

634055, г.Томск , пл.ак.Зуева,1  
8(3822)492020  
8(3822)492086  
[yupon@iao.ru](mailto:yupon@iao.ru)

630073,г.Новосибирск,пр-т К.Маркса,20  
8(383)3461942  
8(383)3461942

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Паулиша Андрея Георгиевича

на тему «Специализированные оптико-электронные систем приема, обработки и отображения информации»

по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы,

представленную на соискание учёной степени доктора технических наук.

### 1. Актуальность избранной темы

Диссертационная работа А. Г. Паулиша «Специализированные оптико-электронные систем приема, обработки и отображения информации» направлена на создание оптических методов и устройств для их реализации для контроля различных физических параметров в весьма широких областях применений: от систем безопасности, промышленных и медицинских технологиях до научных разработок и исследований. Внедрение оптических, бесконтактных, методов контроля в производственные линейки обеспечивает *in-situ* контроль качества продукции и/или безопасной работы оборудования, существенно сокращает производственный процесс и снижает затраты на подготовку персонала.

Приемники нового типа для регистрации электромагнитного излучения в дальнем оптическом диапазон ( $\lambda \geq 300$  мкм) и пьезооптические датчики механических напряжений с высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном, применяются для решения научных и технологических задач, проблем обеспечения безопасности жизнедеятельности человека, противодействия терроризму. Данные направления являются на сегодня актуальными и входят в «Перечень приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации», утвержденному Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. №899.

В диссертации представлены результаты исследований, направленных на разработку новых специализированных оптико-электронных систем и комплексов приема, обработки и отображения информации, предназначенных для детектирования электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне, и измерения величин механических напряжений конструкций различных классов.

Разработка систем противодействия терроризму с использованием терагерцового излучения является актуальной задачей. Особенности ТГц-излучения: высокая проникающая способность по сравнению с излучением

видимого и ближнего ИК-диапазонов; отсутствие ионизирующего воздействия, в отличие от рентгеновских лучей; делает данное излучение перспективным для дистанционного негласного исследования объема объектов, включая системы безопасности (обнаружение скрытого, замаскированного, оружия, взрывчатки и др.). Проблемой регистрации ТГц-излучения остаётся 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 спектрорадиометрических приложениях, например в квазиоптических спектрометрах, по-прежнему представляют интерес одиночные широкополосные неохлаждаемые детекторы.

Быстрое техническое развитие приводит к усложнению технологического оборудования и стимулирует развитие современных систем измерений и контроля, отвечающих условиям и особенностям промышленной эксплуатации. Измерение механических напряжений является основным 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. Датчики на основе пьезооптического эффекта обладают значительно более высокой чувствительностью, чем другие. Их высокая чувствительность позволяет реализовать новые, ранее недоступные, методы контроля напряженных состояний и снизить риски техногенных катастроф.

Таким образом, избранная диссертантом тема исследований является актуальной.

## **2. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы обеспечена теоретическими расчётами, совпадением результатов, полученных теоретически и с помощью методов численного моделирования, с результатами экспериментов при натурных испытаниях экспериментальных и опытных образцов.

Научные положения, выводы и предложения по использованию результатов работы являются обоснованными.

## **3. Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Научная новизна исследований и полученных выводов заключается в том, что 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;
- 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;
- 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;
- показано, что при суммарной толщине ТГц-ИК-конвертера 45–60 мкм со сквозными разрезами, основная часть поглощённой энергии ТГц-излучения (до 80%) переизлучается в тепло, установлена линейность зависимости быстродействия и чувствительности приемника от толщины ТГц-ИК-конвертера;
- 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.
- предложено использование крестообразной формы фотоупругого элемента в пьезооптических преобразователях.
- впервые создано семейство оптико-электронных систем нового типа для регистрации ТГц-излучения, механических напряжений, обладающие лучшими параметрами и эксплуатационными характеристиками по сравнению с существующими аналогами.

Все полученные результаты и выводы, рекомендации к применению, являются научно обоснованными, подкреплены теоретическими оценками, результатами численного моделирования и экспериментальными данными, результатами испытаний, выполненными на сертифицированном оборудовании.

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

Уровень новизны оценивается, как «результаты являются новыми».

#### **4. Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Практическая значимость результатов работы заключается в следующем.

Разработанные детекторы на основе ТГц-ИК-конвертеров и высокочувствительных ИК-камер открывают новые возможности для решения

научных задач исследования свойств материалов, а также прикладных задач 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.

Созданные одиночные пироэлектрические детекторы на основе тонких плёнок тетрааминодифенила с широким диапазоном спектральной чувствительности являются полностью отечественной разработкой на отечественной элементной базе и являются достойной альтернативой зарубежным аналогам и не имеют аналогов в России.

Разработанные пьезооптические датчики механических напряжений обеспечивают дистанционный контроль 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.

Диссертация прошла достаточную апробацию на российских и международных научных конференциях. По материалам диссертации опубликовано 72 печатные работы, в том числе 16 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, получено 19 патентов на изобретения и полезные модели, 3 из них – зарубежные.

## **5. Оценка содержания диссертации, ее завершенность, качество оформления, научная работа соискателя в целом**

Диссертация достаточно объёмна: изложена на 450 страницах и состоит из введения, восьми разделов, заключения, списка использованных источников, приложения, содержит большое количество поясняющих иллюстраций и таблиц с характеристиками созданных образцов оптико-электронных систем и приборов.

Во введении обоснован выбор направлений научных исследований, показана актуальность разработки новых оптико-электронных методов и устройств регистрации дальнего ИК-излучения (включая его ТГц-составляющую) с пространственным разрешением, новых конструкций и методов создания пьезооптических преобразователей для высокочувствительных датчиков механических напряжений.

В первой главе рассмотрены общие вопросы взаимодействия световой волны с веществом и оптико-электронные методы измерения некоторых физических величин. Проанализированы способы регистрации изображения ИК- и ТГц-излучения. Описаны современные средства исследования механических напряжений. Отмечены их положительные стороны и недостатки. Сформулирована цель работы и поставлены задачи, решение которых должно обеспечить ее достижение.

Во второй главе представлены устройство и методика изготовления конвертера ТГц-излучения в ИК-излучение для детектирования изображения ТГц- и субТГц-излучения. В данной главе изложена методика изготовления эмиссионного слоя толщиной 20–40 мкм и коэффициентом черноты не хуже 0,9, а так же представлены варианты построения ТГц-детекторов на основе различных конструкций ТГц-ИК-конвертера.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования теплофизических процессов в структуре ТГц-ИК-конвертера. Проведенное моделирование позволило оценить ряд параметров ТГц-детектора. Полученное значение минимальной обнаруживаемой плотности мощности  $2,5 \times 10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> лучше, чем для современных тепловых детекторов ИК-диапазона. Эффективность конверсии ТГц-излучения в тепловое излучения оказалась достаточно высокой, вплоть до 80 %.

В четвёртой главе изложен новый метод изготовления сквозных разрезов в структуре ТГц-ИК-конвертера с помощью лазерного излучения для уменьшения эффекта расплывания теплового изображения (блюминга) в тепловом изображении конвертера и повышения чувствительности ТГц-детектора.

В пятой главе приводится устройства ТГц-детектора на основе ТГц-ИК-конвертера с использованием охлаждаемых матричных фотоприёмных устройств на основе твёрдых растворов кадмий–ртуть–теллур, а также с использованием неохлаждаемых фотоприёмных устройств на основе микроболометрических матричных структур.

В шестой главе приводятся результаты исследований пироэлектрических детекторов на основе слоёв тетрааминодиенила, толщиной 0,6–1,0 мкм. Измерения показали, что такой датчик обладает спектральным диапазоном чувствительности от 0,4 до 2500 мкм, при этом вольт-ваттная чувствительность превосходит известные аналоги во всем спектральном диапазоне.

Седьмая глава посвящена разработке и исследованию пьезооптических преобразователей новой конструкции для высокочувствительных датчиков деформации. Проведен детальный анализ датчиков деформаций на различных физических принципах, показано, что пьезооптические датчики имеют чувствительность на два–три порядка выше, чем датчики других типов. На основе предложенных технических решений создано и выпускается семейство промышленных датчиков деформации: серии УПС-10 и УПС-12 с фотоупругим элементом в виде усечённого конуса и нагрузочными элементами в виде пластины; серии УПС-15, УКЗК-15, УПС-17 с унифицированным пьезооптическим преобразователем с крестообразным фотоупругим элементом и нагрузочными элементами различных конструкций, которые подробно описаны в диссертации. Датчики серии УПС-17 обладают более высокой чувствительностью и стабильностью параметров по сравнению с предыдущими модификациями.

В восьмой главе приводятся результаты испытаний на сертифицированном оборудовании и перспективы практических применений разработанных специализированных оптико-электронных устройств регистрации

электромагнитного излучения с длиной волн  $\lambda \geq 300$  мкм, а также пьезооптических датчиков деформации.

В заключении приведены основные выводы и результаты работы.

В Приложении приводятся протоколы испытаний созданных образцов оптико-электронных измерительных устройств, акты практического использования полученных автором диссертации научных результатов, полученные патенты.

Диссертационная работа Паулиша Андрея Георгиевича «Специализированные оптико-электронные системы приема, обработки и отображения информации» написана на актуальную тему, является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, содержащей решения существенных научно-технических задач народнохозяйственного и оборонного назначения. Диссертация написана хорошим доходчивым языком. Литературный обзор и список цитируемой литературы является вполне достаточным. Автореферат соответствует диссертации и отражает её основное содержание.

Следует отметить нацеленность автора на доведение результатов научных исследований до создания макетных, экспериментальных и опытных образцов, определения их характеристик, формирование предложений по практическому использованию полученных результатов.

К замечаниям по диссертационной работе можно отнести следующее:

1. В разделе .2.3. было бы полезно обсудить реакцию поглощающей пленки не только на скорость изменения сигнала от концентрации чистого SO<sub>2</sub>, но и на изменении концентрации SO<sub>2</sub> в смеси газов (например, воздухе).
2. В автореферате отсутствуют какие-либо графики, хотя в диссертационной работе присутствуют результаты, выраженные в графических зависимостях, например, результаты теплофизических расчетов, спектральные зависимости чувствительности пироэлектрических детекторов на основе тетрааминодифенила.

Отмеченные в отзыве замечания носят уточняющий, рекомендательный, характер и не снижают общего уровня и ценности выполненной работы.

## **6. Заключение о соответствии диссертации 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 оптических и оптико-электронных приборов и систем для медицины;
- создания оптического и оптико-электронного оборудования для научных исследований в различных областях науки и техники».

## **6. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

Таким образом, диссертационная работа Паулиша Андрея Георгиевича «Специализированные оптико-электронные системы приема, обработки и отображения информации» представленная на соискание ученой степени доктора технических наук является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены научно-обоснованные технические, экономические, технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, что соответствует требованиям пп. 9–14 «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённом Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Официальный оппонент  
доктор физ.-мат. наук, профессор

Ю. Н. Пономарев

*Отзыв по почте  
19.11.2020* *Степанов М.И.*

*С отзывом  
ознакомлен  
Тихомиров 19.11.2020*

Подпись Ю. Н. Пономарева заверяю

Дата *12.11.*

*О.В. Тихомирова*

Пономарев Юрий Николаевич работает в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук в должности главного

заведующего отделением