с антенной и схемой управления, высокочувствительную телевизионную камеру, инфракрасную подсветку на основе ИК светодиода, модуль электронной обработки сигнала и дисплей для вывода видеосигнала и информационных сигналов от СВЧ ЛЧМ-модуля.



Рисунок 8.3.3 — СВЧ ЛЧМ-модуль с антенной, линзой и блоком управления

Устройство сконструировано таким образом, что центр видеоизображения на дисплее совпадает с центром зоны облучения приёмопередающего модуля. В случае превышения величины отражённого сигнала СВЧ-излучения выше заданной величины на дисплей выводится информация о степени угрозы. Использование инфракрасной подсветки с длиной волны в области чувствительности камеры обеспечивает круглосуточный режим работы устройства.

Прибор работает следующим образом. Излучение СВЧ ЛЧМ-модуля с линейной частотной модуляцией отражается от объекта наблюдения и смешивается с исходным излучением. Разностная частота даёт информацию о дистанции до объекта, а амплитуда – о величине отражения. По величине

амплитуды судят о наличии опасного объекта: оружия, поражающих компонентов взрывных устройств. На мониторе выводится цветная марка, цвет которой меняется от зелёного (нет угрозы), жёлтого (возможная угроза) до красного (наличие угрозы).

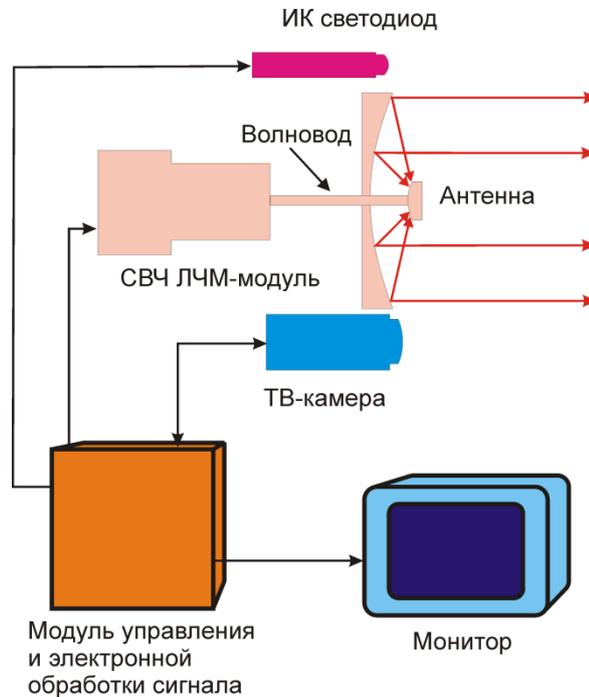
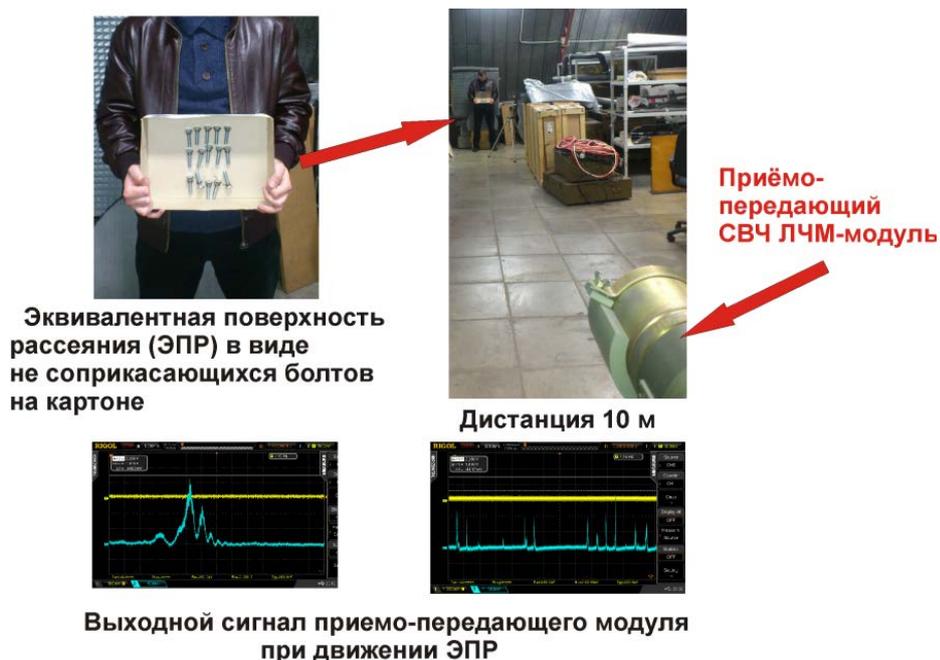


Рисунок 8.3.4 — Схема комплексного прибора дистанционного обнаружения скрытых объектов

На рисунке 8.3.5 представлены результаты экспериментальных исследований СВЧ приёмо-передающего модуля с частотной модуляцией выходного излучения с целью его использования для создания устройства дистанционного обнаружения скрытых объектов. На рисунке 8.3.5, а слева вверху показан объект исследований – набор болтов, закреплённых на картонной крышке (так называемая эквивалентная поверхность рассеяния (ЭПР)). Болты не соприкасались между собой для уменьшения влияния вихревых токов. Слева и справа внизу показан сигнал с ЛЧМ-модуля, выведенный на осциллограф, от движущегося в зоне облучения на расстоянии 10 метров объекта (ЭПР). Справа вверху показано место испытаний. За объектом находился поглощающий СВЧ-излучение экран. Сигнал от человека без ЭПР не наблюдался.



(a)



(б)

Рисунок 8.3.5 — Объекты контроля и результаты испытаний СВЧ ЛЧМ-модуля

На рисунке 8.3.5, б показаны ещё два объекта наблюдения: человек, обмотанный скотчем, и человек с закреплёнными на груди болтами, имитирующими поражающие элементы взрывного устройства. Видно, что регистрируется не только сигнал от болтов (8.3.5, б справа внизу), но и сигнал от скотча (8.3.5, б слева внизу), что демонстрирует достаточно высокую чувствительность устройства.

В таблице 8.3.1 приведены характеристики проработанного прототипа комплексного прибора дистанционного обнаружения скрытых объектов на основе СВЧ ЛЧМ-модуля с антенной и ТВ-камеры с ИК-подсветкой.

Таблица 8.3.1 — Технические характеристики прототипа комплексного прибора дистанционного обнаружения скрытых объектов

Параметр	Значение
СВЧ ЛЧМ-модуль	
Рабочая частота, ГГц	93±1
Диапазон перестройки частоты, МГц	80
Выходная мощность, мВт, не менее	1
Напряжение питания, В	5
Потребляемый ток, А	0,8
Масса, г, не более	95
Антенна	
Диаметр рабочей апертуры, мм	90
Расходимость пучка, град	1
ТВ-камера	
Формат матрицы	1280×900
Спектральный диапазон, мкм	0,4-0,9
ИК светодиод	
Длина волны излучения, мкм	0,8-0,9
Мощность излучения, Вт	0,2
Общие характеристики	
Напряжение питания, В	5-12
Интерфейс	VESA, USB 2.0
Габариты всего прибора, мм	120x120x250
Масса без блока питания, кг, не более	2

8.4 Результаты практического использования пироэлектрических приёмников ТГц- и ММ-излучения

Для создания систем контроля ТГц- и субТГц-излучения с использованием широкополосного детектора был создан многоканальный пироэлектрический детектор УМК-5 (рис. 8.4.1). Детектор включает в себя:

- 5-канальный блок питания,
- набор из 5 штук пироэлектрических детекторов излучения на основе пироэлектрических преобразователей (без резонансных поглотителей),
- первичные и вторичные усилители.



Рисунок 8.4.1 — Многоканальный пироэлектрический детектор УМК-5

Пироэлектрические датчики предназначены для регистрации электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн 0.4^1 –2500 мкм. Пироэлектрический датчик включает в себя блок питания, набор детекторов излучения на основе пироэлектрических преобразователей из 5 штук.

В основе датчика использован пироэлектрический преобразователь. Пироэлектрический датчик изготовлен в стандартном корпусе КТ-3, используемого для пироэлектрических фотоприёмников ИК-излучения типа МГ-33 производства АО «НПП «ВОСТОК», г. Новосибирск, и содержит первичный усилитель, расположенный на чипе сенсора. Столь широкий спектральный диапазон чувствительности датчика обеспечивается использованием

¹ Коротковолновая граница чувствительности точно ещё не определена.

соответствующего входного окна на корпусе КТ-3. В качестве материалов, для изготовления входного окна использовались сапфир и лавсан (майлар), обладающие широким спектром пропускания.

Датчик вставляется в корпус вторичного усилителя, который подсоединяется к многоканальному блоку питания и формирователя выходного сигнала. К одному блоку могут подсоединяться до 5 датчиков для спектрального и поляризационного анализа.

Вторичный усилитель и блок питания могут использоваться для работы со стандартными ИК-фотоприёмниками типа МГ-33.

Данное конструктивное исполнение датчика (5-канальный блок питания и выносные малогабаритные вторичные усилители с пироэлектрическим преобразователем) выигрывает, как по эксплуатационным параметрам: малый диаметр выносного датчика, возможность оперативной замены измерительного элемента, возможность компоновки нескольких датчиков в одном узле для получения оперативной картины измеряемых параметров, так и по техническим характеристикам: малый шум усилителя и питающего напряжения, возможность питания как от сетевого источника, так и от аккумуляторной батареи.

Использование компактных вторичных усилителей и многоканального блока питания позволяет строить относительно недорогие системы для спектрометрических измерений в научных и технологических исследованиях.

Детекторы УМК-5 с пироэлектрическими преобразователями используются в ряде научных и научно-производственных организаций

- для контроля излучения квантово-каскадных лазеров (Центр измерительных технологий и промышленной автоматизации, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва),
- для контроля излучения газовых лазеров с оптической накачкой (ООО «Специальные технологии», Новосибирск),
- для исследований излучения жидкокристаллическими (ЖК) средами в терагерцовом диапазоне (Институт лазерной физики (ИЛФ) СО РАН).

8.4.1 Центр измерительных технологий и промышленной автоматизации, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

Целью исследований в Центр измерительных технологий и промышленной автоматизации является разработка методов диагностики наличия функционирующих или пассивных электронных устройств по изменению свойств ТГц-излучения после облучения предметов содержащих эти устройства. Задачи: Нахождение информационных признаков в сигнале на частоте излучения ТГц-диапазона частот, излученным электронным устройством, отраженном от электронного устройства или переизлучённым им, однозначно связанных со свойствами этого устройства (Грант РФФИ 16-29-09593). Результаты измерений приведены на рисунках 8.4.2–8.4.4.

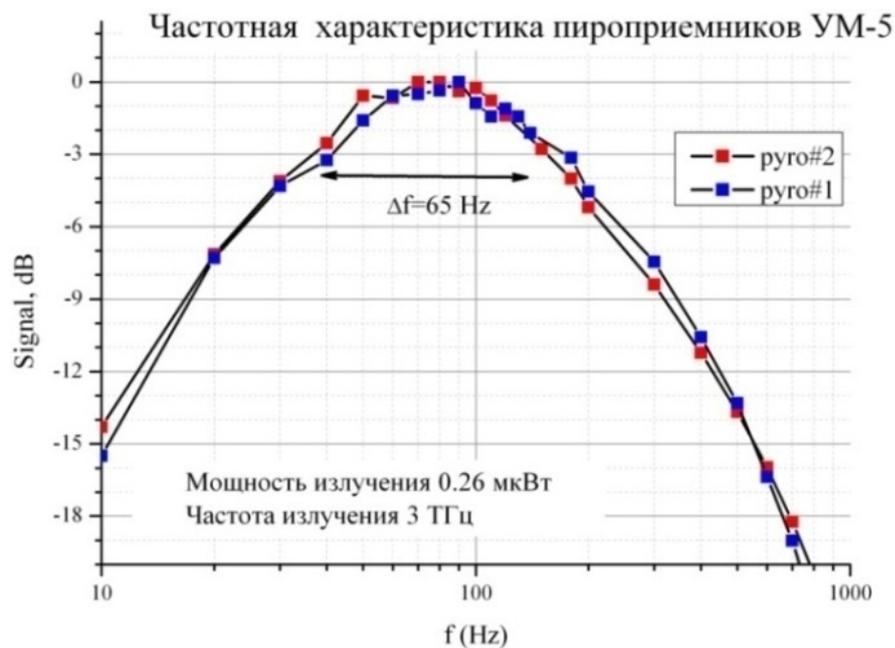


Рисунок 8.4.2 — Амплитудно-частотная характеристика пироприёмников УМК-5

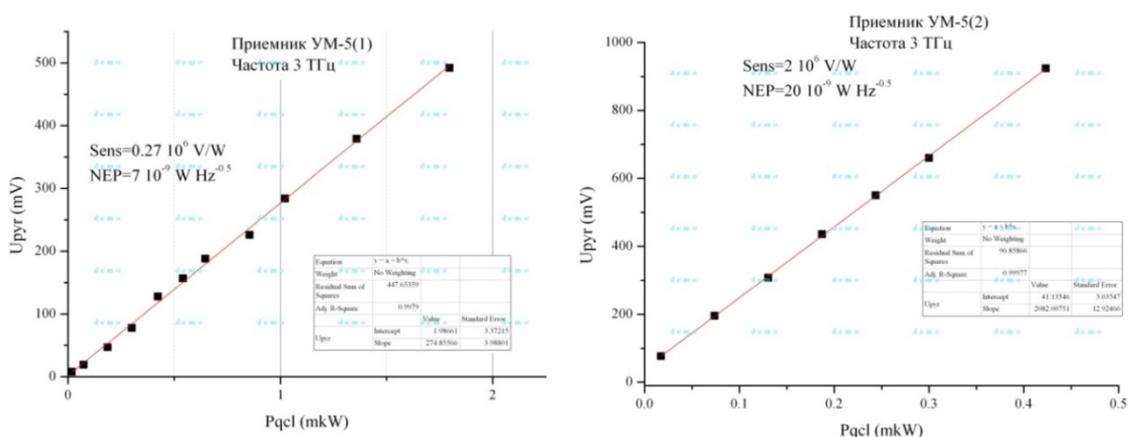


Рисунок 8.4.3 — Вольт-Ваттная характеристика пироэлектрических приемников УМК-5 №1 и №2 для ТГц-излучения с частотой 3 ТГц

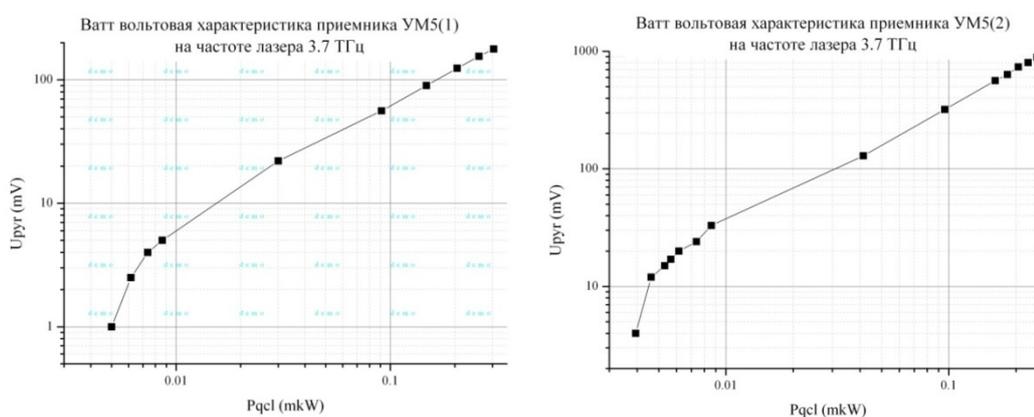


Рисунок 8.4.4 — Вольт-Ваттная характеристика пироэлектрических приемников УМК-5 №1 и №2 для ТГц-излучения с частотой 3.7 ТГц

8.4.2 ООО «Специальные технологии», Новосибирск

Целью исследований в ООО «Специальные технологии» (г. Новосибирск) является создание компактных источников перестраиваемого когерентного терагерцового излучения на основе газовых лазеров с оптической накачкой.

Для измерения характеристик ТГц-излучения использовалась экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 8.4.5.

Перестройка длины волны излучения CO₂ лазера накачки осуществлялась при помощи поворота микровинта МК. Для измерения длины волны и мощности излучения накачки использовались: WS6 4 с коллиматором 3 и PE10BF—C 2 с

Ophir Vega 1 соответственно. Давление в ТГц-резонаторе контролировалось с помощью баратрона 5. С помощью фильтра Ф обеспечивается ослабление излучения CO₂ лазера накачки. Для измерения длины волны ТГц-излучения использовался интерферометр ФП и ТГц-приемник 6 с усилителем сигнала 7, для измерения мощности - измеритель мощности 10 с контроллером 9. При измерении мощности ТГц-излучения использовался механический модулятор 8. При необходимости ТГц-излучение ослаблялось с помощью набора ТГц-фильтров Ф1..Ф4.

Во всех экспериментах по генерации ТГц-излучения в качестве активного вещества применялись пары метанола (CH₃OH) при давлении 180 мТорр. Измерение мощности и длины волны излучения CO₂ лазера проводилось при длительности импульсов 100 мкс и частоте 100 Гц. Для экспериментов по измерению длины волны ТГц-излучения использовался режим следования импульсов лазера накачки 100 Гц/200 мкс, а для измерения средней мощности ТГц-излучения - 1000 Гц/100 мкс. Результаты экспериментов представлены в таблице 8.4.1 и рисунках 8.4.6 и 8.4.7.

Таблица 8.4.1 — Результаты экспериментов по генерации ТГц-излучения

Длина волны излучения накачки, мкм	Средняя мощность излучения накачки, мВт	Длина волны ТГц-излучения, мкм	Максимальная амплитуда напряжения на ТГц-приемнике, мВ	Импульсная мощность ТГц-излучения, мВт
10,365(10R4)	625	210 (1,42 ТГц)	12	6
10,318(10R10)	1000	192,4 (1,56 ТГц)	50	8,8
10,274(10R16)	1000	79,6(3,76ТГц)	15	10,4
10,170(10R32)	770	155(1,93 ТГц)	20	14
10,158(10R34)	540	128,8(2,32 ТГц)	10	6,4

10,136(10R38)	390	162(1,85 ТГц)	165	12
9,694(9P36)	580	118,8(2,52 ТГц)	900	124
9,675(9P34)	430	73(4,11 ТГц)	15	3,2
9,341(9R8)	410	79(3,7 ТГц)	5,9	3,6
9,329(9R10)	480	94(3,19 ТГц)	224	5,2
9,293(9R16)	523	-	0,38	-
9,282(9R18)	530	-	0,15	-

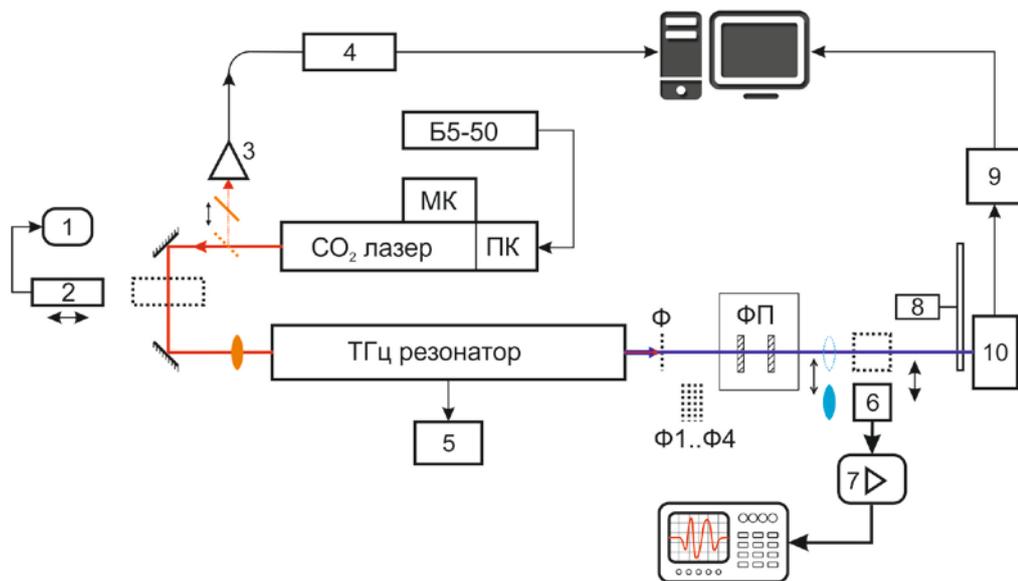


Рисунок 8.4.5 — Схема экспериментальной установки, где 1 - Ophir Vega; 2 - преобразователь PE10BF—С; 3 - коллиматор; 4 - WS6; 5 - баратрон; 6 – ТГц-пироприёмник (Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ»); 7 - усилитель сигнала; 8 - модулятор; 9 - контроллер измерителя мощности; 10 - измеритель мощности; Б5-50 - источник питания постоянного тока; МК - микровинт; ПК - пьезокерамика; Ф – ТГц-фильтр; Ф1..Ф4 - набор ТГц-фильтров; ФП – интерферометр

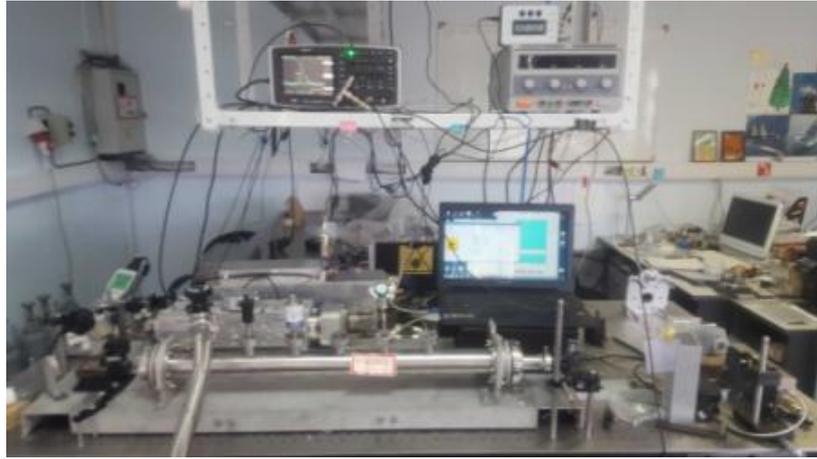


Рисунок 8.4.6 — Внешний вид установки для исследований генерации ТГц-излучения лазерами с оптической накачкой

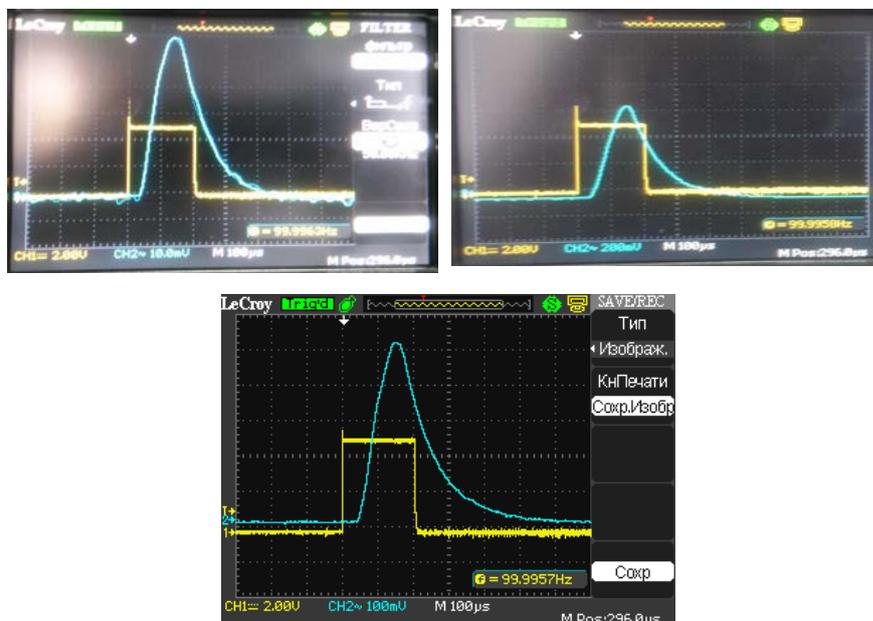


Рисунок 8.4.7 — Осциллограммы импульсов генерации ТГц-лазера. а) амплитуда – 60 мВ, б) – амплитуда – 600 мВ. Длительность импульса накачки – 100 мкс, частота следования импульсов накачки – 100 Гц, давление – 120 мТорр, мощность генерации лазера накачки – 35 Вт, линия 9Р(36) (9,694 мкм), пироприёмник УМК-5 (Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ»)

Вывод: получена генерация в диапазоне частот от 1,42 до 4,11 ТГц (210 - 73 мкм), с импульсной мощностью от 3 до 124 мВт.

8.4.3 Институт лазерной физики СО РАН

В Институт лазерной физики (ИЛФ) СО РАН пироэлектрические датчики УМК-5 используются для исследований фундаментальных аспектов генерации разностных частот (ГРЧ) излучения в терагерцовом диапазоне жидкокристаллическими (ЖК) средами с целью создания мощных малогабаритных перестраиваемых источников ТГц-излучения. Совместно с Филиалом ИФП СО РАН «КТИПМ» разработана система излучения, приема и фильтрации ТГц-излучения, представленная на рисунке 8.4.8. Установка состоит из излучателя на основе нелинейного частотного ЖК преобразователя излучения, системы сбора и фокусировки генерируемого излучения, набора фильтров для выделения ТГц-излучения, прерывателя и пироэлектрического ТГц-приемника (см. рисунок 8.4.8, *а*).

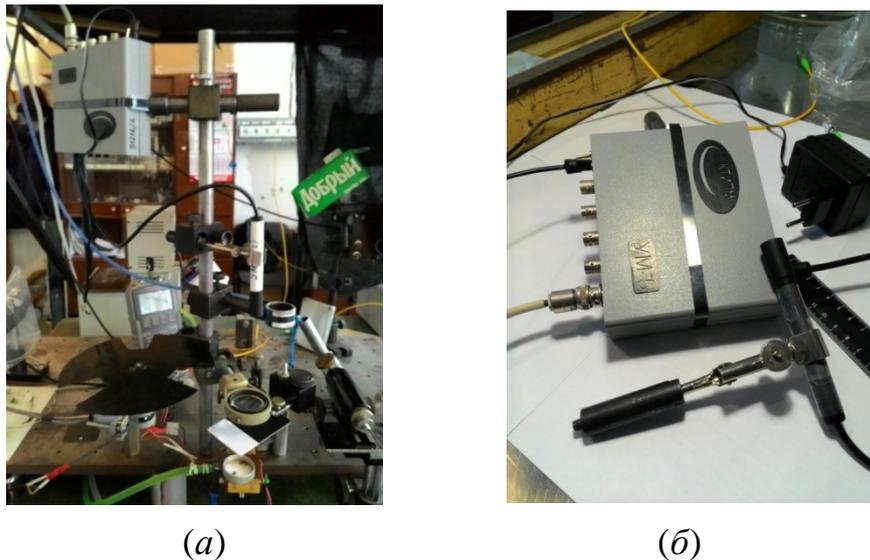


Рисунок 8.4.8 — Внешний вид

(а) – установки нелинейной генерации ТГц на ЖК с системой сбора, фильтрации и измерения генерируемого излучения;

(б) – 5-ти канального пироэлектрического приемника ТГц-излучения, разработки Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ»

Излучатель-преобразователь представляет собой каплеобразный образец ЖК, нанесенный на торец оптоволоконного разъема. ЖК ячейка помещена в

термостабилизирующую обойму с системой сбора водного конденсата, необходимой при работе с пониженными ($< 10^{\circ}\text{C}$) температурами. По волокну подается излучение от двухволнового ИК-лазерного источника ($\lambda_1 = 973,9$ нм, $\lambda_2 = 979,3$ нм, разность частот эквивалентна области ТГц) для получения квазинепрерывного излучения ($\lambda = 176,6$ мкм) или от фемтосекундного волоконного лазера для генерации широкополосного ТГц-излучения с длиной волны $\lambda \sim 100\text{--}300$ мкм.

Система фильтрации отсекала излучение накачки и гармоник не хуже 1:1000 при уменьшении интенсивности ТГц не более 10–15%. Приемник ТГц-излучения (см. рис. 8.4.8, б) разработан в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» на основе пироэлектрического приемника и позволяет фиксировать излучение не ниже 10 мкВт. Фокусировка ТГц-излучения осуществлялась ТРХ™ линзами. Данная система применительно к конструкции ЖК-преобразователя с волоконной накачкой обладает недостатком, приводящим к неполному учету выходящего излучения. Генерация ТГц происходит в ограниченном объеме ЖК с размерами сравнимыми с длиной волны $\sim 100\text{--}200$ мкм, что дает большую дифракционную расходимость излучения ($> 60^{\circ}$). В дальнейшем для измерения абсолютных мощностных характеристик и спектрального состава предполагается усовершенствование системы сбора с использованием зеркальных отражателей в виде резонаторной системы.

8.5 Тестирование пьезооптических датчиков деформации новой конструкции

8.5.1 Испытания на испытательной машине INSTRON 8802 в Институте горного дела СО РАН

Целью данных испытаний являлось определение категории точности и величины максимальной деформации устройства преобразования сигналов (УПС-10), основанного на разработанном пьезооптическом преобразователе. Испытания проводились в рамках Договора № 637-11 от 25.01.2011 г. Результаты испытаний

опубликованы в [237]. Данные испытания проводились при непосредственном участии и руководстве автора. Анализ полученных результатов так же был проведен автором.

Описание устройства преобразования сигналов УПС-10

Устройство преобразования сигналов УПС-10 состоит из первичного преобразователя (ППр), содержащего пьезооптический преобразователь в нагрузочном элементе в виде пластины, и вторичного преобразователя (ПВт). Первичный преобразователь УПС-10 представляет собой металлическую пластину переменного сечения, в центре которой закреплен фотоупругий элемент в виде усечённого конуса (рисунок 8.5.1).

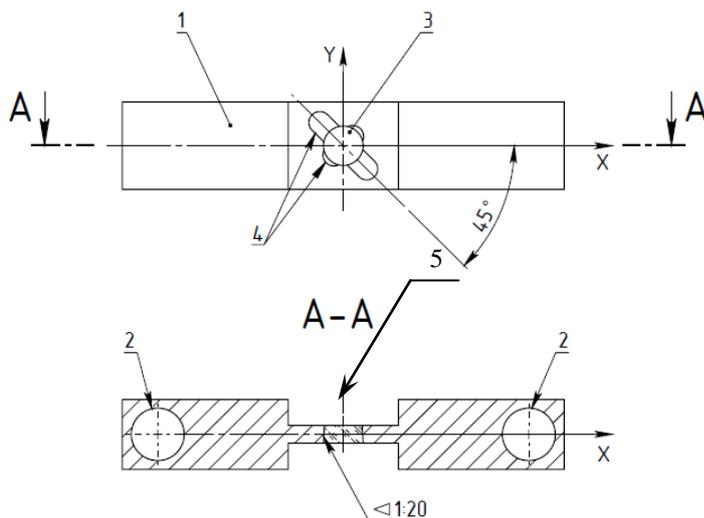


Рисунок 8.5.1 — Схема первичного преобразователя (слева) и внешний вид датчика деформации УПС-10 (справа)

- 1 – пластина,
- 2 – монтажные отверстия,
- 3 – фотоупругий элемент,
- 4 – разрезы,
- 5 – оптическая ось пьезооптического преобразователя

Конструкция пластины обеспечивает концентрацию напряжений, возникающих при деформации пластины, на фотоупругом элементе [211]. Пьезооптический преобразователь, закрепленный на пластине, преобразует

величину напряжений на фотоупругом элементе в электрический сигнал, который обрабатывается преобразователем вторичным (ПВт), формирующим информационные сигналы для станции управления лифтом.

Первичный преобразователь крепится на тест-объекте с помощью монтажных отверстий (рисунок 8.5.1). Для увеличения надежности контакта первичного преобразователя с контролируемым объектом на контактной поверхности пластины выполнены «ножи» (преобразователь ПП007) или «зубья» (преобразователь ПП006) (рисунок 8.5.2).

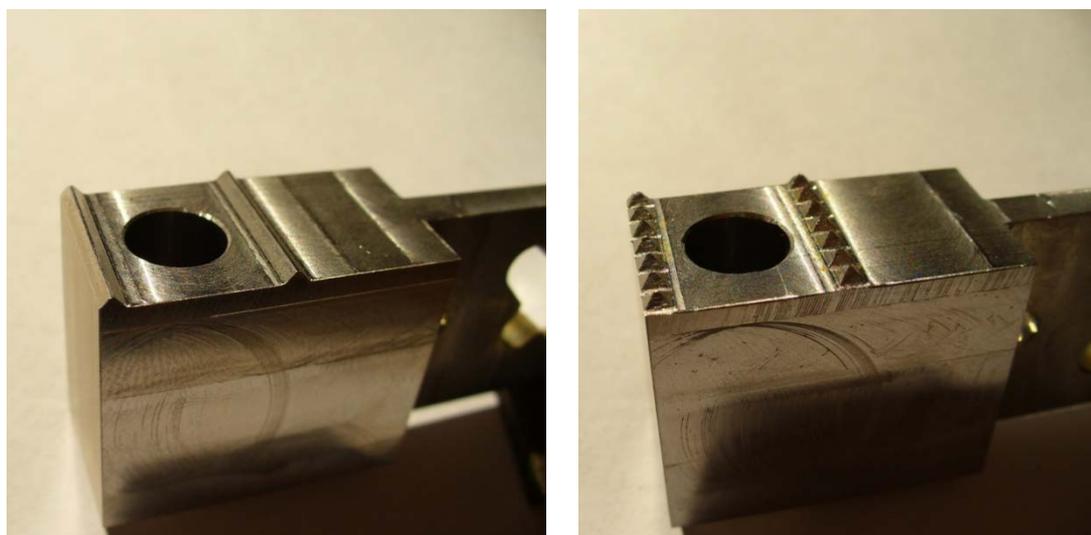


Рисунок 8.5.2 — Пластины первичного преобразователя УПС-10 с «ножами» (слева) и с «зубьями» (справа)

Описание установки для испытаний

Испытания первичного преобразователя проводились на испытательной машине INSTRON 8802 (рисунок 8.5.3) [238]. Предельная нагрузка прессы 250 кН, точность выдержки нагрузки 0.5%. Пресс оснащен климатической камерой для проведения испытаний при повышенных температурах вплоть до +55 °С с точностью ± 0.2 °С. Подача нагрузки на прессе осуществлялась с заданной скоростью в пределах 0,5-2,0 кН/с с помощью компьютерной программы.

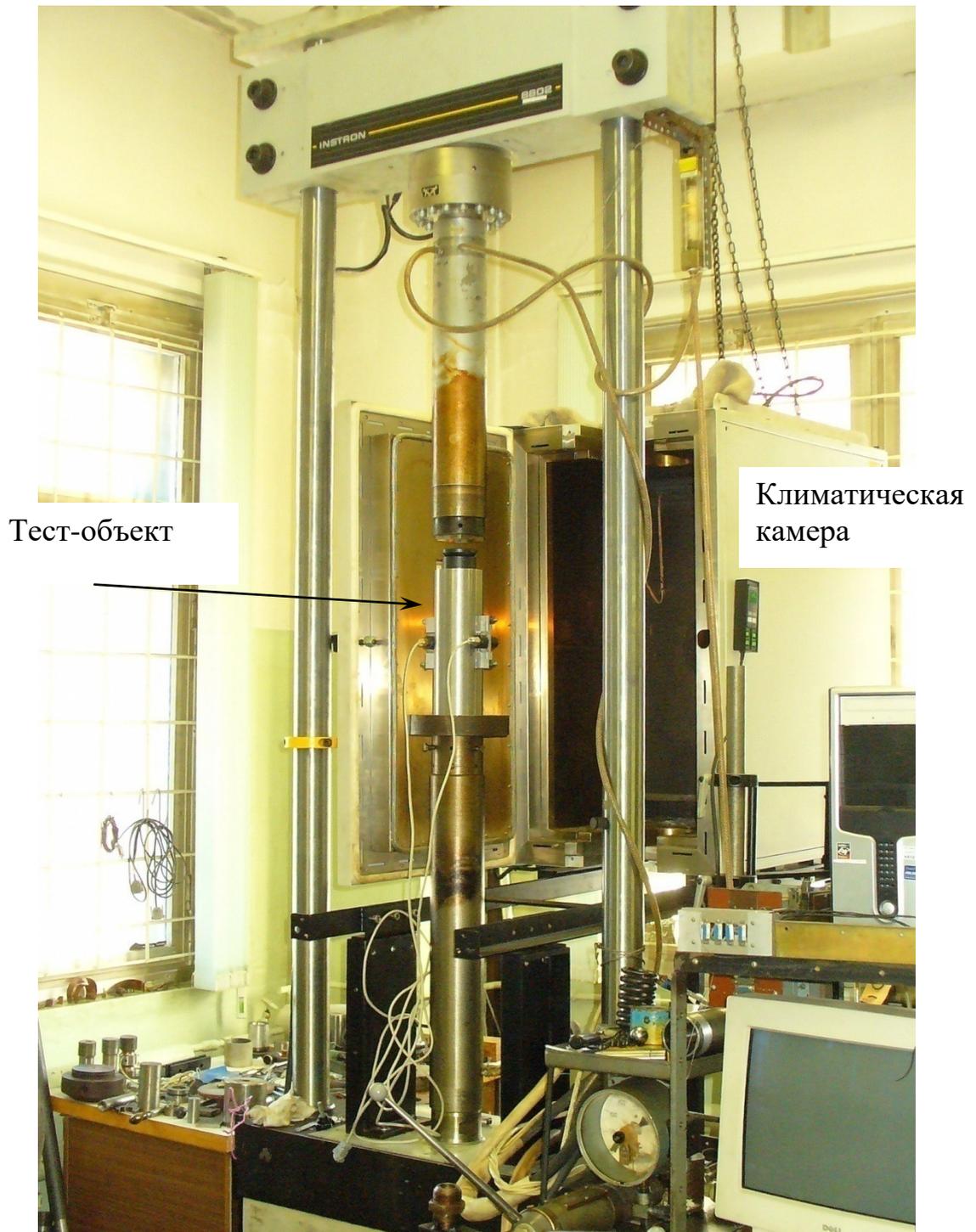


Рисунок 8.5.3 — Испытательная машина INSTRON 8802 с климатической камерой

Для проведения испытаний первичного преобразователя УПС-10 был изготовлен тест-объект (цилиндр) из не закаленной стали марки 50Г диаметром 95 мм и длиной 280 мм (рисунок 8.5.4). На боковых поверхностях тест-объекта выполнены резьбовые глухие отверстия М8 для монтажа двух первичных

преобразователей. Тест-объект устанавливался на пресс как показано на рисунке 8.5.3.

Тест-объект

Первичный преобразователь УПС-10 ПП007

Первичный преобразователь УПС-10 ПП006

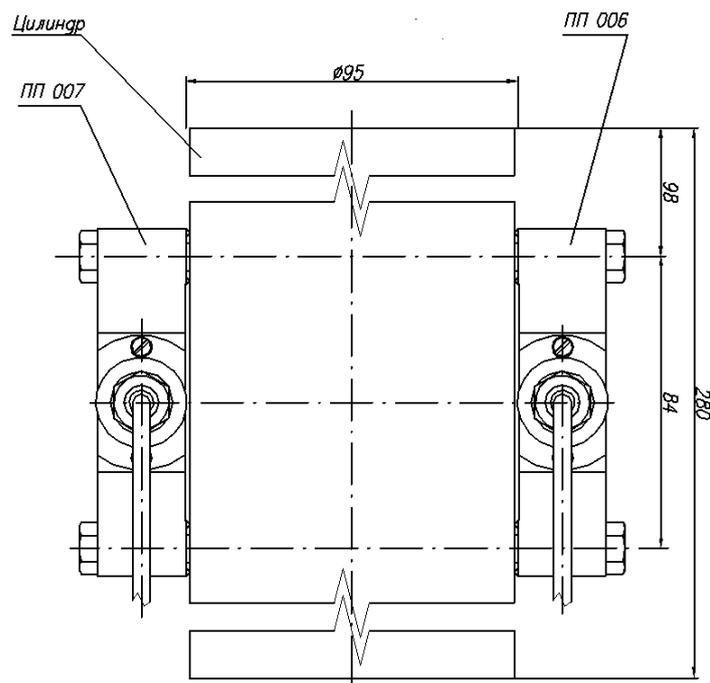
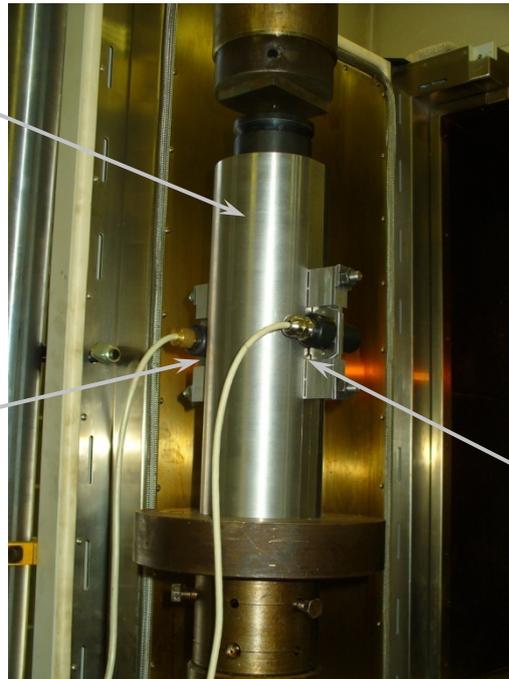


Рисунок 8.5.4 — Тест-объект с закрепленными первичными преобразователями УПС-10. Вверху – общий вид, внизу – схема



Рисунок 8.5.5 – Климатическая камера для измерения метрологических характеристик при разных температурах



Рисунок 8.5.6 — Восемьканальный вторичный преобразователь с ноутбуком для измерения временных характеристик сигнала с первичных преобразователей

Для проведения испытаний при повышенных температурах тест-объект помещался в климатическую камеру (рисунок 8.5.5).

Измерение сигнала с первичного преобразователя осуществлялось с помощью 8-канального вторичного преобразователя (рисунок 8.5.6), позволяющего измерять временную зависимость сигнала с датчиков с частотой $10 \div 100$ Гц и записывать данные в файл для дальнейшей обработки.

Методика испытаний

Метрологические характеристики первичных преобразователей УПС-10 определялись по методикам согласно ГОСТ 28836-90 (пп. 2.2, 6.6-6.9) [239].

Тест-объект с двумя закреплёнными первичными преобразователями (один с «ножами», второй с «зубьями») предварительно нагружался усилием 10 кН. При дальнейших нагрузках за начальный сигнал принимался условный сигнал, соответствующий выходному сигналу предварительно нагруженного преобразователя.

После выдержки тест-объекта при предварительной нагрузке 10 кН в течение 30 секунд проводилась «тренировка» тест-объекта трехкратным нагружением до 240 кН со скоростью увеличения и последующего уменьшения нагрузки 2 кН/с. «Тренировка» проводилась с целью выработки пластической деформации в тест-объекте, связанной с шероховатостью его торцов. После «тренировки» тест-объект оставался под нагрузкой 10 кН.

Начиная с предварительной нагрузки 10 кН, тест-объект двукратно нагружался до максимальной нагрузки 240 кН со скоростью 0,5 кН/с, затем двукратно со скоростью 1 кН/с и двукратно со скоростью 2 кН/с. При этом тест-объект выдерживался при максимальной нагрузке в течение 10 секунд, затем разгружался с той же скоростью до величины предварительной нагрузки 10 кН. Показания вторичных преобразователей записывались в файл. Указанный цикл нагрузок повторялся дважды.

Для определения метрологических характеристик при изменении температуры на 10°C тест-объект помещался в климатическую камеру (рисунок 8.5.5). После выдержки тест-объекта при повышенной температуре указанный цикл нагрузок повторялся дважды.

Результаты испытаний приведены на рисунках 8.5.7–8.5.10 и в таблице 8.5.1.

На рисунке 8.5.7 приведены временные зависимости сигналов с первичных преобразователей ПП006 (с зубьями) и ПП007 (с ножами) для одного цикла испытаний. Один цикл испытаний состоял из четырех последовательных циклов нагружения и разгрузки со скоростью 2.0 кН/с, двух циклов нагружения и разгрузки со скоростью 0.5 кН/с, двух циклов нагружения и разгрузки со скоростью 1.0 кН/с, и двух циклов нагружения и разгрузки со скоростью 2.0 кН/с.

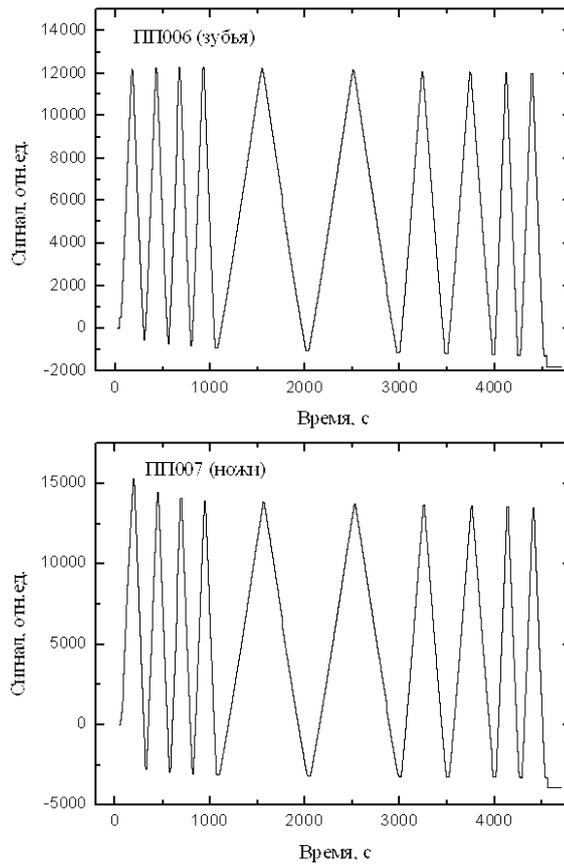


Рисунок 8.5.7 — Временные зависимости показаний первичных преобразователей ПП006 (зубья) и ПП007 (ножи) для одного цикла испытаний

Первые четыре цикла являются тренировкой нагрузочного элемента и первичных преобразователей с целью выработки пластической деформации, связанной с пластической деформацией самого тест-объекта и мест крепления первичных преобразователей. Из рисунка видно, что за первые четыре тренировочных циклов происходит смещение нуля показаний датчиков, как раз связанное с пластической деформацией. При последующих циклах нагружения-

разгрузки смещение незначительно. Далее весь цикл испытаний повторялся. Для вычисления метрологических параметров первичных преобразователей использовались два последних цикла нагружения-разгрузки со скоростью 2.0 кН/с. Таким образом, всего для расчета параметров первичных преобразователей при НКУ использовались четыре цикла нагружения-разгрузки.

На рисунке 8.5.8 показаны временные зависимости величины выходного сигнала УПИ-10 при линейной по времени нагрузке на тест-объект, полученной с помощью компьютерной программы пресса. Максимальные величины нагрузки составляли 1, 2.5, 5, 10, 20 тонн. Эти данные использовались для получения зависимости сигналов с первичных преобразователей от величины приложенной нагрузки. Примеры таких зависимостей показаны на рисунке 8.5.9.

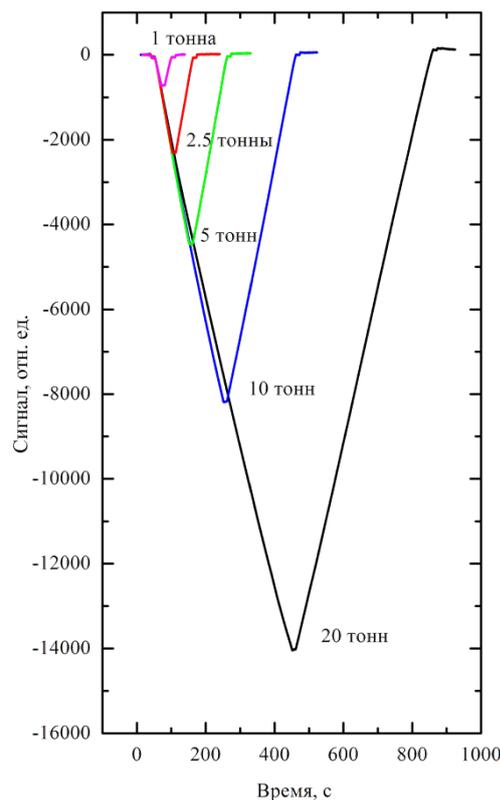


Рисунок 8.5.8 — Зависимости выходного сигнала датчика деформации УПС-10 при линейной по времени нагрузке до разных величин

Расчет метрологических параметров преобразователей проводился в диапазоне нагрузок от 10 кН до 90 кН, при этом сигнал с преобразователей,

соответствующий 10 кН принимался за нулевой сигнал. Данный диапазон был выбран исходя из максимально допустимой нелинейности 0.5%, что соответствует точности измерений нагрузки на прессе. Величины полученных параметров приведены в таблице 8.5.1.

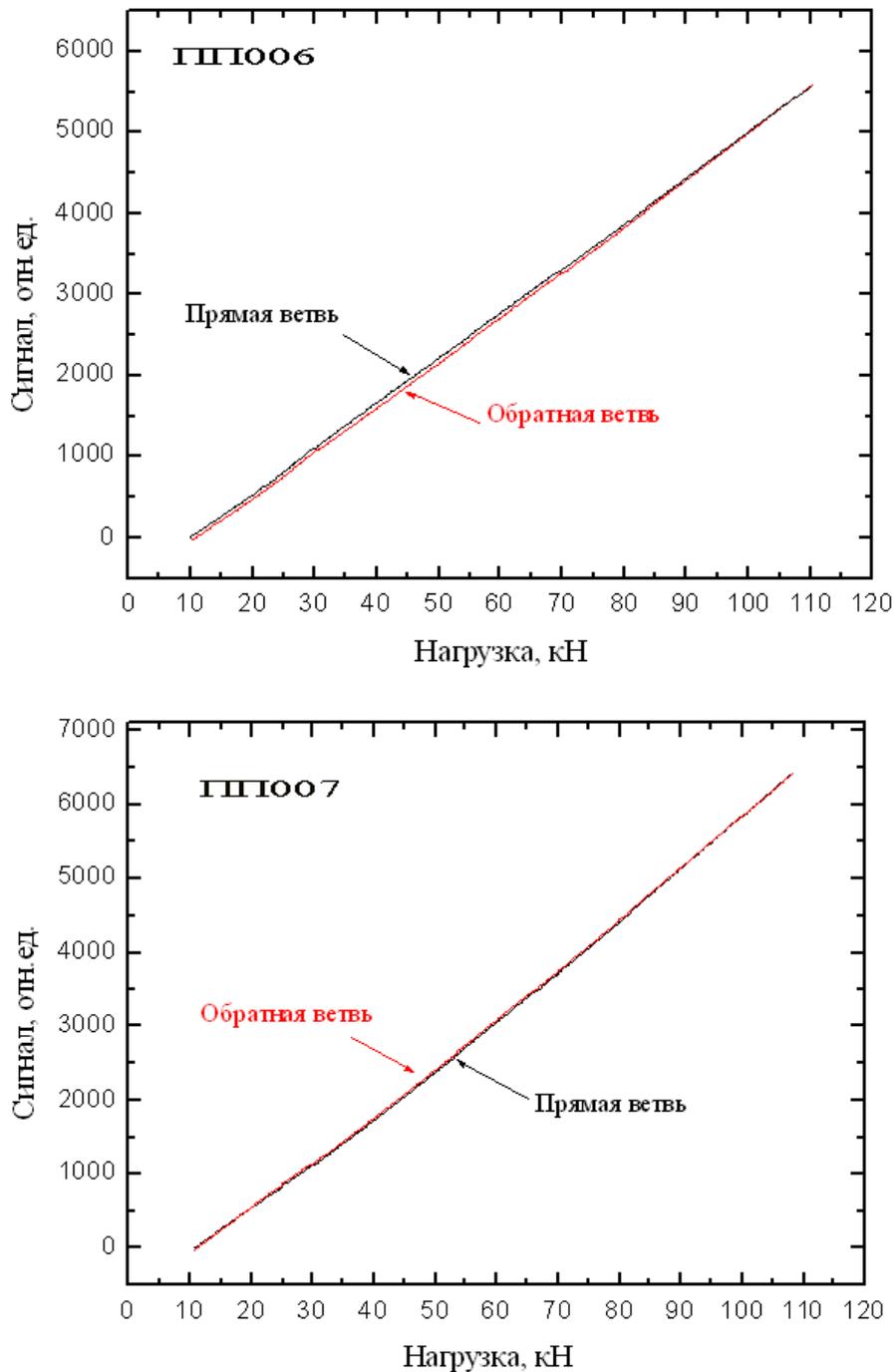


Рисунок 8.5.9 — Зависимости сигнала первичных преобразователей от величины нагрузки на нагрузочном элементе при температуре НКУ

Таблица 8.5.1 — Параметры УПС-10 с различными первичными преобразователями

Первичный преобразователь ПП006

Нагрузка кН	Экспериментальные значения		Расчетные значения	Систематическая составляющая погрешности %	Нелинейность %	Гистерезис %	Среднее квадр. откл. %
	Прямая последовательность	Обратная последовательность					
10	0	2	0	0,02	0,02	0,02	0,07
20	525	525	547	-0,5	-0,5	0,0	0,07
30	1097	1093	1106	-0,2	-0,20	0,09	0,07
40	1665	1656	1660	0,01	0,1	0,2	0,07
50	2219	2201	2219	-0,2	0,0	0,4	0,07
60	2765	2760	2774	-0,2	-0,2	0,1	0,07
70	3315	3319	3328	-0,2	-0,3	-0,09	0,07
80	3878	3887	3887	-0,1	-0,2	-0,2	0,07
90	4432	4455	4441	0,05	-0,2	-0,5	0,07

Первичный преобразователь ПП007

Нагрузка кН	Экспериментальные значения		Расчетные значения	Систематическая составляющая погрешности %	Нелинейность %	Гистерезис %
	нагрузка	разгрузка				
10	0	0	-414	4,79	5,01	0,45
20	430	472	270	1,67	1,61	0,13
30	996	1067	956	0,33	0,07	0,52
40	1605	1670	1642	0,67	0,89	0,45

50	2248	2320	2327	1,11	1,38	0,53
60	2912	2983	3013	1,33	1,59	0,52
70	3584	3653	3698	1,44	1,68	0,49
80	4277	4347	4384	1,24	1,50	0,52
90	4984	5038	5070	0,97	1,11	0,29

Для проведения испытаний при изменении температуры на 10°C тест-объект с двумя закрепленными первичными преобразователями помещался в климатическую камеру, которая является составной частью оборудования пресса. Увеличение и поддержание заданной температуры осуществлялось нагнетанием теплого воздуха с контролем температуры. Точность стабилизации температуры составила ± 0.2 . На рисунке 8.5.10 показаны зависимости величины сигналов с первичных преобразователей от величины нагрузки при температуре НКУ и НКУ+10 °С. Изменение рабочего коэффициента преобразования (РКП) при изменении температуры на 10 °С составило 12%.

Выводы

1. Согласно полученным результатам испытаний, первичный преобразователь ПП006 может быть отнесён к категории точности 0,50 в соответствии с ГОСТ 28836-90.
2. Первичный преобразователь ПП007 не может быть отнесен ни к одной категории точности в соответствии с ГОСТ 28836-90.
3. Изменение рабочего коэффициента преобразования (РКП) при изменении температуры на 10 °С составило 12%, что превышает допустимые значения метрологических характеристик по ГОСТ 28836-90. Температурная зависимость РКП может быть учтена введением в конструкцию первичного преобразователя датчика температуры.

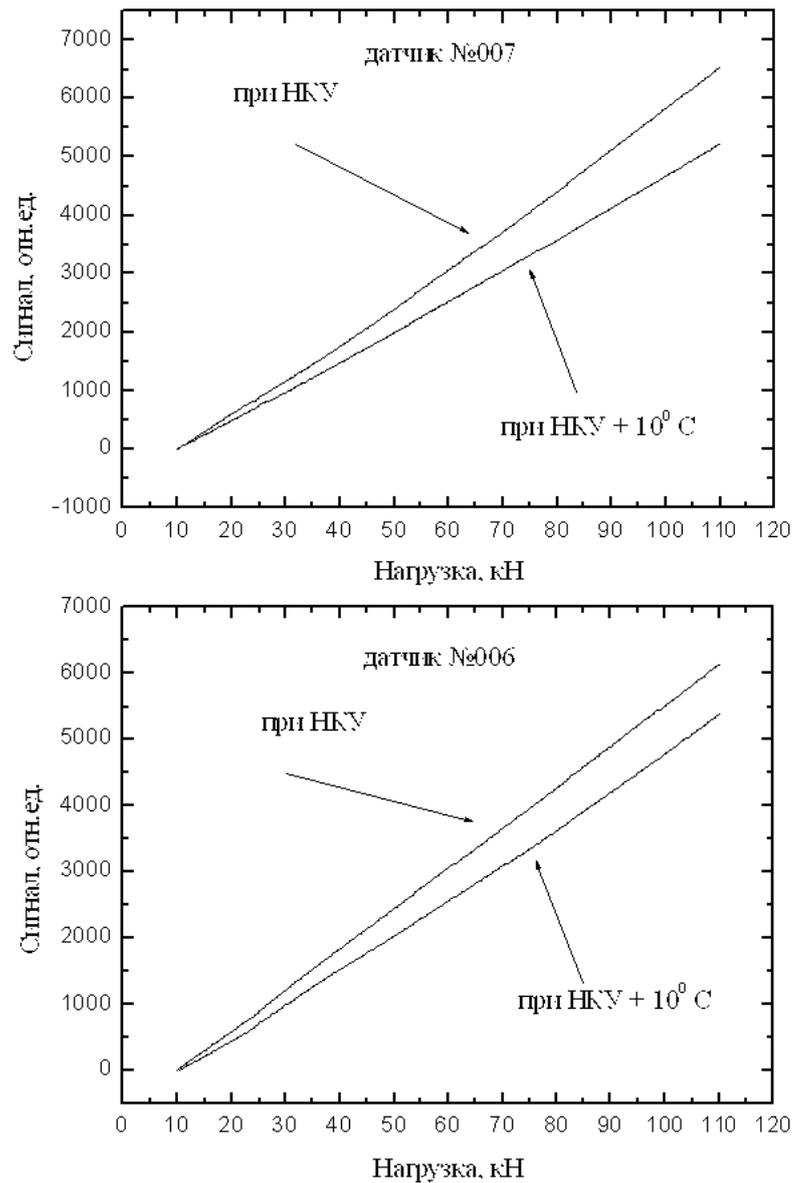


Рисунок 8.5.10 – Зависимости сигнала первичных преобразователей от величины нагрузки на нагрузочном элементе при температуре НКУ и НКУ+10°С

4. Величина относительной деформации, в пределах которой обеспечивается точность 0.5%, составила 5×10^{-5} или 3.4 мкм при базе преобразователя 70 мм по внутренним зубьям.
5. Достигнутое значение максимальной относительной деформации составляет 260% (10 мкм) от величины относительной деформации, в пределах которой обеспечивается точность 0.5%. После многократного приложения максимально достигнутой нагрузки первичные преобразователи сохранили

метрологические характеристики в пределах 0.5%. Предельная деформация преобразователя не была достигнута на данном оборудовании.

6. Анализ результатов испытаний показал, что основным вкладом в погрешность является нелинейность зависимости показаний первичного преобразователя от нагрузки в пределах 0.5%, что соответствует точности выдержки нагрузки прессом (0.5%) в соответствии с сертификатом на пресс.
7. Для получения более объективных данных о категории точности необходимо использовать оборудование с более высоким классом точности.

8.5.2 Испытания в «Ростест-Москва»

Испытания в ФБУ «Ростест-Москва» (г. Москва) [240] проводились в феврале 2016 года. Данные испытания проводились по методике, разработанной автором. Математическая обработка полученной первичной информации была проведена младшим научным сотрудником Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» Загубисало Петром Станиславовичем. Анализ полученных результатов так же был проведен автором.

Описание устройства преобразования сигналов УПС-15

Общий вид и взаимосвязь составных частей устройства преобразования сигналов УПС-15 приведены на рисунке 8.5.11, *а*. УПС-15 включает в себя пьезооптический преобразователь в цилиндрическом корпусе (1), установленный в нагрузочный элемент в виде цанги (рис.8.5.11, *б*), преобразователь вторичный (2), (рис.8.5.11, *в*, *г*), формирующий выходной сигнал и информационные сигналы заданного формата, кабель питания (3), разъем USB (4), кабель выходного сигнала заданного формата (5), кабель релейных выводов (6), в случае использования в лифтах (см. раздел 5.7 ниже). Вторичный преобразователь со стороны соединителей (рис.8.5.11, *в*) имеет разъемы для подключения пьезооптического преобразователя, кабеля релейных выходов, кабеля для подключения к лифтовой станции. Со стороны индикаторной панели (рис.8.5.11, *г*) вторичный преобразователь имеет индикаторы степени загрузки лифта (мин %, 50 %, 90 %, 100 %).

110 % от грузоподъемности лифта), индикатор связи с компьютером, индикатор питания, соединитель питания, USB-интерфейс для подключения компьютера.

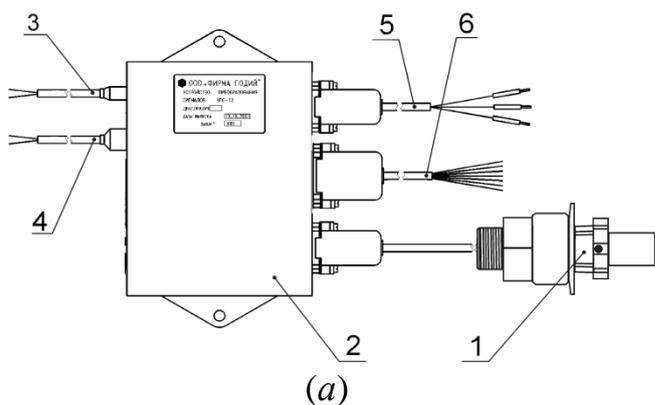


Рисунок 8.5.11 — Схема и внешний вид УПС-15;

- (а) – схема и взаимосвязь составных частей устройства преобразования сигналов УПС-15,
 (б) – внешний вид преобразователя в цилиндрическом корпусе, установленного на нагрузочный элемент в виде цанги,
 (в) – внешний вид вторичного преобразователя со стороны соединителей,
 (г) – внешний вид вторичного преобразователя со стороны индикаторной панели

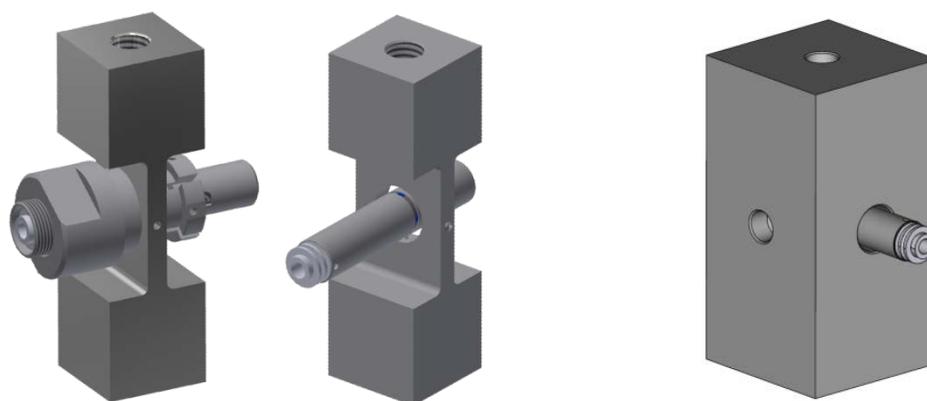
Эксплуатационные характеристики пьезооптического преобразователя без нагрузочного элемента приведены в таблице 8.5.2.

Для проведения испытаний пьезооптического преобразователя УПС-15 были изготовлены нагрузочные элементы разных конфигураций с габаритными размерами 30×30×100 мм (нагрузочный элемент №1) и 50×50×100 мм (нагрузочный элемент №2) (см. рисунок 8.5.12), в которые был вставлен

пьезооптический преобразователь УПС-15, а на вертикальную поверхность нагрузочного элемента **№2** был наклеен стандартный тензорезисторный датчик типа ZEMIC BF120-3AA(11)N6-X [241], согласно инструкции по его применению (рисунок 8.5.13 слева).

Таблица 8.5.2 — Основные характеристики пьезооптического преобразователя

Параметр	Величина	Единица измерений
База датчика деформации	14	мм
Диапазон относительных деформаций	$10^{-8} \div 10^{-4}$	отн. ед.
Максимальная относительная деформация	10^{-3}	отн. ед.
Погрешность преобразования, не более	0.1	%
Температура хранения	“-55” ÷ “+75”	°С
Рабочий диапазон температур	“-20” ÷ “+75”	°С
Выходной сигнал	Аналоговая петля: 4–20	мА
Напряжение питания	7.5 ÷ 36	В
Потребляемая мощность, макс.	0,6	Вт
Габаритные размеры преобразователя	Ø14×70	мм
Вес, максимальный	50	г
Срок службы, не менее	25	лет



№1 с цангой

№1 без цанги

№2

Рисунок 8.5.12 — Нагрузочные элементы для сравнительных испытаний пьезооптического датчика и тензорезистивного датчика деформаций

Нагрузочный элемент с пьезооптическим и тензорезистивным датчиками устанавливался в испытательную машину типа Образцовая силоизмерительная машина ОСМ-2 (рис.8.5.11 справа) [242, 243], для приложения калиброванной силы (рисунок 8.5.13 справа).



Рисунок 8.5.13 — Грузочный элемент с установленным пьезооптическим преобразователем и с наклеенным тензорезистивным преобразователем (слева), и внешний вид испытательной машины с установленным нагрузочным элементом (справа)

Методика испытаний

1. Пьезооптический преобразователь и тензорезистивный преобразователь монтируются в нагрузочном элементе двух типов (№1 и №2).
2. Грузочный элемент с преобразователями устанавливается в испытательную машину, согласно руководству по эксплуатации к машине.
3. Преобразователи подключаются к источникам питания и системе сбора данных (мультиметр Agilent 34461A с программным обеспечением).
4. Для пьезооптического преобразователя с помощью регулировочного винта устанавливается выходной ток на уровне 12.5 ± 0.5 мА.
5. Затем прикладывается предварительная нагрузка (для каждой серии экспериментов разная).

6. Затем прикладывалась тестовая нагрузка (по 10 раз для каждой величины нагрузки).
7. Для нагрузочного элемента №1 десятикратно прикладывались нагрузки 10, 20, и 30 кг (предварительная нагрузка 10 кг).
8. Для нагрузочного элемента №2 десятикратно прикладывались нагрузки 100, и 500 кг (предварительная нагрузка 100 кг).

Для определения величины выходного сигнала, соответствующего величине нагрузки, бралась разница выходного сигнала преобразователей в точках непосредственно перед приложением нагрузки и через 30 секунд после приложения нагрузки с усреднением в окрестности ± 10 секунд (т. е. по переднему фронту). Точки для анализа показаны на временной диаграмме (рис.8.5.14) красным цветом.

Рассчитывались следующие параметры:

- 1) среднеквадратичное отклонение коэффициента преобразования от среднего значения (σ),
- 2) максимальное отклонение по модулю от среднего значения (**максимальное отклонение**),
- 3) максимальный разброс значений (**повторяемость**).

Все величины выражались в процентах от среднего значения. Для расчета для пьезооптического преобразователя брались ступеньки с 5 по 10-й включительно, чтобы уменьшить влияние релаксации в нагрузочном элементе. Для тензорезистивного преобразователя брались первые 5 ступенек.

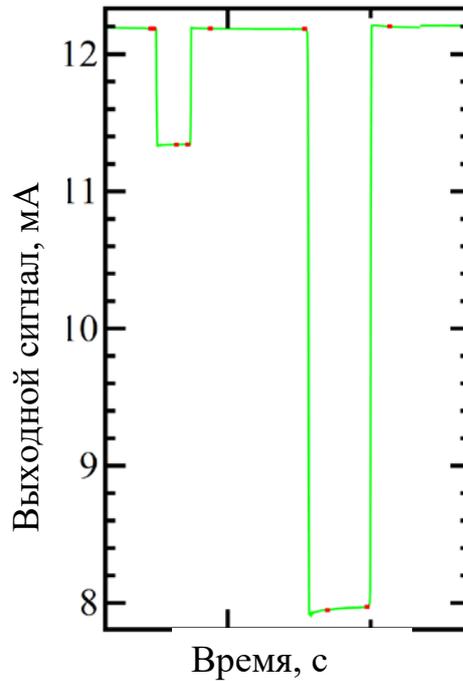


Рисунок 8.5.14 — Пример временной диаграммы выходного сигнала пьезооптического преобразователя при приложении нагрузки. Точки для анализа показаны красным цветом.

Методика обработки данных:

- Значения были получены путем автоматической обработки зависимостей сигнала от времени.
- Пример фрагмента такой зависимости показан на рисунке 8.5.14.
- На графиках автоматически находились точки перед изменением нагрузки, а так же через 30 секунд после изменения нагрузки. На рисунке 8.5.14 эти точки показаны красным.
- В этих точках бралось значение линейной функции, которая является линейной аппроксимацией сигнала между изменениями нагрузки (без учета близких окрестностей к месту изменения сигнала). На рисунке 8.5.14 местоположение красных точек на оси Y соответствует этим значениям.
- Далее находилась разность значений в соседних точках, она соответствует изменению сигнала при изменении нагрузки. Разность может быть как

положительной (для заднего фронта), так и отрицательной (для переднего фронта).

- Далее была произведена нормировка значений. Были взяты абсолютные значения изменений сигнала, которые соответствуют изменению нагрузки. От полученного массива было найдено среднее значение.
- Обозначения **РО** соответствует пьезооптическому преобразователя, **TR** – тензорезистивному преобразователю.

Результаты испытаний

На рисунке 8.5.15 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент №2 50x50x100, при многократной поочередной нагрузке весами, соответствующими 200 и 500 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

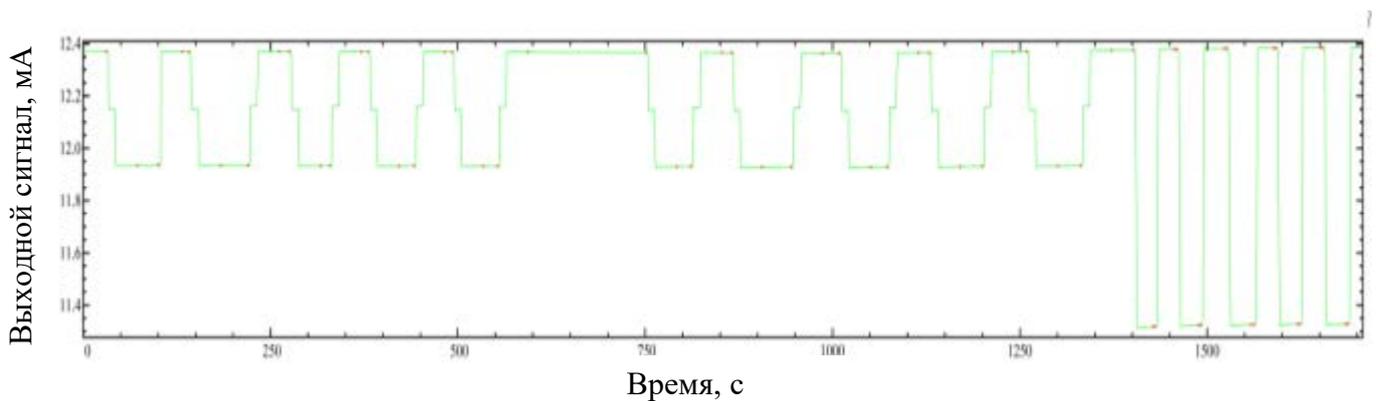


Рисунок 8.5.15 — Временная диаграмма выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент №2, при многократной нагрузке 200 и 500 кг

На рисунке 8.5.16 показаны зависимости величины изменения выходного сигнала датчика от номера нагрузки при нагрузке 200 кг (слева) и 500 кг (справа). Величины рассчитывались относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 500 кг. Красным цветом указаны относительные величины для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, оранжевым цветом – для заднего фронта.

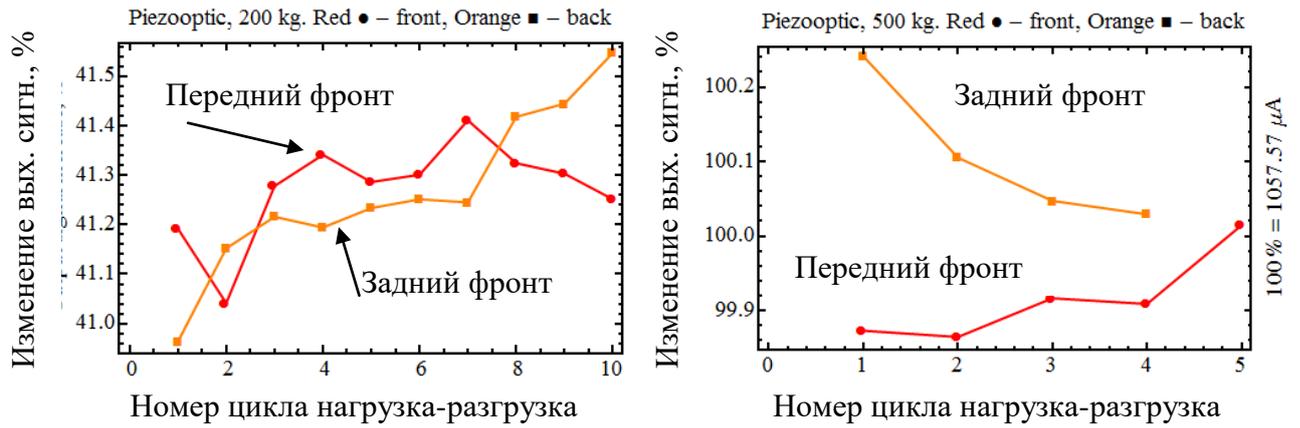


Рисунок 8.5.16 — Изменение выходного сигнала пьезооптического преобразователя при нагрузке 200 кг (слева) и 500 кг (справа) относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 500 кг

В таблице 8.5.3 приведены численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 500 кг. Положительные величины соответствуют заднему фронту изменения сигнала, отрицательные – переднему фронту. Так же приведены усредненные по обоим фронтам значения. Номера циклов нагрузка-разгрузка (взятые для анализа) определены параметром N .

На рисунке 8.5.17 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент №1 без цанги, при многократной поочередной нагрузке весами, соответствующими 10, 20 и 30 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

Таблица 8.5.3 — Численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 500 кг

	mean, %	sigma, %	repeatability, %	max deviation, %
100 % = 1057.57 μ A				
PO, 200kg, > 0, N = 1..Last	41.267	0.166	0.584	0.303
PO, 200kg, < 0, N = 1..Last	-41.273	0.099	0.37	0.232
PO, 200kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..Last	41.27	0.133	0.584	0.306
PO, 500kg, > 0, N = 1..Last	100.106	0.096	0.212	0.135
PO, 500kg, < 0, N = 1..Last	-99.915	0.06	0.15	0.099
PO, 500kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..Last	100.	0.124	0.377	0.241
PO, 200kg, > 0, N = 3..Last	41.319	0.132	0.353	0.229
PO, 200kg, < 0, N = 3..Last	-41.312	0.049	0.16	0.099
PO, 200kg, $\in \mathbb{R}$, N = 3..Last	41.315	0.096	0.353	0.232
PO, 500kg, > 0, N = 2..Last	100.061	0.04	0.076	0.045
PO, 500kg, < 0, N = 3..Last	-99.947	0.059	0.106	0.068
PO, 500kg, $\in \mathbb{R}$, N = 3..Last	99.983	0.066	0.138	0.074
PO, 200kg, > 0, N = 1..5	41.152	0.11	0.27	0.188
PO, 200kg, < 0, N = 1..5	-41.228	0.117	0.3	0.186
PO, 200kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..5	41.19	0.114	0.378	0.226
PO, 200kg, > 0, N = Last 5	41.381	0.131	0.302	0.166
PO, 200kg, < 0, N = Last 5	-41.318	0.058	0.16	0.093
PO, 200kg, $\in \mathbb{R}$, N = Last 5	41.35	0.101	0.302	0.198

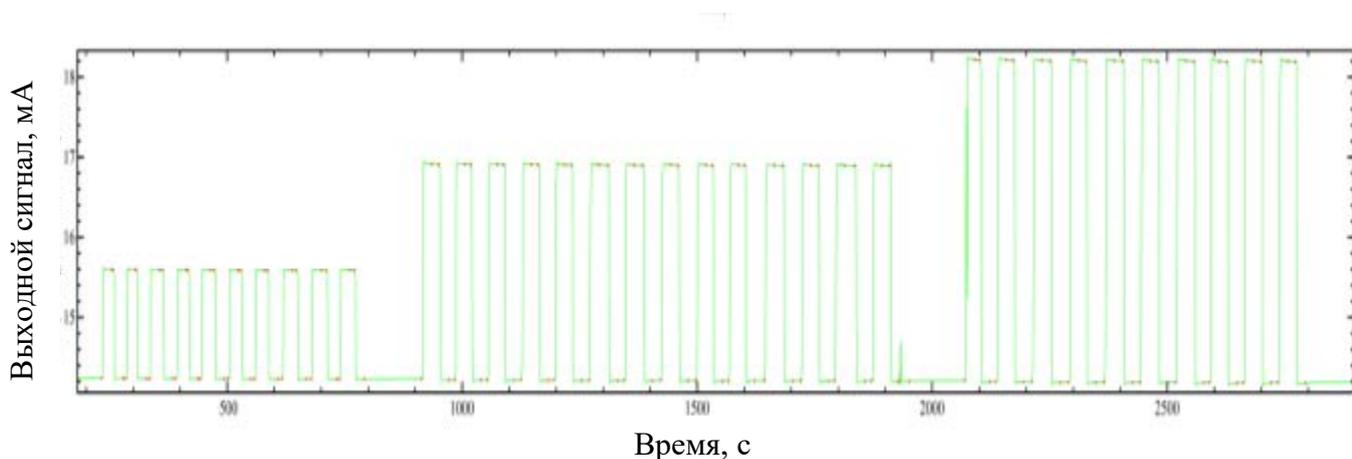


Рисунок 8.5.17 — Временная диаграмма для пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент №1. Красными точками показаны точки, взятые для анализа

На рисунке 8.5.18 показаны зависимости величины изменения выходного сигнала датчика от номера нагрузки при нагрузке 10 кг (слева вверху), 20 кг (справа) и 30 кг (слева внизу). Величины рассчитывались относительно среднего

значения изменения сигнала при нагрузке 30 кг. Красным цветом указаны относительные величины для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, оранжевым цветом – для заднего фронта.

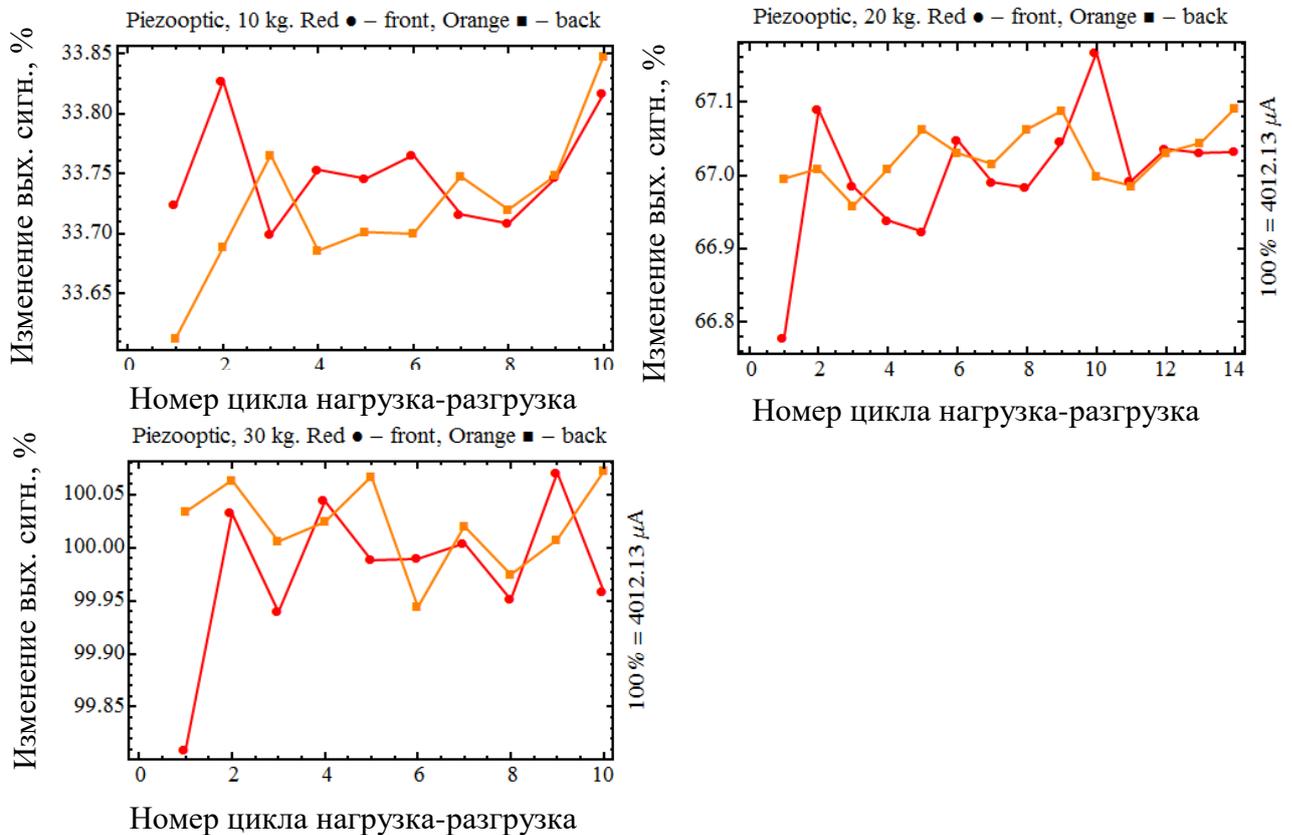


Рисунок 8.5.18 — Изменение выходного сигнала пьезооптического преобразователя при нагрузке 10, 20 и 30 кг относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 30 кг

В таблице 8.5.4 приведены численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 30 кг. Положительные величины соответствуют заднему фронту изменения сигнала, отрицательные – переднему фронту. Так же приведены усредненные по обоим фронтам значения. Номера циклов нагрузка-разгрузка (взяты для анализа) определены параметром N .

Таблица 8.5.4 — Численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 30 кг

100 % = 4012.13 μ A	mean, %	sigma, %	repeatability, %	max deviation, %
PO, 10kg, > 0, $N = 1..Last$	33.722	0.062	0.235	0.126
PO, 10kg, < 0, $N = 1..Last$	-33.75	0.043	0.128	0.077
PO, 10kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..Last$	33.736	0.054	0.235	0.123
PO, 20kg, > 0, $N = 1..Last$	67.003	0.089	0.39	0.225
PO, 20kg, < 0, $N = 1..Last$	-67.027	0.039	0.133	0.069
PO, 20kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..Last$	67.015	0.069	0.39	0.238
PO, 30kg, > 0, $N = 1..Last$	99.979	0.073	0.261	0.169
PO, 30kg, < 0, $N = 1..Last$	-100.021	0.041	0.128	0.077
PO, 30kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..Last$	100.	0.062	0.263	0.191
PO, 10kg, > 0, $N = 4..Last$	33.736	0.055	0.162	0.112
PO, 10kg, < 0, $N = 4..Last$	-33.75	0.036	0.108	0.066
PO, 10kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 4..Last$	33.743	0.045	0.162	0.105
PO, 20kg, > 0, $N = 4..Last$	67.017	0.065	0.244	0.15
PO, 20kg, < 0, $N = 4..Last$	-67.038	0.035	0.106	0.054
PO, 20kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 4..Last$	67.027	0.052	0.244	0.14
PO, 30kg, > 0, $N = 4..Last$	100.001	0.043	0.119	0.07
PO, 30kg, < 0, $N = 4..Last$	-100.016	0.046	0.128	0.072
PO, 30kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 4..Last$	100.008	0.044	0.128	0.064
PO, 10kg, > 0, $N = 1..5$	33.691	0.054	0.153	0.078
PO, 10kg, < 0, $N = 1..5$	-33.75	0.048	0.128	0.078
PO, 10kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..5$	33.72	0.058	0.215	0.108
PO, 20kg, > 0, $N = 1..5$	66.943	0.113	0.312	0.165
PO, 20kg, < 0, $N = 1..5$	-67.007	0.037	0.103	0.055
PO, 20kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..5$	66.975	0.086	0.312	0.197
PO, 30kg, > 0, $N = 1..5$	99.963	0.095	0.235	0.153
PO, 30kg, < 0, $N = 1..5$	-100.039	0.026	0.061	0.033
PO, 30kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..5$	100.001	0.077	0.258	0.191
PO, 10kg, > 0, $N = Last\ 5$	33.753	0.057	0.148	0.095
PO, 10kg, < 0, $N = Last\ 5$	-33.75	0.043	0.108	0.066
PO, 10kg, $\in \mathbb{R}$, $N = Last\ 5$	33.752	0.048	0.148	0.096
PO, 20kg, > 0, $N = Last\ 5$	67.052	0.067	0.175	0.115
PO, 20kg, < 0, $N = Last\ 5$	-67.03	0.042	0.106	0.062
PO, 20kg, $\in \mathbb{R}$, $N = Last\ 5$	67.041	0.054	0.181	0.126
PO, 30kg, > 0, $N = Last\ 5$	99.995	0.048	0.119	0.076
PO, 30kg, < 0, $N = Last\ 5$	-100.004	0.048	0.128	0.068
PO, 30kg, $\in \mathbb{R}$, $N = Last\ 5$	99.999	0.045	0.128	0.073

На рисунке 8.5.19 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный

элемент №1 с цангой, при многократной поочередной нагрузке весом 100 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

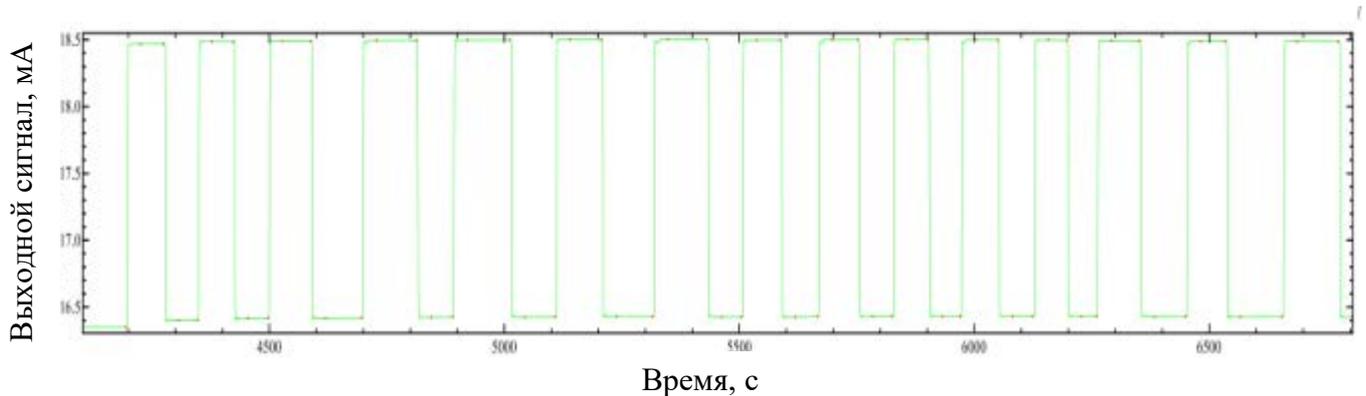


Рисунок 8.5.19 — Временная диаграмма для пьезооптического преобразователя, установленного в каленый нагрузочный элемент №1 с цангой при нагрузке 100 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа

На рисунке 8.5.20 показаны зависимости величины изменения выходного сигнала датчика от номера нагрузки при нагрузке 100 кг. Величины рассчитывались относительно среднего значения изменения сигнала. Красным цветом указаны относительные величины для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, оранжевым цветом – для заднего фронта.

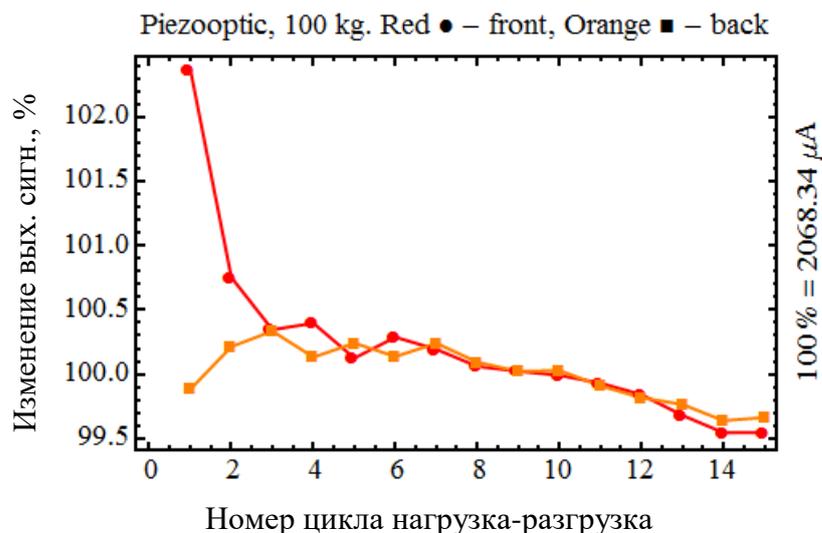


Рисунок 8.5.20 — Изменение выходного сигнала пьезооптического преобразователя при нагрузке 100 кг относительно среднего значения

В таблице 8.5.5 приведены численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 100 кг. Положительные величины соответствуют заднему фронту изменения сигнала, отрицательные – переднему фронту. Так же приведены усредненные по обоим фронтам значения. Номера циклов нагрузка-разгрузка (взяты для анализа) определены параметром N .

Таблица 8.5.5 — Численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 30 кг

100 % = 2068.34 μ A	mean, %	sigma, %	repeatability, %	max deviation, %
PO, 100kg, > 0, $N = 1..Last$	100.206	0.681	2.823	2.162
PO, 100kg, < 0, $N = 1..Last$	-100.009	0.219	0.696	0.369
PO, 100kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..Last$	100.107	0.507	2.823	2.261
PO, 100kg, > 0, $N = 3..Last$	99.998	0.283	0.851	0.452
PO, 100kg, < 0, $N = 3..Last$	-100.002	0.226	0.696	0.363
PO, 100kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 3..Last$	100.	0.251	0.851	0.454
PO, 100kg, > 0, $N = 1..5$	100.798	0.906	2.243	1.57
PO, 100kg, < 0, $N = 1..5$	-100.162	0.172	0.452	0.278
PO, 100kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..5$	100.48	0.7	2.485	1.888
PO, 100kg, > 0, $N = Last 5$	99.709	0.174	0.386	0.222
PO, 100kg, < 0, $N = Last 5$	-99.759	0.111	0.27	0.151
PO, 100kg, $\in \mathbb{R}$, $N = Last 5$	99.734	0.14	0.386	0.197

На рисунке 8.5.21 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент №2 с наклеенным тензорезистором, при многократной поочередной нагрузке весами 100 и 500 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

На рисунке 8.5.22 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала тензорезистивного преобразователя, наклеенного на нагрузочный элемент №2 и установленным в нем пьезооптическим датчиком, при многократной поочередной нагрузке весами 100 и 500 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

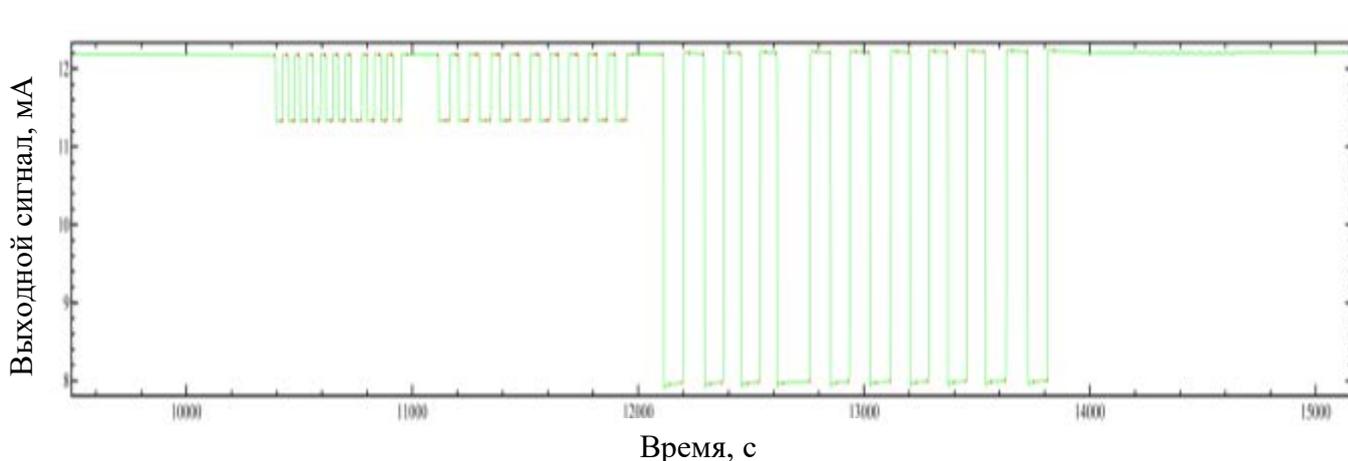


Рисунок 8.5.21 — Временная диаграмма для пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент №2 с наклеенным тензорезистивным преобразователем

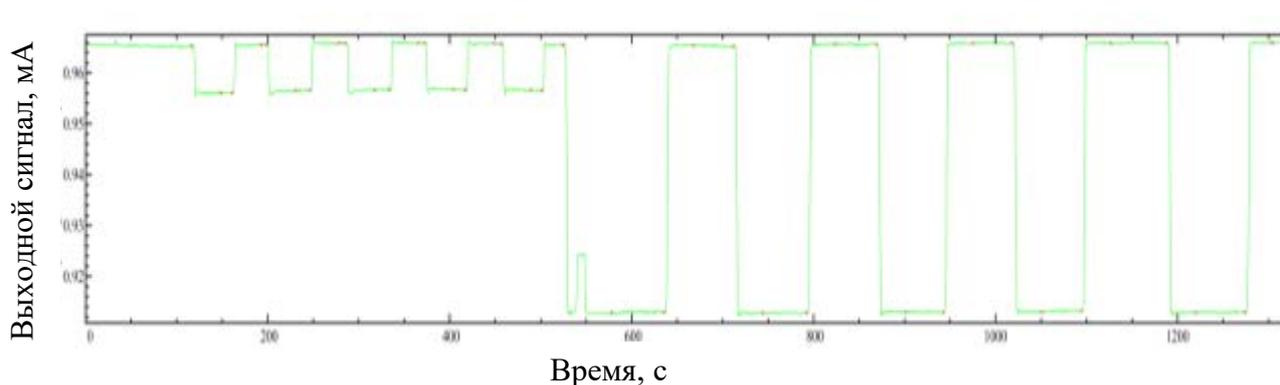


Рисунок 8.5.22 — Временная диаграмма для тензорезистивного преобразователя, наклеенного на нагрузочный элемент №2

На рисунке 8.5.23 показаны зависимости величины изменения выходного сигнала датчика от номера нагрузки при нагрузке 100 и 500 кг. Величины рассчитывались относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 500 кг.

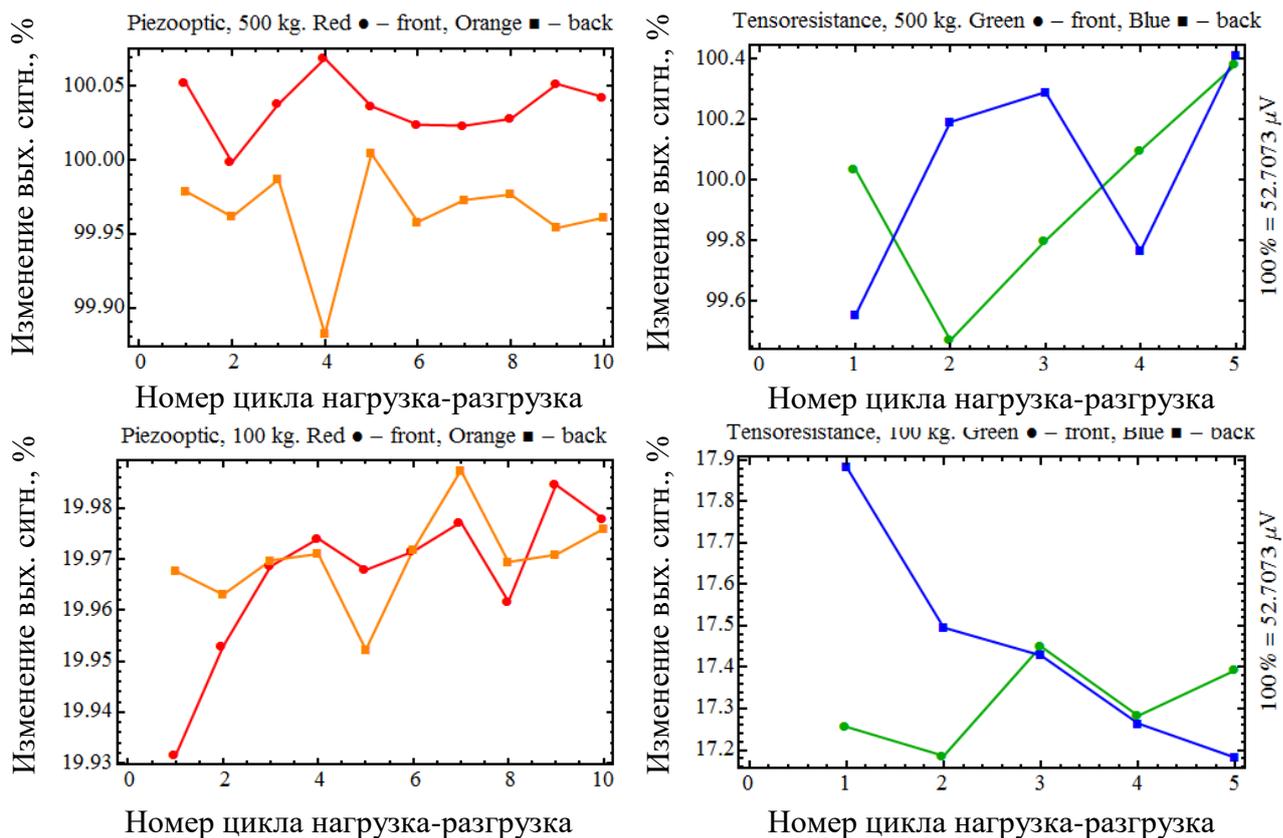


Рисунок 8.5.23 — Изменение выходного сигнала пьезооптического преобразователя и тензорезистивного преобразователя при нагрузке 100 и 500 кг относительно среднего значения изменения сигнала при 500 кг

Красным цветом указаны относительные величины сигнала пьезооптического преобразователя для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, оранжевым цветом – для заднего фронта. Синим цветом указаны относительные величины сигнала тензорезистивного преобразователя для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, зеленым цветом – для заднего фронта.

Здесь:

TR: 100% = 52.7073 μV

PO: 100% = 4231.62 μA

В таблице 8.5.6 приведены численные значения параметров для пьезооптического преобразователя (PO) и тензорезистивного преобразователя (TR), выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 500 кг. Положительные величины соответствуют заднему фронту изменения сигнала,

отрицательные – переднему фронту. Так же приведены усредненные по обоим фронтам значения. Номера циклов нагрузка-разгрузка (взяты для анализа) определены параметром N .

Таблица 8.5.6 — Численные значения параметров пьезооптического преобразователя (PO) и тензорезистивного преобразователя (TR), выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 500 кг

	mean, %	sigma, %	repeatability, %	max deviation, %
TR, 100kg, > 0, $N = 1..5$	17.451	0.273	0.702	0.433
TR, 100kg, < 0, $N = 1..5$	-17.314	0.107	0.264	0.137
TR, 100kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..5$	17.382	0.208	0.702	0.502
TR, 500kg, > 0, $N = 1..5$	100.043	0.366	0.86	0.49
TR, 500kg, < 0, $N = 1..5$	-99.957	0.342	0.91	0.486
TR, 500kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..5$	100	0.337	0.942	0.529
PO, 100kg, > 0, $N = 1..10$	19.97	0.009	0.035	0.018
PO, 100kg, < 0, $N = 1..10$	-19.967	0.015	0.053	0.035
PO, 100kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..10$	19.968	0.012	0.056	0.037
PO, 500kg, > 0, $N = 1..10$	99.964	0.032	0.122	0.081
PO, 500kg, < 0, $N = 1..10$	-100.036	0.019	0.07	0.038
PO, 500kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..10$	100	0.045	0.187	0.118
PO, 100kg, > 0, $N = 1..5$	19.965	0.008	0.019	0.013
PO, 100kg, < 0, $N = 1..5$	-19.959	0.017	0.043	0.027
PO, 100kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..5$	19.962	0.013	0.043	0.03
PO, 500kg, > 0, $N = 1..5$	99.963	0.048	0.122	0.081
PO, 500kg, < 0, $N = 1..5$	-100.039	0.026	0.07	0.04
PO, 500kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 1..5$	100.001	0.054	0.187	0.119
PO, 100kg, > 0, $N = 6..10$	19.975	0.007	0.018	0.012
PO, 100kg, < 0, $N = 6..10$	-19.975	0.009	0.023	0.013
PO, 100kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 6..10$	19.975	0.008	0.026	0.013
PO, 500kg, > 0, $N = 6..10$	99.965	0.01	0.023	0.012
PO, 500kg, < 0, $N = 6..10$	-100.034	0.013	0.028	0.018
PO, 500kg, $\in \mathbb{R}$, $N = 6..10$	99.999	0.038	0.097	0.052

В таблице 8.5.7 приведены полученные из испытаний и последующей обработки параметры пьезооптического преобразователя и тензорезистивного преобразователя, которые были установлены на один нагрузочный элемент №2.

Так же приведены полученные параметры пьезооптического преобразователя с разными нагрузочными элементами.

Таблица 8.5.7 — Сравнение параметров пьезооптического датчика УПС-15 и тензорезистивного датчика деформации при испытаниях в «Ростест-Москва»

Тип преобразователя	Нагр. элемент	Нагр. кг	σ , %	макс откл, %	повторяемость, %
19.02.2016					
Пьезооптический преобразователь	№2 закаленный	100	0.009	0.013	0.024
Пьезооптический преобразователь	№2 закаленный	500	0.013	0.018	0.025
Тензорезистивный преобразователь	№2 закаленный	100	0.107	0.137	0.264
Тензорезистивный преобразователь	№2 закаленный	500	0.342	0.486	0.91
11.02.2016					
Пьезооптический преобразователь	№2 закаленный	200	0.058	0.093	0.16
Пьезооптический преобразователь	№2 не закаленный	500	0.059	0.068	0.106
15.02.2016					
Пьезооптический преобразователь	№1 с цангой	10	0.043	0.066	0.108
Пьезооптический преобразователь	№1 без цанги	20	0.042	0.062	0.106
Пьезооптический преобразователь	№1 без цанги	30	0.048	0.068	0.128
25.02.2016					
Пьезооптический преобразователь	№1 с цангой	100	0.111	0.151	0.270

Из таблицы видно, что параметры, определяющие эксплуатационные характеристики датчика деформации, для пьезооптического преобразователя более чем на порядок превышают параметры для тензорезистивного датчика. Так же из таблицы следует, что в закаленном нагрузочном элементе параметры преобразователя получились лучше, чем в не закаленном. Наличие цанги не влияет существенно на параметры преобразователя.

Выводы:

1. Пьезооптический преобразователь при прочих равных условиях обладает точностью измерений в 10–30 раз выше, чем тензорезистивный датчик.
2. Точность пьезооптического датчика для малых весов (в начале динамического диапазона) составляет не хуже 0.01%.
3. Соотношение сигнал/шум для пьезооптического преобразователя более чем в 50 раз лучше, чем для тензорезистивного датчика.
4. На точность измерений пьезооптического преобразователя существенное влияние оказывал нагрузочный элемент, обладающий долговременной релаксацией, видимо обусловленной несовершенством технологии его изготовления.

8.5.3 Испытания в калибровочной лаборатории Trescal, г. Детройт, США

Разработанный пьезооптический преобразователь УПС-15 был протестирован в сертифицированной лаборатории Detroit Calibration Lab Trescal (г. Детройт, США) [244]. Данные испытания проводились по методике, разработанной автором. Математическая обработка полученной первичной информации была проведена младшим научным сотрудником Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ» Загубисало Петром Станиславовичем. Анализ полученных результатов так же был проведен автором.

Испытания проводились на силоизмерительной машине National Institute of Standards and Technology (NIST) [245] согласно стандарту Metrological regulation for load cells Международной организации законодательной метрологии

(International Organization of Legal Metrology) OIML R 60(E) Edition 2000 [246]. Преобразователь диаметром 13 мм и длиной 70 мм был установлен внутри нагрузочного элемента, представляющего собой параллелепипед из закаленной стали 50×50×100 мм (рис.8.5.24).

Номинальная нагрузка нагрузочного элемента составляла 1000 кг. Затем нагрузочный элемент был установлен на испытательной машине, где он последовательно загружался с помощью калибровочных грузов. Выходной сигнал преобразователя сравнивался с выходным сигналом калибровочного датчика, используемым для калибровки тестовых машин. Конструкция калибровочного нагрузочного элемента основана на тензорезистивном датчике (рис.8.5.25).

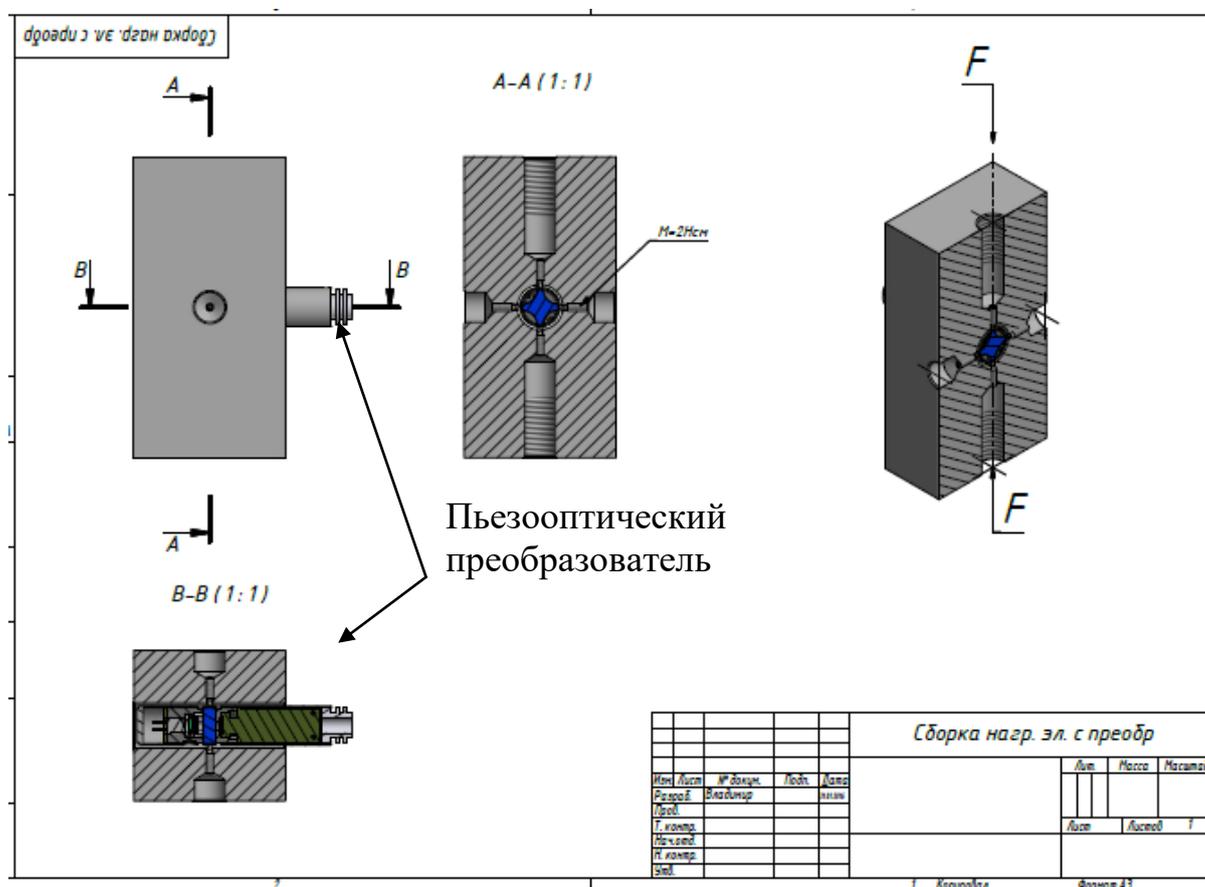


Рисунок 8.5.24 — Нагрузочный элемент

Для сравнения был выбран нагрузочный элемент Ultra Precision LowProfile™ Load Cell Interface Force™ [247] с номинальной нагрузкой в 2000 фунтов (907,185 кг), близкий к номинальной нагрузке (1000 кг) нашего нагрузочного элемента (рис.8.5.26).

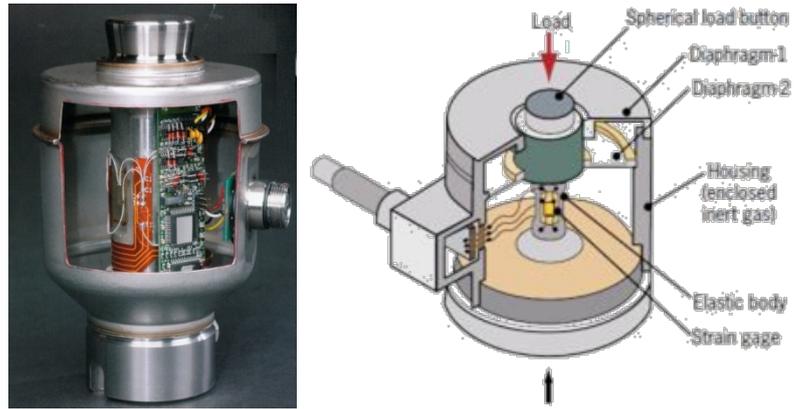


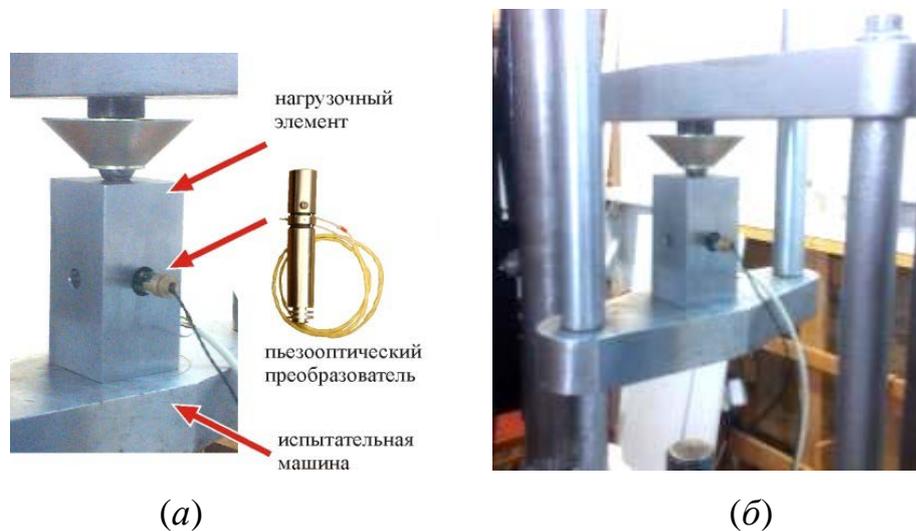
Рисунок 8.5.25 — Устройство калибровочных датчиков деформации для калибровки тестовых машин

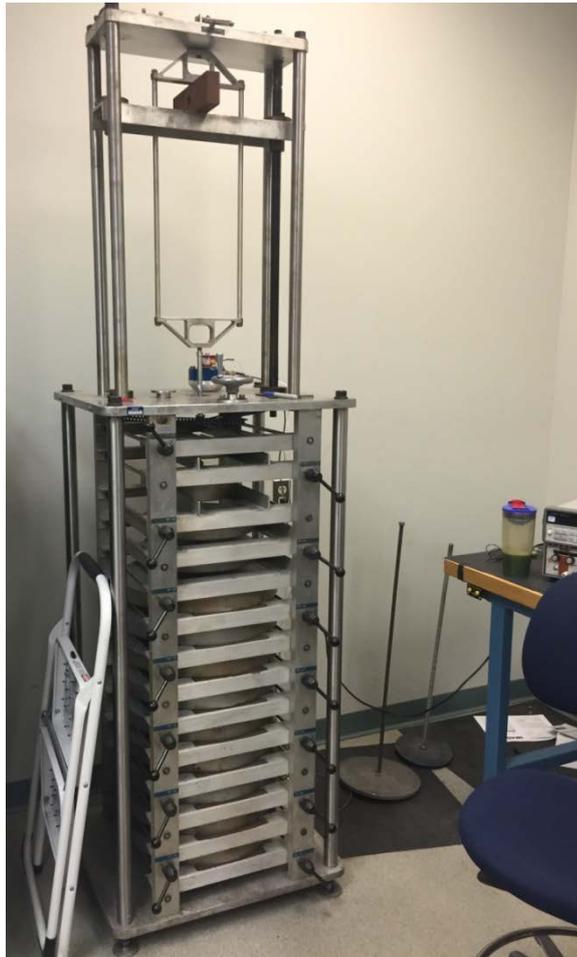
Ultra Precision
Load Cell



Рисунок 8.5.26 — Калибровочный датчик Ultra Precision LowProfile™ Load Cell Interface Force™

На рисунке 8.5.27 показаны: наш нагрузочный элемент с установленным в нем пьезооптическим преобразователем (а), нагрузочный элемент в испытательной машине (б) и вид испытательной машины (в).





(в)

Рисунок 5.1.27 — Установка нагрузочного элемента в испытательную машину

(а) – фотография нагрузочного элемента с пьезооптическим преобразователем;

(б) – нагрузочный элемент в испытательной машине

(в) – испытательная машина

Результаты сравнения разработанного пьезооптического преобразователя в нагрузочном элементе в виде стального параллелепипеда и калибровочного датчика Ultra Precision LowProfile™ Load Cell Interface Force™ показаны на рисунке 8.5.28. Рисунок 8.5.28, а соответствует нашему пьезооптическому преобразователю, а рисунок 8.5.28, б – калибровочному Load Cell. Предварительная нагрузка для обоих датчиков составляла 110 фунтов (49.895 кг). Затем датчики были последовательно нагружены калиброванными грузами от 1 грамма до 100 г (рис. 8.5.28).

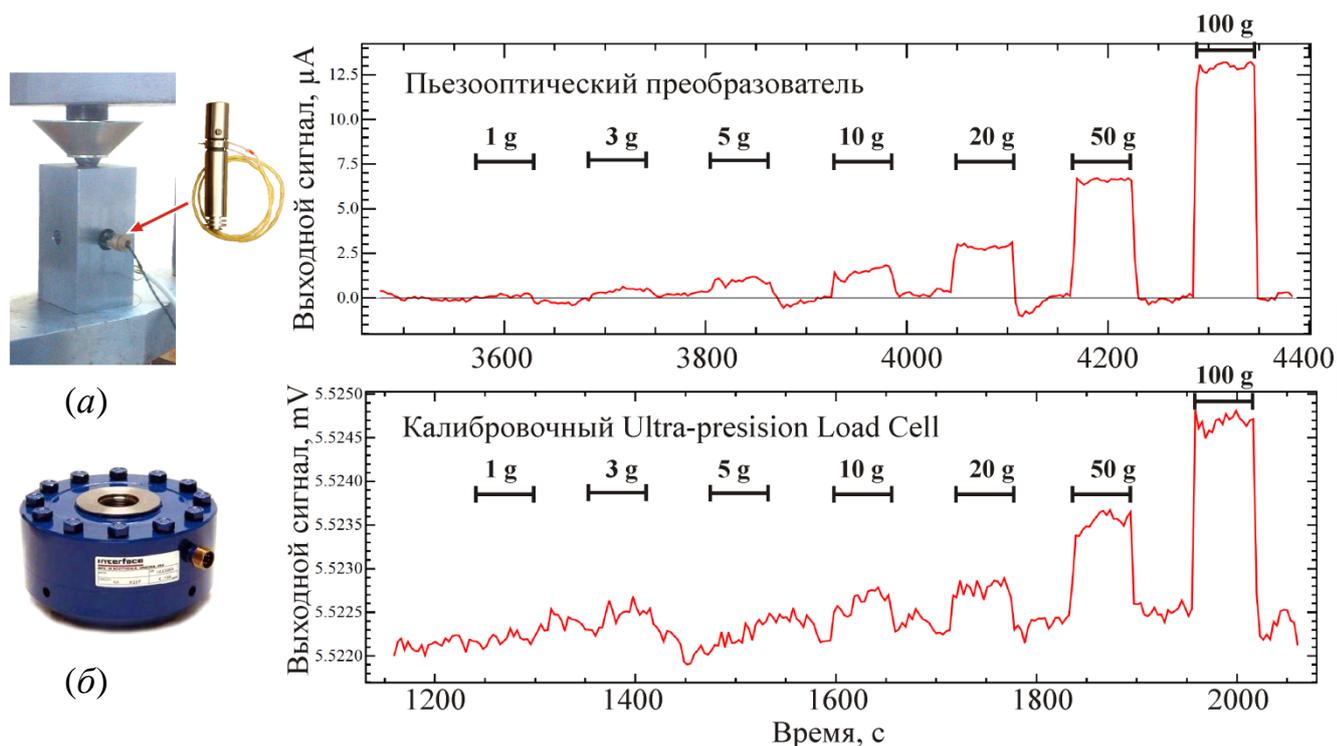


Рисунок 8.5.28 — Временные зависимости выходного сигнала датчиков деформации при последовательной нагрузке калиброванными грузами 1, 3, 5, 10, 20, 50, 100 г,

(а) – пьезооптический преобразователь;

(б) – калибровочный Ultra Precision LowProfile™ Load Cell

Соотношение сигнал/шум для пьезооптического преобразователя примерно на порядок выше, чем для Load Cell. Это меньше, чем предсказывают расчеты. Это связано с тем, что Load Cell содержит вакуумно-герметичную камеру, где расположена сложная и дорогая схема стабилизации выходного сигнала и уменьшения шумов (рис.8.5.25). В нашей конструкции датчика мы использовали, по возможности наиболее простую схему аналоговой токовой петли, поскольку датчик разработан для широкого круга потребителей. Тем не менее, эта конструкция показала более высокую чувствительность по сравнению с калибровочным датчиком, стоимость которого превышает 5000 долларов США.

Полученная высокая чувствительность предложенного пьезооптического преобразователя обусловлена, во-первых, высокой чувствительностью к деформации пьезооптического эффекта по сравнению с тензорезистивным

эффектом, во-вторых, возможностью при фиксированной деформации (силе) сконцентрировать напряжения в небольшом объеме ФЭ за счет оптимизации его конструкции.

Параметры, полученные для пьезооптического датчика и калибровочного Load Cell, суммированы в таблице 8.5.8. Из таблицы видно, что пьезооптический датчик УПС-15 превосходит Load Cell по всем параметрам, кроме погрешности коэффициента преобразования.

Таблица 8.5.8 — Сравнение параметров пьезооптического преобразователя с параметрами калибровочного датчика Load Cell.

Параметр	Ед. изм.	УПС-15	Ultra Precision Load Cell
Среднеквадратичное отклонение (шум) выходного сигнала	% от сигнала при нагрузке 100 г	0.6	5.3
Коэффициент преобразования	вых. сигн./г	0.124 мкА/г	0.023 мкВ/г
Погрешность преобразования	% от сигнала при нагрузке 100 lb (45.359 кг)	0.044	0.017
Минимальная детектируемая нагрузка при равных условиях	г	1	10
Минимальная детектируемая нагрузка	% от номинальной нагрузки	0,0001	0,00110

Выводы:

1. Параметры пьезооптического датчика УПС-15 заметно превосходят параметры калибровочного датчика, за исключением погрешности коэффициента преобразования.
2. Среднеквадратичное отклонение (шум) выходного сигнала УПС-15 почти на порядок меньше величины для калибровочного датчика.

3. Коэффициент преобразования Load Cell равен 0.0232 мкВ/г.
4. Коэффициент преобразования пьезооптического преобразователя равен 0.124 мкА/г.
5. На пьезооптическом датчике УПС-15 наблюдается релаксация сигнала после приложения нагрузки, величина которого увеличивается с увеличением нагрузки. Исходя из предыдущего опыта, можно предположить, что релаксация связана с нагрузочным элементом, т. е. с несовершенством конструкции и технологии его изготовления.
6. Релаксация сигнала на Load Cell при приложении нагрузки не наблюдается.
7. Преобразователь УПС-15 превосходит по параметрам калибровочный датчик, несмотря на гораздо более простую схему формирования выходного сигнала.

8.5.4 Испытания в Институте физической химии и электрохимии имени А.Н. Фрумкина (ИФХЭ РАН), Москва

В испытательной лаборатории ИФХЭ РАН им. А.Н.Фрумкина (Москва) датчики УПС-17 в нагрузочном элементе с номинальной нагрузкой 500 кг (рис. 8.5.29) испытывались на силоизмерительной машине Zwick модель Z-010 (Германия) [248] с датчиком силы на 1 тонну. Испытания проводились по методике согласно ГОСТ 28836-90 «Датчики силоизмерительные тензорезисторные. Общие технические требования и методы испытаний» [239] в диапазоне температур от -40 до $+50^{\circ}\text{C}$. Полученные параметры приведены в таблице 8.5.9 Согласно испытаниям параметры датчика УПС-17 превышают параметры тензорезисторных датчиков с категорией 0.02 (наивысшая категория).

В таблице 8.5.10 для сравнения приведены основные характеристики и параметры промышленных датчиков механических напряжений на различных физических принципах.

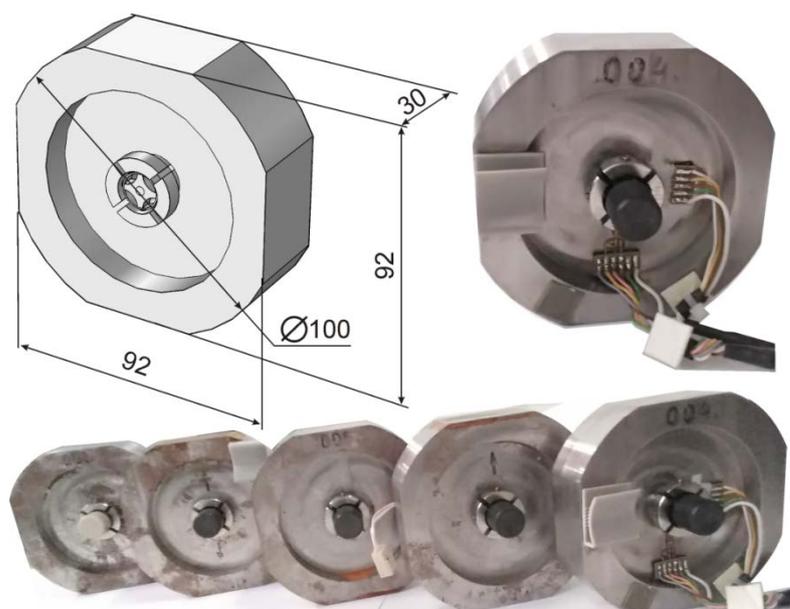


Рисунок 8.5.29 — Внешний вид нагрузочного элемента с установленным датчиком для испытаний на силоизмерительной машине Zwick модель Z-010

Таблица 8.5.9 — Параметры образца УПС-17 в нагрузочном элементе.

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина	Примечание
Коэффициент преобразования при 20°C	k	мкА/Н	1.06	
Начальный коэффициент передачи (НКП)	$k_{нкп}$	мкА	0.15	
Рабочий коэффициент передачи (РКП)	$k_{ркп}$	мА	5.19	
Температурный дрейф НКП (на 10°C)	$\delta k_{нкп}$	%	0.01	
Температурный дрейф РКП (на 10°C)	$\delta k_{ркп}$	%	1.45	
Систематическая ошибка	$\epsilon_{сис}$	%	0.007	
Стандартное отклонение случайной составляющей погрешности	$\sigma_{случ}$	%	0.009	
Гистерезис	h	%	< 0.01	Не превышает стандартное отклонение случайной составляющей погрешности

Минимальная обнаруживаемая сила	F_{\min}	Н	0.14	
Минимальная обнаруживаемая деформация	Δx_{\min}	нм	0.003 0.013	На ФЭ* 12 мм На НЭ* 92 мм
Минимальная обнаруживаемая относительная деформация	$(\Delta x/x)_{\min}$	отн. ед.	2.6×10^{-10} 1.3×10^{-9}	На ФЭ 12 мм На НЭ 92 мм
Максимальная измеряемая сила	F_{\max}	Н	4878	
Максимально измеряемая деформация	Δx_{\max}	нм	109 4408	На ФЭ 12 мм На НЭ 92 мм
Температурный дрейф нуля (на 10°C)	δI	%	3.9	
Нелинейность	$\gamma_{\text{нел}}$	%	1.6	Для 20°C

* ФЭ – фотоупругий элемент, НЭ – нагрузочный элемент.

Таблица 8.5.10 — Основные характеристики датчиков механических напряжений различных типов

Параметр	Тип датчика			
	Тензорезисторный	Пьезоэлектрический	Волоконно-оптический	Пьезооптический
Коэффициент тензочувствительности S_A	2–4	0,1–35,6	0,78	> 7000
Зависимость S_A от конструкции датчика	нет	нет	нет	да
Коэфф. преобразования деформация → ток		80 мкА/мкм		1100-50000 мкА/мкм
Чувствительность к относительной деформации	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$\sim 10^{-6}$	$< 6 \times 10^{-10}$
Погрешность измерений	0.05-0.1%	1.0%	0.25 – 1.0%	0.01-0.03%
Динамический диапазон	$10^3 - 10^4$	10^3	10^3	$> 5 \times 10^4$

Гистерезис	0.1%	нет	нет	нет
Деградация параметров со временем	есть	есть	нет	нет
Температурный дрейф нуля на 10°C	0.05-2%		3 – 12%	~10% Связан с нагрузочным элементом
Температурный дрейф коэф. преобразования	0.05-0.5% на 10° С аппаратной термокомпенсацией	5%		2% на 10° Может быть уменьшен программным способом
Тип измеряемых нагрузок	Динамические, статические	Динамические	Статические	Динамические, статические
Термокомпенсация аппаратная	есть	нет	нет	нет
Термокомпенсация программная	есть		есть	есть
Нелинейность	0.05-0.1%	1 – 2%		~2% Может быть уменьшена сокращением динамического диапазона
Повторяемость	0.05-0.1%			0.05-0.1%
Допустимая перегрузка	120%			350-500%

8.6 Применение пьезооптического преобразователя для контроля параметров движения подъемных устройств

Разработанный пьезооптический датчик УПС-15 был использован для разработки методики контроля параметров движения подъемных устройств на примере использования в пассажирских и грузовых лифтах [249, 250].

Параметры движения движущейся части подъемника, например, кабины лифта, такие как уровень вибраций и величина трения о направляющие, а так же

степень ее загрузки, определяют его эксплуатационные характеристики, в том числе, безопасность.

Из уровня техники известно, что подъемное устройство, как правило, включает лебедку, подвижную часть, перемещающую полезный груз, и направляющие, по которым движется подвижная часть, либо, в случае подъемных кранов, по которым движутся тросы, прикрепленные к подвижной части. Известно, что в лифтовых конструкциях используются направляющие продольной формы в качестве несущих и направляющих элементов для лифтовых кабин. Кабина обычно подвешивается на стальных тросах (канатах), огибающих канатоведущий шкив лебедки лифта, установленной, как правило, в верхней части шахты лифта. Кабина при перемещении вдоль шахты опирается на направляющие с помощью башмаков. Даже незначительные деформации элементов направляющих или зазоры между сегментами направляющих могут привести к возникновению раскачиваний или вибраций кабины, перемещающейся в шахте, или к повышенному трению между башмаками кабины и направляющими. Некачественный монтаж направляющих приводит к повышенному износу элементов конструкции, повышенному электропотреблению, увеличению нагрузки на двигатель лебедки, повышению вероятности возникновения аварийной ситуации, снижению срока эксплуатации лифта.

Контроль направляющих кабины и противовеса при монтаже обычно производится вручную путём выверки ветвей направляющих в вертикальной плоскости при помощи веревочного или лазерного отвеса. Также: (а) вручную измеряются внутренний зазор между ветвями направляющих кабины и ветвями направляющих противовеса – штихмасс кабины и противовеса, величина которого задается с жестким допуском; (б) вручную проверяется установка ветвей направляющих в одной плоскости. Использование инструментов и способов контроля монтажа направляющих известного уровня техники является трудоемким и дорогостоящим и, кроме того, сопровождается большими погрешностями.

Традиционно, контроль качества установки направляющих лифта производится в процессе его монтажа и далее только через период времени, определяемый регламентом эксплуатации. При этом лифт выводится из эксплуатации, и проверка технического состояния направляющих производится вручную с помощью специального устройства (штихмасса) по всей высоте шахты лифта. Очевидно, что неточности в установке направляющих могут возникнуть не только при монтаже лифта, но и при его эксплуатации. Непрерывно, в процессе эксплуатации, как правило, состояние направляющих кабины и противовеса лифта не контролируется [251]. Во многом это определяется отсутствием технических средств для проведения такого контроля без выведения лифта из эксплуатации.

Из уровня техники не известен способ непрерывного контроля в процессе эксплуатации параметров движения движущейся части подъемного устройства, таких как, амплитуда вибраций, величина трения между движущейся частью и направляющими, резкое возрастание которых может привести к возникновению аварийных ситуаций. Известно, что для контроля степени загрузки кабины лифта используются тензорезистивные датчики, которые в количестве 2–4 штук размещаются под полом кабины (рис.8.6.1).

Действующий международный стандарт ISO 18738—1:2012 (E) требует непрерывно контролировать в процессе эксплуатации не только степень загрузки кабины лифта, но и ее скорость, ускорение и торможение, рывки и вибрацию. Проблема заключается в том, что некачественный монтаж направляющих, по которым перемещаются кабина лифта и противовес, приводит к ускоренному износу элементов конструкции, росту электропотребления, увеличению нагрузки на двигатель лебедки, повышению вероятности возникновения аварийной ситуации, снижению срока эксплуатации лифта.



Рисунок 8.6.1 — Размещение пьезооптического датчика и тензорезистивных датчиков деформации на лифте и их параметры

Предлагаемый метод контроля с помощью одного пьезооптического датчика заключается в измерении деформации рамы лебедки лифта, на которую передаются все нагрузки, связанные с движением кабины и противовеса. Датчик смонтирован на раме без дополнительных специальных монтажных отверстий, например, с помощью трубочин или магнитов, как показано на рис. 8.6.2, где 1 — датчик деформации, 2 — швеллер рамы лебедки, 3 — трубочины, 4 — магниты (постоянные или электрические). Такой монтаж позволяет производить оперативный контроль технического состояния направляющих любого лифта независимо от его конструкции, в том числе, уже введенного в эксплуатацию.

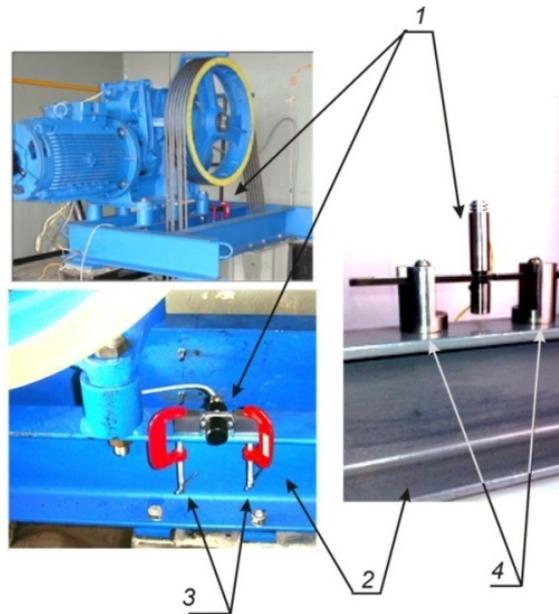


Рисунок 8.6.2 — Способы монтажа пьезооптического датчика на раме лебедки лифта без изготовления монтажных отверстий

Для методического обоснования метода обратимся к упрощенной физической модели лифта для зданий, схематично представленной на рисунке 8.6.3; здесь 1 — кабина, 2 — противовес, 3 — канатоведущий шкив лебедки, 4 — рама, 5 — направляющие, 6 — датчик деформации. На кабину лифта и на противовес действуют силы тяжести P_1 и P_2 соответственно (вместе с канатами и электрическими кабелями). В канатах возникают ответные силы натяжения T_1 и T_2 . На лебедку действует сила F , равная сумме сил T_1 и T_2 . Ответно в раме лебедки возникает сила реакции опоры N , равная по величине силе F , и в целом система уравнений сил в отсутствии движения кабины имеет вид

$$\begin{aligned}
 T_1 - P_1 &= 0; \\
 T_2 - P_2 &= 0; \\
 T_1 + T_2 &= P_1 + P_2 = F = N
 \end{aligned}
 \tag{8.6.1}$$

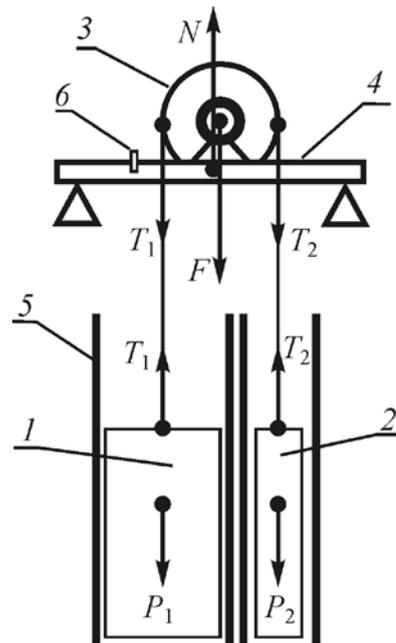


Рисунок 8.6.3 — Физическая модель лифта в статике

Канатоведущий шкив лебедки не является свободно (без трения) вращающимся блоком, а жестко связан с валом двигателя и тормозным механизмом. При этом канаты удерживаются на шкиве силой трения без проскальзывания. Таким образом, можно считать, что в любой момент времени, в покое или в движении, канат жестко связан со шкивом в единое целое в верхней точке шкива. Это позволяет рассматривать силу натяжения канатов кабины лифта и противовеса T_1 и T_2 , определяющих силовое воздействие на лебедку и раму лифта F , независимо друг от друга.

На рисунке 8.6.4, а, б показаны условные диаграммы временных зависимостей скорости (V) и ускорения (a) кабины лифта при движении вверх и затем вниз. Направления движения кабины здесь и далее на других подобных рисунках отмечены соответствующими стрелками. Обозначим массы кабины лифта и противовеса как m_1 и m_2 соответственно. Тогда при движении кабины с ускорением вверх вместо формул (8.6.1) будем иметь

$$\begin{aligned}
 T_1 - P_1 &= m_1 a; \\
 T_2 - P_2 &= -m_2 a; \\
 T_1 + T_2 &= P_1 + P_2 + (m_1 - m_2)a = F = N.
 \end{aligned}
 \tag{8.6.2}$$

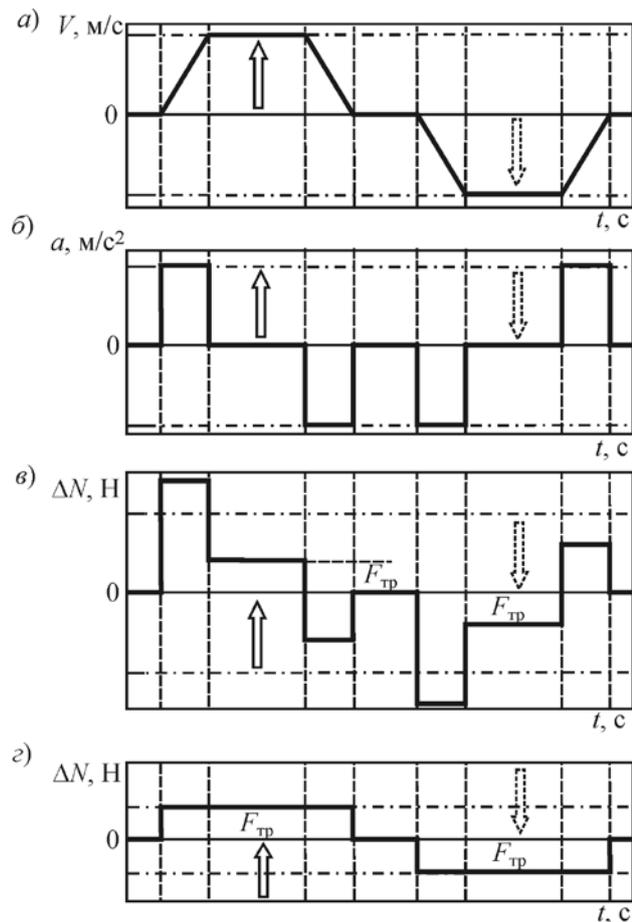


Рисунок 8.6.4 — Условные диаграммы временных зависимостей параметров движения кабины лифта

- а) скорость V ,
- б) ускорение a кабины лифта при последовательном движении вверх и затем вниз,
- в) суммарная сила, действующая на раму лебедки лифта,
- г) силы трения между кабиной (противовесом) и направляющими.

При движении вниз ускорение a меняет знак. Очевидно, что при ускоренном движении кабины и противовеса возникает дополнительное усилие на раму, пропорциональное ускорению a , которое приводит к изменению деформации рамы лебедки с датчиком, однако из (8.6.2) следует, что при равных массах кабины и противовеса ($m_1 = m_2$) дополнительного усилия не возникает.

Все меняется, когда между кабиной (противовесом) и направляющими появляется сила трения, всегда действующая против направления движения (рис. 8.6.5).

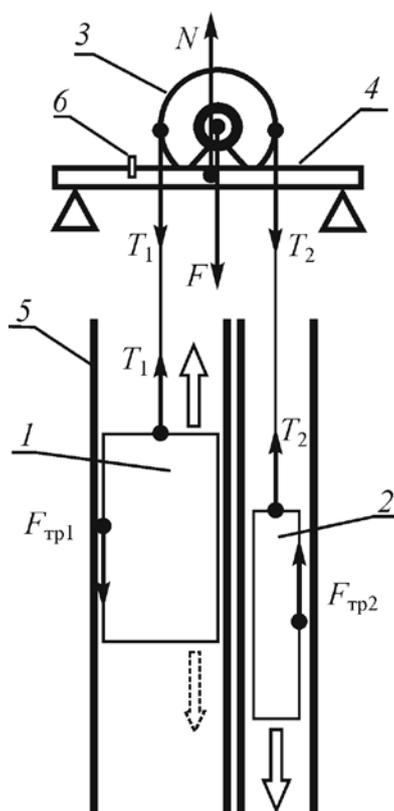


Рисунок 8.6.5 — Физическая модель лифта в движении при наличии трения по направляющим

В подобной ситуации

$$\begin{aligned}
 T_1 - P_1 - F_{\text{тр}1} &= m_1 a; \\
 T_2 - P_2 + F_{\text{тр}2} &= -m_2 a; \\
 F_{\text{тр}1} &= \mu_1 N_1; \\
 F_{\text{тр}2} &= \mu_2 N_2; \\
 T_1 + T_2 &= P_1 + P_2 + F_{\text{тр}1} - F_{\text{тр}2} + (m_1 - m_2) a = F^* = N^*,
 \end{aligned}
 \tag{8.6.3}$$

где $F_{\text{тр}1} = \mu_1 N_1$ и $F_{\text{тр}2} = \mu_2 N_2$ — силы трения скольжения соответственно кабины и противовеса по направляющим, $\mu_{1,2}$ и $N_{1,2}$ — коэффициенты трения и силы взаимодействия кабины и противовеса с направляющими, N^* — новое значение силы реакции рамы на действие силы F^* с учетом сил трения.

Диаграмма изменения силы ΔN (в Ньютонах) с учетом непрерывного действия силы трения принимает вид, как на рисунке 8.6.4, в.

Таким образом, сила, действующая на раму лебедки лифта, пропорциональна разнице сил трения кабины и противовеса при скольжении вдоль направляющих.

Запишем разницу данных сил при движении, по-прежнему полагая оптимальным $m_1 = m_2$:

$$\Delta N = N^* - N = F_{\text{тр}1} - F_{\text{тр}2} = \Delta F_{\text{тр}}, \quad (8.6.4)$$

где $\Delta F_{\text{тр}}$ — разность сил трения. При смене направления движения кабины силы трения меняют знак на противоположный, что приводит к различному знаку ΔN при движении кабины вверх или вниз. Диаграмма $\Delta N = f(t)$ при непрерывно действующих силах трения $F_{\text{тр}1}$ и $F_{\text{тр}2}$ для данного случая соответствует рисунку 8.6.4, з.

На рисунке 8.6.6, а представлена временная диаграмма для ΔN , когда сила трения резко увеличивается в определенных местах шахты из-за некачественного монтажа направляющих.

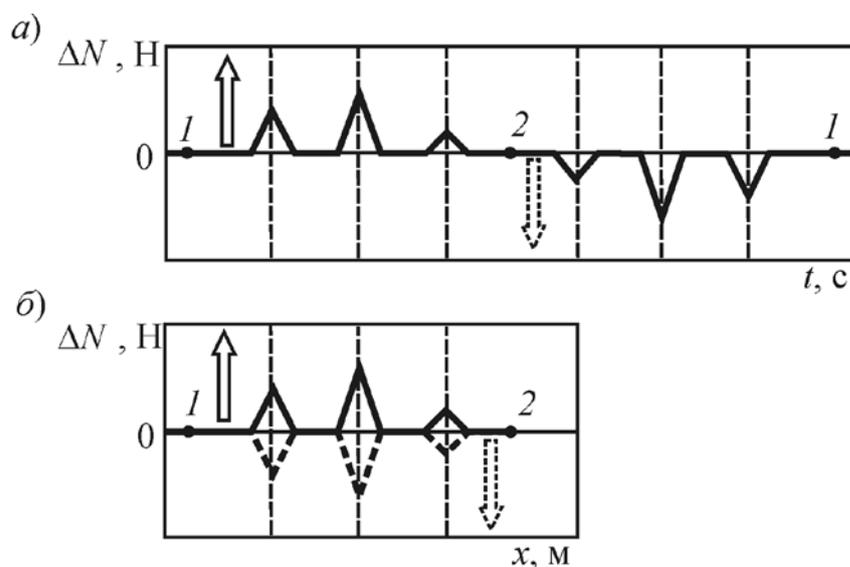


Рисунок 8.6.6 — Условная временная диаграмма для ΔN в случае, если сила трения увеличивается только в определенных местах шахты

- а) исходная диаграмма при движении вверх от точки 1 до точки 2 и вниз от точки 2 до точки 1,
 б) диаграмма, в которой промежуток от точки 2 до точки 1 инвертирован относительно точки 2

При движении кабины вверх от точки 1 до точки 2 изменения положительны, а при обратном движении вниз от точки 2 до точки 1 изменения отрицательны.

Если часть диаграммы при движении вниз инвертировать относительно точки 2, то при условии постоянства скорости получится диаграмма зависимости силы трения от положения x кабины в шахте лифта (рис. 8.6.5, б). Нетрудно обнаружить, что всплески величины силы трения наблюдаются в одних и тех же местах положения кабины, при этом знак всплеска зависит от направления движения кабины. В итоге, по данной диаграмме могут быть выявлены места с повышенным трением.

С августа 2010 года один из разработанных датчиков успешно эксплуатируется на лифте грузоподъемностью 500 кг административного корпуса ОАО «Могилевлифтмаш» в г. Могилеве, еще три с февраля 2011 г. эксплуатируются без замечаний на лифтах грузоподъемностью 400 кг в московских жилых домах. Датчики смонтированы в местах максимальных деформаций рам с учетом удобства размещения. Максимальные деформации определялись на основе анализа с помощью программ трехмерного промышленного проектирования SolidWorks, AutoCAD Inventor, T-Flex CAD.

На рисунке 8.6.7 представлены экспериментальные диаграммы $\Delta N = f(t)$ при движении пустой кабины лифта грузоподъемностью 500 кг без остановок с 1-го на 9-й этаж (сплошная кривая) и обратно (штриховая кривая) со скоростью равномерного движения 1 м/с [249].

Для удобства сравнения диаграммы наложены друг на друга таким образом, чтобы значения ΔN для одного и того же положения кабины в шахте при движении вверх и движении вниз совпадали по оси абсцисс. Иначе говоря, для движения кабины вверх ось времени направлена вправо, а для движения кабины вниз — влево. Таким образом, ось абсцисс задает не столько время протекания процесса t , сколько линейную координату x положения кабины лифта в шахте, что важно для идентификации дефектных мест.

На кривых рисунка 8.6.7 хорошо видны участки разгона и торможения (выделены прямоугольными рамками), качественно совпадающие с соответствующими участками на диаграмме на рисунке 8.6.4. Знак изменения показаний датчика при разгоне кабины вверх совпадает со знаком изменения

сигнала при торможении при движении вниз, так как ускорения в этих точках направлены в одну сторону [см. формулы (8.6.2)]. Значения ΔN в процессе равномерного движения кабины вверх и вниз совпадают в пределах шума, что свидетельствует об отсутствии существенного трения кабины и противовеса с направляющими.

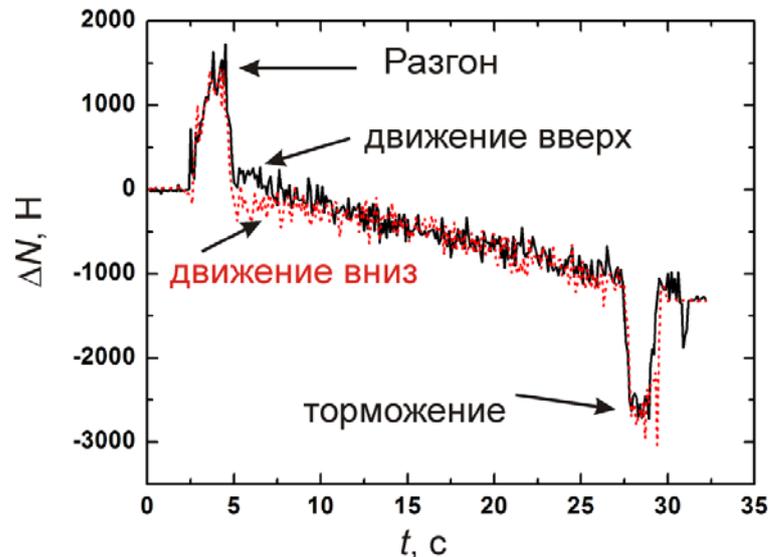


Рисунок 8.6.7 — Временные диаграммы показаний датчика деформации при движении пустой кабины с 1 этажа на 9 этаж без остановок (сплошная кривая) и с обратно с 9 этажа на 1 этаж также без остановок (штриховая кривая). Лифт грузоподъемностью 500 кг со скоростью равномерного движения 1 м/с

Аналогичная диаграмма на рисунке 8.6.8 получена для другого лифта с грузоподъемностью 400 кг. Однако здесь графики для участка равномерного движения вверх и вниз не только не совпадают, но и изменяются в противофазе, что свидетельствует о наличии повышенного трения [см. выражение (5.4)], конкретно — до 500 Н на различных участках шахты (в прямоугольных рамках).

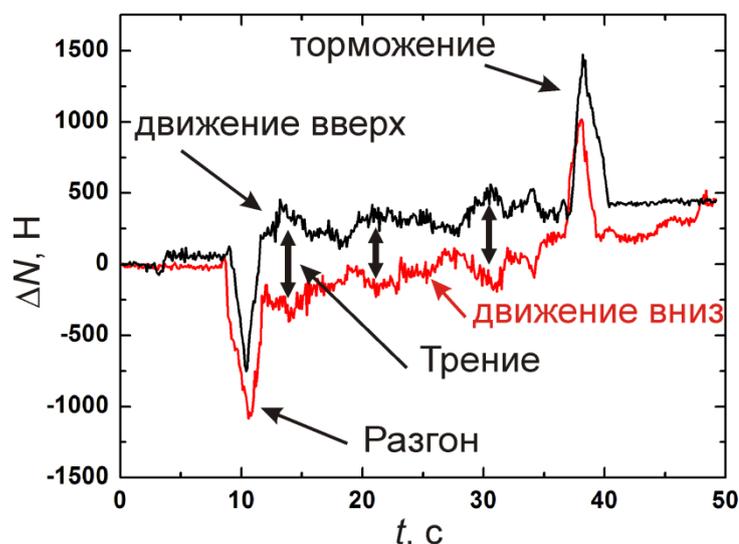


Рисунок 8.6.8 — Временные диаграммы показаний датчика деформации при движении пустой кабины с 1 этажа на 9 этаж без остановок (сплошная кривая) и с обратно с 9 этажа на 1 этаж также без остановок (штриховая кривая). Лифт грузоподъёмностью 400 кг со скоростью равномерного движения 1 м/с

На рисунке 8.6.9 показана диаграмма показаний датчика для лифта грузоподъёмностью 400 кг в 14-этажном доме со скоростью равномерного движения 1 м/с.

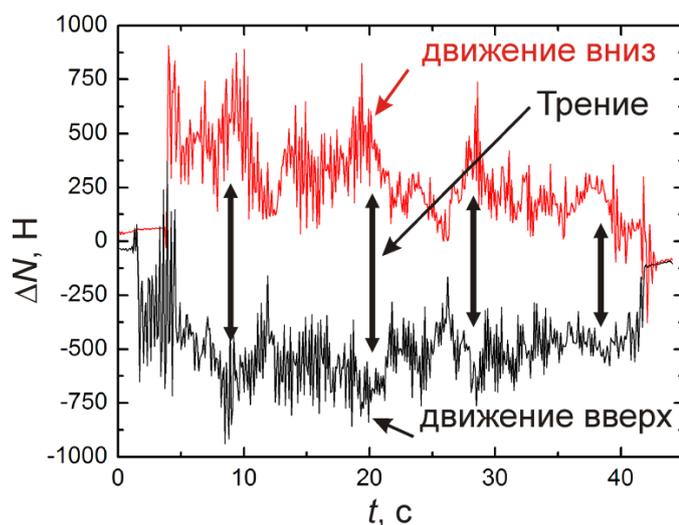


Рисунок 8.6.9 — Временные диаграммы показаний датчика деформации для другого лифта грузоподъёмностью 400 кг в 14-этажном доме со скоростью равномерного движения 1 м/с при движении пустой кабины с 1 этажа на 14 этаж без остановок (сплошная кривая) и с обратно с 14 этажа на 1 этаж также без остановок (штриховая кривая)

На данной диаграмме отсутствуют участки разгона и торможения, что связано с равенством масс кабины и противовеса (см. выражение (8.6.2)). Тем не менее, повышенное трение по направляющим надежно фиксируется как разность сигнала при движении кабины вверх и вниз. Сила трения для данной сборки лифта достигает 750 Н. Кроме того, амплитуда шумовой дорожки при движущейся кабине существенно больше по сравнению с рисунками 8.6.7 и 8.6.8, что свидетельствует о значительных вибрациях кабины. На основе статистического анализа амплитуды вибраций может быть выработан критерий допустимых значений вибраций, превышение которых может фиксировать датчик, и блок обработки сигнала будет выдавать соответствующий информационный сигнал.

Описанный способ контроля позволяет контролировать не только качество монтажа направляющих, но контролировать степень загрузки кабины лифта, что является необходимым условием эксплуатации лифта. Действительно, при входе или выходе людей из кабины меняется её вес (P_1), что согласно выражению (8.6.1) приводит к изменению силы F и, следовательно, к изменению силы реакции опоры N , которая приводит к деформации рамы лебедки, на которой установлен датчик. Данный способ контроля степени загрузки лифта подтверждается рисунками 8.6.10 и 8.6.11. На рисунке 8.6.10 показана временная диаграмма показаний датчика деформации, установленного на раме лебедки лифта грузоподъемностью 630 кг, при пятикратном входе и выходе в кабину человека массой 60 кг. Величина сигнала датчика откалибрована в Ньютонах.

На рисунке 8.6.11 показана диаграмма показаний датчика (в Ньютонах) при загрузке пустой кабины калиброванными весами по 50 кг до общего веса 500 кг. В момент установки груза в кабину наблюдаются всплески сигнала. Показания датчика, соответствующие стационарному состоянию после установки очередного груза, показаны стрелками. Из рисунков видно, что изменение веса кабины надежно регистрируется данным способом. На сегодняшний день наиболее распространенным способом контроля загрузки лифта является

установка нескольких датчиков деформации под полом кабины, что требует введения в конструкцию кабины дополнительных узлов для крепления датчиков.

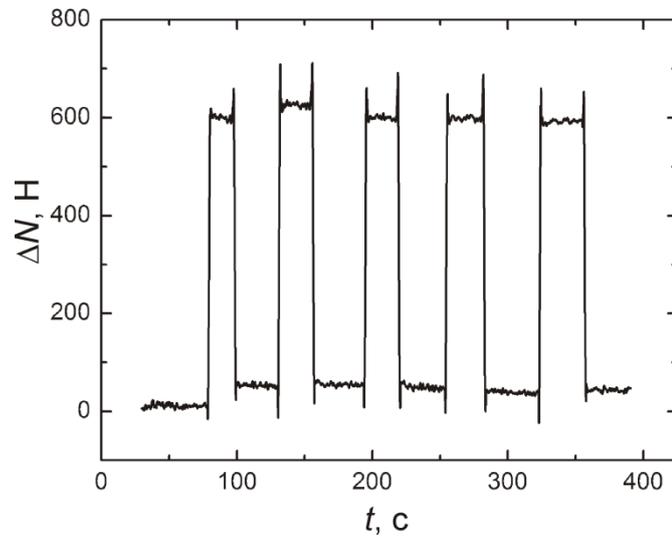


Рисунок 8.6.10 — Временная диаграмма показаний датчика деформации, установленного на раме лебедки лифта грузоподъёмностью 630 кг, при пятикратном входе и выходе в кабину человека массой 60 кг

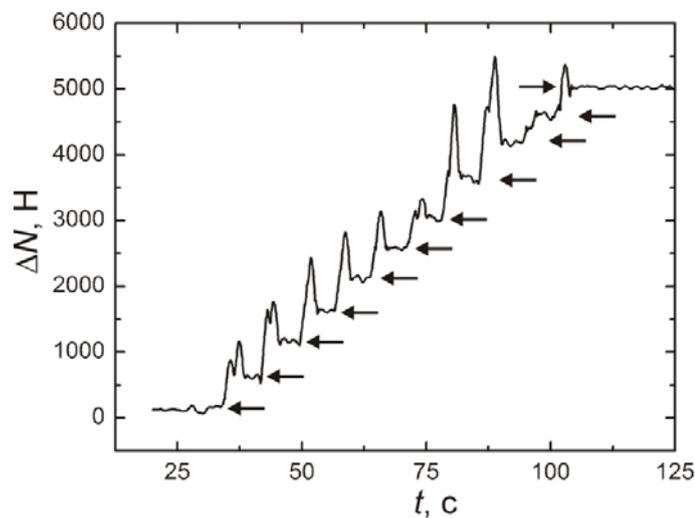


Рисунок 8.6.11 — Временная диаграмма показаний датчика при загрузке пустой кабины калиброванными весами по 50 кг до общего веса 500 кг

Еще одной функцией описанного метода является возможность предотвращения аварийных ситуаций [239]. Если в процессе движения кабины сила трения по разным причинам вдруг начинает непредсказуемо и быстро

возрастать, то становится велика вероятность аварийной остановки (заклинивания) кабины. При этом канаты, двигатель лебедки и другие механизмы лифта испытывают сверхнормативные нагрузки, которые могут привести к выходу их из строя. Ситуация подобного типа демонстрируется диаграммой, полученной при движении кабины лифта грузоподъемностью 500 кг (рис. 8.6.12).

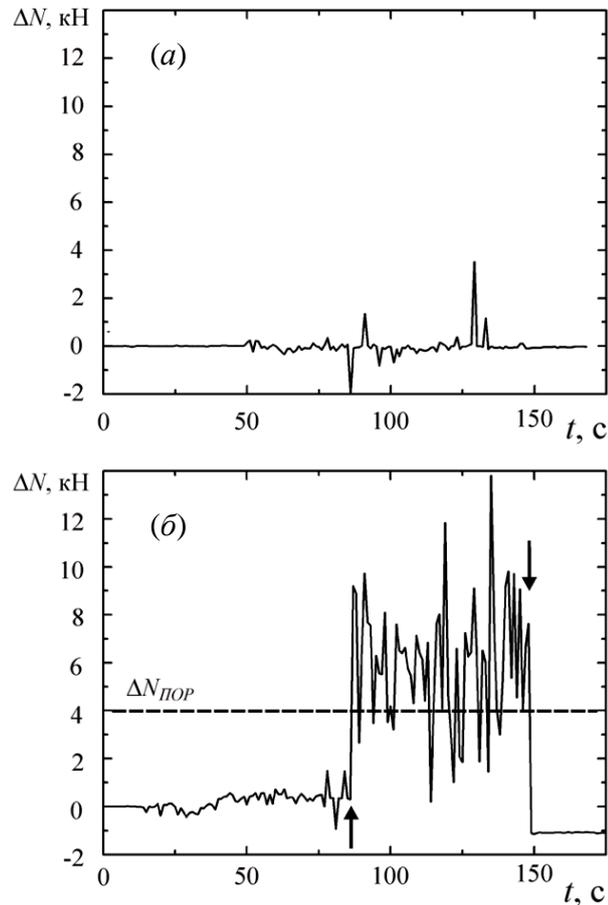


Рисунок 8.6.12 — Временные диаграммы показаний датчика деформации, установленного на раму лебедки лифта

(а) при нормальном движении кабины лифта с одного этажа на другой,

(б) при аварийной остановке в результате заклинивания кабины в направляющих

На рисунке 8.6.12, а показана диаграмма выходного сигнала датчика при нормальном движении кабины лифта с одного этажа на другой. На рисунке 8.6.12, б — диаграмма сигнала, когда кабина начинает цеплять направляющие.

Цепляние за направляющие начинается примерно с момента $t = 85$ секунд (отметка вертикальной стрелкой вверх) и далее при $t = 150$ секунд (отметка вертикальной стрелкой вниз) лифт аварийно останавливается. Таким образом, в течение примерно 65 секунд конструкция лифта испытывала повышенные нагрузки, что отражено в диаграмме. Так как сила трения непрерывно регистрируется датчиком деформации, установленным на раме лебедки, то возможно задать такое пороговое значение сигнала $\Delta N_{\text{пор}}$ (штриховая линия на рисунке 8.6.12, б), при превышении которого система управления лифтом автоматически отключает двигатель, не допуская запредельных перегрузок.

Таким образом, пьезооптический датчик деформации сочетает в себе миниатюрность и высокую чувствительность, что открывает новые возможности для использования в промышленности. Экспериментальные результаты подтверждают возможность использования только одного датчика для контроля технического состояния направляющих лифта. Датчик и метод могут быть применены во всех случаях, когда используются лебедочные механизмы, например, в лифтах для шахт, в эскалаторах, движущихся дорожках, транспортерах, подъемных кранах и т. п.

Данные исследования проведены в рамках опытно-конструкторских работ, выполняемых ООО «Фирма ПОДИЙ», Москва, генеральный директор А. В. Поярков, которому автор выражает особую признательность за постоянное внимание и стимулирование работы [252]. Автор признателен сотрудникам «Фирмы ПОДИЙ» Баракову Владимиру Николаевичу, Маслову Олегу Петровичу, Шатову Владимиру Александровичу, Емельянову Александру Николаевичу и другим за плодотворное сотрудничество. Автор выражает благодарность сотрудникам ОАО «Могилевлифтмаш» (г. Могилев, Республика Беларусь), ОАО «Щербинский лифтостроительный завод» (г. Москва), «Лифтстрой—С» и «Лифтстрой—Сервис» (г. Новосибирск) за оказание технической поддержки при проведении экспериментальных работ и обсуждении результатов.

ВЫВОДЫ К ГЛАВЕ 8

1. Исследованы экспериментальные образцы ТГц-детекторов. Экспериментально полученные значение минимальной обнаруживаемой плотности мощности $2,5 \times 10^{-5}$ Вт/см² на частоте 1 Гц соответствует лучшим современным тепловым детекторам.
2. Проведены все виды испытаний датчиков деформаций согласно техническим условиям.
3. Все виды датчиков продемонстрировали чувствительность к деформации значительно выше, по сравнению с тензорезисторными датчиками и датчиками на других принципах.
4. В разработанных датчиках деформации отсутствует такой негативный эффект, как гистерезис, присущий тензорезисторным датчикам.
5. С 2010 года опытные образцы датчиков эксплуатируются на лифтах в жилых домах г. Москвы и в административном корпусе ОАО «Могилевлифтмаш» (г. Могилев) без замечаний.
6. С помощью разработанного датчика и метода контроля движения подъемников продемонстрирована возможность контроля важнейших параметров движения лифта, которые ранее не контролировались:
 - параметров комфортности поездки на лифте согласно Международному стандарту ISO 18738-1:2012 (E): ускорение, торможение, рывки, величина трения и вибраций.
 - степени загрузки кабины лифта для введения обратной связи в управлении частотным преобразователем двигателя лебедки с целью экономии электроэнергии, снижения износа, предотвращения перегрузок, продления срока службы лебёдки.
 - наступление предаварийных ситуаций.
7. Разработанный пьезооптический преобразователь внедрен в производство промышленных датчиков деформации нового поколения в ООО «Фирма ПОДИЙ».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проанализированы известные схемотехнические решения современных оптико-электронных приборов и систем для регистрации электромагнитного излучения в дальнем ИК-диапазоне, а так же для измерения деформаций. Обобщены результаты проведённых исследований, направленных на создание новых схемотехнических и технологических решений оптико-электронных систем, детально исследованы происходящие в них физические процессы. В результате, выполненные исследования позволили создать специализированные оптико-электронные устройства для регистрации электромагнитного излучения в диапазонах длин волн $\lambda \gtrsim 300$ мкм, а также пьезооптические преобразователи для измерения механических напряжений с высокой чувствительностью в большом динамическом диапазоне, использующие оптические эффекты, связанные с взаимодействием поляризованного излучения с веществом, и обладающие лучшими техническими и эксплуатационными параметрами по сравнению с существующими аналогами.

Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом.

1) Разработан принципиально новый тип детекторов электромагнитного излучения для ТГц-части оптического диапазона на основе конвертера ТГц-излучения в более коротковолновое тепловое излучение. При этом толщина конвертера много меньше ($< \lambda/50$) рабочей длины волны ТГц-излучения, что обеспечивает его низкую теплоемкость и, тем самым, режим реального времени работы приемника. В ходе работы:

- разработана методика получения тонкого эмиссионного слоя для ТГц-ИК-конвертера из графитосодержащего материала толщиной не более 40 мкм и коэффициентом эмиссии не менее 0,9;
- разработанная методика лазерной резки структуры ТГц-ИК-конвертера, содержащего материалы с сильно отличающимися оптическими и теплофизическими параметрами, позволяет изготавливать сквозные разрезы, не

нарушающие целостность структуры конвертера, но существенно снижающие эффект расплывание изображения;

- методами численного моделирования исследованы теплофизические процессы в ТГц-ИК-конвертере, показано, что эффективность конверсии ТГц-излучения в средневолновое тепловое может превышать 80 %;
- установлена линейность зависимости быстродействия и чувствительности приемника от толщины ТГц-ИК-конвертера, что указывает конкретный путь для улучшения его параметров – уменьшение собственной толщины;
- изготовлены экспериментальные образцы ТГц-детекторов и исследованы их характеристики, при этом экспериментально полученные значение минимальной обнаруживаемой плотности мощности $2,5 \times 10^{-5}$ Вт/см² на частоте 1 Гц соответствует лучшим современным тепловым детекторам;
- экспериментально подтверждено, что в одном устройстве можно одновременно регистрировать ТГц-излучение с пространственным разрешением, спектральной и поляризационной селективностью. При этом размерность матрицы может достигать 500×500 , спектральное разрешение – $\Delta\lambda/\lambda < 0,05$, поляризационное – более 20 дБ;
- на основе разработанного ТГц-детектора предложен прототип компактного ($120 \times 120 \times 250$ мм, массой менее 2 кг) носимого/стационарного дистанционного обнаружителя скрытых (замаскированных) объектов;
- созданы одиночные пироэлектрические детекторы со спектральной чувствительностью в диапазоне 0,4–2500 мкм, вольт-ваттной чувствительностью $> 10^5$ В/Вт, полосой пропускания до 500 Гц.

2) Разработаны схемотехнические основы создания высокочувствительных пьезооптических преобразователей для датчиков механических напряжений. Экспериментально показано, что такие датчики обладают:

- отсутствием гистерезиса в пределах $\approx 1,7 \times 10^{-5}$ от номинальной нагрузки;
- высокой чувствительностью к механическим напряжениям, существенно превышающей чувствительность тензорезисторных датчиков и позволяющей

регистрировать величину силы менее 3×10^{-4} Н, с крутизной преобразования ≈ 440 мкА/Н и ≈ 37 мкА/нм;

- широким динамическим диапазоном, вплоть до 6×10^4 ;
- устойчивостью к перегрузкам;
- новыми функциональными возможностями, соответствующими чувствительности к относительным деформациям менее 10^{-9} ; указанная чувствительность документально подтверждена испытаниями в РОСТЕСТе, сертифицированной калибровочной лаборатории Trescal (г. Детройт, США) и других испытательных лабораториях.

Разработаны семейства промышленных датчиков деформации: серии УПС-10 и УПС-12 на основе нагрузочных элементов в виде пластины, серии УПС-15, УКЗК-15, УПС-17 на основе унифицированного пьезооптического преобразователя и адаптивных элементов различных конструкций. Датчики серии УПС-17 обладают более высокой чувствительностью и стабильностью параметров по сравнению с предыдущими модификациями.

Таким образом, подводя общие итоги, можно констатировать, что цель работы достигнута и все вытекающие из нее задачи решены. На современном этапе развития науки, техники и технологий в России они соответствуют Указу Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. № 899 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации» (в редакции Указа Президента Российской Федерации от 16.12.2015 г. № 623). Поэтому материалы, представленные в диссертационной работе, автор рассматривает как изложение новых научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, что отвечает требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней» утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЧТ	– абсолютно черное тело
АЧХ	– амплитудно-частотная характеристика
ВОС	– волоконно-оптические сенсоры
ДНК	– дезоксирибонуклеиновая кислота
ИК	– инфракрасный
КМОП	– комплементарная структура металл-оксид-полупроводник
ЛОВ	– лампа обратной волны
ММ	– миллиметровый
МФПУ	– матричное фотоприёмное устройство
МЭМС	– микро электромеханические системы
НКУ	– нормальные климатические условия
ОАП	– оптико-акустический приёмник
ПВт	– преобразователь вторичный
ПЗС	– прибор с зарядовой связью
ПП	– пьезооптический преобразователь
ППн	– полипропилен
ППр	– преобразователь первичный
РКП	– рабочий коэффициент преобразования
СВЧ	– сверхвысокочастотный
СД	– светодиод
ТГц	– терагерцовый
ТАДФ	– тетрааминодифенил
УПС	– устройство преобразования сигналов
ФЭ	– фотоупругий элемент

ЧИП	– частотно избирательная поверхность
FFT	– Fast Fourier Transformation, быстрое преобразование Фурье
GF	– gauge factor, коэффициент тензочувствительности
HDPE	– high-density polyethylene
HEB	– hot electron bolometer, болометры на горячих электронах
NEP	– noise equivalent power, мощность эквивалентная шуму
NIST	– National Institute of Standards and Technology
NETD	– noise equivalent temperature difference, разница температуры, эквивалентная шуму
OIML	– International Organization of Legal Metrology
PTFE	– polytetrafluoroethylene, политетрафторэтилен, фторопласт
SIS	– superconductor-insulator-superconductor, структура сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник
TPX™	– polymethylpentene, полиметилпентен

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

-
1. Основы оптики. Борн М., Вольф Э., изд. 2-е. Перевод с английского. Главная редакция физ.-мат. литературы изд-ва «Наука», 1973.— 721 С.: ил.
 - 2 Чугуй Ю.В. Оптические информационные технологии для промышленных и научных применений // Вычислительные технологии.— 2013.— Т. 18, № 1.— С. 68–76.
 - 3 Чугуй Ю.В. Трехмерные оптико-электронные измерительные системы и лазерные технологии для научных и промышленных применений // Автометрия.— 2015.— Т. 51, № 4.— С. 76–91.
 - 4 Chugui Y.V., Verkhoglyad A.G., Zavyalov P.S., Sysoev E.V., Kulikov R.V., Vykhristyuk I.A., Zavyalova M.A., Poleshchuk A.G., Korolkov V.P. Optical Measuring and Laser Technologies for Scientific and Industrial Applications // International Journal of Automation Technology.— 2015.— V. 9, N. 5.— P. 515–524.
 - 5 Сысоев Е.В., Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Широков В.В. Оптико-электронная система для бесконтактного контроля поверхностных дефектов // Приборы.— 2017.— Т. 204, № 6.— С. 17–20.
 - 6 Выхристюк И.А., Куликов Р.В., Сысоев Е.В. Повышение достоверности интерференционных измерений при использовании нескольких длин волн // Автометрия.— 2018.— № 5.— С. 64–72.
 - 7 Завьялов П.С., Власов Е.В., Гущина А.А., Соколов Е.В., Сартаков В.Ю. Оптико-электронная система бесконтактного контроля геометрических параметров бронебойных сердечников и пуль // Датчики и системы.— 2018.— № 10.— С. 34–39.
 - 8 Завьялов П.С., Верхогляд А.Г., Чугуй Ю.В. Разработки КТИ НП СО РАН для научных и промышленных применений // Научное приборостроение – современное состояние и перспективы развития: II всеросс. науч.-практ. конф. (Казань, 4-7 июня 2018 г.): сб. матер.— 2018.— С. 32–34.

-
- 9 Двойнишников С.В., Меледин В.Г., Павлов В.А. Высокоскоростная обработка фазовых изображений с использованием параллельных вычислений // Автометрия.— 2017.— Т.53, №2.— С. 56–62.
- 10 Двойнишников С.В., Аникин Ю.А., Кабардин И.К., Куликов Д.В., Меледин В.Г. Оптоэлектронный метод бесконтактного измерения профиля поверхности крупногабаритных объектов сложной формы // Измерительная техника.— 2016.— №1.— С. 17–22.
11. Аззам Р. Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. Пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР А. В. Ржанова и К. К. Свиташева. М.: Мир, 1981.— 583 с.: ил.
12. Handbook of ellipsometry / Edited by H. G. Tompkins and E. A. Irene.— William Andrew Inc., Springer-Verlag GmbH & Co. KG.— 2005.— 902 pages. Andrew Inc., Springer-Verlag GmbH & Co. KG.— 2005.— 902 pages.
- 13 Эллипсометрический датчик (изобретение): пат. 2157513 Рос. Федерация / Федоринин В.Н.; заявл. 05.03.1999; опубл. 10.10.2000, Бюл. № 28.— 5 с.: ил.,
- 14 Fedorinin V. N., Paulish A. G., Levina A. S. Optoelectronics in Measurement of Physical Magnitudes // Nova Science Publishers, Inc. 2011, ISBN: 978-1-61761-094-3, 63p.
15. Visnapuu M.L., Duzdevich D., Greene E. C. In Modern Research and Educational Topics in Microscopy; Microscopy Book Series N3 FORMATEX: Badajoz, Spain.— 2007.— Vol. 1.— P. 297-308.
16. Васильева Л. Л., Кушкова А. С., Репинский С. М., Федоринин В. Н. Газохроматографическое определение углеродсодержащих примесей в высокочистой сере // Журнал аналитической химии.— 2000.— Т. 55, вып.7.— С. 764-769.
17. Levina A., Pyshnaya I., Repkova M., Rar V., Zarytova V. Oligonucleotide probes containing polylysine residues for fabrication of DNA chips on various solid surfaces // Biotechnol. J.— 2007.— Vol. 2.— P. 879-885.

-
18. Brenner N. and Rader C., A New Principle for Fast Fourier Transformation // *IEEE Acoustics, Speech & Signal Processing*.— 1976.— Vol. 24.— P. 264-266.
 19. Guo H., Burrus C. S., and Sitton G. A. The Quick Discrete Fourier Transform // *Proc. IEEE Conf. Acoust. Speech and Sig. Processing (ICASSP)*.— 1994.— Vol. 3.— P. 445–448.
 20. Rokhlin V. and Tygert M. Fast algorithms for spherical harmonic expansions // *SIAM J. Sci. Computing*, 2006.— Vol. 27, No.6.— P. 1903-1928.
 21. Hall N.A., Okandan M., Degertekin F.L. Surface and Bulk-Silicon-Micromachined Optical Displacement Sensor Fabricated With the SwIFT-Lite™ Process // *Journal of Microelectromechanical Systems*.— Aug. 2006.— Vol. 15, No.4.— P. 770-776.
 22. Ko W.H., Guo J., Xuesong Ye, Zhang R., Young D.J., Megerian C.A. MEMS acoustic sensors for totally implantable hearing aid systems // *IEEE International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS*.— May 2008.— P. 1812-1817.
 - 23 Lee J., Kim H.J., Lee S.Q., Lee S.K., Ko S.C., Park K.H. Surface-micromachined MEMS acoustic sensor with bottom electrode anchor // *Electronics Letters*.— April 2008.— Vol. 44, No.9.— P. 576 – 577.
 24. Schock S.G., Tellier A., Wulf J., Sara J., Ericksen M. Buried object scanning sonar // *IEEE J. Oceanic Engineering*.— Oct. 2001.— Vol. 26, No.4, P. 677-689.
 25. Vadus Joseph R. Contributions to Advancement of Underwater Technology // *Oceanic Engineering Society Newsletter*.— 2002.— Vol. 37, No.3.
 26. Pinto M. A. High Resolution Seafloor Imaging with Synthetic Aperture Sonar // *Oceanic Engineering Society Newsletter*.— 2002.— Vol. 37, No.3.
 27. Campanella S., Phyfe D. Application of a model of the analog ear to speech signal analysis // *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*.— Mar 1968.— Vol. 16, No.1.— P. 26–35.
 - 28 Федоринин В. Н. Микрооптоэлектромеханические системы для приемников инфракрасного диапазона волн // *Нано- и микросистемная техника*.— 2005.— вып. 1.— С. 11-13.

-
29. Гельфанд А.В., Паулиш А. Г., Федоринин В. Н. Неохлаждаемый матричный приемник ИК-излучения на основе термопневматического микромеханического преобразователя с оптоэлектронной системой считывания // Прикладная физика.— 2009.— №2.— С.109-114.
 30. Gelfand A. V., Fedorinin V. N., Paulish A. G. Uncooled matrix IR detector based on optoacoustic cells and optoelectronic reading system // Optical Memory & Neural Networks (Information Optics).— 2009.— Vol. 18, No.1.— P. 25-28.
 31. Паулиш А. Г., Дмитриев А. К., Гельфанд А. В., Пыргаева С. М. Исследование спектральных характеристик поглощения ИК-излучения в плёнках диоксида кремния для детекторов теплового излучения // Автометрия.— 2019.— Т. 55, № 5.— С. 101–106. DOI: 10.15372/AUT20190514.
 32. Fedorinin V. N., Paulish A. G. Optical readout system for membrane deformation measurements in matrix optoacoustic infrared imager // Measurement Science and Technology.— 2010.— Vol. 21, N5.— P. 054015, 5pp.
 33. Sizov F. F. Terahertz radiation detectors: State-of-the art // Semicond. Sci. Technol.— 2018.— 123001 [26pp]. <https://doi.org/10.1088/1361-6641/aae473>.
 34. Гибин И. С., Котляр П. Е. Приемники излучения терагерцового диапазона (обзор) // Успехи прикладной физики. 2018.— Т. 6, № 2.— С. 117–129.
 35. Handbook of Terahertz Technologies: Devices and Applications, ed. by Song H-J, and Nagarsume T. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.— 612 P. ISBN-10: 9814613088.
 36. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays // Optoelectronics Review.— 2011.— V.19, No.3.— P.346-404.
 37. Войцеховский А.В., Кульчицкий Н.А., Мельников А.А., Мальцев П.П., Несмелов С.Н. Детекторы терагерцового излучения // Наноинженерия, 2012.— №11.— С. 7–17.
 38. Барко А. В., Войцеховский А. В., Левашкин А. Г., Коханенко А. П. Расчет параметров детекторов терагерцового диапазона на основе системы

-
- иммерсионная линза – планарная антенна – полупроводниковый датчик // Известия вузов. Физика.— 2015.— Т. 58, №8/2.— С. 283–286.
39. Sizov F. THz radiation sensors // *Optoelectronics Review*, 2010.— V. 18, № 1.— P. 10–36.
40. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors // *Progress in Quantum Electronics*, 2010.— V. 34.— P. 278–347.
41. Исаев В.М., Кабанов И.Н., Комаров В.В., Мещанов В.П. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона // Доклады ТУСУРа, 2014.—№ 4 (34).— С. 5–24.
42. Ермолаев, Д. М. Исследование детектирования терагерцового излучения короткопериодными массивами полевых транзисторов на основе наногетероструктур AlGaAs/InGaAs/GaAs:.. диссертации кандидата физ.-мат. Наук: 05.27.01 / Ермолаев Денис Михайлович —Черноголовка, 2015.— 141 с.
- 43 Агеев Б. Г., Климкин А. В., Куряк А. Н., Осипов К. Ю., Пономарев Ю. Н. Дистанционный детектор опасных веществ на основе перестраиваемого $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера // *Оптика атмосферы и океана*.— 2017.— Т. 30, №3.— С. 204–208.
- 44 Matvienko G. G., Perepalov V. I., Ponomarev Yu. N., Sinitza L. N., Cherepanov. High-resolution molecular spectroscopy in Tomsk: Establishment, Development, and Current status // *Russian Physics Journal*.— V. 59, Issue 4.— P. 490–501.
- 45 Айрапетян В. С. Лазерное дистанционное зондирование взрывчатых веществ методом дифференциального поглощения и рассеяния // *Журнал прикладной спектроскопии*.— 2017.— Т. 84, №6.— С. 987–992.
46. Klimov A., Shumsky V., Kubarev V. Terahertz sensitivity of $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ // *Ferroelectrics*. 2007.— V. 347.— P. 111-119. DOI: 10.1080/00150190601187252.
47. Khokhlov D. R. Ivanchik I. I., Raines S. N., Watson D. M., and Pipher J. L. Performance and spectral response of $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ far-infrared photodetectors // *Appl. Phys. Lett.* 2000.— V. 76.— P. 2835–2837. DOI: 10.1063/1.126489.

-
48. Сизов Ф. Ф., Апатская М. В., Гуменюк-Сычевская Ж. В., Забудский В. В. И др. Многоэлементные приёмники терагерцового излучения на HgCdTe // Прикладная физика. 2011.— №2.— С. 61–66.
49. Жукова Е. С., Горшунов Б. П., Юрьев В. А., Арапкина Л. В., Чиж К. В., Чапнин В. А., Калинушкин В. П., Прохоров А. С., Михайлова Г. Н. Поглощение терагерцового излучения в гетероструктурах Ge/Si(001) с квантовыми точками // Письма в ЖЭТФ. 2010.— Т. 92, № 12.— С. 887–883.
50. Crowe T. W., Bishop W. L., Porterfield D. W., Hesler J. L., Weikle R. M. Opening the terahertz window with integrated diode circuits // IEEE J. Solid.-St. Circ. 2005.— V. 40, Issue 10.— P. 2104–2110. DOI: 10.1109/JSSC.2005.854599.
51. Bozhkov V. G. Semiconductor detector, mixer, and frequency multipliers for the terahertz band // Radiophys. Quantum. El. 2003.— V. 46.— P. 631–656. DOI: 10.1023/b:raqe.0000024993.40125.2b.
52. Piddyahiy V. I., Shulga V. M., Korolev A. M., Myshenko V. V. High doping density Schottky diodes in the 3 mm wavelength cryogenic heterodyne receiver // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2005.— V. 26, Issue 9.— P. 1307–1315.
53. Otani Ch., Ariyoshi S., Matsuo H., Morishima T., Yamashita M., Kawase K., Sato H., Shimizu H. M. Terahertz direct detector using superconductor tunnel junction // Proc. SPIE, Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics III. 2004.— V.— 5354.— P. 86–93.
54. Matsuo H., Nagata H. et al. Performance of SIS photon detectors for superconductive imaging submillimeter-wave camera (SISCAM) // Proc. SPIE. 2006.— V. 6275.— P. 627504. DOI: 10.1117/12.672800.
55. Semenov A., Gol'tsman G. N., Sobolewski R. Hot-electron effect in semiconductors and its application for radiation sensors // LLE Review. 2001.— V. 87.— P. 134–143.
56. Mees J., Nahum M., Richard P. New designs for antenna-coupled superconductor bolometers // Appl. Phys. Lett.— 1991.— M. 59.— P. 2329–2331.

-
57. Yao, M., Li, J., Liu, D.C., Li, S., Shi, S., Dmitriev, P., Fominsky, M., Koshlets, V. Development of a 0.85 THz Nb-AlN-NbN superconductor-insulator-superconductor mixer. // Proc. 10th Global Symposium on Millimeter-Waves. 2017.— P. 117–119.
- 58 Pyroelectric Array Cameras: Pyrocam IV Series, Ophir-Spiricon Group, LLC [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ophiropt.com/laser--measurement/beam-profilers/products/Beam-Profiling/Camera-Profiling-with-BeamGage/Pyrocam-IV>.
- 59 Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev B. A., Kulipanov G. N., Vinokurov N. A. // Appl. Phys. Lett.— 2008.— V.92.— P.131116. DOI: 10.1063/1.2898138.
60. Техника спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра / Д. Х. Мартин, П. Л. Ричардс, Г. Р. Уилкинсон; пер. с англ. под ред. д-ра физ.-мат. наук Т. М. Лифшица.— М.: Мир, 1970.— 399 с.: ил. [Пер. с англ.: Spectroscopic techniques for far-infrared, submillimeter and millimeter waves, ed. by D.H. Martin (Amsterdam, NorthHolland Publishing Company, 1967)].
61. THz detector – Golay cells. Microtech Instruments, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mtinstruments.com>.
62. Thermal Image Plates, Macken Instruments Incorporated. /www.macken.com.
63. Экспериментальная механика: в 2-х книгах: Книга 1, Пер. с Англ./Под ред. А. Кобаяси.— М. Мир, 1990.— 616 с., ил.
64. Агейкин Д.И., Костина А.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования.— М.: Машиностроение, 1965.— 928 с.
65. Испытательная техника: Справочник: В 2 кн / Под ред. В.В.Клюева.— М.: Машиностроение, 1982, Кн.1.— 528с. Кн.2.—560 с.
66. Калявин В.П., Мозгалеvский А.В. Технические средства диагностирования.— Л. Судостроение, 1984.— 210 с.
67. Куликовский К.Л., Купер В.Я. Методы и средства измерений.— М.: Энергоатомиздат, 1986.— 448 с.

-
68. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник. В 2-х кн. /Под ред. В.В.Клюева.— М.: Машиностроение, 1986. Кн.1— 431 с. Кн.2.— 352 с.
69. Технические средства диагностирования: Справочник / Под ред. В.В.Клюева.—М.:Машиностроение, 1989.— 672 с.
70. Цапенко М.П. Измерительные информационные системы.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 40 с.
71. Блатт Фр. Дж., Физика электронной проводимости в твердых телах, пер. с англ., М., 1971.
72. Турчин А.М. и др. Электрические измерения неэлектрических величин.— Л.: Энергия, 1975.— 576 с.
- 73 Эрлер В., Вальтер Л. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами.— М.: Мир, 1974.— 358 с.
74. Neubert H.K.P. Strain Gauges.— London, Macmillan, 1967.— 176 с.
75. [Электронный ресурс]. URL:<http://sensor-sms.ru>, <http://www.metra.ru>.
76. Liao X., Zhang Z., Kang Z., Gao F., Liao Q. and Zhang Y. Ultrasensitive and stretchable resistive strain sensors designed for wearable electronics // *Material Horizons*.— 2017.— Iss. 4.— P. 502–510. DOI: 10.1039/C7MH00071E.
77. Ha S.H., Ha S.H., Jeon M.B., Cho J.H., Kim J.M. Highly sensitive and selective multidimensional resistive strain sensors based on a stiffness-variant stretchable substrate // *Nanoscale*.— 2018.— Vol. 10, Iss. 11.— P. 5105-5113. DOI: 10.1039/c7nr08118a.
78. Cho J.H., Ha S.H., Kim J.M. Transparent and stretchable strain sensors based on metal nanowire microgrids for human motion monitoring // *Nanotechnology*.— 2018.— Vol. 29, Iss. 15).— P. 155501. DOI: 10.1088/1361-6528/aaabfe.
79. Kim K.K., Hong S., Cho H.M, Lee J., Suh Y.D., Ham J., Ko S.H. Highly sensitive and stretchable multidimensional strain sensor with prestrained anisotropic metal nanowire percolation networks // *Nano Lett.*— 2015.— Vol. 15, Iss. 8.— P. 5240-7. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b01505.

-
80. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т./Ред. совет: В. Н. Челомей (пред.).— М.: Машиностроение, 1981.— Т. 5. Измерения и испытания.— Под ред. М. Д. Генкина. 1981.— 496 с.
81. Брагинский В. Б., Манукин А. Б. Измерение малых сил в физических экспериментах / М.: Наука, 1974.—151 с.: ил.
82. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Москва: Техносфера, 2008.— 198 с.
83. Клекерс Т., Гюнтер Б. Измерение деформаций: Оптоволоконные сенсоры компании НВМ // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008.— №1.— С. 76–78.
- 84 Wei P., Han X., Xia D., Liu T. and Lang H. Novel Fiber-Optic Ring Acoustic Emission Sensor // IEEE Sensors Journal.— 2018.— Vol. 1.— P.215. DOI: 10.3390/s18010215.
85. Wang X., Sun F., Yin G., Wang Y., Liu B., Dong M. Tactile-sensing based on flexible PVDF nanofibers via electrospinning: a Review // Sensors (Basel).— 2018.— Vol. 18, Iss. 2.— P. E330. DOI: 10.3390/s18020330.
- 86 Liang H., Jia P., Liu J., Fang G., Li Z., Hong Y., Liang T. and Xiong J. Diaphragm-free fiber-optic Fabry-Perot interferometric gas pressure sensor for high temperature application // IEEE Sensors Journal.— 2018.— Vol. 18, No. 4.— p.1011.
87. Sbarufatti C., Beligni A., Gilioli A., Ferrario M., Mattarei M., Martinelli M. and Giglio M. //Strain wave acquisition by a fiber optic coherent sensor for impact monitoring // Materials. 2017.— Vol. 10, No. 7.— P.794 (16 pages).
88. Yang N., Su J., Fan Z. and Qiu Q. High precision temperature insensitive strain sensor based on fiber-optic delay // IEEE Sensors Journal.— 2017.— Vol. 17, No. 5.— P. 1005.
- 89 Peled Y., Motil A., Kressel I., Tur M. Monitoring the propagation of mechanical waves using an optic fiber distributed and dynamic strain sensor based on BOTDA // Opt. Express. 2013.— Vol. 21.— P. 10697–10705.

-
90. Wild G., Hinckley S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art // *IEEE Sensors Journal*.— 2008.— Vol. 8.— P. 1184–1193.
 91. Zou L., Bao X., Afshar S. V., and L. Chen Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber // *Optics Letters*.— 2004.— Vol. 29.— P.1485–1487.
 92. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 256 с: ил.
 93. Буймистряк Г.Я. Информационно-измерительная техника и технология на основе волоконно-оптических датчиков и систем.— СПб, ГРОЦ Минатома, 2004. —198 с: ил.
 94. Бейли Д., Райт Э. Волоконная оптика. Теория и практика.— М.: Кудиц-Образ, 2006.— 320 с.
 95. Xiong L., Jiang G., Guo Y., Liu H. A three-dimensional fiber Bragg grating force sensor for robot // *IEEE Sensors Journal*.— 2018.— Vol. 18, Iss. 9.— P. 3632–3639. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2812820.
 96. Drissi-Habti M., Raman V., Khadour A. and Timorian S. Fiber optic sensor embedment study for multi-parameter strain sensing // *IEEE Sensors Journal*.— 2017.— Vol. 17, No. 4.— P.667. DOI: 10.3390/s17040667.
 97. Ржанов А. В. Титанат бария – новый сегнетоэлектрик // *УФН*.— 1949.— Т. 38, вып. 4.— С. 461–489.
 98. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики.— М.: Техносфера, 2006.— 632 с.— (Мир электроники).
 99. Qiu L., Deng X., Yuan S., Huang Y. and Ren Y. Impact monitoring for aircraft smart composite skins based on a lightweight sensor network and characteristic digital sequences // *IEEE Sensors Journal*.— 2018.— Vol. 18, No. 7.— p. 2218 (27 pages). DOI: 10.3390/s18072218.

-
100. de Inestrillas Á. S, Camarena F., Cabo M. B., Barreiro J. M. and Reig A. Design and performance of a metal-shielded piezoelectric sensor // *Sensors*. 2017.— Vol.17, No. 3, P.1284. DOI: 10.3390/s17061284.
 101. Vitola J., Pozo F., Tibaduiza D. A. and Anaya M. Distributed piezoelectric sensor system for damage identification in structures subjected to temperature changes // *IEEE Sensors Journal*.— 2017.— Vol. 17, No. 6, P.1252. DOI: 10.3390/s17061252.
 102. Li M., Cheng W., Chen J., Xie R. and Li X. A high performance piezoelectric sensor for dynamic force monitoring of landslide // *IEEE Sensors Journal*.— 2017.— Vol. 17, No. 2.— P. 394. DOI: 10.3390/s17020394.
 103. Rade D.A., de Albuquerque E.B., Figueira L.C., Carvalho J.C.M. Piezoelectric driving of vibration conveyors: an experimental assessment // *IEEE Sensors Journal*.— 2013.— Vol. 13, No. 7.— P. 9174-9182. DOI: 10.3390/s130709174.
 104. Юдин В. А., Петрокас Л. В. Теория механизмов и машин. Учеб. Пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. И доп.— М., «Высшая школа», 1977.— 527 с.; ил.
 105. Влияние механических, тепловых и электрических воздействий на показания пьезоэлектрических акселерометров / В. П. Дунаевский, М. И. Субботин, А. Н. Вуколов, Ю. М. Козаков.— В кн.: *Вибрационная техника*.— М.: МДНТП, 1976, С. 15–27.
 106. Frocht M. M. Photoelasticity. Wiley-Interscience: New York, 1948, Vol. 2.
 107. Doyle, JF. *Modern experimental stress analysis*; J. Wiley & Sons: Chichester, 2004, P. 158-170.
 108. Хлесин Г.Л. и др. Метод фотоупругости.— М.:Стройиздат, т.2, 1975.— 367 с.
 109. Поляризаторно-оптический метод исследования напряжений, сб.— Л.: Изд-во ЛГУ им. А.А.Жданова, 1966.— 423 с.
 110. Вишневецкий З.Д. Поляризаторно-оптический метод измерения напряжений на натуральных конструктивных элементах. -Заводлаб., 1955, №4, с.471-472.

-
111. Кокер Э., Файлон Л. Оптический метод исследования напряжений.— Л., М.: ОНТИ, 1936.— 634 с.
 112. Слезингер И.И. Пьезооптический акселерометр.— В кн.: Виброметрия.— М.: Знание, 1973.— С.49-51.
 113. Можаяев В. А. Многокомпонентный пьезооптический измерительный преобразователь сил и моментов: дис. ... кандидата технических наук: 05.13.05 / Можаяев Виктор Александрович.— М., 2003.— 180 с.
 114. Nye J. F. Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices. Oxford Science Publication; University Press: Oxford, 1985, 235-258.
 115. Бюргер Х. В кн. Экспериментальная механика: в 2-х книгах: Книга 1. Пер. с англ./Под. Ред. А. Кобаяси.— М.: Мир, 1990.— С. 195-327.
 116. Ахметзянов М. Х. Исследование методом фотоупругих покрытий упругопластического равновесия деталей сложной формы. В кн. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений.— Л.: Изд. ЛГУ, 1966.— С. 196-205.
 117. Ахметзянов М. Х., Применение метода фотоупругих покрытий для определения напряжений и деформаций в гибких плитах и оболочках. Изв. АН СССР, Механ. и машиностр.— 1964.— № 1.— С. 199–201.
 118. Орлов П. И. Основы конструирования. Справочно-методическое пособие в 3-х книгах. Кн. 1. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Машиностроение», 1977.— 623 с.: ил.
 119. Оппель Г. Оптические упругие наклеиваемые тензометры.— В кн.: Проблемы прочности в машиностроении.— М.: Ин-т машиноведения АН СССР, 1962.— с. 31-43.
 120. Теория фотоупругости, перев. с англ., Тимошенко С. П., Гудьер Дж., Главная редакция физ.-мат. литературы изд-ва «Наука».—1975.— 576 стр.: ил.
 121. Photoelastic strain gauge coating: patent 3994598 USA / Reytblatt Z.V., filling date: Sept. 15, 1975, publication date: Nov. 30, 1976.

-
122. Shakerin S., Jensen D. D. Enhancement of mechanics education by means of photoelasticity and finite element method // *International Journal of Mechanical Engineering Education*. 2000.— V. 29, No 4.— P. 307–320.
123. Уилнер Л.Б. Сравнение чувствительности датчиков // *Приборы для научных исследований*.— 1965, №5— с. 116-119.
- 124 Преобразователь терагерцового излучения (варианты) (изобретение): пат. 2447574 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Гельфанд А.В., Кузнецов С.А., Лазорский П.А.; заявл. 16.11.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. №10.— 9 с.: ил. [Электронный ресурс]. http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet
125. Liu X., Starr T., Starr A. F., and Padilla W. J., Infrared Spatial and Frequency Selective Metamaterial with Near-Unity Absorbance // *Phys. Rev. Lett.*— 2010.— V. 104.— P. 207403.
126. Lee Y. P., Rhee J. Y., Yoo Y. J., Kim K. W. *Metamaterials for Perfect Absorption* / Singapore: Springer, Series in Materials Science, 2016.— 176 p.
127. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V., Lazorskiy P. A., Fedorinin V. N. Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging // *Appl. Phys. Lett.*— 2011.— Vol. 99, Issue 2.— P. 023501.
128. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Arzhannikov A.V., Gelfand A. V., Lazorskiy P. A., Fedorinin V. N. THz imaging system based on THz-to-IR converter // *Technisches Messen*.— 2011.— Vol. 78.— Issue 11.— P. 526-532.
129. Munk B. A. *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*. New York: John Wiley & Sons Inc.— 2000.— 410 p.
130. Tao H., Landy N. I., Bingham C. M., Zhang X., Averitt R. D., Padilla W. J. A metamaterial absorber for the terahertz regime: Design, fabrication and characterization // *Opt. Express*. 2008.— V. 16, Issue 10.— P. 7181–7188.
131. Padilla W. J. and Liu X. Perfect electromagnetic absorbers from microwave to optical // *Optical Design & Engineering*, SPIE Newsroom.— 2010.— 3 p. DOI: 10.1117/2.1201009.003137.

-
132. Kuznetsov S. A., Arzhannikov A. V., Kubarev et al. Development and Characterization of Quasi-Optical Mesh Filters and Metastructures for Subterahertz and Terahertz Applications // *Key Engineering Materials*.— 2010.— V. 437.— P. 276–280.
133. Navarro-Cía M., Kuznetsov S. A., Aznabet M., Beruete M., Falcone F. and Ayza M. S., Route for Bulk Millimeter Wave and Terahertz Metamaterial Design // *IEEE Journal of Quantum Electronics*.— 2011.— V. 47, no. 3.— P. 375-385, DOI: 10.1109/JQE.2010.2090512
134. Преобразователь терагерцового излучения (варианты) (изобретение): пат. 2447574 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Гельфанд А.В., Кузнецов С.А., Лазорский П.А.; заявл. 16.11.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. №10.— 9 с.: ил. [Электронный ресурс]. http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet
135. Beruete M., Sorolla M., Marqués R., Baena J. D. and Freire M. Resonance and Cross-Polarization Effects in Conventional and Complementary Split Ring Resonator Periodic Screens // *Electromagnetics*.— 2006.— V. 26, Issue 3–4.— P. 247–260.
136. Bilotti F., Nucci L., Vegni L. An SRR based microwave absorber // *Microwave and Optical Technology Letters*.— 2006.— V. 48, No. 11.— P. 2171-2175.
137. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V., Astafiev M. A., Arzhannikov A. V., Fedorinin V. N., Thumm M. K. A. Extremely thin metamaterial absorbers for subterahertz waves: from fundamentals towards applications in uncooled bolometric sensors // *Conference SPIE Photonics Europe 2012, Brussels 16-20 April 2012*, [8423-20].
138. Yemelyanov K. M., Lin S.-S., Pugh E. N., Jr., Engheta N. Adaptive Algorithms for 2-Channel Polarization Sensing under Various Polarization Statistics with Non-Uniform Distributions // *Applied Optics*, special issue on “Polarization Imaging and Remote Sensing.”— 2006.— V. 45, Issue 22.— P. 5504–5520.

-
139. Silverberg R.F., Ali S., Bier A., Campano B., Chen T.C., Cheng E.S., Cottingham D.A., Crawford T.M., Downes T., Finkbeiner F.M., Fixsen D.J., Logan D., Meyer S.S., O'Dell C., Perera T., Sharp E.H., Timbie P.T., Wilson G.W. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*.— 2004.— V. 520.— P. 421–423.
- 140 Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V., Lazorskiy P. A., Fedorinin V. N. Matrix structure of metamaterial absorbers for multispectral terahertz imaging // *Progress In Electromagnetics Research*.— 2012.— Vol. 122.— P. 93-103.
141. Матричный преобразователь терагерцового излучения (варианты) (изобретение): пат. 2482527 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Кузнецов С. А., Гельфанд А. В., Федоринин В. Н.; заявл. 24.08.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. №14.— 15 с.: ил. [Электронный ресурс].
http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet
142. Паулиш А.Г., Загубисало П.С., Кузнецов С.А., Аржанников А.В., Тумм М.К. А. Моделирование теплофизических процессов в визуализаторе суб-терагерцового излучения, основанном на тонкоплёночном конвертере из метаматериала // *Изв. вузов. Радиофизика*.— 2013.— Т. LVI.— №1.— С. 22-38.
143. Paulish A. G., Zagubisalo P. S., Kuznetsov S. A. Simulation of Thermal Processes in Metamaterial MM-to-IR Converter for MM-wave Imager // *Journal of Physics: Conference Series*.— 2014.— Vol. 490.— Issue 1.— P. 012174.
144. Paulish A. G., Zagubisalo P. S., Kuznetsov S. A. Simulation of thermal processes in metamaterial millimeter-wave to infrared converter for millimeter-wave imager // *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*.— 2014.— Vol. 05.— P. 1441009 [9 pages].
145. Загубисало П. С., Паулиш А. Г. Моделирование теплофизических процессов в тонкоплёночном конвертере миллиметрового излучения в инфракрасное с целью определения параметров визуализатора миллиметрового излучения // *Сборник материалов Международной научной конференции «СибОптика–2013». IX Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО–СИБИРЬ–2013»*. Новосибирск: СГГА, 2013.— Т. 1.— С. 57–61.

-
146. Паулиш А. Г., Загубисало П. С., Кузнецов С. А.. Моделирование теплофизических процессов в конвертере субтерагерцового излучения в инфракрасное // Тезисы Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2015», Новосибирск, 12-16 октября 2015 г., С. 109.
147. Паулиш А. Г. Сравнительный анализ параметров детекторов терагерцового излучения на основе ТГц-ИК конвертера и матрицы ячеек Голея // Труды XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22-25 мая 2012, «НПО ОРИОН», Москва, С.174-176.
148. Паулиш А. Г., Кузнецов С. А., Лоншаков Е. А., Аржанников А. В., Тумм М. К. А., Вергилес С. А., Гельфанд А.В., Лазорский П. А., Новгородов Н. Б., Турбин А. В., Хрящев С.В., Федоринин В.Н. Конвертер терагерцового излучения в инфракрасное на основе метаматериалов для детекторов терагерцового диапазона // Труды XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22-25 мая 2012, «НПО ОРИОН», Москва С.16-18.
149. Паулиш А. Г., Лоншаков Е. А. Прецизионная лазерная резка в технологии ТГц-ИК конвертора // Труды XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22-25 мая 2012, «НПО ОРИОН», Москва, С.173-174.
150. Ражев А. М. Оптические технологии с использованием импульсных УФ лазеров для микроэлектроники и медицины // ИНТЕРЭКСПО ГЕО-СИБИРЬ, 2012.— Т.1, вып.5.— С. 187-192.
151. Паулиш А. Г., Хрящев С.В. Оптические элементы для визуализатора терагерцового излучения с использованием ТГц-ИК конвертера на основе метаматериалов // Труды XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22-25 мая 2012, «НПО ОРИОН», Москва, С.176-178.

-
152. Паулиш А. Г., Хрящев С.В. Оптические элементы для терагерцовой камеры на основе ТГц-Ик конвертера // Международная конференция «Прикладная оптика-2012» Санкт-Петербург, 15-19 октября 2012 года, стр. 107-111.
153. TeraView Company. [Электронный ресурс]: <http://www.teraview.com>.
154. Federici J. F., Schulkin B., Huang F., Gary D., Barat R., Oliveira F. and Zimdars D. THz imaging and sensing for security applications—explosives, weapons and drugs // *Semicond. Sci. Technol.*— 2005.— Vol. 20.— S266-S280.
155. Watanabe Y., Kawase K., Ikari T., Ito H., Ishikawa Y., and Minamide H. Spatial Pattern Separation of Chemicals and Frequency-Independent Components by Terahertz Spectroscopic Imaging // *Applied Optics.*— 2003.— Vol. 42.— P. 5744-5748.
156. Kawase K., Ogawa Y. and Watanabe Yuki. Component pattern analysis of chemicals using multispectral THz imaging system // *Proc. SPIE.*— 2004.— Vol. 5354.— P. 63-70.
157. Rogalski A. *Infrared Detectors / Antoni Rogalski.* — 2nd ed. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group an informa business, 2011.— 876 p.
158. Shibasaki I., Kuze N. Mass Production of Sensors Grown by Molecular Beam Epitaxy: in *Molecular Beam Epitaxy. From Research to Mass Production*, 2nd. ed., ed. by M. Henini.-Elsevier Inc., 2018.- P. 693–719. doi:10.1016/C2016-0-02290-8.
159. Spain E., Venkatanarayanan A. Review of Physical Principles of Sensing and Types of Sensing Materials // *Comprehensive Materials Processing.*— 2014.— V. 13.— P. 5-46. doi: 10.1016/B978-0-08-096532-1.01302-9.
160. Aggarwal M. D., Batra A. K., Guggilla P., Edwards M. E., Penn B. G. and Currie J. R., Jr. *Pyroelectric Materials for Uncooled Infrared Detectors: Processing, Properties, and Applications.*— Marshall Space Flight Center, AL 35812.— 2010.— 92 p.
161. Schossing M., Norkus V., Gerlach G. High Performance Pyroelectric Infrared Detectors // *Proceedings SENSOR+TEST Conference – IRS².*— 2009.— P. 191–196.

-
162. Stenger V., Shnider M., Sriram S., Dooley D. and Stout M. Thin Film Lithium Tantalate (TFLT™) Pyroelectric Detectors // SPIE Photonics West 2012. Optoelectronic Materials and Devices THz Technology and Applications V – OE107.— 2012.— P. 8261–27.
163. Wang J., Gou J., Li W. Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film // AIP Advances.— 2014.— V. 4.— P. 027106.
164. Roralski A., Sizov F. Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film // Opto-Electronics Review.— 2011.— V. 19, No. 3.— P. 346–404.
165. Müller, R., Bohmeyer W., Kehrt M., Lange K., Monte C., Steiger A. Novel detectors for traceable THz power measurements // J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.— 2014.— V. 35, Issue 8.— P. 659–670.
166. Müller, R. Gutschwager B., Hollandt J., Kehrt M., Monte C., Müller R., Steiger A. Characterization of a Large-Area Pyroelectric Detector from 300 GHz to 30 THz // J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves.— 2015.— V. 36, Issue 7.— P. 654–661. doi: 10.1007/s10762-015-0163-7.
167. Зорин С. М., Гончаренко Б. Г., Козлов В. В., Романов А. Н., Салов В. Д. Свойства дифенил–2,2',4,4'–тетраамина и тонкопленочная мишень пироэлектрического электронно-оптического преобразователя на его основе // Известия вузов. Материалы электронной техники.— 2015.— Т. 18, №3.— С. 205–211.
168. Романов А. Н., Гуларян С. К., Зорин С. М., Козлов В. В., Гончаренко Б. Г., Салов В. Д. Молекулярная структура дифенил– 2,2',4,4'–тетраамина и природа пироэлектрических свойств тонких пленок на его основе // Инж. вестн. Дона.— 2014.— № 2. URL: http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/pdf/IVD_32_Romanov.pdf_2337.pdf (дата обращения 01.07.2019).

-
169. Edwards M., Corda J., Egarievwe S., Guggilla P. Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies // Proc. SPIE. Infrared Sensors, Devices and Applications III.– 2013.– Vol. 8868.– Article N 88680E. doi: 10.1117/12.2023097.
170. Batra A. K., Edwards M. E., Guggilla P., Aggarwal M. D., Lal R. B. Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications // Integrated Ferroelectrics.– 2014.– Vol. 158, No. 1.– P. 98–107. doi: 10.1080/10584587.2014.957559.
171. Batra, A. K., Aggarwal M. D. Pyroelectric Materials: Infrared Detectors, Particle, Accelerators, and Energy Harvesters. Bellingham (Washington, USA): SPIE Press, 2013.– 202 p.
172. Muralt, P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // Reports on Progress in Physics.– 2001.– No. 64.– P. 1339–1388. doi: 10.1007/0-387-23319-9_5
173. Hossain A. and Rashid M. Pyroelectric Detectors and Their Applications // IEEE Transactions on Industry Applications.– 1991.– Vol. 27, No. 5.– P. 824–829. doi: 10.1109/28.90335
174. Электронный ресурс]: [http:// www.vostok.nsk.su/files/pdf/MG33.pdf](http://www.vostok.nsk.su/files/pdf/MG33.pdf).
175. Лебедев И. В. Техника и приборы СВЧ. М.: Высшая школа, 1972.– Т. 1,2.
176. Альтшулер Ю. Г., Татаренко А. С. Лампы малой мощности с обратной волной. М., 1963.
177. Андреев В. Г., Вдовин В. А., Воронов П. С. Спектральные характеристики пленок хрома нанометровой толщины в терагерцовом диапазоне частот // Письма в ЖТФ.– 2003.– Т. 29, вып. 22.– С. 68–73.
178. Андреев В.Г., Ангелуц А.А., Вдовин В.А., Лукичев В.Ф. Экспериментальное исследование поглощения волн миллиметрового диапазона в тонких металлических пленках // Письма в ЖТФ.– 2015.– Т. 41, вып. 4.– С. 52–60.

-
179. Пронин С. М., Вдовин В.А., Андреев В.Г. Исследование оптических коэффициентов нанометровых пленок меди и золота в СВЧ диапазоне // Ученые записки физического факультета.— 2016.— Т. 5.— С. 165411.
180. THz and Security Applications. Detectors, Sources and Associated Electronics for THz Applications, ed. by Corsi C., Sizov F. NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2014, 292 p.
181. Tribe W. R., Newnham D. A., Taday Ph. F., and Kemp M. C. Hidden object detection: security applications of terahertz technology // Proc. of SPIE Vol. 5354 (SPIE, Bellingham, WA, 2004), pp. 168–176. doi: 10.1117/12.543049.
182. [Электронный ресурс]: www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=3337.
- 183 Паулиш А.Г., В.А. Голяшов, Гусаченко А.В., Морозов А.О., Дорожкин К.В., Сусяев В.И., Костюченко В.Я., Пыргаева С.М. Спектральные характеристики чувствительности пироэлектрического детектора на основе тетрааминодифенила в видимом, ИК- и ТГц- диапазонах // Доклады АН ВШ РФ.— 2019.— № 3(44).— С. 55–67. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-3-55-67.
- 184 A. G. Paulish, A. V. Gusachenko, A. O. Morozov, K. V. Dorozhkin, V. I. Suslyayev, V. A. Golyashov, O. V. Minin, I. V. Minin. Characterization of tetraaminodiphenyl-based pyroelectric detector from visible to millimeter wave ranges // Optical Engineering.— 2020.— V. 59, No.6.— P. 061612. DOI: 10.1117/1.OE.59.6.061612.
- 185 A. G. Paulish, A. V. Gusachenko, A. O. Morozov, V. A. Golyashov, K. V. Dorozhkin, V. I. Suslyayev. Sensitivity of the tetraaminodiphenyl based pyroelectric sensor from visible to sub-THz range // Sensor Review.— 2020.— V.40, No.3.— P. DOI: 10.1108/SR-03-2020-0047.
186. Wei P., Han X., Xia D., Liu T. and Lang H. Novel Fiber-Optic Ring Acoustic Emission Sensor // IEEE Sensors Journal. 2018.— Vol. 1.— P.215. DOI: 10.3390/s18010215.

-
187. Wang X., Sun F., Yin G., Wang Y., Liu B., Dong M. Tactile-sensing based on flexible PVDF nanofibers via electrospinning: a Review // *Sensors (Basel)*.— 2018.— Vol. 18, Iss. 2.— P. E330. DOI: 10.3390/s18020330.
188. Liang H., Jia P., Liu J., Fang G., Li Z., Hong Y., Liang T. and Xiong J. Diaphragm-free fiber-optic Fabry-Perot interferometric gas pressure sensor for high temperature application // *IEEE Sensors Journal*. 2018.— Vol. 18, No. 4.— p.1011. DOI: 10.3390/s18041011.
189. Sbarufatti C., Beligni A., Gilioli A., Ferrario M., Mattarei M., Martinelli M. and Giglio M. // Strain wave acquisition by a fiber optic coherent sensor for impact monitoring // *Materials*. 2017.— Vol. 10, No. 7.— P.794 (16 pages). DOI: 10.3390/ma10070794.
190. Yang N., Su J., Fan Z. and Qiu Q. High precision temperature insensitive strain sensor based on fiber-optic delay // *IEEE Sensors Journal*. 2017.— Vol. 17, No. 5.— P. 1005. DOI: 10.3390/s17051005.
191. Peled Y., Motil A., Kressel I., Tur M. Monitoring the propagation of mechanical waves using an optic fiber distributed and dynamic strain sensor based on BOTDA // *Opt. Express*. 2013.— Vol. 21.— P. 10697–10705. DOI: 10.1364/OE.21.010697
192. Wild G., Hinckley S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art // *IEEE Sensors Journal*. 2008.— Vol. 8.— P. 1184–1193.
193. Бусурин В.И., Носов Ю.Р. Волоконно-оптические датчики: Физические основы, вопросы расчета и применения.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 256 с: ил.
194. Xiong L., Jiang G., Guo Y., Liu H. A three-dimensional fiber Bragg grating force sensor for robot // *IEEE Sensors Journal*. 2018.— Vol. 18, Iss. 9.— P. 3632–3639. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2812820.
195. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников / Москва: Техносфера, 2008.— 198 с.

-
196. Клекерс Т., Гюнтер Б. Измерение деформаций: Оптоволоконные сенсоры компании НВМ // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2008.— №1.— С. 76–78.
197. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики.— М.: Техносфера, 2006.— 632 с.— (Мир электроники).
198. Паулиш А. Г., Загубисало П. С. Определение коэффициента тензочувствительности пьезооптических датчиков механических напряжений методом численного моделирования // Автометрия.— 2019.— Т. 55, № 3.— С. 103–112. DOI: 10.15372/AUT20190312.
199. Nye, J. F. Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices / Oxford Science Publication, University Press: Oxford, 1985.— P.235–258.
200. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризационный свет / Пер. с англ. под ред. чл.-корр. АН СССР А.В. Ржанова и К.К. Свиташева.— М.: Мир, 1981.— 583 с.: ил.
201. Handbook of Polycarbonate Science and Technology / Ed. by D. G. LeGrand and John T. Bendler.— Marcel Dekker, Inc.: NewYork, 2000.— 374 pages. ISBN: 9780824799151.
202. Регель В.Р., Меланхолии Н.М. Жесткий оптический динамометр // ЖТФ.— 1954.— Т. 24, №3.— С. 454–459.
203. Слезингер И. И. Пьезооптические измерительные преобразователи // Измерительная техника.— 1985.— №11.— С. 45–48.
204. Слезингер И. И., Ширяев В. А., Миронов Ю. В. Белицкий Г. М. Пьезооптический измерительный преобразователь А. с. 567966 заявлено 14.05.74, опубликовано 05.08.77 Бюл. №29. [Электронный ресурс]. http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet
205. Слезингер И. И., Ширяев В. А., Миронов Ю. В. Белицкий Г. М. Чувствительный элемент пьезооптического преобразователя А. с. 567965

-
- заявлено 17.04.73, опубликовано 05.08.77 Бюл. №29. [Электронный ресурс].
http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet
206. Слезингер И. И., Гитерман Х. Ф.Э, Караулов А. М., Берзин В. К. Пьезооптический измеритель деформации объекта А. с. 1536196 заявлено 13.05.88, опубликовано 15.01.90 Бюл. №2. [Электронный ресурс].
http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet
207. Piezooptical measuring transducer: patent No. 4010632 USA / Slezinger I. I., Belitsky G. M., Shiryayev V. A., Mironov J. V. filed Feb. 03, 1976; publication date Mar. 08, 1977. [Электронный ресурс]. <https://patents.google.com/patent/US4010632A/ja>.
208. Photoelastic neural torque sensor: patent No. 5723794 USA / Discenzo F. M. filed Sep 29, 1995; publication date Mar. 03, 1998. [Электронный ресурс]. <https://www.google.com/patents/US5723794>.
209. Photoelastic measuring transducer and accelerometer based thereon: patent No. 4648274 USA / Trainer M. N. filed Aug. 07, 1985; publication date Mar. 10, 1987. [Электронный ресурс]. <https://patents.google.com/patent/US4648274A>.
210. System and method for sensing torque on a rotating shaft: patent No. 6948381 USA / Discenzo F. M. filed Sep. 04, 2003; publication date Sep. 27, 2005. [Электронный ресурс]. <http://www.google.ch/patents/US6948381>.
211. Тензометрический преобразователь (изобретение): пат. 2422786 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Рафаилович А.С., Шатов В.А., Поярков А.В.; заявл. 23.04.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. №18.— 7 с.: ил. [Электронный ресурс]. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet
212. Тензометрический датчик (варианты) (изобретение): пат. 2454642 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В. Н.; заявл. 29.03.2011; опубл. 27.06.2012, Бюл. №18.— 14 с.: ил. [Электронный ресурс].
http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet
213. Тензометрический датчик (изобретение): пат. 2530467 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Федоринин В. Н., Шапор П. И., Сущих А. А.;

-
- заявл. 09.07.2013; опубл. 10.10.2014.— 12 с.: ил. [Электронный ресурс].
http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet
214. Тензометрический преобразователь (изобретение): пат. 2530466 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н., Федоринин В. Н., Филимонов А. Л.; заявл. 09.07.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. №28.— 8 с.: ил. [Электронный ресурс]. http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet
215. Паулиш, А. Г., Загубисало П. С. Фотоупругий элемент для пьезооптических датчиков деформаций // Письма в ЖТФ.— 2015.— Т. 41, вып. 13.— С. 33-40. DOI: 10.1134/S1063785015070135.
216. Фотоупругий элемент (изобретение): пат. 2552128 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н., Маслов О. П. заявл. 29.11.2013; опубл. 10.06.2015.— 8 с.: ил. [Электронный ресурс].
http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet
217. Encyclopedia of Optical Engineering / Ed. by Ronald G. Driggers, New York: Marcel Dekker Inc. 2003.— Vol. 1.— P. 205.
218. Тензометрический преобразователь (изобретение): пат. 2564691 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н.. заявл. 04.02.2014; опубл. 10.10.2015, Бюл. №28.— 18 с.: ил. [Электронный ресурс].
http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet
219. System and method for sensing torque on a rotating shaft: patent No. 6948381 USA / Discenzo F. M. filed Aug 27, 2003; publication date Sep. 27, 2005. [Электронный ресурс]. <https://www.google.com/patents/US6948381>.
220. System and method for sensing torque on a rotating shaft: patent No. 7458277 USA / Discenzo F. M. filed Aug. 27, 2007; publication date Dec 02, 2008. [Электронный ресурс]. <https://www.google.com/patents/US7458277>.
221. Sensitive element of piezooptic measuring converter: patent No. 4002934 USA / Slezinger I. I., Belitsky G. M., Shiryaev V. A., Mironov J. V. filed Feb 3, 1976; publication date Mar 8, 1977. [Электронный ресурс]. <https://www.google.com/patents/US4002934>.

-
222. Tensometric transducer: patent No. 8887577 USA / Paulish A.G., Poyarkov A. V., Shatov V. A., Fedorinin V. N., Rafailovich A. S. Filing date: Jul. 1, 2010, Publication Date: Nov. 18, 2014. [Электронный ресурс]. <https://www.google.com/patents/US8887577>.
223. Device and method for measuring combined deformations International Patent Application No. PCT/RU2015/000220 Publication Date: 08.04.2015 / Paulish A.G., Poyarkov A. V., Barakov V. N., Maslov O. P. WO2016/163902, Publication Date: 13.10.2016.
224. Paulish A. G., Zagubisalo P. S., Barakov V. N., Pavlov M. A., Poyarkov A. V. Piezo-optical transducer for high sensitive strain gauges // IEEE Sensors Journal.— 2018.— Vol. 18, Iss. 20.— P.8318—8328. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2865917.
225. Theocaris P. S. and Gdoutos E. E. Matrix Theory of Photoelasticity / Springer-Verlag, New-York.— 1979.— 352 pages.
226. Устройство обработки сигнала пьезооптического преобразователя (изобретение) пат. 2565856 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н., Павлов М. А.; заявл. 08.07.2014; опубл. 20.20.2015, Бюл. №29.— 7 с.: ил. [Электронный ресурс]. http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet
227. Паулиш А. Г., Новгородов Б. Н., Хрящев С В., Кузнецов С. А. Терагерцовый визуализатор на основе ТГц-ИК конвертера // Автометрия.— 2019.— Т. 55, № 1.— С. 56–63. DOI: 10.15372/AUT20190108.
228. Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Кузнецов С.А., Аржанников А.В. Детекторы изображения миллиметрового диапазона на основе ММ-ИК конвертера // научно-технический журнал «Контенант».— 2013.— Т. 12, № 1.— С. 58 – 64.
229. Паулиш А. Г., Кузнецов С. А., Аржанников А. В., Лазорский П. А., Федоринин В. Н. Неохлаждаемые болометрические приемники терагерцового излучения на основе ультратонких поглотителей // Материалы Российской конференции и школы по актуальным проблемам

-
- полупроводниковой нанофотоэлектроники, «Фотоника-2011», 22-26 августа 2011, Новосибирск, С.39.
230. Паулиш А. Г., Кузнецов С. А., Лоншаков Е. А., Аржанников А. В., Тумм М. К. А., Вергилес С. А., Гельфанд А.В., Лазорский П. А., Новгородов Н. Б., Турбин А. В., Хрящев С.В., Федоринин В.Н. Конвертер терагерцового излучения в инфракрасное на основе метаматериалов для детекторов терагерцового диапазона // Труды XXII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 22-25 мая 2012, «НПО ОРИОН», Москва, С. 16-18.
231. Паулиш А. Г., Загубисало П. С., Кузнецов С. А., Федоринин В. Н. Высокоэффективный конвертер миллиметрового излучения в инфракрасное на основе метаматериала для визуализатора мм излучения // Тезисы докладов XX Всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике «Территория NTD-2014» г. Москва, 3-6 марта 2014 г., с. 249-252.
232. Федоринин В. Н., Паулиш А. Г., Кремис И. И., Журов Г. Е., Чурилов С. М. Перспективные направления развития приборов и технологий оптического, инфракрасного и миллиметрового диапазона в Филиале ИФП СО РАН «КТИПМ» // Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. «НПО ОРИОН», 28-30 мая 2014, Москва, с.20-24.
233. Паулиш А. Г., Кузнецов С. А., Федоринин В. Н. Дистанционные средства контроля на основе технологий инфракрасного и миллиметрового диапазонов длин волн // Доклады круглых столов форума «Территория NTD-2015». 3-6 марта 2015 г. М.:ИД «Спектр», 2015.— 300 с.
234. Кузнецов С. А., Паулиш А. Г., Федоринин В. Н. Неохлаждаемые системы управления и регистрации терагерцового и субтерагерцового излучения. Труды XXIV Международной научно-технической конференции и школе по

- фотоэлектронике и приборам ночного видения, 24-27 мая 2016, Москва. Стр.17-18.
235. Паулиш А. Г., Федоринин В. Н. Современное состояние и перспективы развития оптико-электронных систем в филиале ИФП СО РАН "КТИПМ". Сборник материалов научно-практической конференции «Научное приборостроение – современное состояние и перспективы». 15-16 ноября 2016, Москва, стр. 43-45.
236. Гусаченко А. В., Морозов А. О., Паулиш А. Г., Рогова И. В. Исследование возможности использования СВЧ модуля с частотной модуляцией в комплексном устройстве обнаружения скрытых объектов // Тезисы Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2017», 11-15 сентября 2017, г. Новосибирск, С.163.
237. Сидоров В. И., Паулиш А. Г., Почкай Д. В. Регистрация изменения нагрузки на твёрдое тело при помощи пьезооптического преобразователя // Глобальная ядерная безопасность.— 2012.— №2-3 (4).— С. 58–63.
238. Instron Model 8802, 8803, 8804, 8805 and 8806 Load frames, Reference Manual. [Электронный ресурс]. URL: https://www.upc.edu/sct/es/documents_equipament/d_54_id-371.pdf.
239. ГОСТ 28836-90 Датчики силоизмерительные тензорезисторные. Общие требования и методы испытаний. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2004, 9 с.
240. ФБУ «Ростест-Москва». Метрология, поверка, калибровка, испытания средств измерений [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rostest.ru>.
241. Тензорезисторы ZEMIC серии BF и BA [Электронный ресурс] URL: <https://zemicrus.ru/catalog/tenzorezistory/tenzorezistory-serii-ba/>
242. Весоизмерительная компания «Тензо-М», Модернизация образцовых силоизмерительных машин типа ОСМ, ДО [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tenso-m.ru/isyatatelnoe-oborudovanie/253>.

-
243. Завод испытательных машин ПО "Точмашприбор", г. Армавир, Машины силоизмерительные 2-го разряда ОСМ-2-200-10М [Электронный ресурс]. URL: <http://www.all-pribors.ru/opisanie/12472-90-osm-2-200-10m-3222>.
244. Detroit Calibration Lab Trescal [Электронный ресурс]. URL: <http://www.trescal.us/calibration-lab/michigan/detroit/detroit-calibration-lab>.
245. Bartel T. W., Yaniv S. L. and Seifarth R. L. Force Measurement Services at NIST: Equipment, Procedures, and Uncertainty // NCSL Workshop & Symposium.— 1997.— P. 421–431.
246. Metrological regulation for load cells OIML R 60(E) Edition 2000.— 83 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r060-e00.pdf.
247. Ultra Precision LowProfile™ Load Cell Interface Force™ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.interfaceforce.com/index.php?mod=product&show=3>.
248. ZwickRoell. Static Materials Testing Machines [Электронный ресурс]. URL: <https://www.zwickroell.com/en/products>.
249. Способ контроля параметров движения подъемного устройства (изобретение): пат. 2618862 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н., Шатов В.А., Федоринин В.Н.; заявл. 12.10.2015; опубл. 11.05.2017, Бюл. №14.— 25 с.: ил. [Электронный ресурс]. http://www1.fips.ru/fips_serv1/fips_servlet.
250. Паулиш А. Г., Сидоров В. И., Федоринин В. Н., Шатов В. А. Пьезооптический датчик деформации и метод контроля параметров движения подъемных механизмов // Изв. вузов. Приборостроение.— 2018.— Т. 61, № 6.— С. 530—538.
251. ГОСТ Р 53780-2010 Лифты. Общие требования безопасности к устройству и установке. М.: Из-во Стандартиформ, 2012. 81 с.
252. Датчик упругих деформаций // Инновации ООО «Фирма ПОДИЙ» [Электронный ресурс]. URL: <http://firmarodij.ru/innovacii> (дата обращения: 22.01.2018).

ПРИЛОЖЕНИЕ «А» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «ФИРМА ПОДИЙ»
_____ А. В. Поярков
«13» 10 2019 г.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Паулиша А. Г.
«Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов
и систем приема, обработки и отображения информации»

«13» 10 2019 г.

г. Москва

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Паулиша А.Г. «Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов и систем приема, обработки и отображения информации» в части разработки пьезооптических преобразователей для высокочувствительных датчиков деформации внедрены в производство семейства специализированных оптико-электронных датчиков деформации УПС-10, УПС-12, УПС-15, УКЗК-15, УПС-17. С 2010 г. датчики УПС-10 эксплуатируются на лифтах ОАО «Могилевлифтмаш» (г. Могилев, Республика Беларусь) и ряде жилых домов Москвы без замечаний. С их помощью по разработанной оригинальной методике контролируются:

- степень загрузки кабины лифта;
- параметры комфортности движения лифта (ускорение, торможение, рывки, величина трения и вибрации);
- наступление предаварийных ситуаций.

В рамках опытно-конструкторских и инновационных работ, осуществляемых ООО «Фирма ПОДИЙ» совместно с А. Г. Паулишем, ведутся разработки новых оптико-электронных устройств и систем для контроля давления в жидких и газовых средах, для контроля параметров работы двигателей различного назначения.

Начальник отдела
промышленной электроники



О. П. Маслов

Ответственный исполнитель:
Инженер-конструктор



В. Н. Бараков



УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора ИЯФ

Д.Е. Беркаев«28» февраля 2019 г.**АКТ**

внедрения результатов диссертационной работы Паулиша А. Г.
«Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов
и систем приема, обработки и отображения информации»

«28» февраля 2019 г.

г. Новосибирск

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Паулиша А.Г. «Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов и систем приема, обработки и отображения информации» в части разработки неохлаждаемых детекторов миллиметрового и субмиллиметрового излучения внедрены в Институте ядерной физики СО РАН для настройки волноводной линии (СВЧ-тракта) от мощного генератора СВЧ-излучения (гиротрона) до выхода из тракта. Настройка СВЧ-тракта заключается в проведении СВЧ-пучка по нужной траектории по зеркалам квазиоптического фильтра и его вводе в волноводную линию строго вдоль оси волновода. На всех этапах требуется контроль пространственного распределения мощности пучка, характеризующего его волновой фронт, и его положение относительно опорных точек зеркал и оси волновода. В процессе настройки в разных частях волноводной линии устанавливается поглотитель микроволнового излучения, и с помощью ИК камеры регистрируется пространственное распределение температуры поглотителя после короткого СВЧ-импульса. В итоге, согласно калориметрическим измерениям, потери мощности в волноводной линии удалось снизить с 10% до 6.5%.

Руководитель проекта,
 заведующий лабораторией 9-1 ИЯФ, д. ф.-м. н.

П. А. Багрянский

Отв. Исполнитель:

старший научный сотрудник ИЯФ, к. ф.-м. н.

А. Л. Соломахин

УТВЕРЖДАЮ

Директор международного учебно-научного лазерного центра
МГУ имени М. В. Ломоносова

Профессор Макаров В.А.



«01» марта 2019 г.

АКТ

использования результатов диссертационной работы Паулиша А. Г.
«Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов
и систем приема, обработки и отображения информации»

«01» марта 2019 г.

г. Москва

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Паулиша А.Г. «Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов и систем приема, обработки и отображения информации» в части разработки многоканальных пироэлектрических детекторов ТГц-излучения типа УМК-5 использованы в лаборатории терагерцовой оптоэлектроники и спектроскопии физического факультета МГУ при выполнении проекта «Определение информационных признаков электронных устройств применительно к методу терагерцовой рефлектометрии» (грант РФФИ 16-29-09593) для контроля параметров источников ТГц-излучения – квантово-каскадных лазеров.

Профессор, д. ф.-м. н.

А. П. Шкуринов

Руководитель проекта:
научный сотрудник, к. ф.-м. н.

А. А. Ангелуц

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель директора
ИЛФ СО РАН СО РАН
по научной работе



 В. И. Денисов
«23» 10 2019 г.

АКТ

**использования результатов диссертационной работы Паулиша А. Г.
«Специализированные оптико-электронные системы приема и отображения
информации»**

« 23 » 10 2019 г.

г. Новосибирск

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Паулиша А.Г. «Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов и систем приема, обработки и отображения информации» в части разработки пироэлектрических детекторов ТГц- и миллиметрового излучения использованы в Институте лазерной физики СО РАН при исследовании фундаментальных аспектов генерации, управления и регистрации излучения терагерцового диапазона с использованием жидкокристаллических (ЖК) сред для создания дистанционных диагностических систем. Пироэлектрический ТГц-детектор используется для контроля интенсивности ТГц-излучения нелинейного частотного ЖК-преобразователя, генерирующего излучение с длиной волны $\lambda = 176,6$ мкм или в диапазоне $\lambda \sim 100\text{--}300$ мкм, в зависимости от способа оптической накачки. Работа выполняется в рамках госбюджетного проекта 0307-2016-0007 «Разработка и создание малогабаритных перестраиваемых источников когерентного излучения в среднем ИК и ТГц диапазонах на новых нелинейных средах для применения в биологии, медицине и других областях», программа П.11.2. Современные направления лазерных биомедицинских технологий.

Руководитель
к.ф.-м.н., зав. лаб.



А.И. Карапузиков

Отв. исполнитель
к. ф.-м. наук, с.н.с.



С. И. Трашкеев

УТВЕРЖДАЮ

Директор
ООО «Специальные технологии»/ Карапузиков А.А.
«20» февраля 2019 г.**АКТ**

использования результатов диссертационной работы Паулиша А. Г.
«Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов
и систем приема, обработки и отображения информации»

«20» февраля 2019 г.

г. Новосибирск

Настоящим актом подтверждается, что результаты диссертационной работы Паулиша А.Г. «Разработка и исследование специализированных оптико-электронных методов и систем приема, обработки и отображения информации» в части разработки многоканальных пироэлектрических детекторов ТГц- и миллиметрового излучения типа УМК-5 используются в ООО «Специальные технологии» для измерения характеристик ТГц-излучения компактных источников перестраиваемого когерентного терагерцового излучения на основе газовых лазеров с оптической накачкой. В качестве лазера оптической накачки использовался CO_2 -лазер с перестраиваемой частотой генерации. В качестве активного вещества (среда, где генерируется ТГц-излучение) применялись пары метанола (CH_3OH) при давлении 180 мТорр. В результате получена генерация излучения в диапазоне частот от 1,42 до 4,11 ТГц (210 - 73 мкм), с импульсной мощностью от 3 до 124 мВт.

ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ И ПОЛЕЗНЫЕ МОДЕЛИ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2414688

**МАТРИЧНЫЙ ПРИЕМНИК ТЕРАГЕРЦОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ**

Патентообладатель(ли): *Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования Новосибирский
государственный университет (НГУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010111202

Приоритет изобретения 23 марта 2010 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 20 марта 2011 г.

Срок действия патента истекает 23 марта 2030 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 414 688**⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G01J 5/42 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2010111202/28, 23.03.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.03.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.03.2010

(45) Опубликовано: 20.03.2011 Бюл. № 8

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: US 7045784 B1, 16.05.2006. RU 2325729 C1,
27.05.2008. RU 2371684 C2, 27.10.2009. RU
2169911 C2, 27.06.2001.

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
Новосибирский государственный
университет, отдел по защите ИС

(72) Автор(ы):

Кузнецов Сергей Александрович (RU),
Федоринин Виктор Николаевич (RU),
Гельфанд Александр Витальевич (RU),
Паулиш Андрей Георгиевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное агентство по образованию
Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования Новосибирский
государственный университет (НГУ) (RU)

(54) МАТРИЧНЫЙ ПРИЕМНИК ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике измерений. Приемник имеет матричную структуру с ячейками Голя, каждая из которых представляет собой заполненную газом камеру, один торец которой является входным окном для электромагнитного излучения, противоположный торец закрыт гибкой мембраной с зеркальным покрытием с внешней стороны, а внутри камеры размещен поглощающий элемент. Поглощающий элемент ячейки Голя выполнен в виде ультратонкого (не менее, чем в 50 раз меньше

длины волны терагерцового излучения) резонансного поглощающего слоя, содержащего высокоимпедансную поверхность, обращенную к входному окну ячейки. Матрица содержит ячейки с заданными оптическими характеристиками поглощающих слоев, обусловленными заданной топологией высокоимпедансных поверхностей.

Технический результат - возможность измерений в терагерцовой области с пространственным и поляризационным разрешением как в односпектральном, так и в многоспектральном режимах. 4 з.п. ф-лы, 2 ил.

RU 2 4 1 4 6 8 8 C 1

RU 2 4 1 4 6 8 8 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2447574

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
(ВАРИАНТЫ)**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет" (Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, НГУ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010146644

Приоритет изобретения **16 ноября 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **10 апреля 2012 г.**

Срок действия патента истекает **16 ноября 2030 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 447 574** ⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
H03D 7/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2010146644/07, 16.11.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
16.11.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 16.11.2010

(45) Опубликовано: 10.04.2012 Бюл. № 10

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 1827552 A1 G01J 5/00, 15.07.1993. RU
2094757 C1 G01J 1/16, 27.10.1997. RU 2160479
C2 H01J 31/52, 10.12.2000. US 2009026195 A1
H05B 6/76, 29.01.2009. US 2010243646 A1 H05B
6/76, 30.09.2010. US 2009094832 A1 H05B 6/76,
16.04.2009.

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
Новосибирский государственный
университет, отдел по защите ИС, Н.А.
Беляевой

(72) Автор(ы):

Кузнецов Сергей Александрович (RU),
Федоринин Виктор Николаевич (RU),
Гельфанд Александр Витальевич (RU),
Паулиш Андрей Георгиевич (RU),
Лазорский Павел Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Новосибирский национальный
исследовательский государственный
университет" (Новосибирский национальный
исследовательский государственный
университет, НГУ) (RU)

(54) ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ВАРИАНТЫ)

(57) Реферат:

Изобретение относится к технике измерений, в частности к измерению интенсивности электромагнитного излучения с пространственным и поляризационным разрешением. Технический результат заключается в возможности проведения в реальном времени измерений интенсивности электромагнитного излучения в терагерцовой области с пространственным разрешением, а также с поляризационным разрешением. Предложен преобразователь терагерцового излучения в инфракрасное излучение (которое может быть зарегистрировано с помощью имеющихся на сегодняшний день инфракрасных матричных приемников), обладающий высокой чувствительностью к терагерцовому излучению, высоким пространственным разрешением, чувствительностью к поляризации излучения, малым временем отклика. Преобразователь

выполнен в виде ультратонкой (не менее чем в 50 раз меньше длины волны терагерцового излучения) многослойной структуры на основе диэлектрического слоя. Со стороны падения терагерцового излучения на поверхности диэлектрического слоя выполнен металлизированный топологический рисунок, образующий частотно-избирательную поверхность (ЧИП). С обратной стороны диэлектрического слоя нанесен сплошной слой с металлической проводимостью, поверх которого нанесен тонкий слой материала, обладающего высокой излучательной способностью в инфракрасном диапазоне (коэффициент серости, близкий к единице). Вариантом является преобразователь, в котором с обратной стороны диэлектрического слоя резонансного поглотителя терагерцового излучения поверх слоя с металлической проводимостью вместо излучающего слоя наносится второй

Стр.: 1

RU 2 447 574 C 1

RU 2 447 574 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2482527

**МАТРИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕРАГЕРЦЕВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ (ВАРИАНТЫ)**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский национальный исследовательский государственный университет" (Новосибирский государственный университет, НГУ) (RU), Учреждение Российской академии наук Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН (ИПФ СО РАН) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2011135446

Приоритет изобретения 24 августа 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 мая 2013 г.

Срок действия патента истекает 24 августа 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU**⁽¹¹⁾ **2 482 527**⁽¹³⁾ **C2**(51) МПК
G02F 1/00 (2006.01)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2011135446/28, 24.08.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.08.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.08.2011

(45) Опубликовано: 20.05.2013 Бюл. № 14

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 22010146644 A1, 20.03.2011. RU 2414688
C1, 20.03.2011. RU 2009146681 A, 27.06.2011.
RU 105738 U1, 20.06.2011. WO 2010112730 A1,
07.10.2010.

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
Новосибирский государственный
университет, отдел по защите ИС, Н.А.
Беляевой

(72) Автор(ы):

Кузнецов Сергей Александрович (RU),
Федоринин Виктор Николаевич (RU),
Гельфанд Александр Витальевич (RU),
Паулиш Андрей Георгиевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Новосибирский национальный
исследовательский государственный
университет" (Новосибирский
государственный университет, НГУ) (RU),
Учреждение Российской академии наук
Институт физики полупроводников им. А.В.
Ржанова Сибирского отделения РАН (ИПФ
СО РАН) (RU)

RU
2 4 8 2 5 2 7
C 2

(54) МАТРИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ (ВАРИАНТЫ)

(57) Реферат:

Устройство относится к измерительной
технике. Матричный преобразователь
терагерцевого излучения, состоящий из
диэлектрической пленки, на которой со
стороны падения терагерцевого излучения
выполнена частотно-избирательная
поверхность, а на противоположной стороне
нанесен сплошной слой с металлической
проводимостью. В первом варианте устройства
частотно-избирательная поверхность
выполнена в виде матрицы фрагментов, с
различными топологическими рисунками,
обеспечивающих различные спектральные
и/или поляризационные чувствительности, а на
противоположной стороне поверх сплошного
слоя с металлической проводимостью нанесен
тонкий слой материала с высокой
излучательной способностью в инфракрасной

области излучения. Во втором варианте
устройства на слой с металлической
проводимостью нанесен второй
диэлектрический слой, на котором
сформирован металлизированный
топологический рисунок, образующий вторую
частотно избирательную поверхность, при
этом толщина второго диэлектрического слоя
и топологический рисунок второй частотно-
избирательной поверхности выбраны таким
образом, чтобы обеспечить резонансное
поглощение инфракрасного излучения.
Технический результат заключается в
обеспечении возможности реализации в едином
устройстве функций многоспектрального и/или
поляризационно-чувствительного
детектирования терагерцевого излучения. 2 н.
и 12 з.п. ф-лы, 6 ил.

RU
2 4 8 2 5 2 7
C 2

КОПИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2422786

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" (ООО "ФИРМА ПОДИЙ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2010116023

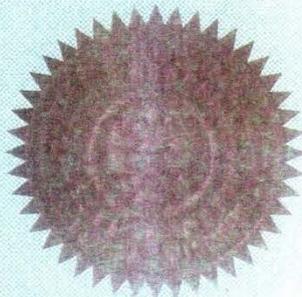
Приоритет изобретения **23 апреля 2010 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **27 июня 2011 г.**

Срок действия патента истекает **23 апреля 2030 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** (11) **2 422 786** (13) **C1**

(51) МПК
G01L 1/24 (2006.01)
G01B 11/16 (2006.01)

(12) ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(21)(22) Заявка: 2010116023/28, 23.04.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
23.04.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 23.04.2010

(45) Опубликовано: 27.06.2011 Бюл. № 18

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 847085 A1, 15.07.1981. SU 1536196 A1,
15.01.1990. SU 1136010 A1, 23.01.1985. US
4002934 A, 11.01.1987.

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
Новосибирский государственный
университет, отдел по защите ИС

(72) Автор(ы):

Паулиш Андрей Георгиевич (RU),
Поярков Александр Владимирович (RU),
Федоринин Виктор Николаевич (RU),
Шатов Владимир Александрович (RU),
Рафаилович Алексей Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной
ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ"
(ООО "ФИРМА ПОДИЙ") (RU)

RU 2 4 2 2 7 8 6 C 1

(54) ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

(57) Формула изобретения

1. Тензометрический преобразователь, включающий нагрузочный элемент, закрепляемый на контролируемом объекте, и пьезооптический преобразователь, преобразующий величину напряжений на фотоупругом элементе в электрический сигнал, отличающийся тем, что нагрузочный элемент представляет собой пластину, обеспечивающую концентрацию напряжений на фотоупругом элементе, фотоупругий элемент закреплен в пластине в заведомо нагруженном состоянии и таким образом, что действие исходной силовой нагрузки осуществляется в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

2. Преобразователь по п.1, отличающийся тем, что для повышения эффективности передачи измеряемой деформации на фотоупругий элемент пластина имеет утоньшение в месте крепления фотоупругого элемента.

3. Преобразователь по п.1, отличающийся тем, что в центре пластины выполнено конусовидное отверстие, ось которого лежит в плоскости перпендикулярной оси нагружения, при этом фотоупругий элемент выполнен в виде усеченного конуса, причем углы конуса отверстия и конуса фотоупругого элемента совпадают и равны конусу Морзе.

4. Преобразователь по п.1, отличающийся тем, что в пластине выполнены два взаимно перпендикулярных сквозных разреза, не нарушающих целостности пластины.



(12) **United States Patent**
Poyarkov et al.

(10) **Patent No.:** **US 8,887,577 B2**
 (45) **Date of Patent:** **Nov. 18, 2014**

(54) **TENSOMETRIC TRANSDUCER**
 (75) **Inventors:** **Alexander Vladimirovich Poyarkov**, Troitsk (RU); **Vladimir Alexandrovich Shatov**, Moscow (RU); **Alexei Sergeevich Rafailovich**, Novosibirsk (RU); **Viktor Nikolaevich Fedorin**, Novosibirsk (RU); **Andrei Georgievich Paulish**, Novosibirsk (RU)

(58) **Field of Classification Search**
 CPC G01L 1/241; G01N 2021/1706; G01B 11/24; G01B 11/18
 USPC 73/800, 862.324, 862.624
 See application file for complete search history.

(73) **Assignee:** **Alexander Vladimirovich Poyarkov**, Troitsk (RU)

(56) **References Cited**
 U.S. PATENT DOCUMENTS
 3,786,681 A * 1/1974 Kiehn 73/382 R
 4,002,934 A 1/1977 Slezinger et al.

(*) **Notice:** Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 87 days.

(Continued)
 FOREIGN PATENT DOCUMENTS
 SU 847085 7/1981
 SU 1136010 1/1985
 SU 1536196 1/1990

(21) **Appl. No.:** **13/642,711**
 (22) **PCT Filed:** **Jul. 1, 2010**
 (86) **PCT No.:** **PCT/RU2010/000369**
 § 371 (c)(1),
 (2), (4) **Date:** **Oct. 22, 2012**
 (87) **PCT Pub. No.:** **WO2011/133063**
 PCT Pub. Date: **Oct. 27, 2011**

OTHER PUBLICATIONS
 International Search Report of PCT/RU2010/000369, Jan. 13, 2011.
 (Continued)

(65) **Prior Publication Data**
 US 2013/0036830 A1 Feb. 14, 2013

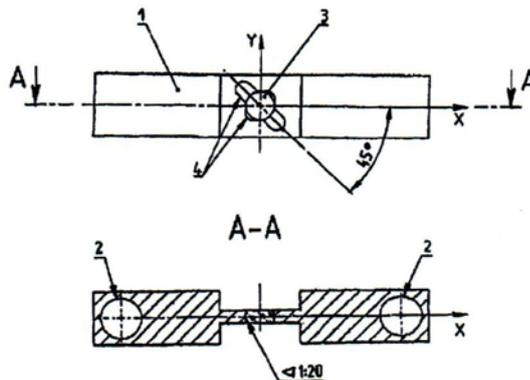
Primary Examiner — Max Noori
 (74) *Attorney, Agent, or Firm* — Collard & Roe, P.C.

(30) **Foreign Application Priority Data**
 Apr. 23, 2010 (RU) 2010116023

(57) **ABSTRACT**
 The tensometric transducer comprises a load element which is fixed to an object to be monitored, and a piezo-optical transducer which converts the magnitude of the stresses on a photoelastic element into an electrical signal, wherein the load element is in the form of a plate having a thinned portion at the fixing point for the photoelastic element, which is fixed in the plate in a preloaded state is such a way that the action of the initial load force is realized in two mutually perpendicular to directions, and a conical opening is formed in the center of the plate, the axis of the opening lying in a plane perpendicular to the load axis, wherein the photoelastic element is in the form of a truncated cone, wherein the angles of the taper of the opening and of the taper of the photoelastic element coincide with one another and are equal to a Morse taper.

(51) **Int. Cl.**
G01L 1/24 (2006.01)
G01B 11/16 (2006.01)
 (52) **U.S. Cl.**
 CPC **G01B 11/18** (2013.01); **G01L 1/241** (2013.01)
 USPC **73/800**

5 Claims, 1 Drawing Sheet





(11) **EP 2 562 522 A1**

(12) **EUROPEAN PATENT APPLICATION**
 published in accordance with Art. 153(4) EPC

(43) Date of publication:
27.02.2013 Bulletin 2013/09

(51) Int Cl.:
G01L 1/24^(2006.01) G01B 11/16^(2006.01)

(21) Application number: **10850337.6**

(86) International application number:
PCT/RU2010/000369

(22) Date of filing: **01.07.2010**

(87) International publication number:
WO 2011/133063 (27.10.2011 Gazette 2011/43)

(84) Designated Contracting States:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
 GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
 PL PT RO SE SI SK SM TR**

- **RAFAILOVICH, Alexei Sergeevich**
 Novosibirsk 630056 (RU)
- **FEDORININ, Viktor Nikolaevich**
 Novosibirsk 630128 (RU)
- **PAULISH, Andrei Georgievich**
 Novosibirsk 630117 (RU)

(30) Priority: **23.04.2010 RU 2010116023**

(71) Applicant: **Poyarkov, Alexander Vladimirovich**
Moskovskaya obl. 142190 (RU)

(74) Representative: **Andrae, Steffen et al**
Andrae Flach Haug
Balanstrasse 55
81541 München (DE)

(72) Inventors:
 • **SHATOV, Vladimir Alexandrovich**
Moscow 127322 (RU)

(54) **TENSOMETRIC TRANSDUCER**

(57) The tensometric transducer comprises a load element which is fixed to an object to be monitored, and a piezo-optical transducer which converts the magnitude of the stresses on a photoelastic element into an electrical signal, wherein the load element is in the form of a plate having a thinned portion at the fixing point for the photoelastic element, which is fixed in the plate in a preloaded state in such a way that the action of the initial load force

is realized in two mutually perpendicular directions, and a conical opening is formed in the center of the plate, the axis of the opening lying in a plane perpendicular to the load axis, wherein the photoelastic element is in the form of a truncated cone, wherein the angles of the taper of the opening and of the taper of the photoelastic element coincide with one another and are equal to a Morse taper.

(19)  **Евразийское
патентное
ведомство** (11) **024662** (13) **B1**

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента **2016.10.31** (51) Int. Cl. *G01L 1/24* (2006.01)
G01B 11/16 (2006.01)
(21) Номер заявки **201201422**
(22) Дата подачи заявки **2010.07.01**

(54) **ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ**

(31) **2010116023** (56) *SU-A1-847085*
(32) **2010.04.23** *SU-A1-1536196*
(33) **RU** *SU-A-1136010*
(43) **2013.03.29** *US-A-4002934*

(86) **PCT/RU2010/000369**
(87) **WO 2011/133063 2011.10.27**

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:
**ПОЯРКОВ АЛЕКСАНДР
ВЛАДИМИРОВИЧ (RU)**

(72) Изобретатель:
**Поярков Александр Владимирович,
Шатов Владимир Александрович,
Рафанлович Алексей Сергеевич,
Федоринни Виктор Николаевич,
Паулиш Андрей Георгиевич (RU)**

(57) Тензометрический преобразователь содержит нагрузочный элемент, закрепленный на контролируемом объекте, и пьезооптический преобразователь, преобразующий величину напряжений на фотоупругом элементе в электрический сигнал, причем нагрузочный элемент выполнен в виде пластины, имеющей утоньшение в месте крепления фотоупругого элемента, закрепленного в пластине в нагруженном состоянии таким образом, что действие исходной силовой нагрузки осуществляется в двух взаимно перпендикулярных направлениях, а в центре пластины выполнено конусовидное отверстие, ось которого лежит в плоскости, перпендикулярной оси нагружения, при этом фотоупругий элемент выполнен в виде усеченного конуса, причем углы конуса отверстия и конуса фотоупругого элемента совпадают и равны конусу Морзе.

B1

024662

024662 B1

УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА ВІНАХІД

№ 104375

ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на винаходи
27.01.2014.

Голова Державної служби
інтелектуальної власності України

М.В. Ковіня



(11) 104375

(19) UA

(51) МПК

G01L 1/24 (2006.01)

G01B 11/16 (2006.01)

<p>(21) Номер заявки: а 2012 12440</p> <p>(22) Дата подання заявки: 01.07.2010</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права на винахід: 27.01.2014</p> <p>(31) Номер попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: 2010116023</p> <p>(32) Дата подання попередньої заявки відповідно до Паризької конвенції: 23.04.2010</p> <p>(33) Код держави-учасниці Паризької конвенції, до якої подано попередню заявку: RU</p> <p>(41) Дата публікації відомостей про заявку та номер бюлетеня: 11.03.2013, Бюл.№ 5</p> <p>(46) Дата публікації відомостей про видачу патенту та номер бюлетеня: 27.01.2014, Бюл. № 2</p> <p>(86) Номер та дата подання міжнародної заявки, поданої відповідно до Договору про патентну кооперацію: PCT/RU2010/000369, 01.07.2010</p>	<p>(72) Винахідники: Поярков Александр Владімірович, RU, Шатов Владімір Александровіч, RU, Рафаїлович Алексей Сергєєвіч, RU, Федорінін Віктор Ніколаєвіч, RU, Пауліш Андрей Георгієвіч, RU</p> <p>(73) Власник: Поярков Александр Владімірович, Октябрьский пр-кт, д. 4, кв. 88, г. Троицк, Московская обл., 142190, Российская Федерация, RU</p>
---	---

(54) Назва винаходу:

ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ

(57) Формула винаходу:

1. Тензометричний перетворювач, що містить навантажувальний елемент, закріплений на контрольованому об'єкті, і п'єзооптичний перетворювач, що перетворює величину напружень на фотопружному елементі в електричний сигнал, який відрізняється тим, що навантажувальний елемент виконаний у вигляді пластини, у якій закріплений фотопружний елемент, у свідомо навантаженому стані і таким чином, що дія вихідного силового навантаження здійснюється в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

2. Перетворювач за п. 1, який відрізняється тим, що пластина має стоншування у місці кріплення фотопружного елемента.

3. Перетворювач за п. 1, який відрізняється тим, що в центрі пластини виконано конусоподібний отвір, вісь якого лежить у площині, перпендикулярній осі навантаження, при цьому фотопружний елемент виконаний у вигляді зрізаного конуса, причому кути конуса отвору і конуса фотопружного елемента збігаються і дорівнюють конусу Морзе.

4. Перетворювач за п. 1, який відрізняється тим, що в пластині виконані два взаємно перпендикулярних наскрізних розрізи, що не порушують цілісності пластини, осі яких складають 45° до осі навантаження, а центри розрізів збігаються з центром конусного отвору для кріплення фотопружного елемента.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2454642

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК (ВАРИАНТЫ)

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)*

Автор(ы): *Паулиш Андрей Георгиевич (RU), Федоринин Виктор Николаевич (RU)*

Заявка № 2011111967

Приоритет изобретения 29 марта 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 июня 2012 г.

Срок действия патента истекает 29 марта 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 454 642** ⁽¹³⁾ **C1**
 (51) МПК
G01L 1/22 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011111967/28, 29.03.2011
 (24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 29.03.2011
 Приоритет(ы):
 (22) Дата подачи заявки: 29.03.2011
 (45) Опубликовано: 27.06.2012 Бюл. № 18
 (56) Список документов, цитированных в отчете о
 поиске: SU 847085 A1, 15.07.1981. SU 1536196 A1,
 15.01.1990. SU 1136010 A1, 23.01.1985. US
 4002934 A, 11.01.1977.
 Адрес для переписки:
 630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
 Новосибирский государственный
 университет, отдел по защите ИС, Н.А.
 Беляевой

(72) Автор(ы):
 Паулиш Андрей Георгиевич (RU),
 Федоринин Виктор Николаевич (RU)
 (73) Патентообладатель(и):
 Общество с ограниченной
 ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ"
 ООО "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)

RU 2 4 5 4 6 4 2 C 1

(54) ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК (ВАРИАНТЫ)

(57) Реферат:
 Изобретение относится к контрольно-измерительной технике, в частности, для измерения деформаций в различных конструкциях посредством поляризационно-оптических преобразователей и может быть использовано в строительстве, на транспорте, в промышленных производствах, в контрольно-измерительной аппаратуре. Технический результат - расширение функциональных возможностей, упрощение конструкции, повышение ее надежности и точности измерения деформаций. Тензометрический датчик включает нагрузочный элемент, закрепляемый на контролируемом объекте, пьезооптический преобразователь, преобразующий в электрический сигнал

величину напряжений на фотоупругом элементе, который закреплен в заведомо нагруженном состоянии и таким образом, что действие исходной силовой нагрузки осуществляется в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и блок обработки сигнала. Нагрузочный элемент представляет собой полый цилиндр с четырьмя продольными разрезами, не нарушающими целостности цилиндра. Фотоупругий элемент пьезооптического преобразователя закреплен в цилиндре таким образом, что оптическая ось пьезооптического преобразователя совпадает с осью цилиндра и перпендикулярна плоскости измеряемых напряжений. Наружная поверхность может быть выполнена в виде конуса Морзе. 2 н. и 12 з.п. ф-лы, 6 ил.

RU 2 4 5 4 6 4 2 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 111629

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
НАПРЯЖЕНИЙ (ВАРИАНТЫ)**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной
ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА
ПОДИЙ" (RU)*

Автор(ы): *Паулиш Андрей Георгиевич (RU), Федоринин Виктор
Николаевич (RU)*

Заявка № 2011121502

Приоритет полезной модели 27 мая 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 20 декабря 2011 г.

Срок действия патента истекает 27 мая 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*

Б.И. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 111646

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
НАПРЯЖЕНИЙ

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной
ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА
ПОДИЙ" (RU)*

Автор(ы): *Паулиш Андрей Георгиевич (RU), Федоринин Виктор
Николаевич (RU)*

Заявка № 2011121506

Приоритет полезной модели 27 мая 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 20 декабря 2011 г.

Срок действия патента истекает 27 мая 2021 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 113828

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
НАПРЯЖЕНИЙ**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью
"ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)*

Автор(ы): *Паулиш Андрей Георгиевич (RU), Федоринин Виктор
Николаевич (RU)*

Заявка № 2011121504

Приоритет полезной модели 27 мая 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 27 февраля 2012 г.

Срок действия патента истекает 27 мая 2021 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 115474

**УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ
НАПРЯЖЕНИЙ**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью
"ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)*

Автор(ы): *Паулиш Андрей Георгиевич (RU), Федоринин Виктор
Николаевич (RU)*

Заявка № 2011121505

Приоритет полезной модели 27 мая 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 27 апреля 2012 г.

Срок действия патента истекает 27 мая 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2530466

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013131874

Приоритет изобретения 09 июля 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 13 августа 2014 г.

Срок действия патента истекает 09 июля 2033 г.

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 530 466** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК

G01L 1/24 (2006.01)*G01D* 3/028 (2006.01)*G12B* 7/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013131874/28, 09.07.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.07.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.07.2013

(45) Опубликовано: 10.10.2014 Бюл. № 28

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2422786 C1, 27.06.2011, . US
4002934 A, 11.01.1977, . JP 0011201735 A,
30.07.1999, . SU 1536196 A1, 15.01.1990, . WO
2009128040 A 1, 22.10.2009

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
Новосибирский государственный университет,
Отдел управления ИС, Беляевой Н.А.

(72) Автор(ы):

Поярков Александр Владимирович (RU),
Бараков Владимир Николаевич (RU),
Федоринин Виктор Николаевич (RU),
Паулиш Андрей Георгиевич (RU),
Филимонов Александр Леонидович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
"ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА
ПОДИЙ" (RU)

RU 2 530 466 C1

(54) ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

(57) Реферат:

Изобретение относится к контрольно-измерительной технике и может быть использовано в строительстве, на транспорте, в промышленных производствах, в контрольно-измерительной аппаратуре. Предложен тензометрический преобразователь, включающий нагрузочный элемент, закрепляемый на контролируемом объекте, пьезооптический преобразователь, преобразующий в электрический сигнал величину напряжений на фотоупругом элементе, который закреплен в заведомо нагруженном состоянии, и блок обработки сигнала. Нагрузочный элемент представляет собой пластину с цилиндрическим

отверстием, в котором фотоупругий элемент цилиндрической формы регулируемо зажат в направлении действия измеряемых деформаций с помощью двух стержней, изготовленных из материала с коэффициентом температурного расширения, большим, чем соответствующий коэффициент пластины. При этом длина стержней рассчитана таким образом, что обеспечивает неизменность величины исходного сжатия от изменения температуры. Технический результат - повышение точности измерений при одновременном упрощении конструкции устройства. 6 з.п. ф-лы. 3 ил.

RU 2 530 466 C1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2530467

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК

Патентообладатель(ли): **Общество с ограниченной ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)**

Автор(ы): **с.м. на обороте**

Заявка № 2013131875

Приоритет изобретения **09 июля 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **13 августа 2014 г.**

Срок действия патента истекает **09 июля 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 530 467** ⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК

G01B 11/16 (2006.01)

G01L 1/24 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013131875/28, 09.07.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
09.07.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 09.07.2013

(45) Опубликовано: 10.10.2014 Бюл. № 28

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2454642 C1, 27.06.2012, . US
6422084 B1, 23.07.2002, . RU 2422786 C1,
27.06.2011, . US 4002934 A, 11.01.1977, . JP
0011201735 A, 30.07.1999, . SU 1536196 A1,
15.01.1990

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
Новосибирский государственный университет,
Отдел управления ИС, Беляевой Н.А.

(72) Автор(ы):

Поярков Александр Владимирович (RU),
Федоринин Виктор Николаевич (RU),
Паулиш Андрей Георгиевич (RU),
Шапор Пётр Иванович (RU),
Сущих Александр Андреевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
"ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА
ПОДИЙ" (RU)

(54) ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ДАТЧИК

(57) Реферат:

Изобретение относится к контрольно-измерительной технике и может быть использовано в строительстве, на транспорте, в промышленных производствах, в контрольно-измерительной аппаратуре. Предложен тензометрический датчик, включающий нагрузочный элемент, представляющий собой полый цилиндр, закрепляемый на контролируемом объекте, пьезооптический преобразователь, преобразующий в электрический сигнал величину напряжений на фотоупругом элементе, который закреплен в заведомо нагруженном состоянии, и блок обработки сигнала. При этом оптическая ось пьезооптического преобразователя совпадает с осью цилиндра и перпендикулярна плоскости

измеряемых деформаций, а нагрузочный элемент представляет собой сплошной полый цилиндр из упругого материала с толщиной стенок, обеспечивающей необходимую упругость нагрузочного элемента в направлении измеряемых деформаций и определяющей чувствительность тензометрического датчика, который с торцов герметично закрыт, а с внешней стороны снабжен жесткими выступами, предназначенными для крепления тензометрического датчика на контролируемом объекте и передачи деформации этого объекта на фотоупругий элемент. Технический результат - повышение функциональных возможностей устройства. 8 з.п. ф-лы, 14 ил.

RU 2 530 467 C 1

RU 2 530 467 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2552128

ФОТОУПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013153233

Приоритет изобретения **29 ноября 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **29 апреля 2015 г.**

Срок действия патента истекает **29 ноября 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 552 128** ⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
G01L 1/24 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013153233/28, 29.11.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.11.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.11.2013

(45) Опубликовано: 10.06.2015 Бюл. № 16

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 115474 U1, 27.04.2012. RU 111646
U1, 20.12.2011. SU 1649315 A1, 15.05.1991. US
20130036830 A1, 14.02.2013

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
Новосибирский государственный университет,
Отдел управления ИС, Беляевой Н.А.

(72) Автор(ы):

Поярков Александр Владимирович (RU),
Бараков Владимир Николаевич (RU),
Паулиш Андрей Георгиевич (RU),
Маслов Олег Петрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
"ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА
ПОДИЙ" (RU)

(54) ФОТОУПРУГИЙ ЭЛЕМЕНТ

(57) Реферат:

Изобретение относится к контрольно-измерительной технике, в частности для измерения деформаций (напряжений) в различных конструкциях посредством поляризационно-оптических преобразователей, и может быть использовано в строительстве, на транспорте, в промышленных производствах, в контрольно-измерительной аппаратуре. Согласно изобретению фотоупругий элемент имеет в плане крестообразную форму, фронтальные

поверхности которого, параллельные направлению прикладываемых усилий, являются оптически плоскими, а боковые поверхности фотоупругого элемента имеют постоянный и/или переменный радиус кривизны. Технический результат - увеличение напряжений в центральной (рабочей) части фотоупругого элемента и, как следствие, повышение чувствительности пьезоэлектрических датчиков, использующих данные фотоупругие элементы. 3 ил.

RU 2 552 128 C 1

RU 2 552 128 C 1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2564691

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Патентообладатель(ли): **Общество с ограниченной ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" (ООО "ФИРМА ПОДИЙ") (RU)**

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014103763

Приоритет изобретения **04 февраля 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **09 сентября 2015 г.**

Срок действия патента истекает **04 февраля 2034 г.**

Заместитель руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 564 691** ⁽¹³⁾ **C2**(51) МПК
G01B 11/16 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2014103763/28, 04.02.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
04.02.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 04.02.2014

(43) Дата публикации заявки: 10.08.2015 Бюл. № 22

(45) Опубликовано: 10.10.2015 Бюл. № 28

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2454642 C1, 27.06.2012 . SU 847085
A1, 15.07.1981 . SU 1536196 A1, 15.01.1990 . US
4002934 A, 11.01.1977

Адрес для переписки:

630090, г.Новосибирск, ул. Пирогова, 2,
Новосибирский государственный университет,
Отдел управления ИС, Беляевой Н.А.

(72) Автор(ы):

Поярков Александр Владимирович (RU),
Бараков Владимир Николаевич (RU),
Паулиш Андрей Георгиевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Общество с ограниченной ответственностью
"ФИРМА ПОДИЙ" (ООО "ФИРМА
ПОДИЙ") (RU)

(54) ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

(57) Реферат:

Изобретение относится к контрольно-измерительной технике, в частности для измерения деформаций (напряжений) в различных конструкциях посредством поляризационно-оптических преобразователей, и может быть использовано в строительстве, на транспорте, в промышленных производствах, в контрольно-измерительной аппаратуре. Предложена конструкция тензометрического преобразователя, включающего нагрузочный элемент цилиндрической формы с разрезами, не нарушающими целостности цилиндра, и закрепляемый на контролируемом объекте, размещенный в нем пьезооптический преобразователь, состоящий из закрепленного в заведомо нагруженном состоянии фотоупругого элемента (ФЭ) с системой преобразования величины напряжений на ФЭ в электрический сигнал и блока обработки сигнала, причем фотоупругий элемент имеет в плане крестообразную форму, фронтальные поверхности которого, параллельные

направлению измеряемых усилий, являются оптически плоскими, а боковые поверхности ФЭ имеют постоянный и/или переменный радиус кривизны, при этом пьезооптический преобразователь имеет собственный корпус, который представляет собой цилиндр диаметром меньше, чем внешний диаметр ФЭ, и в котором выполнены отверстия, сквозь которые торцы боковых поверхностей ФЭ выступают за внешние габариты цилиндра, а в нагрузочном элементе напротив этих выступов на уровне размещения ФЭ выполнены четыре сквозных резьбовых отверстия, расположенные в плоскости, перпендикулярной оси цилиндра, и под углом 90 градусов относительно друг друга, под винты, обеспечивающие изначальную силовую нагрузку на ФЭ, при этом система преобразования величины напряжений на ФЭ в электрический сигнал пьезооптического преобразователя включает механизмы вращения поляризатора и четвертьволновой пластины. Технический результат - упрощение конструкции, повышение

RU 2 564 691 C 2

RU 2 564 691 C 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2565856

**УСТРОЙСТВО ОБРАБОТКИ СИГНАЛА
ПЬЕЗООПТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной
ответственностью "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)*

Автор(ы): *Поярков Александр Владимирович (RU), Бараков
Владимир Николаевич (RU), Павлов Михаил Алексеевич
(RU), Паулиш Андрей Георгиевич (RU)*

Заявка № 2014127832

Приоритет изобретения **08 июля 2014 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **23 сентября 2015 г.**

Срок действия патента истекает **08 июля 2034 г.**

Заместитель руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2618862

**СПОСОБ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ
ПОДЪЕМНОГО УСТРОЙСТВА**

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью
"ФИРМА ПОДИЙ" ООО "ФИРМА ПОДИЙ" (RU)*

Авторы: *Поярков Александр Владимирович (RU), Бараков
Владимир Николаевич (RU), Паулиш Андрей Георгиевич (RU),
Шатов Владимир Александрович (RU), Федоринин Виктор
Николаевич (RU)*

Заявка № 2015143478

Приоритет изобретения 12 октября 2015 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 11 мая 2017 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 12 октября 2035 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

Справка.

Я Беляева Нина Алексеевна, начальник отдела защиты и управления интеллектуальной собственностью (ОЗУИС) Новосибирского государственного университета (НГУ), в период с 2010 г. 2017 г. оформляла заявки на ниже перечисленные патенты на изобретения и полезные модели, в том числе как представитель ООО «Фирма ПОДИЙ», на основе Доверенности 77 А А 7370810, выданной 27.02.2014 зарегистрированной в реестре за № 1с-325, г.Москва.

Список патентов.

1. Матричный приемник терагерцового излучения (изобретение): пат. 2414688 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Гельфанд А.В., Кузнецов С.А.; заявл. 23.03.2010; опубл. 20.03.2011, Бюл. № 8.— 9 с.: ил.
2. Преобразователь терагерцового излучения (варианты) (изобретение): пат. 2447574 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Гельфанд А.В., Кузнецов С.А., Лазорский П.А.; заявл. 16.11.2010; опубл. 10.04.2012, Бюл. №10.— 9 с.: ил.
3. Матричный преобразователь терагерцового излучения (варианты) (изобретение): пат. 2482527 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Кузнецов С. А., Гельфанд А. В., Федоринин В. Н.; заявл. 24.08.2011; опубл. 20.05.2013, Бюл. №14.— 15 с.: ил.
4. Пирозлектрический детектор миллиметрового излучения (варианты) (изобретение): пат. 2606516 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Кузнецов С. А., Глухов А.В., Гайлес В.М.; заявл. 16.02.2015; опуб. 10.01.2017, Бюл. №1.— 16 с.: ил.
5. Тензометрический преобразователь (изобретение): пат. 2422786 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Рафаилович А.С., Шатов В.А., Поярков А.В.; заявл. 23.04.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. №18.— 7 с.: ил.
6. Tensometric transducer: United States Patent, Patent No.US 8887577 B2 / Paulish A. G., Fedorinin V. N., Poyarkov A. V., Shatov V. A., Rafailovich A. S. Priority Data 01.07.2010; Pub. Date 18.11.2014.
7. Тензометрический преобразователь (изобретение): Евразийский патент 024662 В1 / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Рафаилович А.С., Шатов В.А., Поярков А.В.; заявл. 01.07.2010; опубл. 31.10.2016.
8. Тензометрический перетворювач: патент України 104375 / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Рафаилович А.С., Шатов В.А., Поярков А.В.; заявл. 01.07.2010; опубл. 27.01.2014.
9. Тензометрический датчик (варианты) (изобретение): пат. 2454642 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н.; заявл. 29.03.2011; опубл. 27.06.2012, Бюл. №18.— 14 с.: ил.
10. Устройство для измерения механических напряжений (варианты) (полезная модель): пат. 111629 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н.; заявл. 27.05.2011; опубл. 20.12.2011, Бюл. №35.— 2 с.: ил.

11. Устройство для измерения механических напряжений (варианты) (полезная модель): пат. 111646 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н.; заявл. 27.05.2011; опубл. 20.12.2011, Бюл. №35.— 2 с.: ил.
12. Устройство для измерения механических напряжений (варианты) (полезная модель): пат. 113828 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н.; заявл. 29.03.2011; опубл. 27.02.2012, Бюл. №6.— 2 с.: ил.
13. Устройство для измерения механических напряжений (варианты) (полезная модель): пат. 115474 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Федоринин В.Н.; заявл. 27.05.2011; опубл. 27.04.2012, Бюл. №12.— 2 с.: ил.
14. Тензометрический преобразователь (изобретение): пат. 2530466 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н., Федоринин В. Н., Филимонов А. Л.; заявл. 09.07.2013; опубл. 10.10.2014, Бюл. №28.— 8 с.: ил.
15. Тензометрический датчик (изобретение): пат. 2530467 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Федоринин В. Н., Шапор П. И., Сущих А. А.; заявл. 09.07.2013; опубл. 10.10.2014.— 12 с.: ил.
16. Фотоупругий элемент (изобретение): пат. 2552128 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н., Маслов О. П. заявл. 29.11.2013; опубл. 10.06.2015.— 8 с.: ил.
17. Устройство обработки сигнала пьезооптического преобразователя (изобретение) пат. 2565856 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н., Павлов М. А.; заявл. 08.07.2014; опубл. 20.20.2015, Бюл. №29.— 7 с.: ил.
18. Тензометрический преобразователь (изобретение): пат. 2564691 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н. заявл. 04.02.2014; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28.— 18 с.: ил.
19. Способ контроля параметров движения подъемного устройства (изобретение): пат. 2618862 Рос. Федерация / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Бараков В. Н., Шатов В.А., Федоринин В.Н.; заявл. 12.10.2015; опубл. 11.05.2017, Бюл. №14.— 25 с.: ил.
20. Device and method for measuring combined deformations: International Patent Application No. PCT/RU2015/000220 / Paulish A.G., Poyarkov A. V., Barakov V. N., Maslov O. P. Publication Date: 13.10.2016.

Настоящим заверяю, что Паулиш Андрей Георгиевич является единственным лицом со стороны авторов, который предоставлял исходные материалы и участвовал в дальнейшем в подготовке заявок на выше перечисленные патенты: составление текста и подготовка чертежей, создание многозвенной формулы с зависимыми пунктами, а также в подготовке ответов по существу вопросов экспертов в процессе патентной экспертизы.

Начальник ОЗУИС

Белыева

Н. А. Беляева

09.01.2020

ПРИЛОЖЕНИЕ «В» ПРОТОКОЛЫ ИСПЫТАНИЙ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

«УТВЕРЖДАЮ»

Руководитель Филиала ИФП СО
РАН «КТИПМ»




В. Н. Федорин
15.04 2011 г.

ПРОТОКОЛ

предварительных испытаний опытных образцов УПС-10 на сертифицированном
оборудовании в Институте горного дела СО РАН

г. Новосибирск

03 марта – 11 апреля 2011 г.

1. Цель испытаний.

Определение категории точности и величины максимальной деформации первичного преобразователя УПС-10, согласно ГОСТ . Испытания проводились в рамках Договора № 637-11 от 25.01.2011 г.

2. Место испытаний

Институт горного дела СО РАН (г. Новосибирск)

3. Условия проведения испытаний:

- Температура окружающего воздуха плюс 22 °С
- Относительная влажность воздуха 78%
- Атмосферное давление 745 мм. рт. ст.

4. Оборудование и применяемые средства:

Пресс INSTRON 8802.

Описание первичного преобразователя

Первичный преобразователь УПС-10 представляет собой металлическую пластину переменного сечения, в центре которой закреплен фотоупругий элемент (рисунок 1). Конструкция пластины обеспечивает концентрацию напряжений, возникающих при деформации пластины, на фотоупругом элементе. Пьезооптический преобразователь, закрепленный на пластине, преобразует величину напряжений на фотоупругом элементе в электрический сигнал.

Первичный преобразователь крепится на контролируемом объекте с помощью монтажных отверстий (рисунок 1). Для увеличения надежности контакта первичного преобразователя с контролируемым объектом на контактной поверхности пластины выполнены «ножи» (преобразователь ПП007) или «зубья» (преобразователь ПП006) (рисунок 2).

Описание установки для испытаний

Испытания первичного преобразователя проводились на прессе INSTRON 8802 (рисунок 3). Предельная нагрузка прессы 250 кН, точность выдержки нагрузки 0.5%. Пресс оснащен климатической камерой для проведения испытаний при повышенных температурах вплоть до +55 °С с точностью ± 0.2 °С. Подача нагрузки на прессе осуществлялась с заданной скоростью в пределах 0,5-2,0 кН/с с помощью компьютерной программы.

Для проведения испытаний первичного преобразователя УПС-10 был изготовлен нагрузочный элемент (цилиндр) из некаленной стали марки 50Г диаметром 95 мм и длиной 280 мм (Рисунок 4). На боковых поверхностях нагрузочного элемента выполнены резьбовые глухие отверстия М8 для монтажа двух первичных преобразователей. Нагрузочный элемент устанавливался на пресс как показано на рисунке 3.

Для проведения испытаний при повышенных температурах нагрузочный элемент помещался в климатическую камеру (рисунок 5).

Измерение сигнала с первичного преобразователя осуществлялось с помощью 8-канального вторичного преобразователя (рисунок 6), позволяющего измерять временную зависимость сигнала с датчиков с частотой 10 Гц и записывать данные в файл для дальнейшей обработки.

Методика испытаний

Метрологические характеристики первичных преобразователей УПС-10 определялись по методикам согласно ГОСТ 28836-90 (пп. 2.2, 6.6-6.9).

Нагрузочный элемент с двумя закреплёнными первичными преобразователями (один с «ножами», второй с «зубьями») предварительно нагружался усилием 10 кН. При дальнейших нагрузках за начальный сигнал принимался условный сигнал, соответствующий выходному сигналу предварительно нагруженного преобразователя.

После выдержки нагрузочного элемента при предварительной нагрузке 10 кН в течение 30 секунд проводилась «тренировка» нагрузочного элемента трехкратным нагружением до 240 кН со скоростью увеличения и последующего уменьшения нагрузки 2 кН/с. «Тренировка» проводилась с целью выработки пластической деформации в нагрузочном элементе, связанной с шероховатостью его торцов. После «тренировки» нагрузочный элемент оставался под нагрузкой 10 кН.

Начиная с предварительной нагрузки 10 кН, нагрузочный элемент двукратно нагружался до максимальной нагрузки 240 кН со скоростью 0,5 кН/с, затем двукратно со скоростью 1 кН/с и двукратно со скоростью 2 кН/с. При этом нагрузочный элемент выдерживался при максимальной нагрузке в течение 10 секунд, затем разгружался с той же скоростью до величины предварительной нагрузки 10 кН. Показания вторичного преобразователя записывались в файл. Указанный цикл нагрузок повторялся дважды.

Для определения метрологических характеристик при изменении температуры на 10°C нагрузочный элемент помещался в климатическую камеру (рисунок 5). После выдержки нагрузочного элемента при повышенной температуре указанный цикл нагрузок повторялся дважды.

Результаты испытаний

Результаты испытаний приведены на рисунках 7-10 и в таблице 1.

На рисунке 7 приведены временные зависимости сигналов с первичных преобразователей ПП006 (с зубьями) и ПП007 (с ножами) для одного цикла испытаний. Один цикл испытаний состоит последовательно из четырех циклов нагружения и разгружения со скоростью 2.0 кН/с, двух циклов нагружения и разгружения со скоростью 0.5 кН/с, двух циклов нагружения и разгружения со скоростью 1.0 кН/с, и двух циклов нагружения и разгружения со скоростью 2.0 кН/с. Первые четыре цикла являются тренировкой нагрузочного элемента и первичных преобразователей с целью выработки пластической деформации, связанной с пластической деформацией самого нагрузочного элемента и мест крепления первичных преобразователей. Из рисунка видно, что за первые

четыре тренировочных циклов происходит смещение нуля показаний датчиков, как раз связанное с пластической деформацией. При последующих циклах нагружения-разгрузки смещение незначительно. Далее весь цикл испытаний повторялся. Для вычисления метрологических параметров первичных преобразователей использовались два последних цикла нагружения-разгрузки со скоростью 2.0 кН/с. Таким образом, всего для расчета параметров первичных преобразователей при НКУ использовались четыре цикла нагружения-разгрузки.

На рисунке 8 показана временная зависимость величины нагрузки на нагрузочный элемент, полученной с помощью компьютерной программы пресса. Эти данные использовались для получения зависимости сигналов с первичных преобразователей от величины приложенной нагрузки. Примеры таких зависимостей показаны на рисунке 9.

Расчет метрологических параметров преобразователей проводился в диапазоне нагрузок от 10 кН до 90 кН, при этом сигнал с преобразователей, соответствующий 10 кН принимался за нулевой сигнал. Данный диапазон был выбран исходя из максимально допустимой нелинейности 0.5%, что соответствует точности измерений нагрузки на прессе. Величины полученных параметров приведены в таблице 1.

Для проведения испытаний при изменении температуры на 10 °С нагрузочный элемент с двумя закрепленными первичными преобразователями помещался в климатическую камеру, которая является составной частью оборудования пресса. Увеличение и поддержание заданной температуры осуществлялось нагнетанием теплого воздуха с контролем температуры. Точность стабилизации температуры составила ± 0.2 . На рисунке 10 показаны зависимости величины сигналов с первичных преобразователей от величины нагрузки при температуре НКУ и НКУ+10 °С. Изменение рабочего коэффициента преобразования (РКП) при изменении температуры на 10 °С составило 12%.

Выводы

1. Согласно полученным результатам испытаний, первичный преобразователь ПП006 может быть отнесён к категории точности 0,50 в соответствии с ГОСТ 28836-90.
2. Первичный преобразователь ПП007 не может быть отнесен ни к одной категории точности в соответствии с ГОСТ 28836-90.
3. Изменение рабочего коэффициента преобразования (РКП) при изменении температуры на 10 °С составило 12%, что превышает допустимые значения метрологических характеристик по ГОСТ 28836-90. Температурная зависимость РКП может быть учтена введением в конструкцию первичного преобразователя датчика температуры.

4. Величина относительной деформации, в пределах которой обеспечивается точность 0.5%, составила 5×10^{-5} или 3.4 мкм при базе преобразователя 70 мм по внутренним зубьям.
5. Достигнутое значение максимальной относительной деформации составляет 260% (10 мкм) от величины относительной деформации, в пределах которой обеспечивается точность 0.5%. После многократного приложения максимально достигнутой нагрузки первичные преобразователи сохранили метрологические характеристики в пределах 0.5%. Предельная деформация преобразователя не была достигнута на данном оборудовании.
6. Анализ результатов испытаний показал, что основным вкладом в погрешность является нелинейность зависимости показаний первичного преобразователя от нагрузки в пределах 0.5%, что соответствует точности выдержки нагрузки прессом (0.5%) в соответствии с сертификатом на пресс.
7. Для получения более объективных данных о категории точности необходимо использовать оборудование с более высоким классом точности.

Рисунки

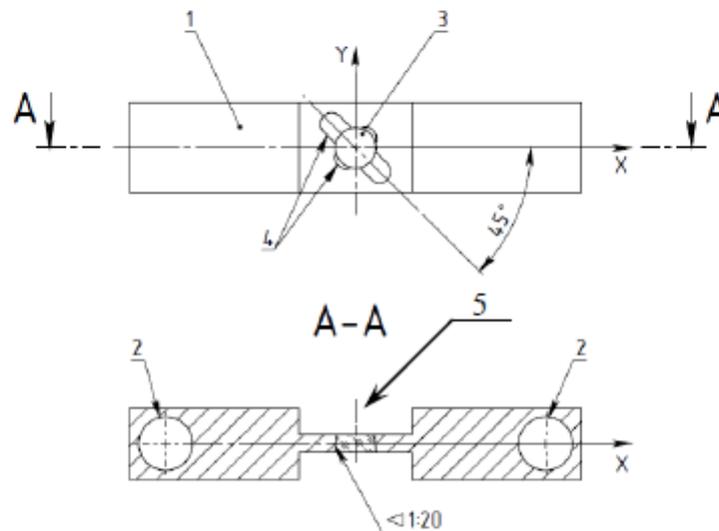


Рисунок 1 – Схема первичного преобразователя
1 – пластина, 2 – монтажные отверстия, 3 – фотоупругий элемент, 4 – разрезы, 5 – оптическая ось пьезооптического преобразователя

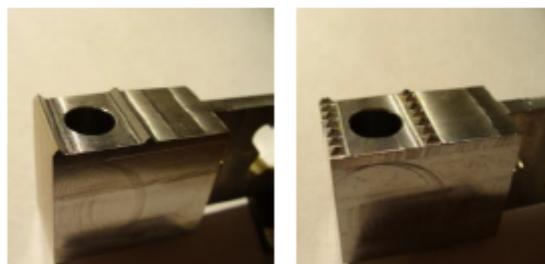


Рисунок 2 – Пластины первичного преобразователя УПС-10 с «ножами» (слева) и с «зубьями» (справа)

Нагрузочный
элемент

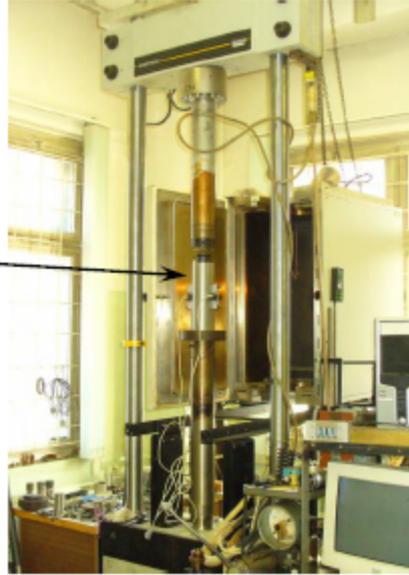
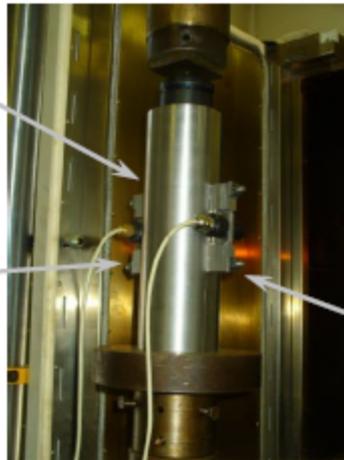


Рисунок 3 – Пресс INSTRON 8802 с климатической камерой

Нагрузочный
элемент

Первичный
преобразователь
УПС-10
ПП007



Первичный
преобразователь
УПС-10
ПП006

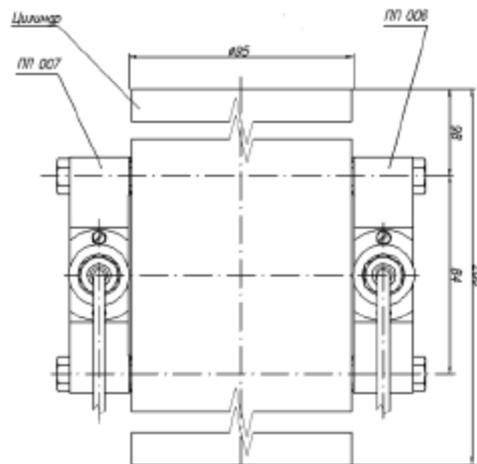


Рисунок 4 – Нагрузочный элемент с закрепленными первичными преобразователями УПС-10. Вверху – общий вид, внизу – схема



Рисунок 5 – Климатическая камера для измерения метрологических характеристик при повышенной температуре



Рисунок 6 – 8-канальный вторичный преобразователь с ноутбуком для измерения временных характеристик сигнала с первичных преобразователей

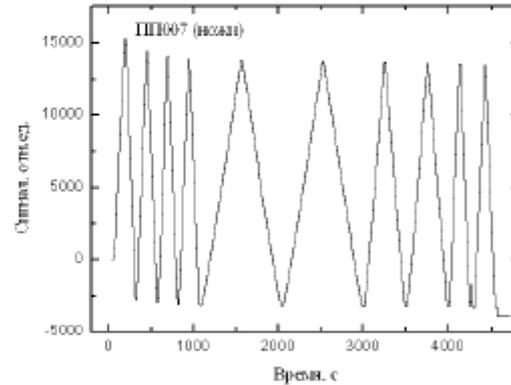
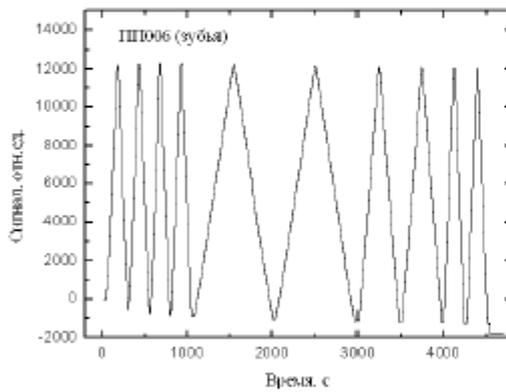


Рисунок 7 – Временные зависимости показаний первичных преобразователей ПП006 (зубья) и ПП007 (ножи) для одного цикла испытаний

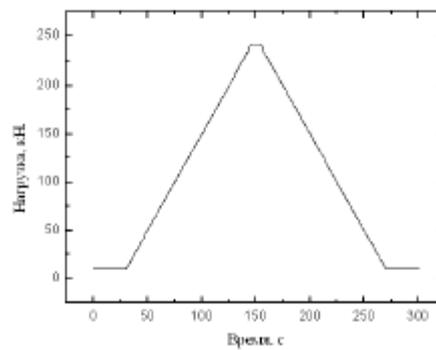


Рисунок 8 – Временная зависимость величины нагрузки на нагрузочный элемент, полученная с помощью компьютерной программы прессы

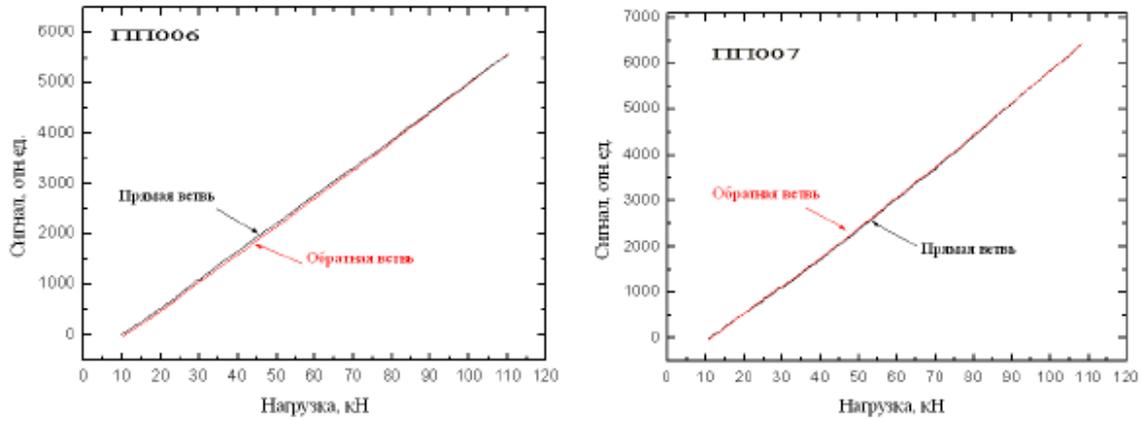


Рисунок 9 – Зависимости сигнала первичных преобразователей от величины нагрузки на нагрузочном элементе при температуре НКУ

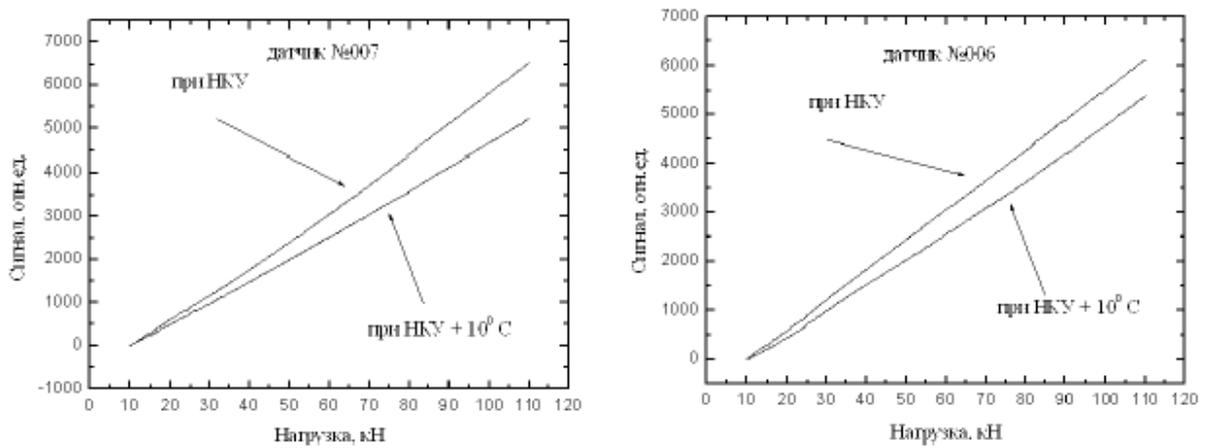


Рисунок 10 – Зависимости сигнала первичных преобразователей от величины нагрузки на нагрузочном элементе при температуре НКУ и НКУ+10°С

Таблица 1

Первичный преобразователь ПП006

Нагрузка кН	Экспериментальные значения		Расчетные значения	Систематическая составляющая погрешности %	Нелинейность %	Гистерезис %	Среднее квадр. откл. %
	Прямая последовательность	Обратная последовательность					
10	0	2	0	0,02	0,02	0,02	0,07
20	525	525	547	-0,5	-0,5	0,0	0,07
30	1097	1093	1106	-0,2	-0,20	0,09	0,07
40	1665	1656	1660	0,01	0,1	0,2	0,07
50	2219	2201	2219	-0,2	0,0	0,4	0,07
60	2765	2760	2774	-0,2	-0,2	0,1	0,07
70	3315	3319	3328	-0,2	-0,3	-0,09	0,07
80	3878	3887	3887	-0,1	-0,2	-0,2	0,07
90	4432	4455	4441	0,05	-0,2	-0,5	0,07

Первичный преобразователь ПП007

Нагрузка кН	Экспериментальные		Расчетные значения	Систематическая составляющая	Нелинейность	Гистерезис
	нагрузочные	разгрузочные				
10	0	0	-414	4,79	5,01	0,45
20	430	472	270	1,67	1,61	0,13
30	996	1067	956	0,33	0,07	0,52
40	1605	1670	1642	0,67	0,89	0,45
50	2248	2320	2327	1,11	1,38	0,53
60	2912	2983	3013	1,33	1,59	0,52
70	3584	3653	3698	1,44	1,68	0,49
80	4277	4347	4384	1,24	1,50	0,52
90	4984	5038	5070	0,97	1,11	0,29

Приложения

1. Методика испытаний первичного преобразователя устройства преобразования сигналов УПС-10.
2. Сертификат прессы INSTRON 8802 (Test Certificate)

Ведущий конструктор

В. И. Сидоров

Старший научный сотрудник

А. Г. Паулиш



ПРОТОКОЛ
проведения испытаний опытного образца УПС-10, зав. № 008
в составе лифта Q=1000 кг, V=1м/с

г. Могилев

07 июня 2011г.

1. Объём испытаний.

Проверка на соответствие пунктов 4.1 – 4.3 «Программа испытаний устройства преобразования сигналов УПС-10.....» от 02.06.2011г (далее – Программа).

2. Условия проведения испытаний:

- температура окружающего воздуха плюс 28 °С;
- относительная влажность воздуха 75 %;
- атмосферное давление 751 мм рт. ст.
- ветер 6,2 м/с.

3. Оборудование и применяемые средства:

- лифт грузоподъемностью 1000 кг, V = 1 м/с подготовленный к испытанию;
- эталонный груз – 5 кг, 25 кг Испытательного центра РУП завод «Могилевлифтмаш».

4. Монтаж УПС-10.

4.1. Монтаж первичного преобразователя (ПП) был осуществлен на швеллер лебедки, в месте предварительно определенном математическим моделированием распределения деформаций по конструкции лебедки с последующей выдержкой – 3 часа (Рисунок 1).

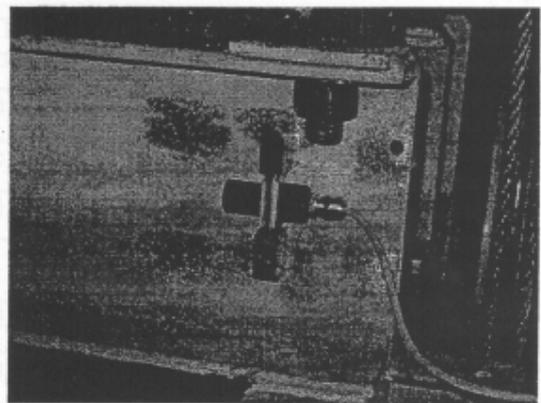
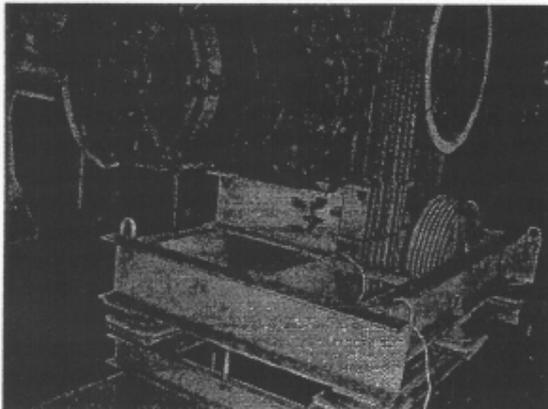


Рисунок 1.

4.2. Монтаж двух датчиков движения (ДД) поз.1 на корпус ограничителя скорости в направлении диска поз.2 со смещением на ¼ периода импульсов (Рисунок 2).

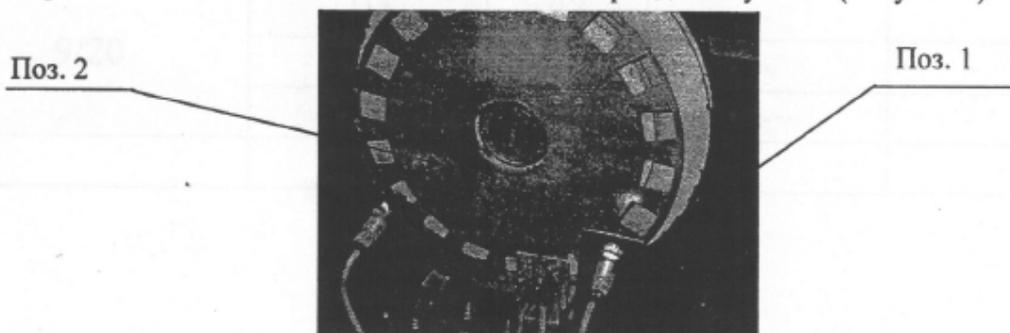


Рисунок 2.

5. Настройка УПС-10:

- грузоподъёмность – 1000 кг;
- временные параметры частотно-импульсного преобразователя двигателя лебедки;
- минимальный пороговый вес – 25 кг;
- количество остановок – 9.

6. Калибровка УПС-10.

6.1. Проведена калибровка эталонным грузом 280 кг на 9 остановках.

6.2. Проведена проверка правильности определения этажности устройством при движении и остановки лифта.

7. Испытания.

7.1. Проверка стабильности показаний устройства при загрузке и выгрузки лифта по п. 4.1 Программы:

- Загружаемый вес – 115 кг;
- Место нахождения лифтовой кабины – 1 этаж, 10 этаж, 20 этаж (1 – 4 – 9 остановка);
- Число циклов – 3 на каждом месте нахождения лифтовой кабины.

Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Номер остановки / этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -20 этаж)		Вниз (20 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1/1	112	0,3	112	0,3	
	114	0,1	113	0,2	
	114	0,1	114	0,1	
4/10	117	0,2	116	0,1	
	116	0,1	115	0	
	116	0,1	116	0,1	
9/20	113	0,2	-	-	
	115	0	-	-	
	115	0	-	-	

7.2. Проверка стабильности показаний устройства при загрузке и выгрузки лифта по п. 4.1 Программы:

- Загружаемый вес – 25 кг;
- Место нахождения лифтовой кабины – 1 этаж, 10 этаж, 20 этаж (1 – 4 – 9 остановка);
- Число циклов – 3 на каждом месте нахождения лифтовой кабины.

Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Номер остановки / этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -20 этаж)		Вниз (20 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1/1	23	0,2	21	0,4	
	23	0,2	22	0,3	
	23	0,2	23	0,2	
4/10	22	0,3	22	0,3	
	22	0,3	21	0,4	
	23	0,3	21	0,4	
9/20	26	0,1	-		
	24	0,1	-		
	23	0,2	-		

7.3. Проверка срабатывания релейных выходов устройства и передача сигналов на станцию управления лифтом при загрузке лифтовой кабины грузом 20 кг; 50 %, 90 %, 110 % грузоподъемности лифта по п.4.2 Программы:

- Загружаемый вес – 25; 500; 900; 1075 кг.
- Место нахождения лифтовой кабины – 1 этаж, 20 этаж (1 – 9 остановка);
- Число циклов – 1 на каждом месте нахождения лифтовой кабины

Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Пороги срабатывания релейных выходов	Фактический вес срабатывания релейных выходов, кг	
	1 этаж	20 этаж
25 кг	25	25
50%	505	505
90%	905	905
1075 кг	1080	1080

7.4. Проверка работоспособности устройства после посадки лифтовой кабины с грузом на ловителя по п.4.3 «Программы испытаний УПС-10»:

- Загружаемый вес – 525 кг.
- Место нахождения лифтовой кабины – между 16 и 18 этажами (7 – 8 остановками);
- Число циклов – 1 посадка.

7.5. Примечание: после снятия лифтовой кабины с ловителей проведена проверка стабильности показаний устройства при загрузке и выгрузки лифта по п. 4.1 Программы:

- Загружаемый вес – 115 кг;
- Место нахождения лифтовой кабины – 1 этаж, 20 этаж (1 – 9 остановка);
- Число циклов – 3 на каждом месте нахождения лифтовой кабины.

Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4

Номер остановки / этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -20 этаж)		Вниз (20 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1/1	117	0,2	114	0,1	
	116	0,1	113	0,2	
	114	0,1	112	0,3	
9/20	116	0,1	-		
	117	0,2	-		
	116	0,1	-		

8. Заключение.

- 8.1. Испытания представленного образца устройства преобразования сигналов УПС-10 зав. № 008 проведены в полном объеме согласно п.п. 4.1 - 4.3 Программы.
- 8.2. По пункту 4.1 Программы максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 1000 кг составила 0,4 % от грузоподъемности лифта.
- 8.3. По пункту 4.2 Программы релейные выходы устройства сработали в соответствии заданным весам.
- 8.4. По пункту 4.3 Программы максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 1000 кг составила 0,3 % от грузоподъемности лифта.

Испытания проводили:

от РУП завода «Могилевлифтмаш»
Начальник бюро ОГК



И.В. Иванов

от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

Заместитель директора по новой технике



В.А.Шатов

Ведущий конструктор



В.И. Сидоров

УТВЕРЖДАЮ

И. о. главного инженера

РУП завод «Могилевлифтмаш»

А.Е. Кротович

« 28 / 09 2012г.

ПРОТОКОЛ

приемочных испытаний опытного образца УПС-10 зав. № 001
в составе лифта Q = 500 кг, V = 1,0 м/с (ПП-404С зав. № 48441С) в качестве индикатора
степени загрузки лифта, с использованием информации от лифтовой станции УЛ АЕИГ
656353.036 по существующему протоколу

г. Могилев

28 сентября 2012г.

1. Цель испытаний.

Проверка на соответствие пунктов 4.1 – 4.7 «Программа испытаний устройства преобразования сигналов УПС-10.....» от 25.09.2012г (далее – Программа).

2. Условия проведения испытаний:

- температура окружающего воздуха плюс 28 °С;
- относительная влажность воздуха 75 %;
- атмосферное давление 751 мм рт. ст.
- ветер 6,2 м/с.

3. Оборудование и применяемые средства:

- лифт грузоподъемностью 500 кг, V = 1 м/с подготовленный к испытанию;
- эталонный груз – 5 кг, 25 кг Испытательного центра РУП завод «Могилевлифтмаш».

4. Монтаж УПС-10.

4.1. Монтаж первичного преобразователя (ПП) был осуществлен на швеллер лебедки, в месте предварительно определенном математическим моделированием распределения деформаций по конструкции лебедки с последующей выдержкой – 3 часа (Рисунок 1).
(Монтаж осуществлен 18.08.2011 г.)

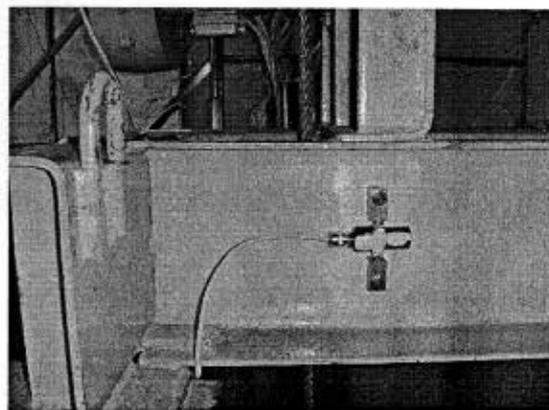
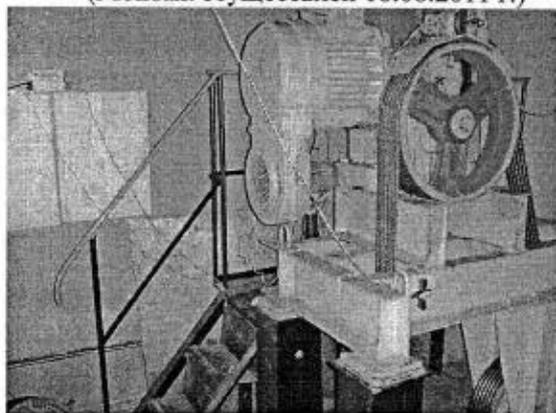


Рисунок 1.

4.2. Монтаж кабеля ДББ 6.644.118 был осуществлен в соответствии с руководством по эксплуатации ДББ 2.009.078 РЭ и технической документации «Устройство управления лифтами серии УЛ» (электропривод автоматика) АЕИГ.656353.036 (Рисунок 2).

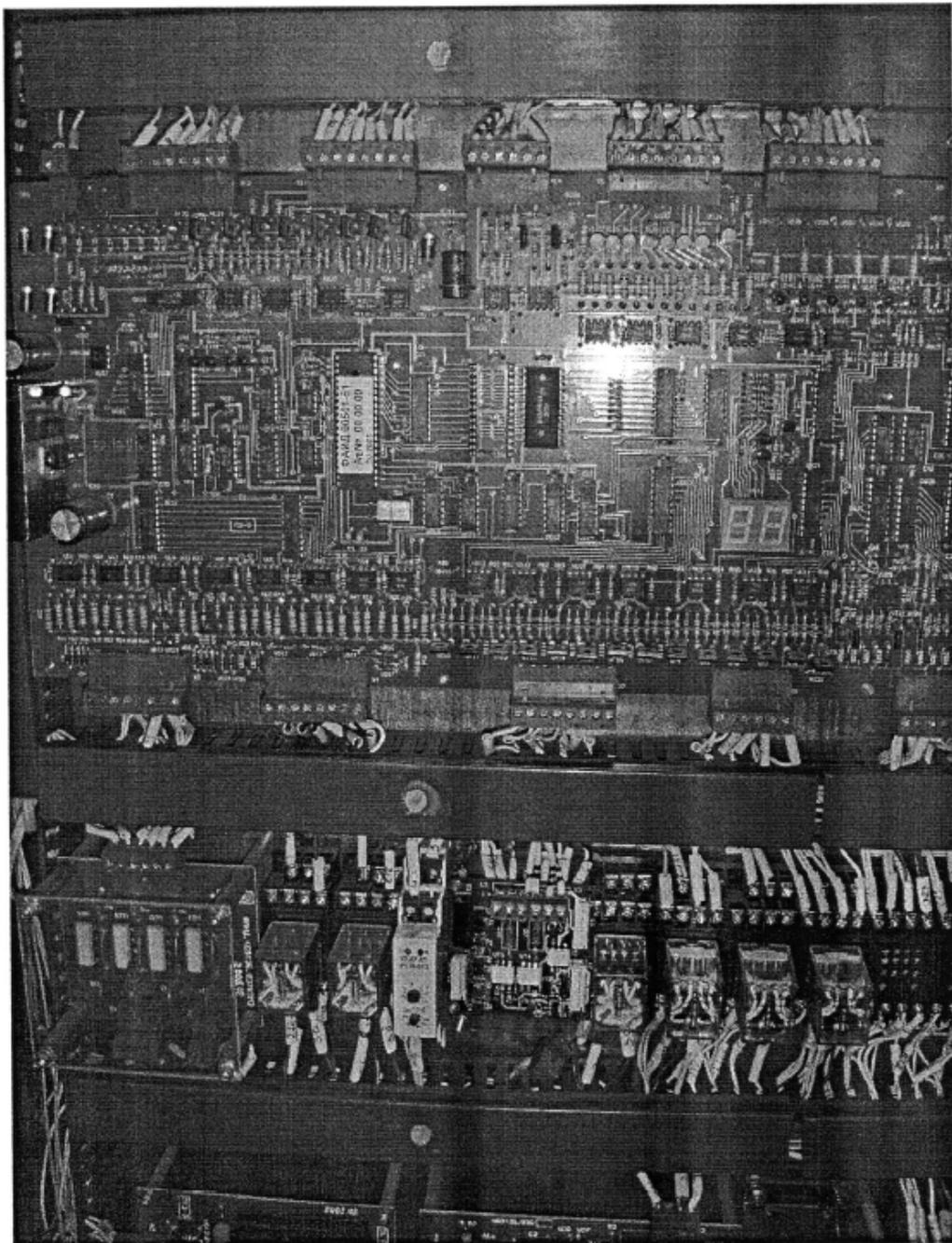


Рисунок 2.

5. Настройка УПС-10:

- грузоподъёмность – 500 кг;
- временные параметры частотно-импульсного преобразователя двигателя лебедки (время 1 = 2, время 2 = 1, время 3 = 1);
- минимальный пороговый вес – 25 кг;
- количество этажей – 9.

6. Калибровка УПС-10.

6.1. Проведена калибровка эталонным грузом 250 кг на 9 остановках.

6.2. Проведена проверка правильности определения этажности устройством при движении и остановки лифта.

7. Испытания.

Результаты испытаний по пп.4.1 - 4.7 Программы приведены в таблицах 1 - 5.

7.1. Проверка выдачи информационных сигналов, погрешности преобразования, продолжительности цикла преобразования, времени выхода на установленный режим работы

Таблица 1

№	Точка нагружения лифта	Величина нагрузки, кг	Знак на индикаторе ПВ	Факт срабатывания релейного выхода	Погрешность преобразования, %	Продолжительность цикла преобразования, с	Время выхода на установл. режим, мин
1	20 кг	26	20 кг	сработал	0,2	1	15
2	50% НПП (250 кг)	252	50%	сработал	0,4	1	15
3	90% НПП (450 кг)	452	90%	сработал	0,4	1	15
4	110%НПП (575 кг)	577	110%	сработал	0,4	1	15

7.2. Проверка обнуления значения массы пустой кабины.

Таблица 2

№	Точка нагружения лифта	Величина веса загрузки, кг	Знак на индикаторе ПВ	Факт обнуления
1	20 кг	25	20 кг 26	-
2	50% НПП	205	50% 250	-
3	90% НПП	362	90% 450	-
4	110% НПП	476	110% 575	-
5	0 кг	0	2 кг	Обнулilл через 5 секунд
6	20 кг	25	20 кг 26	Обнулilл через 30 минут

7.3. Проверка показания УПС-10 при движении пустой кабины лифта по всем этажам с остановками на каждом этаже, с открыванием и закрыванием дверей.

Таблица 3

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Факт обнуления	Показания прибора, кг	Факт обнуления	
1	0	-	-1	Обнулил	
2	-4	Обнулил	1	Обнулил	
3	3	Обнулил	2	Обнулил	
4	2	Обнулил	4	Обнулил	
5	-1	Обнулил	1	Обнулил	
6	5	Обнулил	0	-	
7	7	Обнулил	-1	Обнулил	
8	2	Обнулил	2	Обнулил	
9	-5	Обнулил	-	-	

7.4. Проверка показания УПС-10 при движении кабины лифта загруженной весом более 50% грузоподъёмности лифта по всем этажам с остановками на каждом этаже, с открыванием и закрыванием дверей.

Таблица 4

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1	248	0,2	247	0,4	
2	251	0,4	250	0,2	
3	250	0,2	248	0,2	
4	248	0,2	251	0,4	
5	251	0,4	250	0,2	
6	247	0,4	246	0,6	
7	248	0,2	249	0	
8	252	0,6	251	0,4	
9	250	0,2	-	-	

7.5. Проверка работоспособности УПС-10 в составе лифта в реальном режиме работы.

Таблица 5

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1	84	0,2	83	0,4	
2	83	0,4	86	0,2	
3	86	0,2	84	0,2	
4	84	0,2	83	0,4	
5	85	0	86	0,2	
6	82	0,6	82	0,6	
7	83	0,4	84	0,2	
8	86	0,2	84	0,2	
9	84	0,2	-	-	

8. Заключение.

8.1. Испытания представленного образца устройства преобразования сигналов УПС-10 зав. № 001 проведены в полном объеме согласно п.п. 4.1 - 4.7 Программы.

8.2. По пункту 4.1 Программы релейные выходы устройства сработали в соответствии заданным весам. Максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,4 % от грузоподъемности лифта.

8.3. По пункту 4.2 Программы продолжительность цикла преобразования составила 1 с.

8.4. По пункту 4.3 Программы обнуление значения массы пустой кабины происходило через 5 с.

8.5. По пункту 4.4 Программы время выхода на установленный режим работы штатно.

8.6. По пункту 4.5 Программы значение пустой кабины при движении по этажам и остановкам с открыванием дверей показывало ноль.

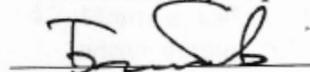
8.7. По пункту 4.6 Программы максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,6 % от грузоподъемности лифта.

8.8. По пункту 4.7 Программы максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,6% от грузоподъемности лифта в реальном режиме работы.

Испытания проводили:

от РУП завода «Могилевлифтмаш»

Главный конструктор

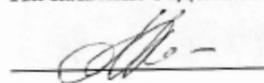
 И.Н. Балабанов

Начальник бюро ОГК

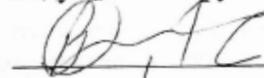
 И.В. Иванов

от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

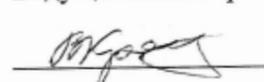
Начальник отдела инноваций и развития

 В.Н. Бараков

Ведущий конструктор

 В.И. Сидоров

Ведущий инженер электроник

 В.А. Крапивницкий

СОГЛАСОВАНО
 Главный конструктор
И.Н. Балабанов
 « 20 » 03 2013г.

УТВЕРЖДАЮ
 Главный инженер
 ОАО «Могилевлифтмаш»
Н.М. Иванов
 « 20 » 03 2013г.

ПРОТОКОЛ

приемочных испытаний опытного образца УПС-12 зав. № 005 в составе лифта Q = 500 кг, V = 1,0 м/с (ПП-404С зав. № 48441С) в качестве индикатора степени загрузки лифта, с использованием информации от лифтовой станции УЛ АЕИГ 656353.036.

г. Могилев

20 марта 2013 г.

1. Цель испытаний.

Проверка на соответствие устройства преобразования сигналов УПС-12 пунктов 4.1 – 4.7 «Программа испытаний опытных образцов контроля перегрузки кабины УПС-12 в составе лифта Q = 500 кг, V = 1,0 м/с (ПП-404С зав. № 48441С) в качестве индикатора степени загрузки лифта, используя информацию с лифтовой станции УЛ АЕИГ 656353.036 по существующему протоколу» от 26.02.2013 г (далее – Программа).

2. Условия проведения испытаний:

- температура окружающего воздуха плюс 18 °С;
- относительная влажность воздуха 75 %;
- атмосферное давление 751 мм рт. ст.
- ветер 6,2 м/с.

3. Оборудование и применяемые средства:

- лифт грузоподъемностью 500 кг, V = 1 м/с подготовленный к испытанию;
- эталонный груз – 5 кг, 25 кг Испытательного центра ОАО «Могилевлифтмаш».

4. Монтаж УПС-12.

4.1. Монтаж первичного преобразователя (ПП) был осуществлен на швеллер лебедки, в месте предварительно определенном математическим моделированием распределения деформаций по конструкции лебедки с последующей выдержкой – 3 часа (Рисунок 1). (Монтаж осуществлен 19.03.2013 г.)

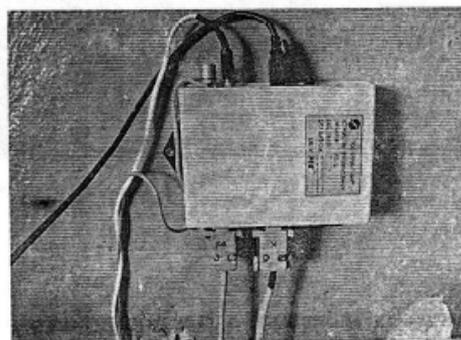
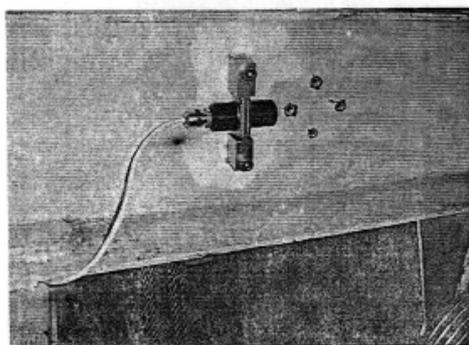


Рисунок 1.

4.2. Монтаж кабеля ДББ 6.644.118 был осуществлен в соответствии с руководством по эксплуатации ДББ 2.009.079 РЭ и технической документации «Устройство управления лифтами серии УЛ» (электропривод автоматика) АЕИГ.656353.036 (Рисунок 2).

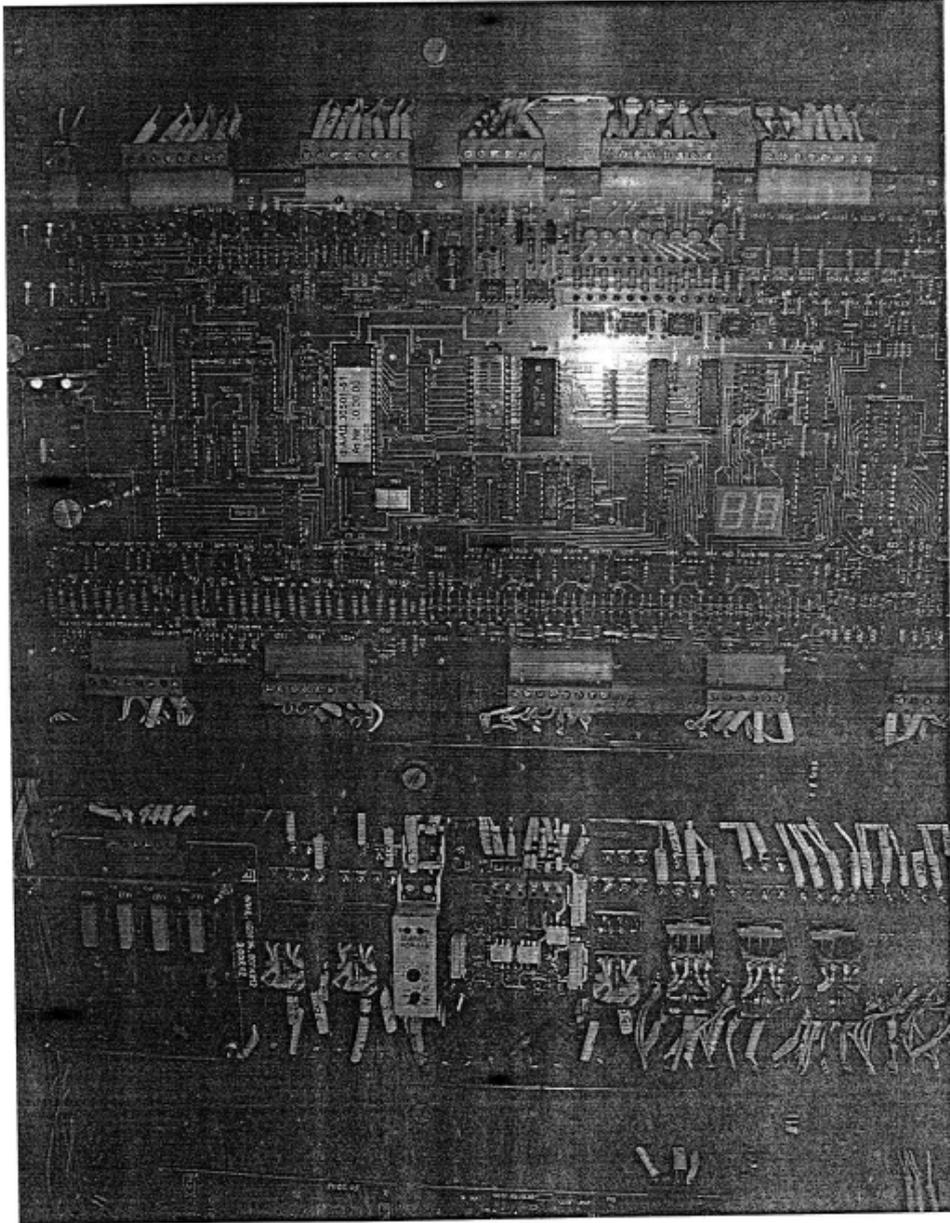


Рисунок 2.

5. Настройка УПС-12:

- грузоподъемность – 500 кг;
- временные параметры частотно-импульсного преобразователя двигателя лебедки (время 1 = 3, время 2 = 1, время 3 = 1);
- минимальный пороговый вес – 25 кг;
- количество этажей – 9.

6. Калибровка УПС-12.

6.1. Проведена калибровка эталонным грузом 183 кг на 9 этажах.

6.2. Проведена проверка правильности определения этажности устройством при движении и остановки лифта.

7. Испытания.

Результаты испытаний по пп.4.1 - 4.7 Программы приведены в таблицах 1 - 5.

7.1. Проверка выдачи информационных сигналов, погрешности преобразования, продолжительности цикла преобразования, времени выхода на установленный режим работы

Таблица 1

№	Точка нагружения лифта	Величина нагрузки, кг	Значение веса, измеренного ПВ	Факт срабатывания релейного выхода	Погрешность преобразования, %	Продолжительность цикла преобразования, с	Время выхода на установл. режим, мин
1	25 кг	26	min	сработал	0,2	1	15
2	50% НПП (250 кг)	252	50%	сработал	0,4	1	15
3	90% НПП (450 кг)	452	90%	сработал	0,4	1	15
4	110%НПП (575 кг)	577	110%	сработал	0,4	1	15

7.2. Проверка обнуления значения массы пустой кабины.

Таблица 2

№	Точка нагружения лифта	Величина веса загрузки, кг	Значение веса на ПВ	Факт обнуления
1	min	25	min 26	-
2	50% НПП	205	50% 250	-
3	90% НПП	465	90% 450	-
4	110% НПП	580	110% 575	-
5	0 кг	0	2	Обнулil через 5 секунд
6	25 кг	25	min 26	Обнулil через 30 минут

7.3. Проверка показания УПС-12 при движении пустой кабины лифта по всем этажам с остановками на каждом этаже, с открыванием и закрыванием дверей.

Таблица 3

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1*этаж)		
	Показания прибора, кг	Факт обнуления	Показания прибора, кг	Факт обнуления	
1	0	-	-1	Обнулil	
2	-4	Обнулil	1	Обнулil	
3	3	Обнулil	2	Обнулil	
4	2	Обнулil	4	Обнулil	
5	-1	Обнулil	1	Обнулil	
6	5	Обнулil	0	-	
7	7	Обнулil	-1	Обнулil	
8	2	Обнулil	2	Обнулil	
9	-5	Обнулil	-	-	

7.4. Проверка показания УПС-12 при движении кабины лифта загруженной весом более 50% грузоподъемности лифта по всем этажам с остановками на каждом этаже, с открыванием и закрыванием дверей.

Таблица 4

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1	248	0,2	247	0,4	
2	251	0,4	250	0,2	
3	250	0,2	248	0,2	
4	248	0,2	252	0,4	
5	251	0,4	250	0	
6	247	0,4	246	0,6	
7	248	0,2	249	0,2	
8	254	0,6	252	0,4	
9	250	0,2			

7.5. Проверка работоспособности УПС-10 в составе лифта в реальном режиме работы.

Таблица 5

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1	84	0,2	83	0,4	
2	83	0,4	86	0,2	
3	86	0,2	84	0,2	
4	84	0,2	83	0,4	
5	85	0,2	86	0,2	
6	82	0,6	82	0,6	
7	83	0,4	84	0,2	
8	86	0,2	84	0,2	
9	84	0,2	-	-	

8. Заключение.

8.1. Испытания представленного образца устройства преобразования сигналов УПС-12 зав. № 005 проведены в полном объеме согласно п.п. 4.1 - 4.7 Программы.

8.2. По пункту 4.1 Программы релейные выходы устройства сработали в соответствии заданным весам. Максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,4 % от грузоподъемности лифта.

8.3. По пункту 4.2 Программы продолжительность цикла преобразования составила 1 с.

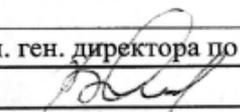
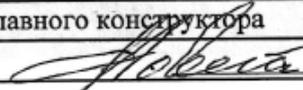
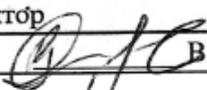
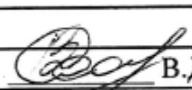
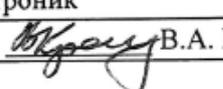
8.4. По пункту 4.3 Программы обнуление значения массы пустой кабины происходило через 5 с.

8.5. По пункту 4.4 Программы время выхода на установленный режим работы штатно.

8.6. По пункту 4.5 Программы значение пустой кабины при движении по этажам и остановкам с открыванием дверей показывало ноль.

8.7. По пункту 4.6 Программы максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,6 % от грузоподъемности лифта.

8.8. По пункту 4.7 Программы максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,6 % от грузоподъемности лифта в реальном режиме работы.

Испытания проводили:	
Начальник участка по обслуживанию лифтов ЦГиСО	от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»
 А.Н.Гетманский	Зам. ген. директора по новой технике  В.А. Шатов
Зам. главного конструктора  Н.Н.Новицкий	Ведущий конструктор  В.И. Сидоров
Начальник БСПЭ  В.Д.Соленков	Инженер электроник  В.А. Крапивницкий

СОГЛАСОВАНО

Главный конструктор

И.Н. Балабанов

«25» 04 2013г.

СВЕРЖДАЮ

Главный инженер

«Могилевлифтмаш»

Н.М. Иванов

«25» 04 2013г.

ПРОТОКОЛ

промежуточных испытаний опытных образцов УПС-12 зав. № 001 (ДД) и зав. № 003 (УЛ) в составе лифта Q = 500 кг, V = 1,0 м/с (ПП-404С зав. № 48441С) в качестве индикатора степени загрузки лифта, с использованием информации от лифтовой станции УЛ АЕИГ 656353.036.

г. Могилев

25 апреля 2013 г.

1. Цель испытаний.

Проверка на соответствие устройств преобразования сигналов УПС-12 пунктов 4.1 – 4.7 «Программа испытаний опытных образцов контроля перегрузки кабины УПС-12 в составе лифта Q = 500 кг, V = 1,0 м/с (ПП-404С зав. № 48441С) в качестве индикатора степени загрузки лифта, используя информацию с лифтовой станции УЛ АЕИГ 656353.036 по существующему протоколу» от 18.04.2013 г (далее – Программа).

2. Условия проведения испытаний:

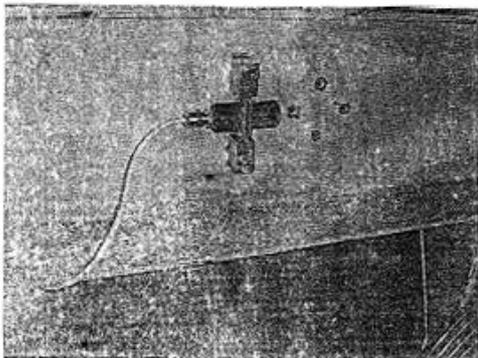
- температура окружающего воздуха плюс 16 °С;
- относительная влажность воздуха 75 %;
- атмосферное давление 751 мм рт. ст.
- ветер 15,4 м/с.

3. Оборудование и применяемые средства:

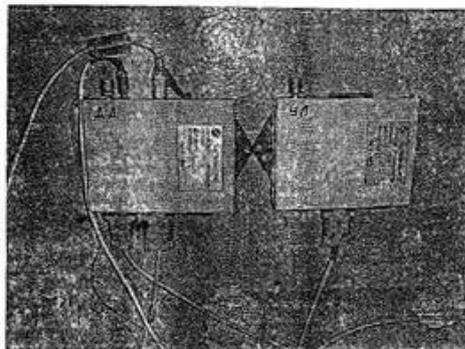
- лифт грузоподъемностью 500 кг, V = 1 м/с подготовленный к испытанию;
- эталонный груз – 5 кг, 25 кг Испытательного центра ОАО «Могилевлифтмаш».

4. Монтаж УПС-12.

4.1. Монтаж первичного преобразователя (ПП03) был осуществлен на швеллер лебедки, в месте предварительно определенном математическим моделированием распределения деформаций по конструкции лебедки с последующей выдержкой – 3 часа (Рисунок 1.А). (Монтаж осуществлен 19.03.2013 г.)



А



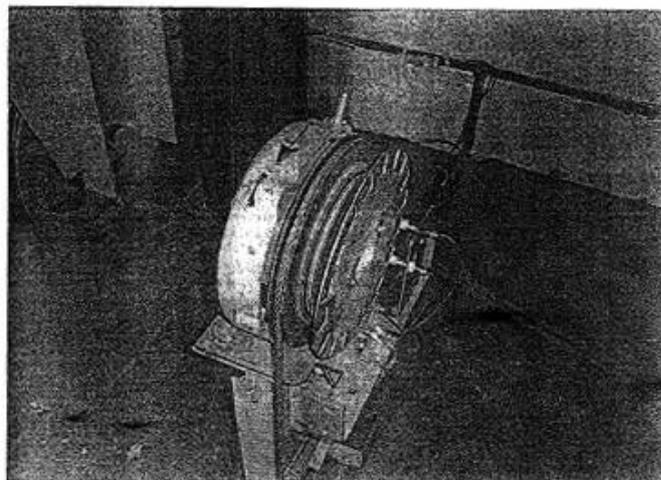
Б

Рисунок 1. А – монтаж ПП03, Б – монтаж ПВ 001 (ДД) и ПВ 003 (УЛ).

4.2. Монтаж кабеля ДББ 6.644.118 был осуществлен в соответствии с руководством по эксплуатации ДББ 2.009.079 РЭ и технической документации «Устройство управления лифтами серии УЛ» (электропривод автоматика) АЕИГ.656353.036 (Рисунок 2. А). Монтаж датчика движения (ДД) на УКПСЛ был осуществлен в соответствии с руководством по эксплуатации ДББ 2.009.079 РЭ.



А



Б

Рисунок 2. А – лифтовая станция УЛ; Б – монтаж ДД на УКПСЛ.

5. Настройка УПС-12:

- грузоподъемность – 500 кг;
- временные параметры частотно-импульсного преобразователя двигателя лебедки (время 1 = 3, время 2 = 1 (ПВ 003) и время 2 = 300 (ПВ 001), время 3 = 1 (ПВ 003) и время 3 = 800 (ПВ 001));
- минимальный пороговый вес – 25 кг;
- количество этажей – 9.

6. Калибровка УПС-12.

- 6.1. Проведена калибровка эталонным грузом 170 кг на 9 этажах.
- 6.2. Проведена проверка правильности определения этажности устройствами при движении и остановки лифта.

7. Испытания.

Результаты испытаний по пп.4.1 - 4.7 Программы приведены в таблицах 1 - 5.

7.1. Проверка выдачи информационных сигналов, погрешности преобразования, продолжительности цикла преобразования, времени выхода на установленный режим работы

Таблица 1

№	Точка нагружения лифта	Величина нагрузки, кг	Значение веса, измеренного ПВ	Факт срабатывания релейного выхода	Погрешность преобразования, %	Продолжительность цикла преобразования, с	Время выхода на установл. режим, мин
1	25 кг	26	min	сработал	0,2	1	15
2	50% НПП (250 кг)	252	50%	сработал	0,4	1	15
3	90% НПП (450 кг)	452	90%	сработал	0,4	1	15
4	110%НПП (575 кг)	577	110%	сработал	0,4	1	15

7.2. Проверка обнуления значения массы пустой кабины.

Таблица 2

№	Точка нагружения лифта	Величина веса загрузки, кг	Значение веса на ПВ	Факт обнуления
1	min	25	min 26	-
2	50% НПП	205	50% 250	-
3	90% НПП	465	90% 450	-
4	110% НПП	580	110% 575	-
5	0 кг	0	2	Обнулил через 5 секунд
6	25 кг	25	min 26	Обнулил через 30 минут

7.3. Проверка показания УПС-12 при движении пустой кабины лифта по всем этажам с остановками на каждом этаже, с открыванием и закрыванием дверей.

Таблица 3

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Факт обнуления	Показания прибора, кг	Факт обнуления	
1	0	-	-1	Обнулил	
2	-4	Обнулил	1	Обнулил	
3	3	Обнулил	2	Обнулил	
4	2	Обнулил	4	Обнулил	
5	-1	Обнулил	1	Обнулил	
6	5	Обнулил	0	-	
7	7	Обнулил	-1	Обнулил	
8	2	Обнулил	2	Обнулил	
9	-5	Обнулил	-	-	

7.4. Проверка показания УПС-12 при движении кабины лифта загруженной весом более 50% грузоподъемности лифта по всем этажам с остановками на каждом этаже, с открыванием и закрыванием дверей.

Таблица 4

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1	248	0,2	247	0,4	
2	251	0,4	250	0,2	
3	250	0,2	248	0,2	
4	248	0,2	252	0,4	
5	251	0,4	250	0	
6	247	0,4	246	0,6	
7	248	0,2	249	0,2	
8	254	0,6	252	0,4	
9	250	0,2			

7.5. Проверка работоспособности УПС-10 в составе лифта в реальном режиме работы.

Таблица 5

Номер этажа	Движение лифта				Примечание
	Вверх (1 -9 этаж)		Вниз (9 -1 этаж)		
	Показания прибора, кг	Погрешность, %	Показания прибора, кг	Погрешность, %	
1	84	0,2	83	0,4	
2	83	0,4	86	0,2	
3	86	0,2	84	0,2	
4	84	0,2	83	0,4	
5	85	0,2	86	0,2	
6	82	0,6	82	0,6	
7	83	0,4	84	0,2	
8	86	0,2	84	0,2	
9	84	0,2	-	-	

8. Заключение.

- 8.1. Испытания представленных образцов устройства преобразования сигналов УПС-12 зав. № 001 и зав. № 003 проведены в полном объеме согласно п.п. 4.1 - 4.7 Программы.
- 8.2. По пункту 4.1 Программы релейные выходы устройств сработали в соответствии заданным весам. Максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,4 % от грузоподъемности лифта.
- 8.3. По пункту 4.2 Программы продолжительность цикла преобразования составила 1 с.
- 8.4. По пункту 4.3 Программы обнуление значения массы пустой кабины происходило через 5 с.
- 8.5. По пункту 4.4 Программы время выхода на установленный режим работы штатно.
- 8.6. По пункту 4.5 Программы значение пустой кабины при движении по этажам и остановкам с открыванием дверей показывало ноль.
- 8.7. По пункту 4.6 Программы максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,6 % от грузоподъемности лифта.
- 8.8. По пункту 4.7 Программы максимальная погрешность преобразования устройства в составе лифта грузоподъемностью 500 кг составила 0,6 % от грузоподъемности лифта в реальном режиме работы.

Испытания проводили:

Начальник БСПЭ

от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

В.Д.Соленков

Вед. инженер - конструктор

В.И. Сидоров

Инж. - конструктор

А.Л.Архангельский

Электромеханик ЦГ и СО

К.В.Рыдлевич

«УТВЕРЖДАЮ»
Генеральный директор
ООО «Фирма ПОДИЙ»

А. В. Поярков
26 02 2016 г.

ПРОТОКОЛ

предварительных испытаний опытных образцов УПС-15 на сертифицированном оборудовании в «РОСТЕСТ-Москва»



г. Москва

11–25 февраля 2016 г.

1. Цель испытаний.

Определение основных параметров устройства преобразования сигналов УПС-15 на основе пьезооптического преобразователя и сравнение их с тензорезисторным датчиком деформации.

2. Место испытаний

ФБУ «Ростест-Москва» (г. Москва)

3. Условия проведения испытаний:

- Температура окружающего воздуха плюс 24 °С
- Относительная влажность воздуха 75%
- Атмосферное давление 755 мм. рт. ст.

4. Оборудование и применяемые средства:

- Образцовая силоизмерительная машина ОСМ-2.
- Тензорезистивный датчик типа ZEMIC BF120-3AA(11)N6-X.

Описание устройства преобразования сигналов УПС-15

Общий вид и взаимосвязь составных частей устройства преобразования сигналов УПС-15 приведены на рисунке 5.1.11. а. УПС-15 включает в себя пьезооптический преобразователь в цилиндрическом корпусе (1), установленный в нагрузочный элемент в виде цанги (рис.5.1.11. б) (см. раздел 4.3), преобразователь вторичный (2), (рис.5.1.11. в, г), формирующий выходной сигнал и информационные сигналы заданного формата, кабель питания (3), разъем USB (4), кабель выходного сигнала заданного формата (5), кабель релейных выводов (6), в случае использования в лифтах (см. раздел 5.2 ниже). Вторичный преобразователь со стороны соединителей (рис.5.1.11, в) имеет разъемы для подключения пьезооптического преобразователя, кабеля релейных выходов, кабеля для подключения к лифтовой станции. Со стороны индикаторной панели (рис.5.1.11, г) вторичный преобразователь имеет индикаторы степени загрузки лифта (мин %, 50 %, 90 %, 110 % от грузоподъемности лифта), индикатор связи с компьютером, индикатор питания, соединитель питания, USB-интерфейс для подключения компьютера.

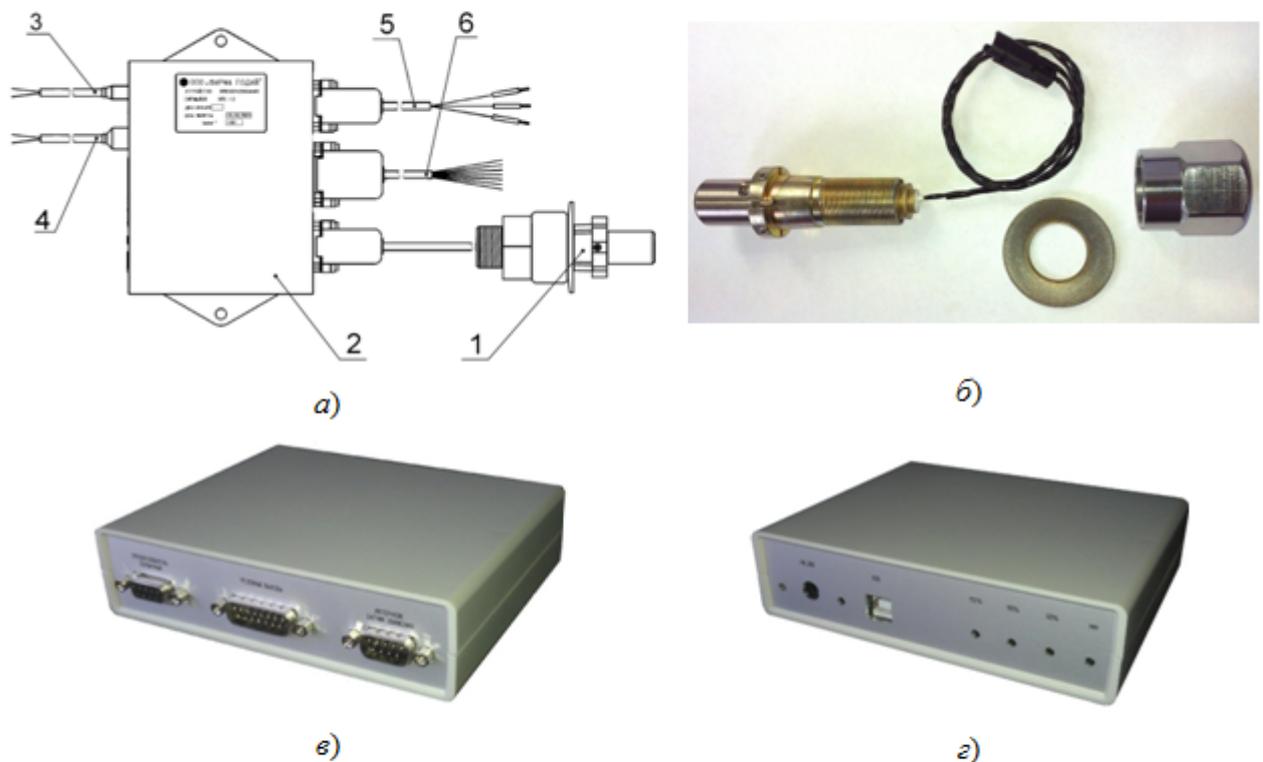


Рисунок 5.1.11 — Схема и внешний вид УПС-15

- а) – схема и взаимосвязь составных частей устройства преобразования сигналов УПС-15,
- б) – внешний вид преобразователя в цилиндрическом корпусе, установленного в нагрузочный элемент в виде цанги,
- в) – внешний вид вторичного преобразователя со стороны соединителей,
- г) – внешний вид вторичного преобразователя со стороны индикаторной панели

Эксплуатационные характеристики пьезооптического преобразователя без нагрузочного элемента приведены в таблице 5.1.2.

Таблица 5.1.2 Основные характеристики пьезооптического преобразователя

Параметр	Величина	Единица измерений
База датчика деформации	14	мм
Диапазон относительных деформаций	$10^{-8} \div 10^{-4}$	отн. ед.
Максимальная относительная деформация	10^{-3}	отн. ед.
Погрешность преобразования, не более	0.1	%
Температура хранения	“-55” ÷ “+75”	°С
Рабочий диапазон температур	“-20” ÷ “+75”	°С
Выходной сигнал	Аналоговая петля: 4–20	мА
Напряжение питания	7.5÷36	В
Потребляемая мощность, макс.	0,6	Вт
Габаритные размеры преобразователя	Ø14×70	мм
Вес, максимальный	50	г
Срок службы, не менее	25	лет

Для проведения испытаний пьезооптического преобразователя УПС-15 были изготовлены нагрузочные элементы разных конфигураций с габаритными размерами 30×30×100 мм (нагрузочный элемент №1) и 50×50×100 мм (нагрузочный элемент №2) (см. рисунок 5.1.12 и Приложение ??), в которые был вставлен пьезооптический преобразователь УПС-15, а на вертикальную поверхность нагрузочного элемента №2 был наклеен стандартный тензорезистивный датчик типа ZEMIC BF120-3AA(11)N6-X [i], согласно инструкции по его применению (рисунок 5.1.13 слева). Нагрузочный элемент с пьезооптическим и тензорезистивным датчиками устанавливался в испытательную машину типа Образцовая силоизмерительная машина ОСМ-2 (рис.5.1.11 справа) [ii, iii], для приложения калиброванной силы (рисунок 5.1.13 справа).

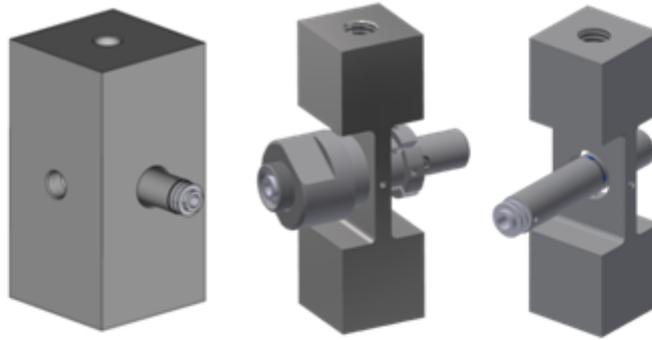


Рисунок 5.1.12 — Нагрузочные элементы для сравнительных испытаний пьезооптического датчика и тензорезистивного датчика деформаций



Рисунок 5.1.13 — Нагрузочный элемент с вставленным пьезооптическим преобразователем и с наклеенным тензорезистивным преобразователем (слева), и внешний вид испытательной машины с установленным нагрузочным элементом (справа).

Методика испытаний

1. Пьезооптический преобразователь и тензорезистивный преобразователь монтируются в нагрузочном элементе двух типов (см. Приложение 1).
2. Нагрузочный элемент с преобразователями устанавливается в испытательную машину, согласно руководству по эксплуатации к машине.
3. Преобразователи подключаются к источникам питания и системе сбора данных (мультиметр Agilent 34461A с программным обеспечением).
4. Для пьезооптического преобразователя с помощью регулировочного винта устанавливается выходной ток на уровне 12.5 ± 0.5 мА.
5. Затем прикладывается предварительная нагрузка (для каждой серии экспериментов разная).

6. Затем прикладывалась тестовая нагрузка (по 10 раз для каждой величины нагрузки).
7. Для нагрузочного элемента #1 (см. Приложение 1) десятикратно прикладывались нагрузки 10, 20, и 30 кг (предварительная нагрузка 10 кг).
8. Для нагрузочного элемента #2 (см. Приложение 1) десятикратно прикладывались нагрузки 100, и 500 кг (предварительная нагрузка 100 кг).

Для определения величины выходного сигнала, соответствующего величине нагрузки, бралась разница выходного сигнала преобразователей в точках непосредственно перед приложением нагрузки и через 30 секунд после приложения нагрузки с усреднением в окрестности ± 10 секунд (т. е. по переднему фронту). Точки для анализа показаны на временной диаграмме (рис.5.1.14) красным цветом.

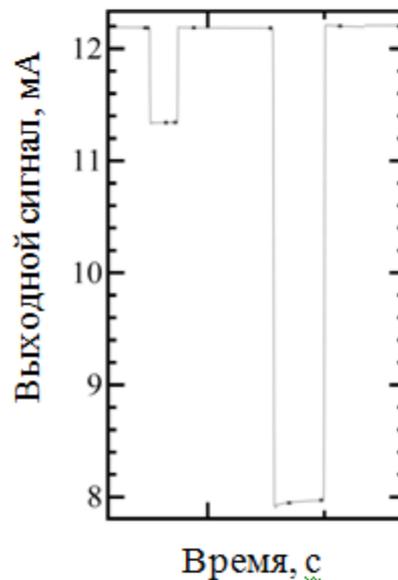


Рисунок 5.1.14 — Пример временной диаграммы выходного сигнала пьезооптического преобразователя при приложении нагрузки. Точки для анализа показаны красным цветом.

Рассчитывались следующие параметры:

- 1) среднеквадратичное отклонение коэффициента преобразования от среднего значения (σ),
- 2) максимальное отклонение по модулю от среднего значения (**максимальное отклонение**),
- 3) максимальный разброс значений (**повторяемость**).

Все величины выражались в процентах от среднего значения. Для расчета для пьезооптического преобразователя брались ступеньки с 5 по 10-й включительно, чтобы уменьшить влияние релаксации в нагрузочном элементе. Для тензорезистивного преобразователя брались первые 5 ступенек.

Методика обработки данных:

- Значения были получены путем автоматической обработки зависимостей сигнала от времени.
- Пример фрагмента такой зависимости показан на рисунке 5.1.14.
- На графиках автоматически находились точки перед изменением нагрузки, а так же через **30 секунд** после изменения нагрузки. На рисунке 5.1.14 эти точки показаны красным.
- В этих точках бралось значение линейной функции, которая является линейной аппроксимацией сигнала между изменениями нагрузки (без учета близких окрестностей к месту изменения сигнала). На рисунке 5.1.14 местоположение красных точек на оси Y соответствует этим значениям.
- Далее находилась разность значений в соседних точках, она соответствует изменению сигнала при изменении нагрузки. Разность может быть как положительной (для заднего фронта), так и отрицательной (для переднего фронта).
- Далее была произведена нормировка значений. Были взяты абсолютные значения изменений сигнала, которые соответствуют изменению нагрузки. От полученного массива было найдено среднее значение.
- Обозначения **PO** соответствует пьезооптическому преобразователя, **TR** – тензорезистивному преобразователю.

Результаты испытаний

На рисунке 5.1.15 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент #2 50x50x100 (см. Приложение ??), при многократной поочередной нагрузке весами, соответствующими 200 и 500 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

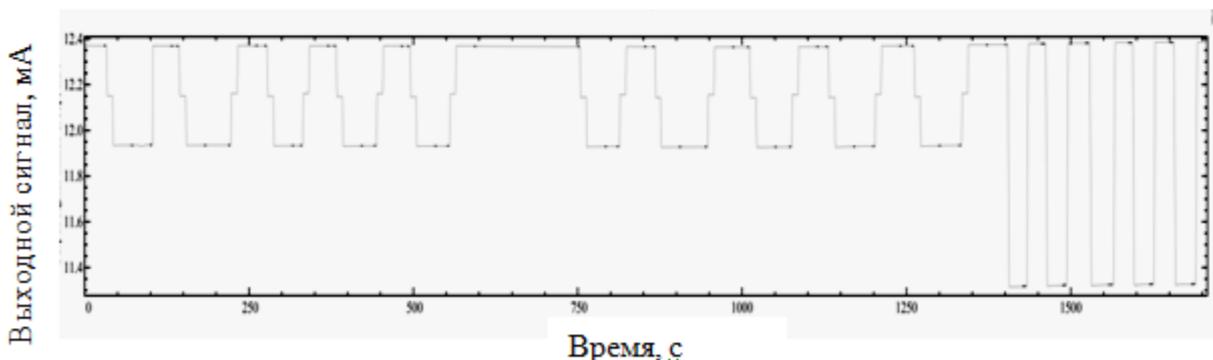


Рисунок 5.1.15 — Временная диаграмма выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент #2, при многократной нагрузке 200 и 500 кг

На рисунке 5.1.16 показаны зависимости величины изменения выходного сигнала датчика от номера нагрузки при нагрузке 200 кг (слева) и 500 кг (справа). Величины рассчитывались относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 500 кг. Красным цветом указаны относительные величины для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, оранжевым цветом – для заднего фронта.

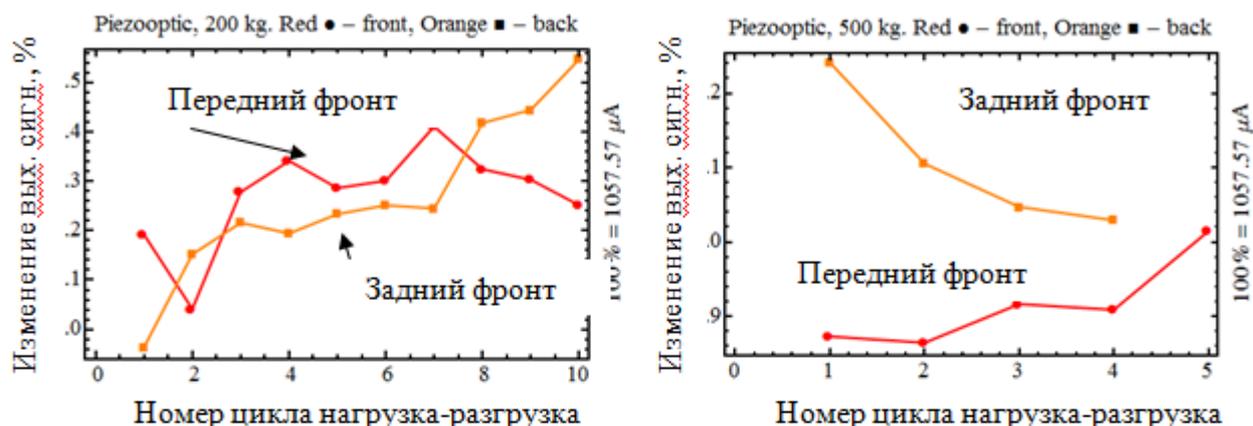


Рисунок 5.1.16 — Изменение выходного сигнала пьезооптического преобразователя при нагрузке 200 кг (слева) и 500 кг (справа) относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 500 кг

В таблице 5.1.3 приведены численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 500 кг. Положительные величины соответствуют заднему фронту изменения сигнала, отрицательные – переднему фронту. Так же приведены усредненные по обоим фронтам значения. Номера циклов нагрузка-разгрузка (взяты для анализа) определены параметром N .

На рисунке 5.1.17 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент #1 без цанги (см. Приложение ??), при многократной поочередной нагрузке весами, соответствующими 10, 20 и 30 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

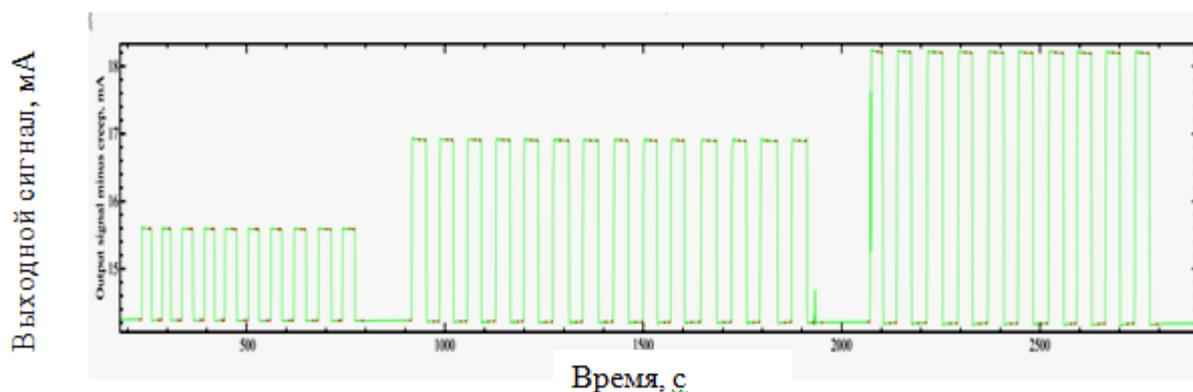


Рисунок 5.1.17 — Временная диаграмма для пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент #1. Точками показаны точки, взятые для анализа.

Таблица 5.1.3 Численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 500 кг

100 % = 1057.57 μ A	mean, %	sigma, %	repeatability, %	max deviation, %
PO, 200kg, > 0, N = 1..Last	41.267	0.166	0.584	0.303
PO, 200kg, < 0, N = 1..Last	-41.273	0.099	0.37	0.232
PO, 200kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..Last	41.27	0.133	0.584	0.306
PO, 500kg, > 0, N = 1..Last	100.106	0.096	0.212	0.135
PO, 500kg, < 0, N = 1..Last	-99.915	0.06	0.15	0.099
PO, 500kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..Last	100.	0.124	0.377	0.241
PO, 200kg, > 0, N = 3..Last	41.319	0.132	0.353	0.229
PO, 200kg, < 0, N = 3..Last	-41.312	0.049	0.16	0.099
PO, 200kg, $\in \mathbb{R}$, N = 3..Last	41.315	0.096	0.353	0.232
PO, 500kg, > 0, N = 2..Last	100.061	0.04	0.076	0.045
PO, 500kg, < 0, N = 3..Last	-99.947	0.059	0.106	0.068
PO, 500kg, $\in \mathbb{R}$, N = 3..Last	99.983	0.066	0.138	0.074
PO, 200kg, > 0, N = 1.5	41.152	0.11	0.27	0.188
PO, 200kg, < 0, N = 1.5	-41.228	0.117	0.3	0.186
PO, 200kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1.5	41.19	0.114	0.378	0.226
PO, 200kg, > 0, N = Last 5	41.381	0.131	0.302	0.166
PO, 200kg, < 0, N = Last 5	-41.318	0.058	0.16	0.093
PO, 200kg, $\in \mathbb{R}$, N = Last 5	41.35	0.101	0.302	0.198

На рисунке 5.1.18 показаны зависимости величины изменения выходного сигнала датчика от номера нагрузки при нагрузке 10 кг (слева вверху), 20 кг (справа) и 30 кг (слева внизу). Величины рассчитывались относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 30 кг. Красным цветом указаны относительные величины для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, оранжевым цветом – для заднего фронта.

На рисунке 5.1.19 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент #1 с цангой, при многократной поочередной нагрузке весом 100 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

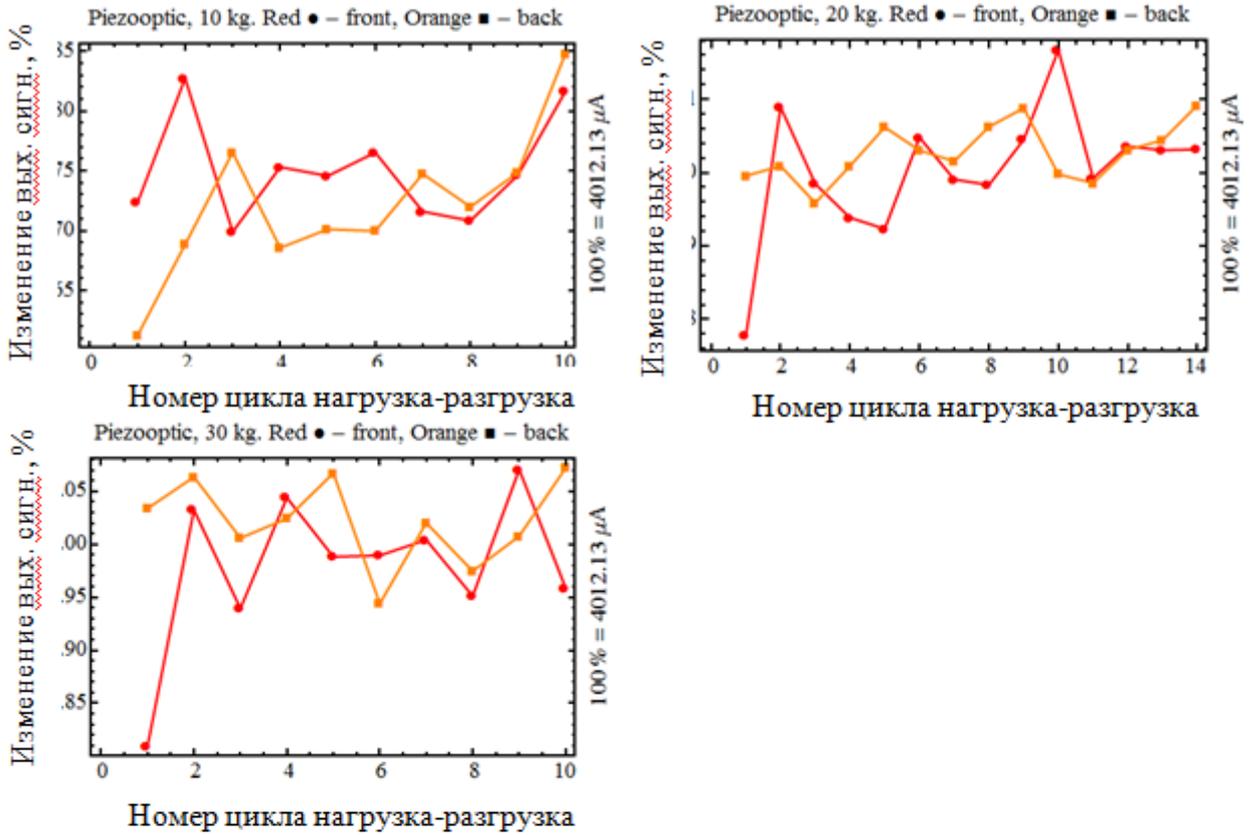


Рисунок 5.1.18 — Изменение выходного сигнала пьезооптического преобразователя при нагрузке 10, 20 и 30 кг относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 30 кг

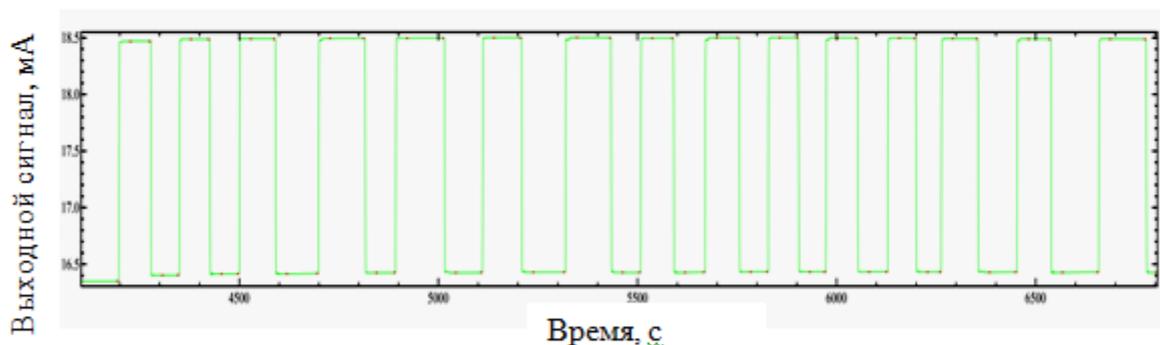


Рисунок 5.1.19 — Временная диаграмма для пьезооптического преобразователя, установленного в каленый нагрузочный элемент #1 с цангой (см. Приложение 1) при нагрузке 100 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

На рисунке 5.1.20 показаны зависимости величины изменения выходного сигнала датчика от номера нагрузки при нагрузке 100 кг. Величины рассчитывались относительно среднего значения изменения сигнала. Красным цветом указаны относительные величины для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, оранжевым цветом – для заднего фронта.

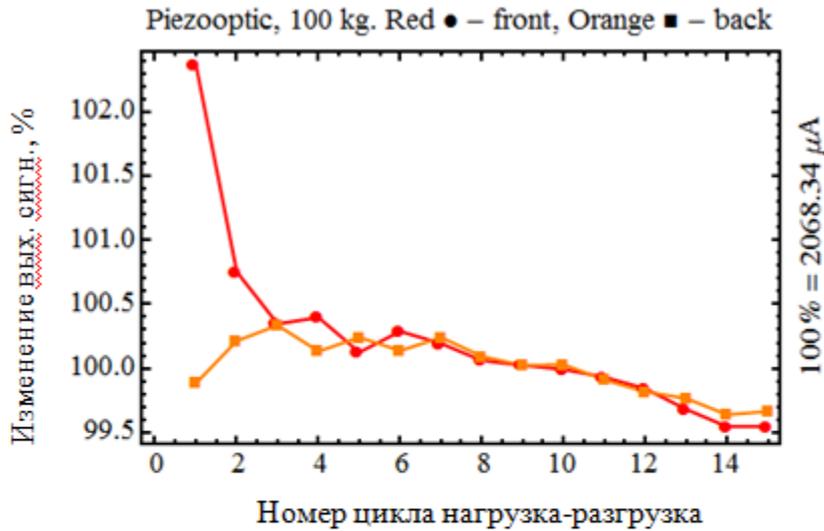


Рисунок 5.1.20 — Изменение выходного сигнала пьезооптического преобразователя при нагрузке 100 кг относительно среднего значения изменения сигнала.

В таблице 5.1.4 приведены численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 30 кг. Положительные величины соответствуют заднему фронту изменения сигнала, отрицательные – переднему фронту. Так же приведены усредненные по обоим фронтам значения. Номера циклов нагрузка-разгрузка (взяты для анализа) определены параметром N .

В таблице 5.1.5 приведены численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 100 кг. Положительные величины соответствуют заднему фронту изменения сигнала, отрицательные – переднему фронту. Так же приведены усредненные по обоим фронтам значения. Номера циклов нагрузка-разгрузка (взяты для анализа) определены параметром N .

На рисунке 5.1.21 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент #2 с наклеенным тензорезистором, при многократной поочередной нагрузке весами 100 и 500 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

Таблица 5.1.4 Численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 30 кг

	mean, %	sigma, %	repeatability, %	max deviation, %
100 % = 4012.13 μ A				
PO, 10kg, > 0, N = 1..Last	33.722	0.062	0.235	0.126
PO, 10kg, < 0, N = 1..Last	-33.75	0.043	0.128	0.077
PO, 10kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..Last	33.736	0.054	0.235	0.123
PO, 20kg, > 0, N = 1..Last	67.003	0.089	0.39	0.225
PO, 20kg, < 0, N = 1..Last	-67.027	0.039	0.133	0.069
PO, 20kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..Last	67.015	0.069	0.39	0.238
PO, 30kg, > 0, N = 1..Last	99.979	0.073	0.261	0.169
PO, 30kg, < 0, N = 1..Last	-100.021	0.041	0.128	0.077
PO, 30kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..Last	100.	0.062	0.263	0.191
PO, 10kg, > 0, N = 4..Last	33.736	0.055	0.162	0.112
PO, 10kg, < 0, N = 4..Last	-33.75	0.036	0.108	0.066
PO, 10kg, $\in \mathbb{R}$, N = 4..Last	33.743	0.045	0.162	0.105
PO, 20kg, > 0, N = 4..Last	67.017	0.065	0.244	0.15
PO, 20kg, < 0, N = 4..Last	-67.038	0.035	0.106	0.054
PO, 20kg, $\in \mathbb{R}$, N = 4..Last	67.027	0.052	0.244	0.14
PO, 30kg, > 0, N = 4..Last	100.001	0.043	0.119	0.07
PO, 30kg, < 0, N = 4..Last	-100.016	0.046	0.128	0.072
PO, 30kg, $\in \mathbb{R}$, N = 4..Last	100.008	0.044	0.128	0.064
PO, 10kg, > 0, N = 1.5	33.691	0.054	0.153	0.078
PO, 10kg, < 0, N = 1.5	-33.75	0.048	0.128	0.078
PO, 10kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1.5	33.72	0.058	0.215	0.108
PO, 20kg, > 0, N = 1.5	66.943	0.113	0.312	0.165
PO, 20kg, < 0, N = 1.5	-67.007	0.037	0.103	0.055
PO, 20kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1.5	66.975	0.086	0.312	0.197
PO, 30kg, > 0, N = 1.5	99.963	0.095	0.235	0.153
PO, 30kg, < 0, N = 1.5	-100.039	0.026	0.061	0.033
PO, 30kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1.5	100.001	0.077	0.258	0.191
PO, 10kg, > 0, N = Last 5	33.753	0.057	0.148	0.095
PO, 10kg, < 0, N = Last 5	-33.75	0.043	0.108	0.066
PO, 10kg, $\in \mathbb{R}$, N = Last 5	33.752	0.048	0.148	0.096
PO, 20kg, > 0, N = Last 5	67.052	0.067	0.175	0.115
PO, 20kg, < 0, N = Last 5	-67.03	0.042	0.106	0.062
PO, 20kg, $\in \mathbb{R}$, N = Last 5	67.041	0.054	0.181	0.126
PO, 30kg, > 0, N = Last 5	99.995	0.048	0.119	0.076
PO, 30kg, < 0, N = Last 5	-100.004	0.048	0.128	0.068
PO, 30kg, $\in \mathbb{R}$, N = Last 5	99.999	0.045	0.128	0.073

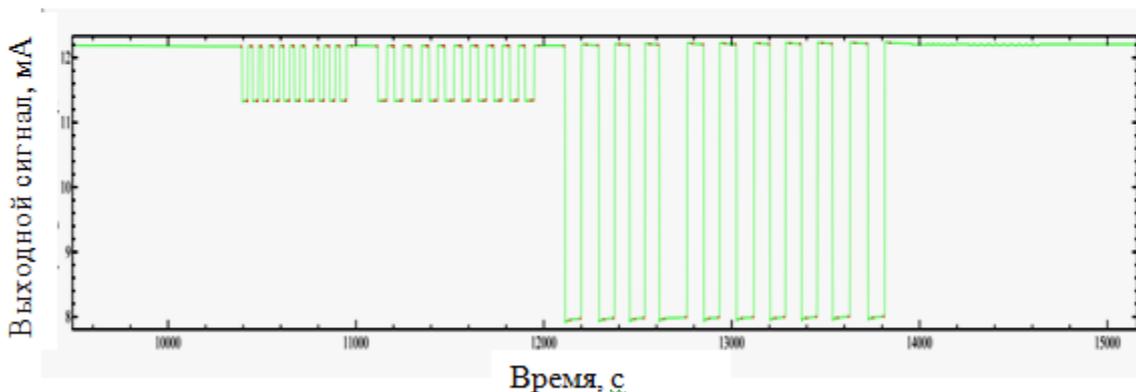


Рисунок 5.1.21 — Временная диаграмма для пьезооптического преобразователя, установленного в нагрузочный элемент #2 (см. Приложение 1) с наклеенным тензорезистивным преобразователем. Точками показаны точки, взятые для анализа.

Таблица 5.1.5 Численные значения параметров, выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 30 кг

100 % = 2068.34 μ A	mean, %	sigma, %	repeatability, %	max deviation, %
PO,100kg, > 0, N = 1..Last	100.206	0.681	2.823	2.162
PO,100kg, < 0, N = 1..Last	-100.009	0.219	0.696	0.369
PO,100kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1..Last	100.107	0.507	2.823	2.261
PO,100kg, > 0, N = 3..Last	99.998	0.283	0.851	0.452
PO,100kg, < 0, N = 3..Last	-100.002	0.226	0.696	0.363
PO,100kg, $\in \mathbb{R}$, N = 3..Last	100.	0.251	0.851	0.454
PO,100kg, > 0, N = 1.5	100.798	0.906	2.243	1.57
PO,100kg, < 0, N = 1.5	-100.162	0.172	0.452	0.278
PO,100kg, $\in \mathbb{R}$, N = 1.5	100.48	0.7	2.485	1.888
PO,100kg, > 0, N = Last 5	99.709	0.174	0.386	0.222
PO,100kg, < 0, N = Last 5	-99.759	0.111	0.27	0.151
PO,100kg, $\in \mathbb{R}$, N = Last 5	99.734	0.14	0.386	0.197

На рисунке 5.1.22 приведена временная диаграмма величины выходного сигнала тензорезистивного преобразователя, наклеенного на нагрузочный элемент #2 (см. Приложение ??) и установленным в нем пьезооптическим датчиком, при многократной поочередной нагрузке весами 100 и 500 кг. Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

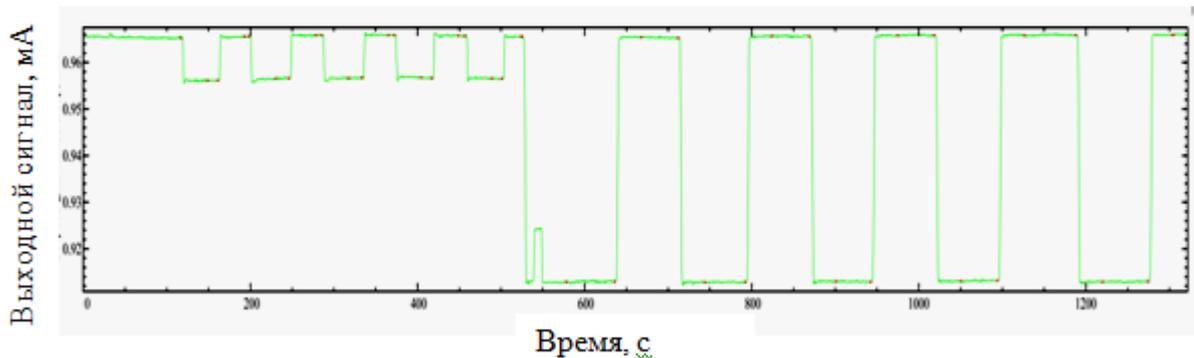


Рисунок 5.1.22 — Временная диаграмма для тензорезистивного преобразователя, наклеенного на нагрузочный элемент #2 (см. Приложение 1). Красными точками показаны точки, взятые для анализа.

На рисунке 5.1.23 показаны зависимости величины изменения выходного сигнала датчика от номера нагрузки при нагрузке 100 и 500 кг. Величины рассчитывались относительно среднего значения изменения сигнала при нагрузке 500 кг.

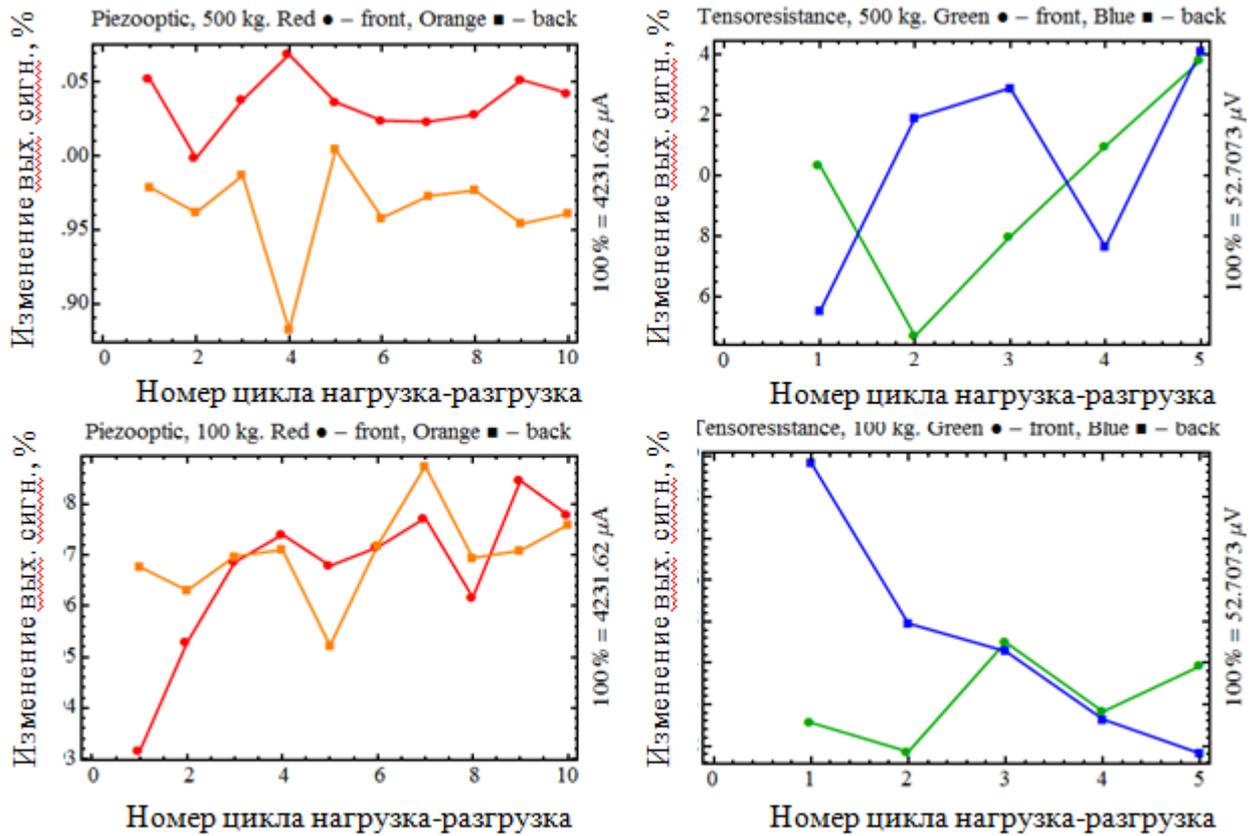


Рисунок 5.1.23 — Изменение выходного сигнала пьезооптического преобразователя и тензорезистивного преобразователя при нагрузке 100 и 500 кг относительно среднего значения изменения сигнала при 500 кг

Красным цветом указаны относительные величины сигнала пьезооптического преобразователя для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, оранжевым цветом – для заднего фронта. Синим цветом указаны относительные величины сигнала тензорезистивного преобразователя для переднего фронта цикла нагрузка-разгрузка, зеленым цветом – для заднего фронта.

Здесь:

TR: 100% = 52.7073 μV

PO: 100% = 4231.62 μA

В таблице 5.1.6 приведены численные значения параметров для пьезооптического преобразователя (PO) и тензорезистивного преобразователя (TR), выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 500 кг. Положительные величины соответствуют заднему фронту изменения сигнала, отрицательные – переднему фронту. Так же приведены усредненные по обоим фронтам значения. Номера циклов нагрузка-разгрузка (взяты для анализа) определены параметром N .

Таблица 5.1.6 Численные значения параметров пьезооптического преобразователя (PO) и тензорезистивного преобразователя (TR), выраженных в процентах к среднему значению при нагрузке 500 кг

	mean, %	sigma, %	repeatability, %	max deviation, %
TR, 100kg, > 0, N = 1..5	17.451	0.273	0.702	0.433
TR, 100kg, < 0, N = 1..5	-17.314	0.107	0.264	0.137
TR, 100kg, ∈ ℝ, N = 1..5	17.382	0.208	0.702	0.502
TR, 500kg, > 0, N = 1..5	100.043	0.366	0.86	0.49
TR, 500kg, < 0, N = 1..5	-99.957	0.342	0.91	0.486
TR, 500kg, ∈ ℝ, N = 1..5	100	0.337	0.942	0.529
PO, 100kg, > 0, N = 1..10	19.97	0.009	0.035	0.018
PO, 100kg, < 0, N = 1..10	-19.967	0.015	0.053	0.035
PO, 100kg, ∈ ℝ, N = 1..10	19.968	0.012	0.056	0.037
PO, 500kg, > 0, N = 1..10	99.964	0.032	0.122	0.081
PO, 500kg, < 0, N = 1..10	-100.036	0.019	0.07	0.038
PO, 500kg, ∈ ℝ, N = 1..10	100	0.045	0.187	0.118
PO, 100kg, > 0, N = 1..5	19.965	0.008	0.019	0.013
PO, 100kg, < 0, N = 1..5	-19.959	0.017	0.043	0.027
PO, 100kg, ∈ ℝ, N = 1..5	19.962	0.013	0.043	0.03
PO, 500kg, > 0, N = 1..5	99.963	0.048	0.122	0.081
PO, 500kg, < 0, N = 1..5	-100.039	0.026	0.07	0.04
PO, 500kg, ∈ ℝ, N = 1..5	100.001	0.054	0.187	0.119
PO, 100kg, > 0, N = 6..10	19.975	0.007	0.018	0.012
PO, 100kg, < 0, N = 6..10	-19.975	0.009	0.023	0.013
PO, 100kg, ∈ ℝ, N = 6..10	19.975	0.008	0.026	0.013
PO, 500kg, > 0, N = 6..10	99.965	0.01	0.023	0.012
PO, 500kg, < 0, N = 6..10	-100.034	0.013	0.028	0.018
PO, 500kg, ∈ ℝ, N = 6..10	99.999	0.038	0.097	0.052

В таблице 5.1.7 приведены полученные из испытаний и последующей обработки параметры пьезооптического преобразователя и тензорезистивного преобразователя, которые были установлены на один нагрузочный элемент №2 (см. Приложение ??). Так же приведены полученные параметры пьезооптического преобразователя с разными нагрузочными элементами (см. Приложение ??). Из таблицы видно, что параметры, определяющие эксплуатационные характеристики датчика деформации, для пьезооптического преобразователя более, чем на порядок превышают параметры для тензорезистивного датчика. Так же из таблицы следует, что в закаленном нагрузочном элементе параметры преобразователя получились лучше, чем в не закаленном. Наличие цанги не влияет существенно на параметры преобразователя.

Таблица 5.1.7 Сравнение параметров пьезооптического датчика УПС-15 и тензорезистивного датчика деформации при испытаниях в РОСТЕСТе

Тип преобразователя	Нагр. элемент	Нагр. кг	σ , %	макс откл. %	повторяемость, %
19.02.2016					
Пьезооптический преобразователь	#2 закаленный	100	0.009	0.013	0.024
Пьезооптический преобразователь	#2 закаленный	500	0.013	0.018	0.025
Тензорезистивный преобразователь	#2 закаленный	100	0.107	0.137	0.264
Тензорезистивный преобразователь	#2 закаленный	500	0.342	0.486	0.91
11.02.2016					
Пьезооптический преобразователь	#2 закаленный	200	0.058	0.093	0.16
Пьезооптический преобразователь	#2 не закаленный	500	0.059	0.068	0.106
15.02.2016					
Пьезооптический преобразователь	#1 с цангой	10	0.043	0.066	0.108
Пьезооптический преобразователь	#1 без цанги	20	0.042	0.062	0.106
Пьезооптический преобразователь	#1 без цанги	30	0.048	0.068	0.128
25.02.2016					
Пьезооптический преобразователь	#1 с цангой	100	0.111	0.151	0.270

Выводы

1. Пьезооптический преобразователь при прочих равных условиях обладает точностью измерений в 10–30 раз выше, чем тензорезистивный датчик.
2. Точность пьезооптического датчика для малых весов (в начале динамического диапазона) составляет не хуже 0.01%.
3. Соотношение сигнал/шум для пьезооптического преобразователя более чем в 50 раз лучше, чем для тензорезистивного датчика.
4. На точность измерений пьезооптического преобразователя существенное влияние оказывал нагрузочный элемент, обладающий долговременной релаксацией, видимо обусловленной несовершенством технологии его изготовления.

Начальник отдела инноваций и развития



В. Н. Бараков

Начальник отдела промышленной электроники



О. П. Маслов

Отчет составил:

Ученый секретарь

Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ»



А. Г. Паулиш



ПРОТОКОЛ

предварительных испытаний опытных образцов УПС-15 на сертифицированном оборудовании в калибровочной лаборатории Detroit Calibration Lab Trescal (США)

г. Детройт

06–07 апреля 2016 г.

1. Цель испытаний.

Определение основных параметров устройства преобразования сигналов УПС-15 на основе пьезооптического преобразователя и сравнение их с калибровочным тензорезисторным датчиком деформации Load Cell, используемым для калибровки дедвейтовых машин.

2. Место испытаний

Detroit Calibration Lab Trescal (г. Детройт, США)

3. Условия проведения испытаний:

- Температура окружающего воздуха плюс 22 °С
- Относительная влажность воздуха 85%
- Атмосферное давление 740 мм. рт. ст.

4. Оборудование и применяемые средства:

- Силоизмерительная машина 113 kN (25.3 klbf) deadweight machine.
- Нагрузочный элемент Ultra Precision LowProfile™ Load Cell Interface Force™.
- Нагрузочный элемент для пьезооптического преобразователя (Приложение 1).

Результаты экспериментов

1. Исходные данные

Результаты по второму эксперименту с пьезооптический преобразователем в калёном нагрузочном элементе 30x30x100 мм с номинальной нагрузкой 287 lb (130 кг) и калибровочный Load Cell с номинальной нагрузкой 2 klb (907.185 кг).
04 07 2016 15-32-53-823

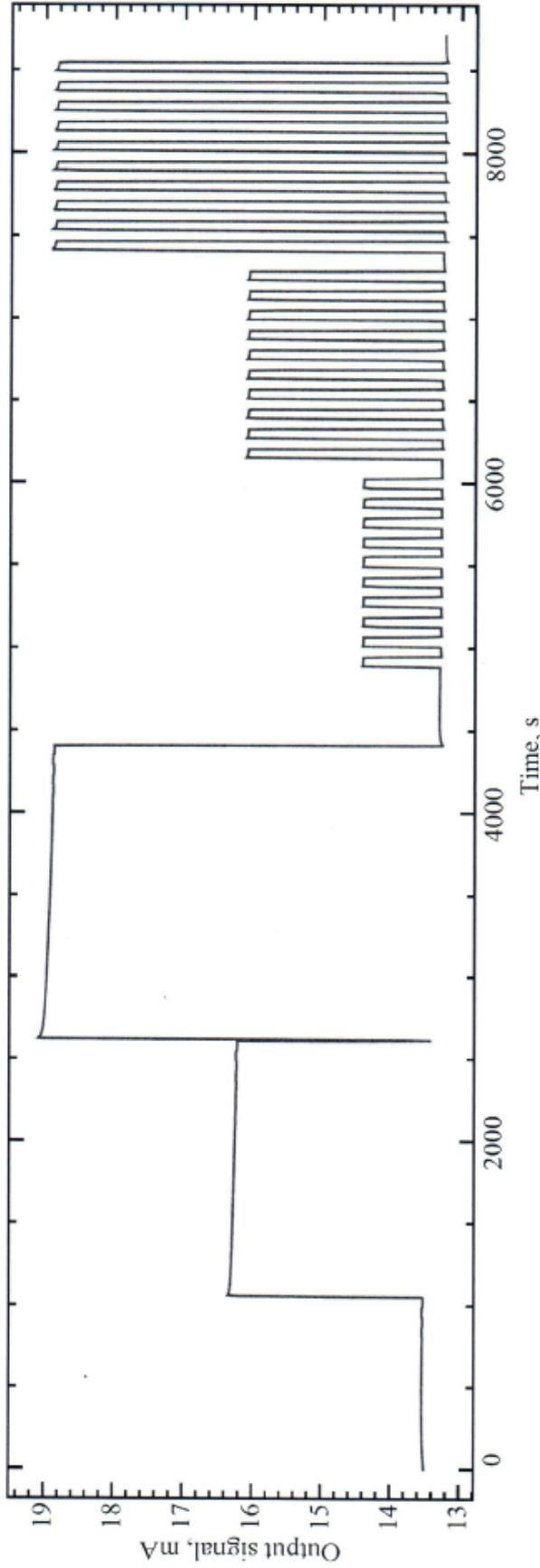


Рис.1.1. Исходная временная зависимость выходного сигнала пьезооптического датчика при преднагрузке 10 lb, измеряемым калиброванным весом 50 lb, 100 lb, 20 lb (10 раз), 50 lb (10 раз), 100 lb (10 раз), 100 lb (10 раз).

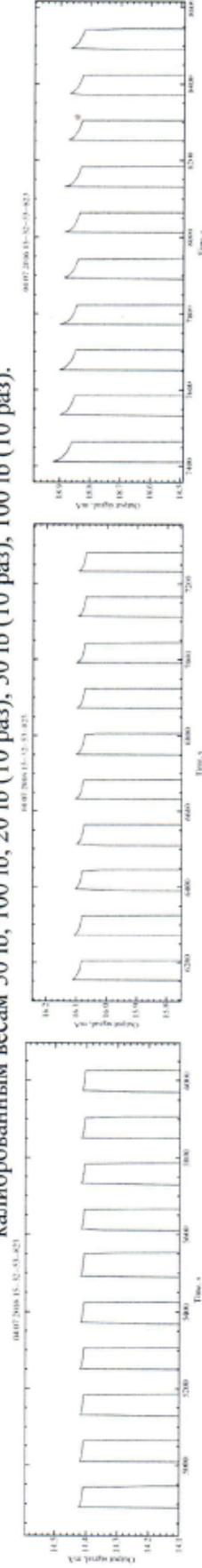


Рис.1.2. Фрагменты зависимости, показанной на Рис.1.1, демонстрирующие наличие релаксации, величина которой зависит от величины нагрузки.
04 07 2016 18-14-11-925

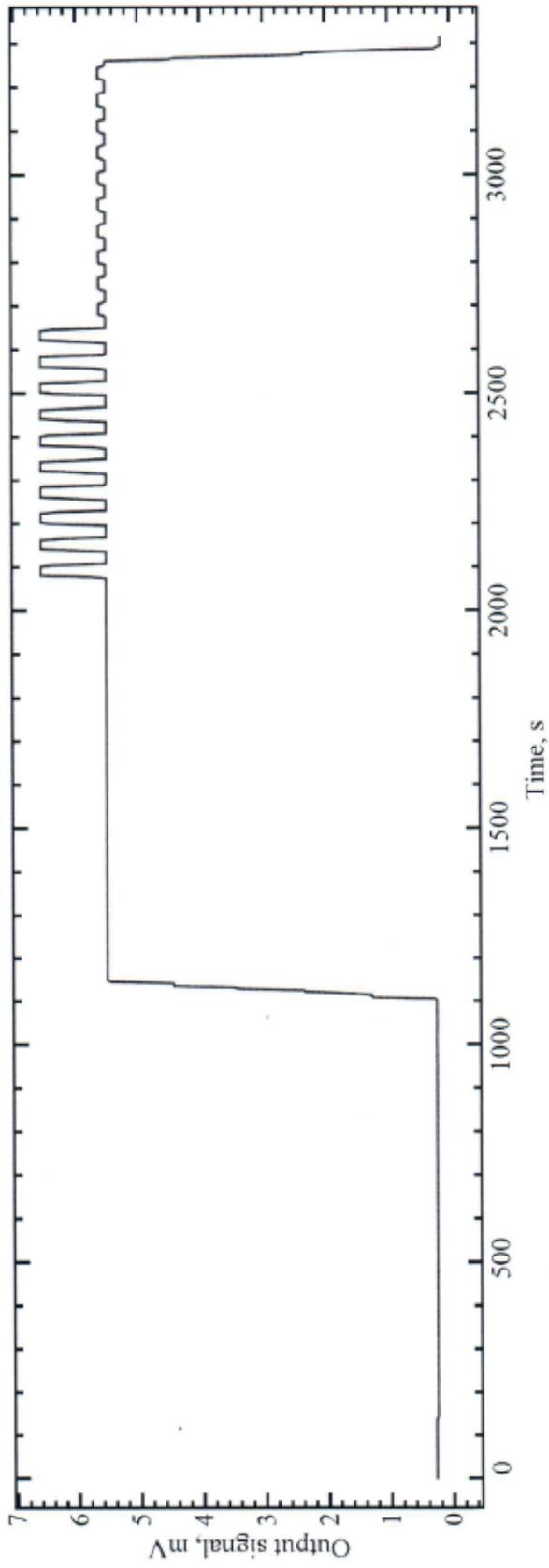


Рис.1.3. Исходная временная зависимость выходного сигнала калибровочного Load Cell при приложении преднагрузки 10 lb, и весов 500 lb +100 lb (10 раз), 500 lb +10 lb (10 раз).

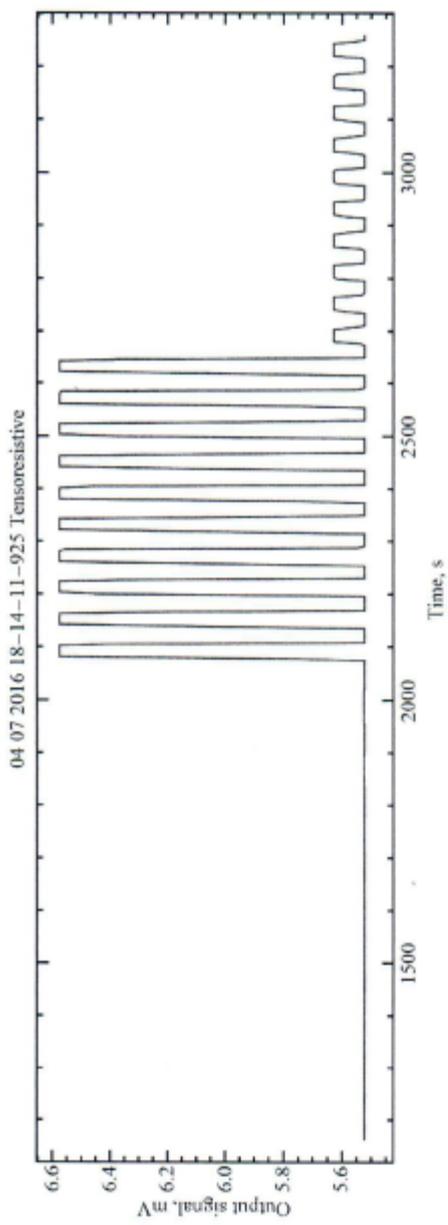


Рис. 1.4. Фрагмент зависимости, показанной на Рис. 1.3, демонстрирующий отсутствие релаксации выходного сигнала Load Cell.

2. Обработка результатов

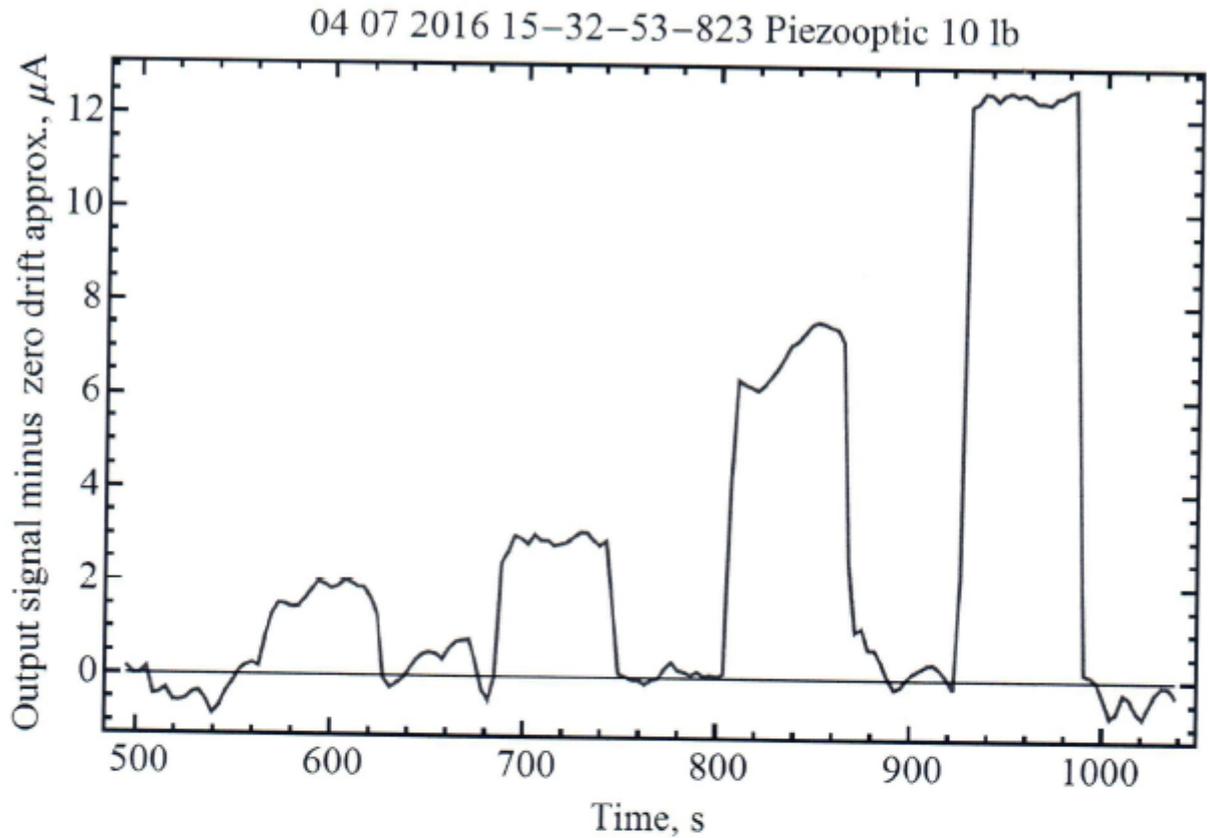


Рисунок 2.1 — Временные зависимости исходного выходного сигнала пьезооптического преобразователя (30x30x100 мм, калёный) при преднагрузке **10 lb** и нагрузке малыми весами 10, 20, 50, 100 г.

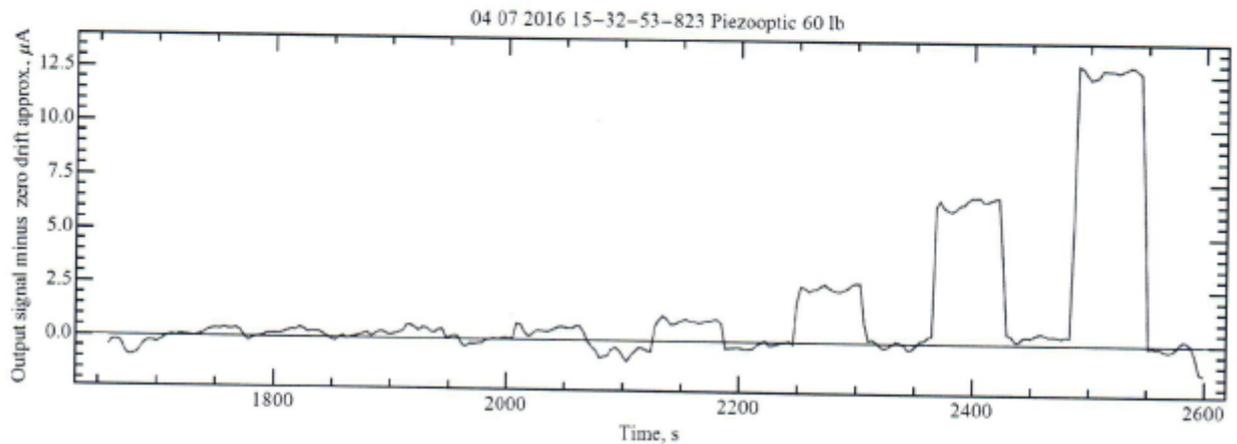


Рисунок 2.2 — Временные зависимости исходного выходного сигнала пьезооптического датчика (30x30x100 мм, калёный) при преднагрузке **60 lb** и последовательной нагрузке малыми весами 1, 3, 5, 10, 20, 50, 100 г.

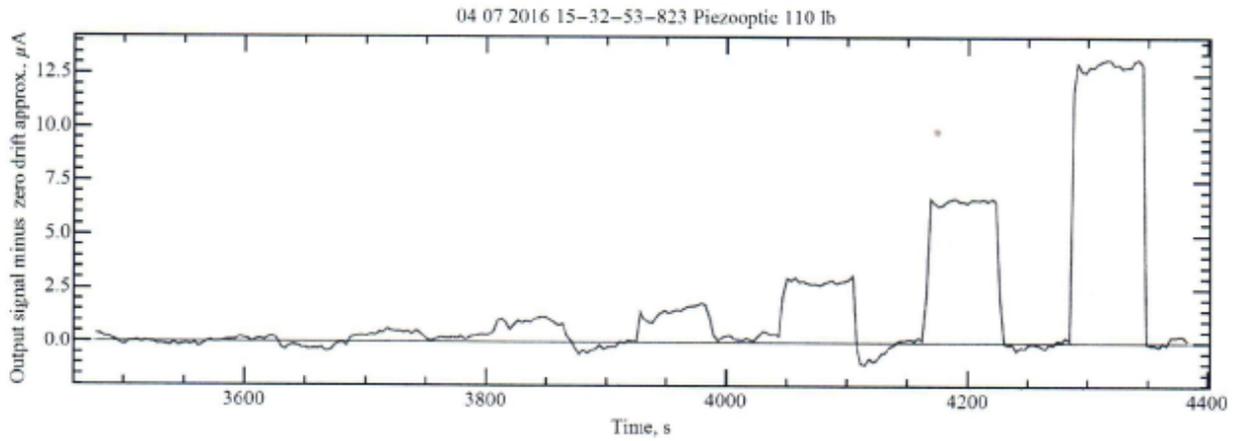


Рисунок 2.3 — Временные зависимости исходного выходного сигнала пьезооптического датчика (30x30x100 мм, калёный) при преднагрузке **110 lb** и последовательной нагрузке весами 1, 3, 5, 10, 20, 50, 100 г.

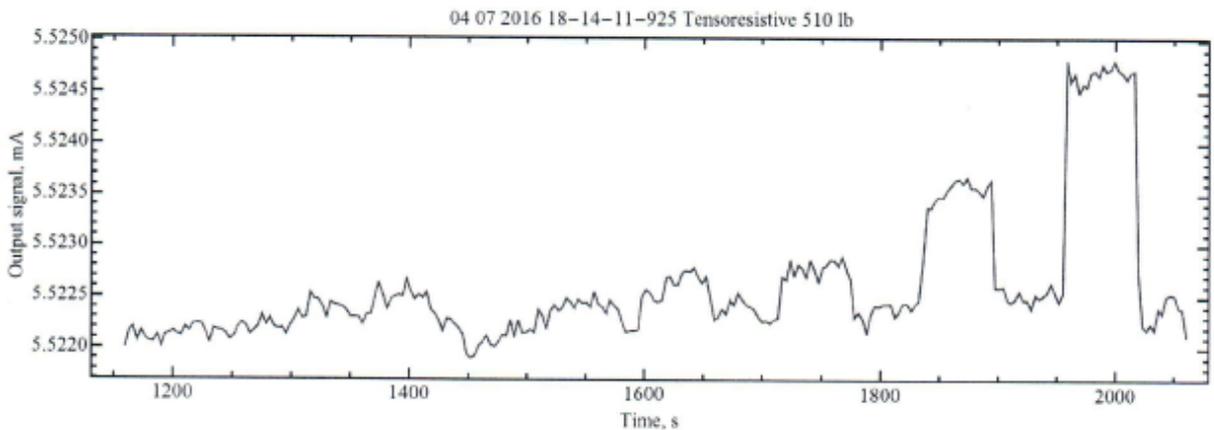
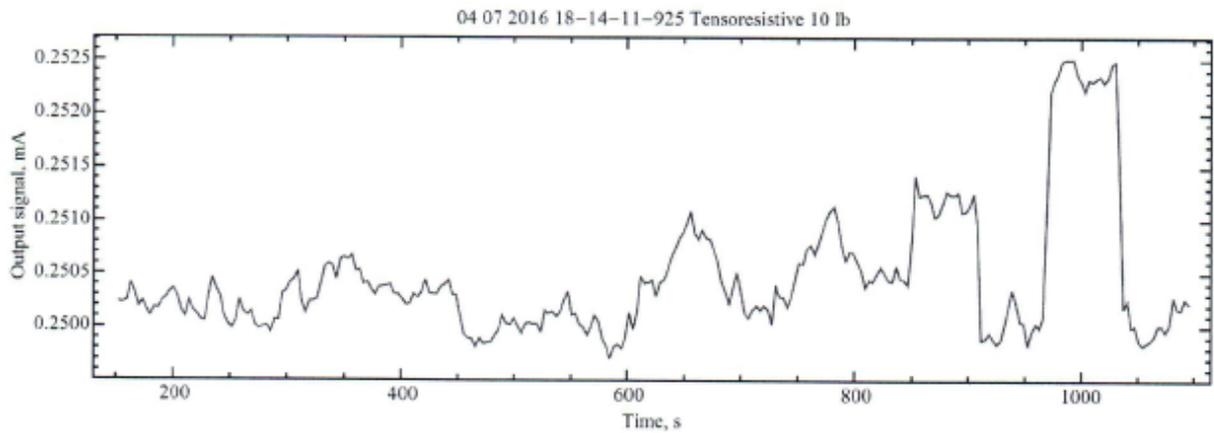


Рис.2.4. Временные зависимости исходного выходного сигнала Load Cell при преднагрузке **10 lb** (вверху) и преднагрузке **510 lb** (внизу) и последовательной нагрузке весами 1, 3, 5, 10, 20, 50, 100 г.

3. Выводы

1. Дрейф нуля пьезооптического датчика за 10 минут равен по величине сигналу, соответствующему нагрузке 100 г ($12 \div 13$ мкА).
2. Дрейф нуля Load Cell не превышает 0.5 мкВ при сигнале, соответствующему нагрузке 100 г, 2.5 мкВ.
3. На пьезооптическом датчике наблюдается релаксация сигнала после приложения нагрузки, величина которого увеличивается с увеличением нагрузки. Исходя из предыдущего опыта, можно предположить, что релаксация связана с нагрузочным элементом, т. е. с несовершенством конструкции и технологии его изготовления.
4. Релаксация сигнала на Load Cell при приложении нагрузки не наблюдается.
5. Изменение сигнала при приложении нагрузки **не равно** величине сигнала при снятии нагрузки для обоих типов датчиков. Причём, для малых весов (≤ 100 г) величина сигнала при разгрузке больше, чем величина при нагрузке, то есть наблюдается «антигистерезис». Для больших весов наблюдается обычный гистерезис.
6. Коэффициент преобразования Load Cell не зависит от предварительной нагрузки и равен 0.0232 мкВ/г как для преднагрузки 10 фунтов, так и 510 фунтов.
7. Коэффициент преобразования пьезооптического преобразователя равен 0.124 мкА/г.

Начальник отдела инноваций и развития



В. Н. Бараков

Ведущий инженер-электроник



М. А. Павлов

Отчет составил:

Ученый секретарь

Филиала ИФП СО РАН «КТИПМ»

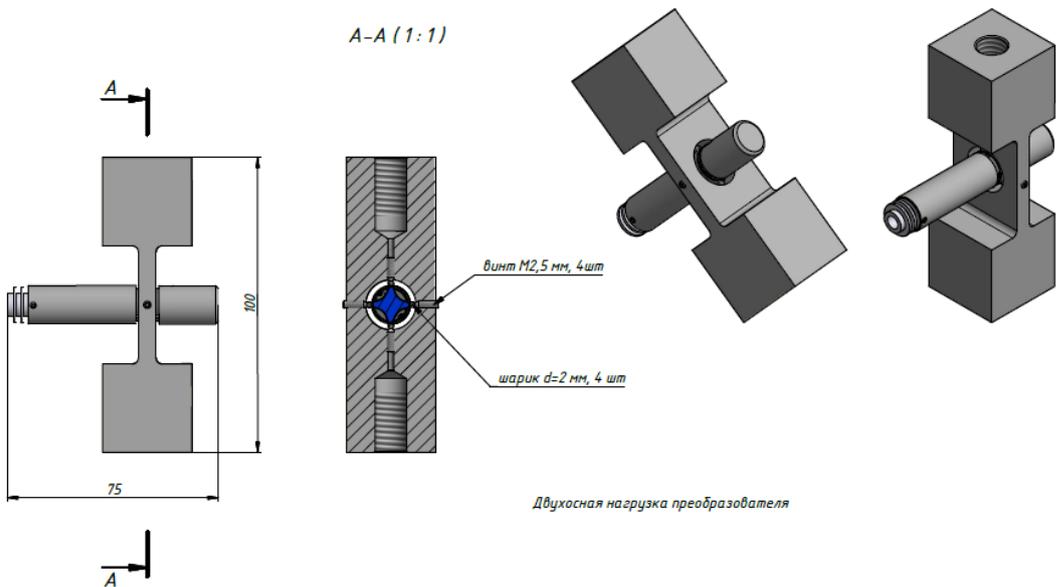
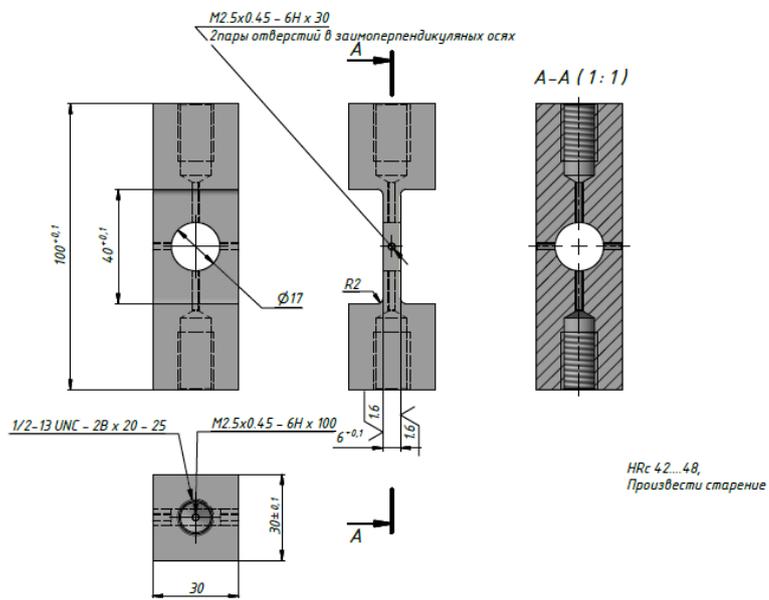
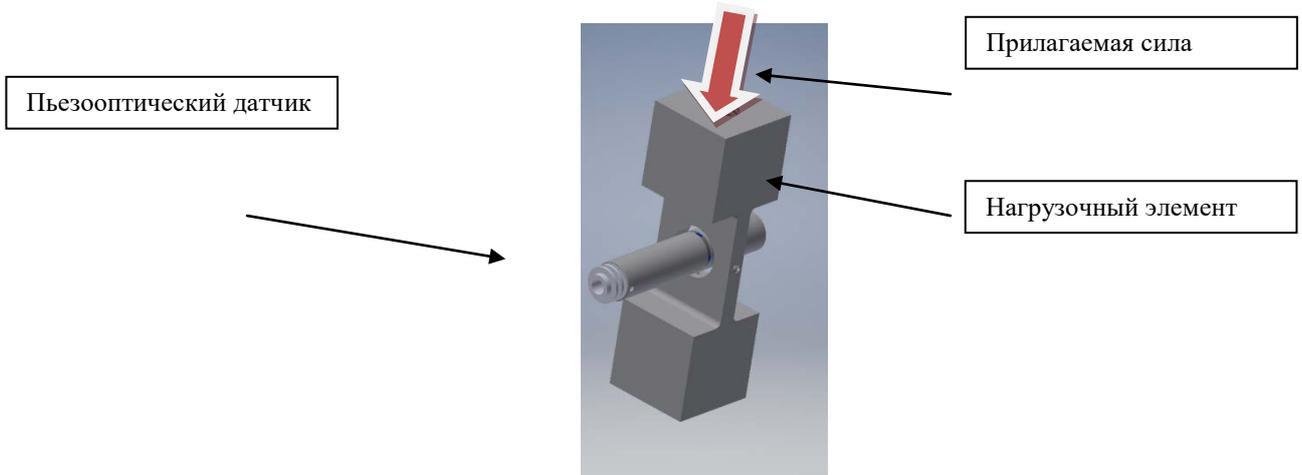


А. Г. Паулиш

Таблица соответствия весов в фунтах и в килограммах.

Weight in pounds (lb)	Weight in kilogram (kg)
10 lb	4.536 kg
20 lb	9.072 kg
50 lb	22.680 kg
60 lb	27.216 kg
100 lb	45.359 kg
110 lb	49.895 kg
500 lb	226.796 kg

Пьезооптический преобразователь и нагрузочный элемент





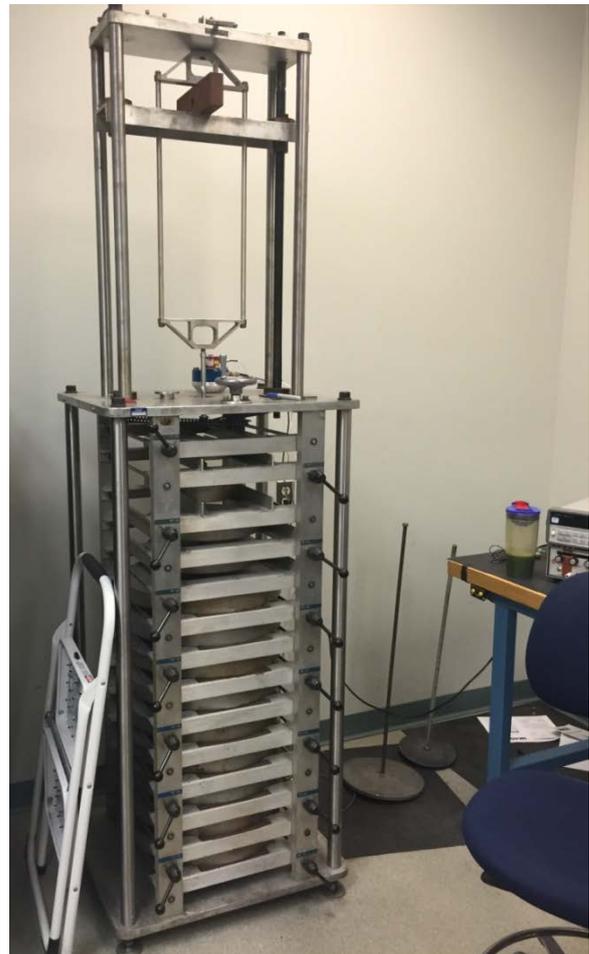
Калибровочные датчики Load Cell



а)



б)



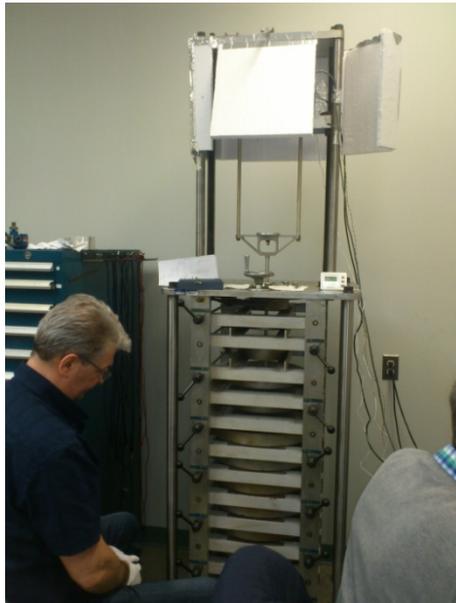
в)

Установка нагрузочного элемента в испытательную машину

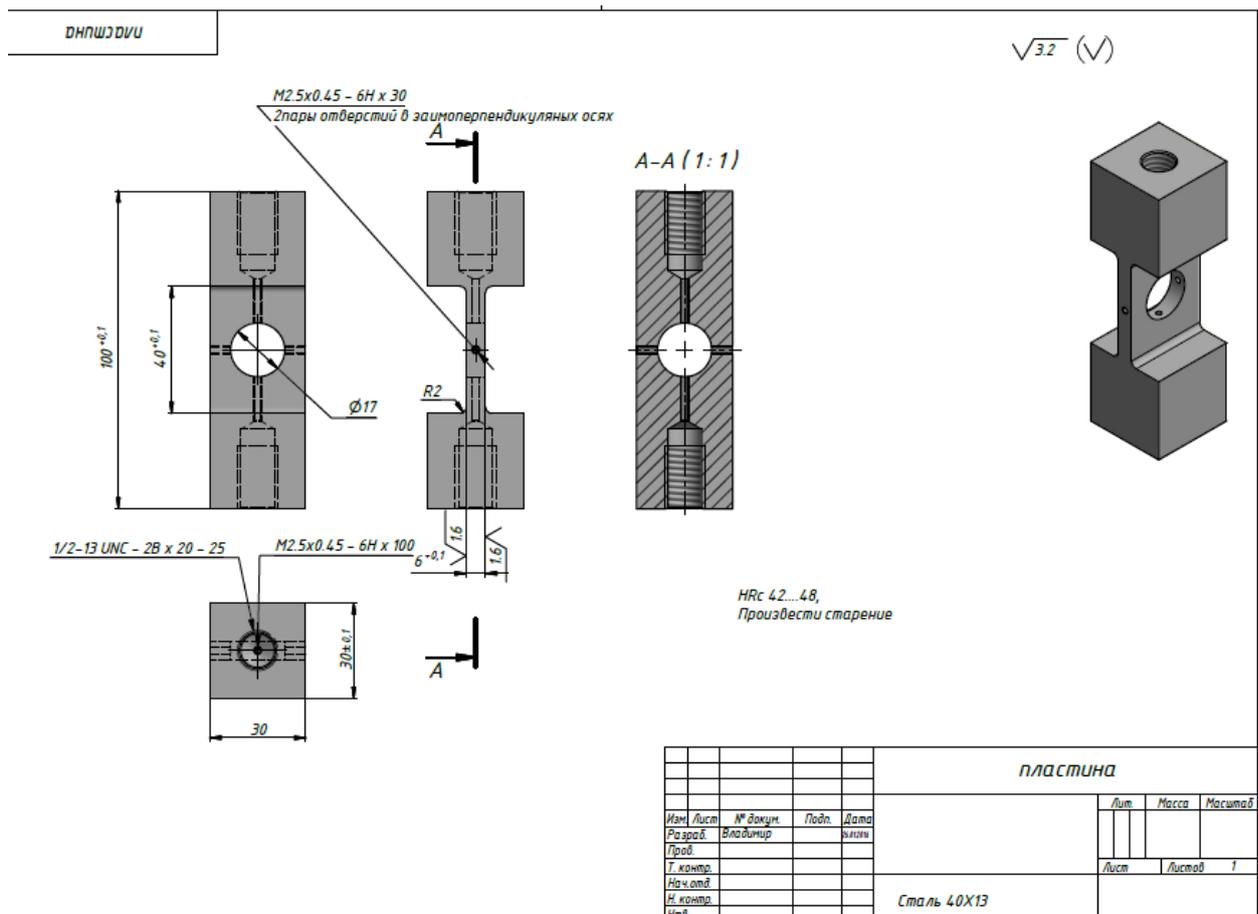
а) – фотография нагрузочного элемента с пьезооптическим преобразователем;

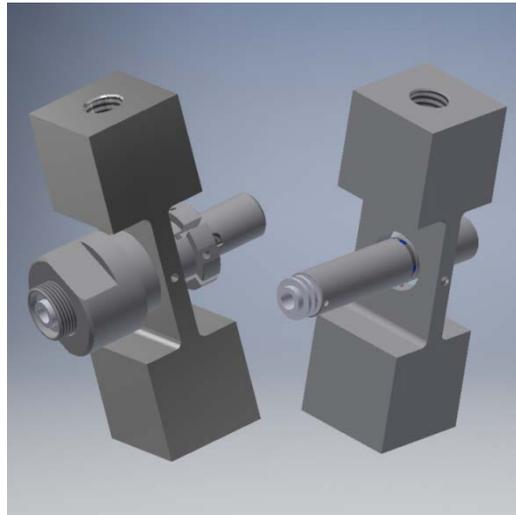
б) – нагрузочный элемент в испытательной машине

в) – испытательная машина

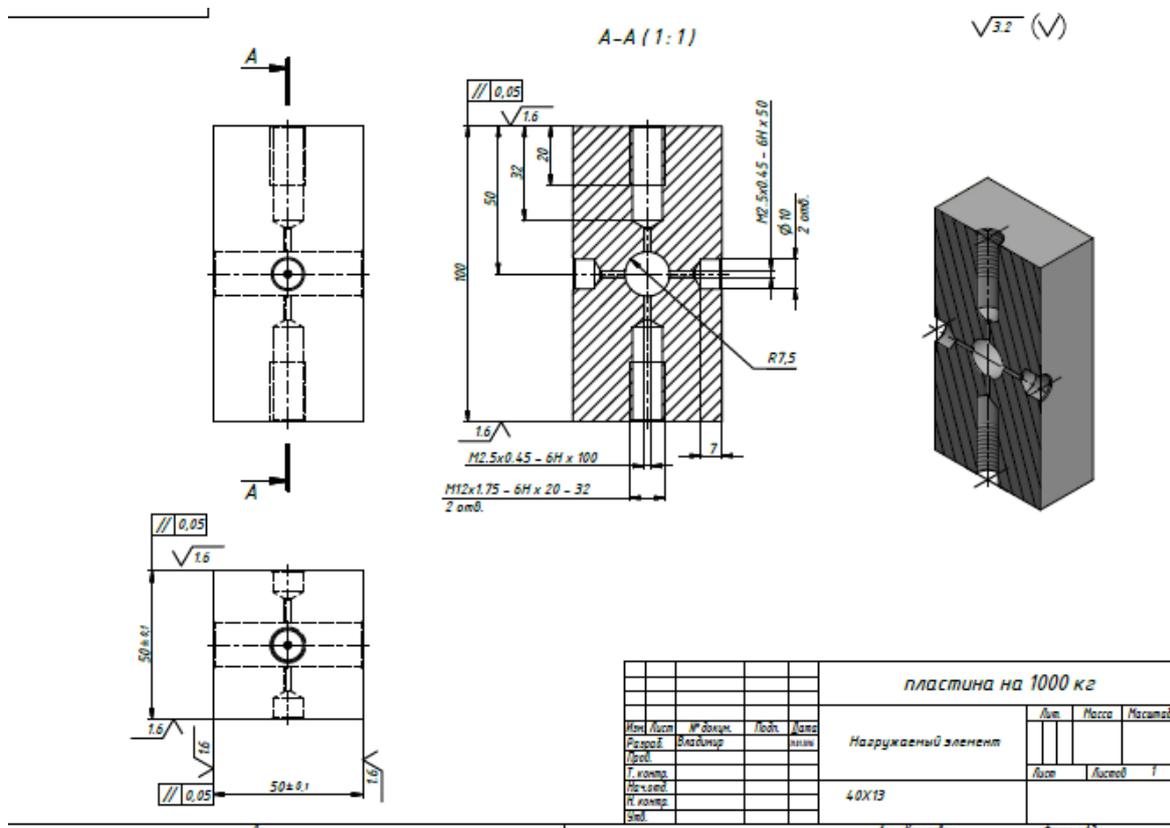


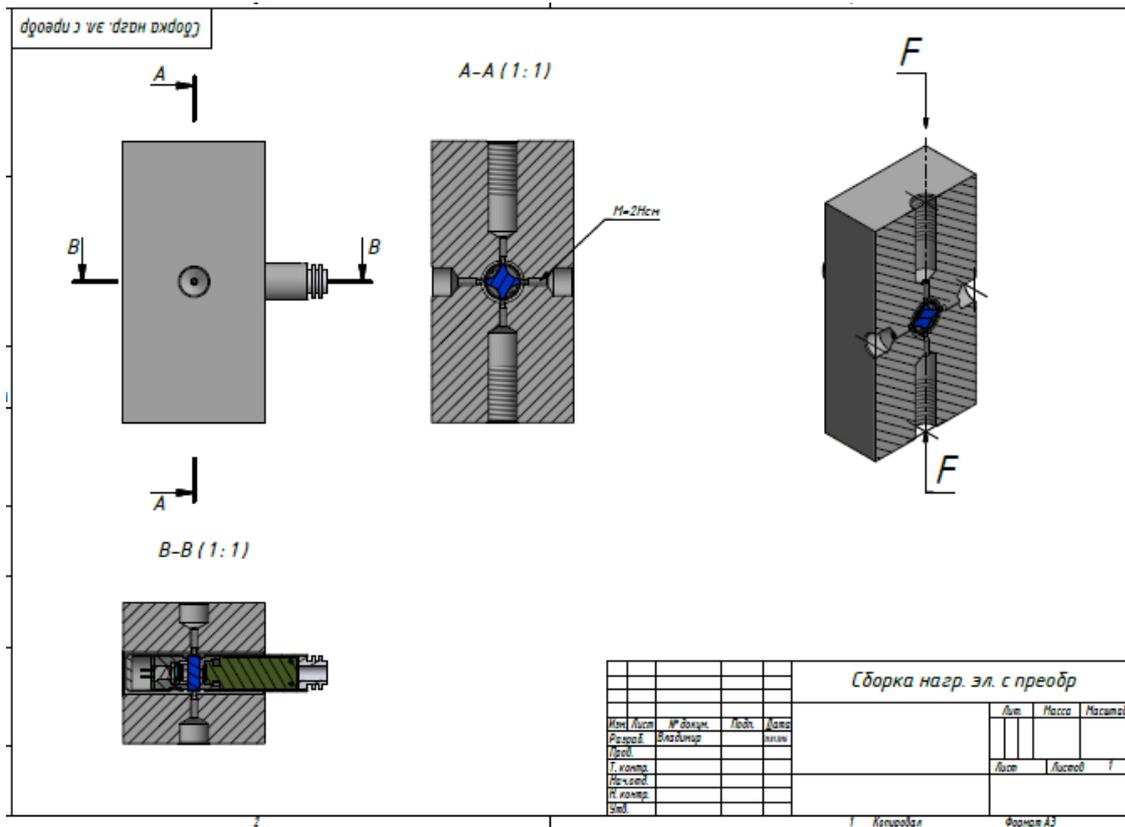
Испытательная машина, датчик деформации закрыт пенопластовыми пластинами для уменьшения влияния температурных перепадов.





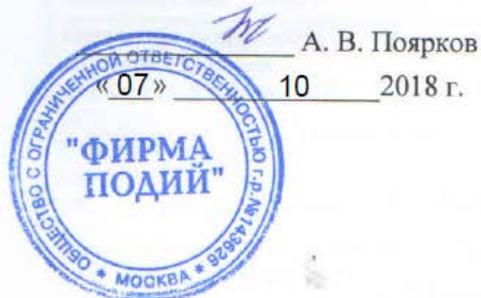
Нагрузочный элемент #1 30x30x100 мм из каленой стали 40X13. Монтаж пьезооптического преобразователя с цангой и без цанги.





Нагрузочный элемент **#2** 50x50x100 мм из каленой стали 40X13.

«СОГЛАСОВАНО»

Генеральный директор
ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора
ИФХЭ РАН им. А.Н.Фрумкина

ПРОТОКОЛ

испытаний пьезооптических преобразователей деформации

Дата: 29 октября – 06 ноября 2018 г.

Место испытаний: ИФХЭ РАН им. А.Н.Фрумкина

Оборудование: Модель Z-010. Датчик силы 10 кН

Методика испытаний: Приложение №1 к договору

Методика обработки результатов испытаний: Приложение №2 к договору

Условия испытаний: НКУ

Образцы: **Образец №001**

РКП – рабочий коэффициент передачи при номинальной нагрузке,

НКП – начальный коэффициент передачи.

Рабочий диапазон линейности выходного сигнала соответствует диапазону значений выходного сигнала, в пределах которого отклонение от линейной функции не превышает значения, определяемого категорией точности датчика согласно ГОСТ 28836-90.

Таблица параметров (образец №001).

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина	Примечание
Коэффициент преобразования при 20°C	k	мкА/Н	0.415	
Начальный коэффициент передачи (НКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{нкп}$	мкА	0.18	
Рабочий коэффициент передачи (РКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{ркп}$	мА	2.002	
Температурный дрейф НКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{нкп}}$	%	0.054	
Температурный дрейф РКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{ркп}}$	%	6.0	
Систематическая ошибка	ϵ_{sys}	%	0.002 17.0	макс. для 20°C макс. для всех т-р, кроме -40°C
Стандартное отклонение случайной составляющей погрешности	σ_{rand}	%	0.232	макс. для 20°C
Гистерезис	h	%	< 0.2	Не превышает стандартное отклонение случайной составляющей погрешности
Минимальная обнаруживаемая сила	F_{min}	Н	0.44	
Минимальная обнаруживаемая деформация	Δx_{min}	нм	0.01 0.39	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Минимальная обнаруживаемая относительная деформация	$(\Delta x/x)_{\text{min}}$	отн. ед.	8.1×10^{-10} 4.3×10^{-9}	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Максимальная измеряемая сила	F_{max}	Н	4824	
Максимально измеряемая деформация	Δx_{max}	нм	108 4359	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Температурный дрейф нуля (на 10°C)	$\delta I_{10^\circ\text{C}}$	%	29	
Нелинейность	$\gamma_{\text{нел}}$	%	2.1 17	Для 20°C Для всех температур

от ИФХЭ РАН им. А. Н. Фрумкина:

Заведующий лабораторией, к.х.н.

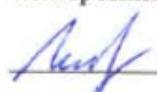

 А. В. Шапагин

Ответственный исполнитель, к.х.н.


 Р. Р. Хасбиуллин

от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

Начальник отдела промышленной электроники


 О. П. Маслов
Ответственный исполнитель,
Инженер-конструктор

 В. Н. Бараков

«СОГЛАСОВАНО»

Генеральный директор
ООО «ФИРМА ПОДИЙ»А. В. Поярков
« 6 » 10 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора
ИФХЭ РАН им. А.Н.ФрумкинаР. Х. Залавутдинов
« 06 » 10 2018 г.

ПРОТОКОЛ

испытаний пьезооптических преобразователей деформации

Дата: 20 сен – 3 окт 2018 г.

Место испытаний: ИФХЭ РАН им.А.Н.Фрумкина

Оборудование: Модель Z-010. Датчик силы 10 кН.

Методика испытаний: Приложение №1 к договору

Методика обработки результатов испытаний: Приложение №2 к договору

Условия испытаний: НКУ

Образцы: Образец №002

РКП – рабочий коэффициент передачи при номинальной нагрузке,

НКП – начальный коэффициент передачи.

Рабочий диапазон линейности выходного сигнала соответствует диапазону значений выходного сигнала, в пределах которого отклонение от линейной функции не превышает значения, определяемого категорией точности датчика согласно ГОСТ 28836-90.

Таблица параметров (образец №002).

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина	Примечание
Коэффициент преобразования при 20°C	k	мкА/Н	0.93	
Начальный коэффициент передачи (НКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{нкп}$	мкА	0.29	
Рабочий коэффициент передачи (РКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{ркп}$	мА	4.558	
Температурный дрейф НКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{нкп}}$	%	0.043	
Температурный дрейф РКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{ркп}}$	%	2.0	
Систематическая ошибка	ε_{sys}	%	0.04 4	макс. для 20°C макс. для всех т-р, кроме -40°C
Стандартное отклонение случайной составляющей погрешности	σ_{rand}	%	0.03	
Гистерезис	h	%	< 0.03	Не превышает стандартное отклонение случайной составляющей погрешности
Минимальная обнаруживаемая сила	F_{min}	Н	0.31	
Минимальная обнаруживаемая деформация	Δx_{min}	нм	0.007 0.28	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 95 мм
Минимальная обнаруживаемая относительная деформация	$(\Delta x/x)_{\text{min}}$	отн. ед.	5.8×10^{-10} 3.0×10^{-9}	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 95 мм
Максимальная измеряемая сила	F_{max}	Н	4905	
Максимально измеряемая деформация	Δx_{max}	нм	109 4432	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 95 мм
Температурный дрейф нуля (на 10°C)	$\delta I_{10^\circ\text{C}}$	%	14	
Нелинейность	$\gamma_{\text{нел}}$	%	2.3 4.3	Для 20°C Для всех температур

от ИФХЭ РАН им. А.Н. Фрумкина:

Заведующий лабораторией, к.х.н.

А. В. Шапагин

Ответственный исполнитель, к.х.н.

Р. Р. Хасбиуллин

от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

Начальник отдела промышленной электроники

О. П. Маслов

Ответственный исполнитель,
Инженер-конструктор

В. Н. Бараков

«СОГЛАСОВАНО»

Генеральный директор
ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

А. В. Поярков

10 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Зам. директора
ИФХЭ РАН им. А.Н.Фрумкина

Р. Х. Залавутдинов

10 2018 г.

ПРОТОКОЛ

испытаний пьезооптических преобразователей деформации

Дата: 12 – 22 октябрь 2018 г.

Место испытаний: ИФХЭ РАН им.А.Н.Фрумкина

Оборудование: Модель Z-010. Датчик силы 10 кН

Методика испытаний: Приложение №1 к договору

Методика обработки результатов испытаний: Приложение №2 к договору

Условия испытаний: НКУ

Образцы: **Образец №003**

РКП – рабочий коэффициент передачи при номинальной нагрузке,

НКП – начальный коэффициент передачи.

Рабочий диапазон линейности выходного сигнала соответствует диапазону значений выходного сигнала, в пределах которого отклонение от линейной функции не превышает значения, определяемого категорией точности датчика согласно ГОСТ 28836-90.

Таблица параметров (образец №003).

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина	Примечание
Коэффициент преобразования при 20°C	k	мкА/Н	1.05	
Начальный коэффициент передачи (НКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{нкп}$	мкА	0.18	
Рабочий коэффициент передачи (РКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{ркп}$	мА	5.111	
Температурный дрейф НКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{нкп}}$	%	0.007	
Температурный дрейф РКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{ркп}}$	%	1.2	
Систематическая ошибка	ϵ_{sys}	%	0.001 4.6	макс. для 20°C макс. для всех т-р, кроме -40°C
Стандартное отклонение случайной составляющей погрешности	σ_{rand}	%	0.02	макс. для 20°C
Гистерезис	h	%	< 0.02	Не превышает стандартное отклонение случайной составляющей погрешности
Минимальная обнаруживаемая сила	F_{min}	Н	0.17	
Минимальная обнаруживаемая деформация	Δx_{min}	нм	0.004 0.16	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Минимальная обнаруживаемая относительная деформация	$(\Delta x/x)_{\text{min}}$	отн. ед.	3.2×10^{-10} 1.7×10^{-9}	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Максимальная измеряемая сила	F_{max}	Н	4869	
Максимально измеряемая деформация	Δx_{max}	нм	109 4399	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Температурный дрейф нуля (на 10°C)	$\delta I_{10^\circ\text{C}}$	%	9.3	
Нелинейность	$\gamma_{\text{нел}}$	%	1.7 4.8	Для 20°C Для всех температур

от ИФХЭ РАН им. А.Н. Фрумкина:

Заведующий лабораторией, к.х.н.



А. В. Шапагин

Ответственный исполнитель, к.х.н.



Р. Р. Хасбиуллин

от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

Начальник отдела промышленной электроники



О. П. Маслов

Ответственный исполнитель,
Инженер-конструктор


В. Н. Бараков

Таблица параметров (образец №004).

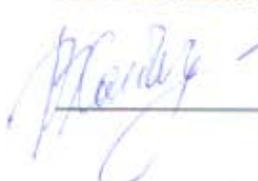
Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина	Примечание
Коэффициент преобразования при 20°C	k	мкА/Н	0.97	
Начальный коэффициент передачи (НКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{\text{нкп}}$	мкА	0.4	
Рабочий коэффициент передачи (РКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{\text{ркп}}$	мА	4.711	
Температурный дрейф НКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{нкп}}$	%	0.01	
Температурный дрейф РКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{ркп}}$	%	2.9	
Систематическая ошибка	ε_{sys}	%	0.004 4.7	макс. для 20°C макс. для всех т-р, кроме -40°C
Стандартное отклонение случайной составляющей погрешности	σ_{rand}	%	0.03	макс. для 20°C
Гистерезис	h	%	< 0.03	Не превышает стандартное отклонение случайной составляющей погрешности
Минимальная обнаруживаемая сила	F_{min}	Н	0.39	
Минимальная обнаруживаемая деформация	Δx_{min}	нм	0.009 0.35	На фотоупругом элементе 13 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Минимальная обнаруживаемая относительная деформация	$(\Delta x/x)_{\text{min}}$	отн. ед.	7.3×10^{-10} 3.9×10^{-9}	На фотоупругом элементе 13 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Максимальная измеряемая сила	F_{max}	Н	4865	
Максимально измеряемая деформация	Δx_{max}	нм	109 4396	На фотоупругом элементе 13 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Температурный дрейф нуля (на 10°C)	$\delta I_{10^\circ\text{C}}$	%	8.5	
Нелинейность	$\gamma_{\text{нел}}$	%	2.4 4.7	Для 20°C Для всех температур

от ИФХЭ РАН им.А.Н.Фрумкина:

Заведующий лабораторией, к.х.н.

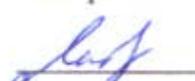

 А. В. Шапагин

Ответственный исполнитель, к.х.н.


 Р. Р. Хасбиуллин

от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

Начальник отдела промышленной электроники


 О. П. Маслов
Ответственный исполнитель,
Инженер-конструктор

 В. Н. Бараков

«СОГЛАСОВАНО»
 Генеральный директор
 ООО «ФИРМА ПОДИЙ»



М
 А. В. Поярков
 «28» 10 2018 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
 Зам. директора
 ИФХЭ РАН им. А.Н.Фрумкина



П
 Р. Х. Залавутдинов
 «28» 10 2018 г.

ПРОТОКОЛ

испытаний пьезооптических преобразователей деформации

Дата: 22– 26 октября 2018 г.
 Место испытаний: ИФХЭ РАН им.А.Н.Фрумкина
 Оборудование: Модель Z-010. Датчик силы 10 кН
 Методика испытаний: Приложение №1 к договору
 Методика обработки результатов испытаний: Приложение №2 к договору
 Условия испытаний: НКУ
 Образцы: **Образец №005**

РКП – рабочий коэффициент передачи при номинальной нагрузке,
 НКП – начальный коэффициент передачи.

Рабочий диапазон линейности выходного сигнала соответствует диапазону значений выходного сигнала, в пределах которого отклонение от линейной функции не превышает значения, определяемого категорией точности датчика согласно ГОСТ 28836-90.

Таблица параметров (образец №005).

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Величина	Примечание
Коэффициент преобразования при 20°C	k	мкА/Н	1.06	
Начальный коэффициент передачи (НКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{нкп}$	мкА	0.15	
Рабочий коэффициент передачи (РКП) при номинальной нагрузке при 20°C	$k_{ркп}$	мА	5.19	
Температурный дрейф НКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{нкп}}$	%	0.01	
Температурный дрейф РКП (на 10°C)	$\delta k_{10^\circ\text{C}, \text{ркп}}$	%	1.45	
Систематическая ошибка	ϵ_{sys}	%	0.007 4.5	макс. для 20°C макс. для всех т-р, кроме -40°C
Стандартное отклонение случайной составляющей погрешности	σ_{rand}	%	0.009	макс. для 20°C
Гистерезис	h	%	< 0.1	Не превышает стандартное отклонение случайной составляющей погрешности
Минимальная обнаруживаемая сила	F_{min}	Н	0.14	
Минимальная обнаруживаемая деформация	Δx_{min}	нм	0.003 0.013	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Минимальная обнаруживаемая относительная деформация	$(\Delta x/x)_{\text{min}}$	отн. ед.	2.6×10^{-10} 1.3×10^{-9}	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Максимальная измеряемая сила	F_{max}	Н	4878	
Максимально измеряемая деформация	Δx_{max}	нм	109 4408	На фотоупругом элементе 12 мм На нагрузочном элементе 92 мм
Температурный дрейф нуля (на 10°C)	$\delta I_{10^\circ\text{C}}$	%	3.9	
Нелинейность	$\gamma_{\text{нел}}$	%	1.6 3.8	Для 20°C Для всех температур

от ИФХЭ РАН им. А. Н. Фрумкина:

Заведующий лабораторией, к.х.н.


 А. В. Шапагин

Ответственный исполнитель, к.х.н.


 Р. Р. Хасбиуллин

от ООО «ФИРМА ПОДИЙ»

Начальник отдела промышленной электроники


 О. П. Маслов
Ответственный исполнитель,
Инженер-конструктор

 В. Н. Бараков

ПРИЛОЖЕНИЕ «Г» ИНФОРМАЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ОПЫТНЫХ ОБРАЗЦОВ, ДЕМОНИСТРИРОВАВШИХСЯ НА ВЫСТАВКАХ И ЯРМАРКАХ



ФИЛИАЛ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»
(Филиал ИФП СО РАН «КТИПМ»)

Пирозлектрический датчик электромагнитного излучения с широким спектральным диапазоном

Вторичный усилитель



Блок питания
пятиканальный



Пирозлектрический датчик с
первичным усилителем в
корпусе КТ-3

Входное окно выбирается
исходя из требований к
спектральному диапазону
чувствительности датчика

Технические характеристики

Пирозлектрический датчик с первичным усилителем

Спектральный диапазон, мкм	0,4-2000
Крутизна преобразования, В/Вт	$>10^4$
Мощность эквивалентная шуму, Вт/Гц ^{1/2}	$< 10^{-8}$
Потребляемая мощность, Вт, не более	0,001
Напряжение питания, В	+5
Габариты, мм	9×9×12

Вторичный усилитель

Полоса усиления, Гц	60-500
Макс. напряжение выходного сигнала (нагрузка 50 Ом), В:	±4
Макс. шум усилителя, мВ	0,3
Габариты, мм	14×14×110

Блок питания

Количество подключаемых датчиков	5
Напряжение питания блока питания, В	+12
Потребляемая мощность блока питания, Вт, не более	2
Вес блока питания, кг	0,7
Габариты, мм	140×38×125



630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 2/1
Тел: (383)330-96-30, (383)330-65-59, факс: (383)330-91-06, E-mail: oes@oesd.ru
site: oesd.ru



Пирозлектрический датчик электромагнитного излучения с широким спектральным диапазоном

НАЗНАЧЕНИЕ

Пирозлектрические датчики предназначены для регистрации электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн 0.4–2000 мкм. Пирозлектрический датчик включает в себя блок питания, набор детекторов излучения на основе пирозлектрических преобразователей из 5 штук. Данные датчики обладают наибольшей чувствительностью в миллиметровом диапазоне среди известных неохлаждаемых тепловых датчиков.

ОПИСАНИЕ

В основе датчика использован пирозлектрический преобразователь. Пирозлектрический датчик изготовлен в стандартном корпусе КТ-3, используемого для пирозлектрических датчиков ИК излучения типа МГ-33 производства АО «НПП «ВОСТОК», г. Новосибирск, и содержит первичный усилитель, расположенный на чипе сенсора. Датчик вставляется в выносной малогабаритный корпус вторичного усилителя, который с помощью кабеля подсоединяется к многоканальному блоку питания и формирователя выходного сигнала. К одному блоку могут подсоединяться до 5 датчиков для спектрального и поляризационного анализа.

Данное конструктивное исполнение датчика выигрывает, как по эксплуатационным параметрам: малый диаметр выносного усилителя, возможность оперативной замены измерительного элемента, возможность компоновки нескольких датчиков в одном узле для получения оперативной картины измеряемых параметров, так и по техническим характеристикам: малый шум усилителя и питающего напряжения, возможность питания как от сетевого источника, так и от аккумуляторной батареи.

Использование компактных вторичных усилителей и многоканального блока питания позволяет строить относительно недорогие системы для спектро-радиометрических измерений в научных и технологических исследованиях.

ПРИМЕЧАНИЕ

Вторичный усилитель и блок питания могут использоваться для работы со стандартными ИК детекторами типа МГ-33.

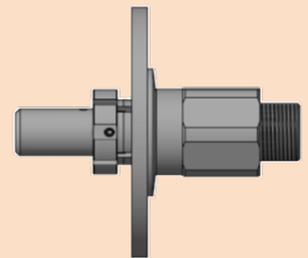
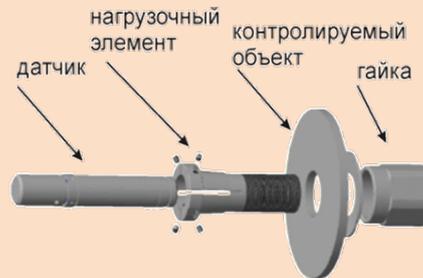




ООО «Фирма ПОДИЙ»

«УПС-15»

Пьезооптический датчик деформаций (напряжений)

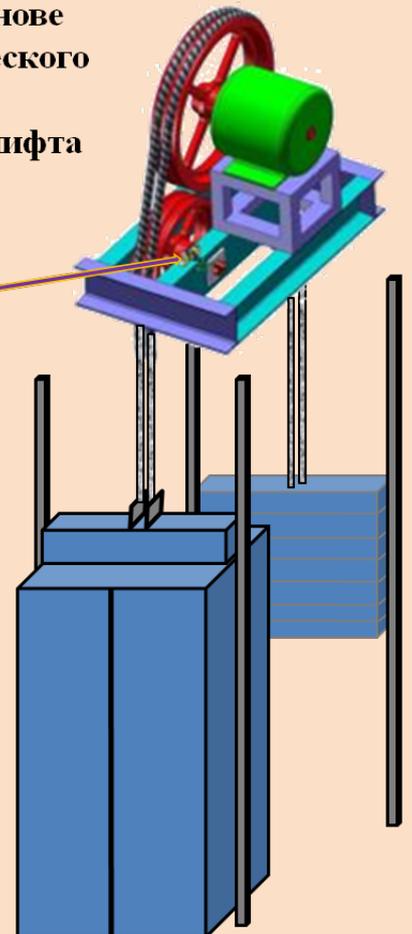
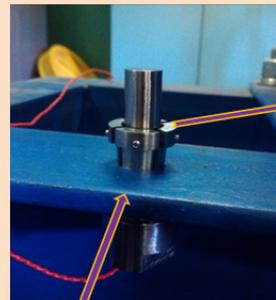


НАЗНАЧЕНИЕ

Датчик деформации выполнен на основе высокочувствительного пьезооптического преобразователя и предназначен для контроля степени загрузки кабины лифта

ОСОБЕННОСТИ

- ✓ Миниатюрный
- ✓ Высокочувствительный
- ✓ Надежный
- ✓ Универсальный



СОСТАВ ДАТЧИКА

Датчик состоит из пьезооптического преобразователя в цилиндрическом корпусе и нагрузочного элемента, который служит для монтажа преобразователя на раме лебедки лифта и для передачи деформации рамы на преобразователь



107084, г. Москва, ул. Мясницкая, д.47, оф. Б-10

Тел: (495) 607-92-91, факс: (383) 607-88-84,

E-mail: infor@firmapodij.ru site: firmapodij.ru

ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «УПС-15»

Наименование характеристики	Значение
База датчика деформации, мм	14
Диапазон относительных деформаций, отн. ед.	$10^{-8} \div 10^{-4}$
Максимальная относительная деформация, отн. ед.	10^{-3}
Погрешность преобразования, %	0.2
Температура хранения, °С	"-55" ÷ "+75"
Рабочий диапазон температур, °С	"-20" ÷ "+75"
Выходной сигнал, мА	Аналоговая петля: 4-20
Напряжение питания, В	7.5 ÷ 36
Потребляемая мощность, Вт	макс 0,6
Габаритные размеры преобразователя, мм	Ø14×70
Вес, г	max 50
Срок службы, лет, не менее	25



Преобразователь с различными нагрузочными элементами

- Датчик состоит из универсального **миниатюрного** преобразователя.
- Связь со станцией с помощью **аналогового** или **цифрового** выходов.
- Конструкция **нагрузочного** элемента к преобразователю выбирается исходя из **способа** монтажа
- Не требуется **изменений** конструкции контролируемого объекта

Патенты:

US 8,887,577 23.04.2010
 RF 2.422.786 23.04.2010
 ЕАПО 024662 01.07.2010
 RF 2.454.642 29.03.2011
 RF 2.530.466 09.07.2013
 RF 2.530.467 09.07.2013
 RF 2.564.691 04.02.2014
 RF 2.565.856 08.07.2014

Новые функциональные возможности

- ✓ контроль качества монтажа лифта;
- ✓ контроль нагрузки на двигатель лебедки;
- ✓ контроль разгона и торможения;
- ✓ контроль аварийных ситуаций;
- ✓ оперативный контроль состояния шахты лифта



107084, г. Москва, ул. Мясницкая, д.47, оф. Б-10
 Тел: (495) 607-92-91, факс: (383) 607-88-84,
 E-mail: infor@firmapodij.ru site: firmapodij.ru

ПРИЛОЖЕНИЕ «Д» БЛАГОДАРНОСТЬ



Институт физики полупроводников
им. А.В. Ржанова СО РАН

БЛАГОДАРНОСТЬ

ученому секретарю КТИПМ, к.ф.-м.н.

Паулишу Андрею Георгиевичу

победителю конкурса научных работ
сотрудников ИФП СО РАН 2017 года

за работу «Теоретическое и экспериментальное
исследование пьезооптического преобразователя
для высокочувствительных датчиков деформаций»

(авторы П.С. Загубисало, А.Г. Паулиш),

получившую 1-ю премию.

Директор ИФП СО РАН
академик



А.В. Латышев