

УТВЕРЖДАЮ

Директор КТИ ИИ СО РАН

П.С. Завьялов

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Паулиша Андрея Георгиевича  
«Специализированные оптико-электронные системы приема и отображения информации», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 – оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

### **Актуальность темы диссертации**

Методы измерения характеристик различных объектов в ТГц-диапазоне излучения находят всё большее применение, как в гражданском секторе экономики, так и в специальной технике. Нерешенной на сегодня проблемой развития детекторов ТГц-диапазона является отсутствие неохлаждаемых матричных детекторов, простых в использовании, обладающих достаточной чувствительностью и быстродействием и позволяющих регистрировать изображение в ТГц-диапазоне в реальном масштабе времени без использования систем глубокого охлаждения ( $T < 20 \text{ K}$ ) и систем сканирования. В задачах спектроскопии в широком спектральном диапазоне, охватывающем видимый, инфракрасный, терагерцовый и миллиметровый диапазоны, по-прежнему представляют интерес одиночные широкополосные неохлаждаемые детекторы. На сегодня предпринимаются попытки реализовать высокую чувствительность пироэлектрических сенсоров в данной области, так как они потенциально обладают большим быстродействием и низкой стоимостью в сравнении с другими типами тепловых детекторов.

Измерение механических напряжений является основным экспериментальным методом изучения напряженных состояний в различных конструкциях. С развитием технологий необходимость в датчиках с такими характеристиками как малые масса и размеры, малая мощность, устойчивость к воздействиям внешней среды и электромагнитная помехозащищенность, стабильность параметров, низкая стоимость резко возрастает в таких областях, как аэрокосмическая и оборонная промышленность, производство материалов и готовых изделий, строительство, горная промышленность. Сегодня наиболее широко используемыми устройствами для измерения механических

напряжений являются датчики, основанные на тензорезистивном и пьезоэлектрическом эффектах, волоконно-оптические датчики. Проблема заключается в том, что такие датчики имеют ряд неустранимых недостатков: неустойчивость и деградация параметров со временем, гистерезис, нелинейность, малый динамический диапазон, относительно низкая чувствительность к измеряемым параметрам и, наоборот, высокая чувствительность к перегрузкам.

Датчики на основе пьезооптического эффекта имеют значительно более высокий коэффициент тензочувствительности, чем другие, благодаря принципиально высокой чувствительности фазы волны к напряженному состоянию вещества. Несмотря на то, что пьезооптический эффект известен достаточно давно, на рынке отсутствуют датчики, удовлетворяющие условиям промышленной эксплуатации. Высокая чувствительность 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.

#### **Связь работы с планами соответствующих отраслей науки и народного хозяйства**

Полученные результаты полностью 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).

**Научная новизна.** В качестве новых научных результатов диссертантом выдвинуты следующие положения.

1. Впервые 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. Впервые 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. Впервые 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. Впервые 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 пьезоэлектрические 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.
6. Предложено использование крестообразной формы фотоупругого элемента в пьезооптических преобразователях.

Оригинальность и новизна выполненных исследований и полученных результатов подтверждаются публикациями в российских журналах из перечня ВАК, приравненных к ним зарубежными публикациями, индексируемыми в SCOPUS и Web-of-Science, а также 19-ю российскими и зарубежными патентами.

**Научная и практическая значимость работы** заключается в следующем:

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 метапоглопителей, которые на данный момент охватывают интервал длин волн от 1,6 мкм до 10 мм.

2. Созданные многоканальные пьезоэлектрические детекторы типа УМК-5, являясь достойной альтернативой зарубежным аналогам, могут использоваться для контроля параметров источников излучения в диапазоне длин волн от 0,4 до 2500 мкм.

3. Созданные многоканальные пьезоэлектрические детекторы типа УМК-5, являясь достойной альтернативой зарубежным аналогам, могут использоваться для контроля параметров источников излучения в диапазоне длин волн от 0,4 до 2500 мкм.

4. Благодаря высокой чувствительности (менее 0,3 мН) и большому динамическому диапазону (до  $6 \times 10^4$ ) 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.

**Достоверность исследований** в диссертационной работе Паулиша А. Г. обеспечена измерениями, выполненными на поверенном сертифицированном оборудовании в различных организациях. 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» (г. Новосибирск) 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» (2012-2014 гг., Москва), «INTERPOLITECH» (2014-2015 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., г. 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: ISMTII-2009 (С.-Петербург), IRMMW-THz-2010 (Рим, Италия), IMEKO TC2-2011 (Линц, Австрия), «Metamaterials'2010» (Карлсруэ, Германия), GSM-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).

#### **Значимость для науки и производства (практики) полученных автором диссертации результатов**

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 РФФИ 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 в период с 2009 по 2017 гг.). 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.

### **Оценка содержания диссертации, ее завершенность в целом, замечания по оформлению**

Представленную диссертацию можно считать завершенной в целом работой: цель 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). Материалы, представленные в диссертационной работе, можно рассматривать как изложение новых научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, что отвечает п. 9 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013.

#### **Замечания по диссертационной работе:**

1. Не отмечена связь работы с планами НИР и ОКР организации.
2. В первой главе недостаточно полно приведены ссылки на работы, касающиеся неохлаждаемых матричных ТГц-детекторов.
3. Не перечислены предприятия, заинтересованные в результатах работы, касающиеся ТГц-детекторов.
4. К замечаниям по оформлению диссертации можно отнести дублирование первоисточников в списке литературы.

5. Возможно, Глава 8 и соответствующие ей Приложения излишни по объёму, так как содержат, по сути, ряд результатов однотипных испытаний, проведённых в разное время.

Указанные замечания носят рекомендательный характер и не меняют в целом высокую и положительную оценку диссертационной работы. Работа выполнена на высоком уровне. Результаты работы полностью и своевременно опубликованы в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, прошли апробацию в виде докладов на многих конференциях. Автореферат диссертации полно и верно отражает содержание работы.

### **Заключение**

Характер результатов диссертации соответствует п. 1.2 «Научно обоснованные технические, экономические или технологические разработки, обеспечивающие решение важных прикладных задач».

Уровень новизны результатов диссертации соответствует п. 2.1 «Результаты являются новыми».

Ценность результатов диссертации соответствует п. 3.2. «Высокая».

Связь темы диссертации с плановыми исследованиями соответствует п. 4.1. «Тема входит в государственную программу или программу международных исследований».

Уровень внедрения (использования) результатов диссертации, имеющей прикладное значение, соответствует п. 5.2. «На межотраслевом уровне».

Рекомендации по расширенному использованию результатов диссертации, имеющей прикладное значение – соответствует п. 6.1. Требуется расширенного использования.

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:

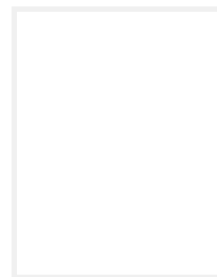
- исследования и контроля параметров различных сред и объектов, в том числе при решении технологических, экологических и биологических задач;
- приема, обработки и отображения информации;
- создания оптических и оптико-электронных приборов и систем для медицины;
- создания оптического и оптико-электронного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

Полученные в диссертации данные достоверны, результаты экспериментов грамотно интерпретированы, выводы достаточно обоснованы. Таким образом, диссертация Паулиша Андрея Георгиевича является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные схмотехнические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор заслуживает присуждения искомой ученой степени.

Отзыв на диссертационную работу составлен научным руководителем Конструкторско-технологического института научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук профессором, доктором технических наук Чугуем Юрием Васильевичем.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании научно-технического совета КТИ НП СО РАН, протокол № 5 от 11.11.2020 г.

Научный руководитель КТИ НП СО РАН,  
доктор технических наук, профессор,  
заслуженный деятель науки РФ  
E-mail: [chugui@tdisie.nsc.ru](mailto:chugui@tdisie.nsc.ru)



Ю.В. Чугуй

Сведения о ведущей организации



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Конструкторско-технологический институт научного приборостроения Сибирского отделения Российской академии наук (КТИ НП СО РАН)

Адрес: 630058, г. Новосибирск-58,

ул. Русская 41, тел. (383)306-62-08

E-mail: [info@tdisie.nsc.ru](mailto:info@tdisie.nsc.ru)

С отзывом ознакомлен *Гуркин* / А.Т. Паулиш /

13.11.2020г.

Отзыв получен

13.11.2020



Степанов М.И.