

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»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2020

Работа выполнена в Новосибирском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники» и

в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научные консультанты:	д-р техн. наук, профессор Шлишевский Виктор Брунович д-р физ.-мат. наук, профессор. Дмитриев Александр Капитонович
Официальные оппоненты:	Войцеховский Александр Васильевич , д-р физ.-мат. наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Кафедра квантовой электроники и фотоники радиофизического факультета, заведующий кафедрой. Пономарев Юрий Николаевич , д-р физ.-мат. наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, Отделение спектроскопии атмосферы, главный научный сотрудник, руководитель отделения. Двойнишников Сергей Владимирович , д-р техн. наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория основ безопасности и эффективного использования реакторных установок, заведующий лабораторией.
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Конструкторско-технологический институт научного приборостроения» Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится « 08 » декабря 2020 г. в 10 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д 212.173.08 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр-кт К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Дата рассылки автореферата диссертации « ___ » сентября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент



Максим Андреевич Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 инфракрасной (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 пирозлектрических 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, пьезооптические 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 ви-

димым 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 пироэлектрических 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. Однако все они имеют ряд неустраняемых недостатков, а именно: неустойчивость и деградация параметров со временем, гистерезис, нелинейность, ма-

льный 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 темы исследования

1. Для создания систем ТГц-диапазона ($\lambda \gtrsim 300$ мкм) в настоящее время, как правило, используются глубоководные ($T < 4$ 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 Ругосам фирмы Spigicon), 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 матричных чувствительных элементов и габаритных размеров матриц. Размеры со-

временных, представленных на рынке, матриц 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 распределенных 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 напряжения (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 теп-

лового 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 теплообменом 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 метапоглощителей, 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 использова-

ния 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 пироэлектрических 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» (2012–14 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: ISMTII-2009 (С.-Петербург), IRMMW-THz-2010 (Рим, Италия), IMEKO TC2-2011 (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 пироэлектрические 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснован выбор направлений научных исследований, показана актуальность разработки новых оптико-электронных методов и устройств регистрации дальнего ИК-излучения с пространственным разрешением, новых конструкций и методов создания пьезооптических преобразователей для высокочувствительных датчиков механических напряжений. Сформулирована цель работы и поставлены задачи, решение которых должно обеспечить ее достижение.

В первой главе рассмотрены общие вопросы взаимодействия световой волны с веществом и оптико-электронные методы измерения различных физических величин. Представлены устройства и методы регистрации ИК-излучения на основе микромеханических преобразователей. Проанализированы способы регистрации изображения ТГц- и субТГц-излучения. Описаны современные средства исследования механических напряжений на основе тензорезистивного, пьезоэлектрического и пьезооптического эффектов. Отмечены их положительные стороны и недостатки.

Во второй главе представлен устройство и методика изготовления конвертера ТГц-излучения в ИК-излучение (ТГц-ИК-конвертера) для детектирования изображения ТГц- и субТГц-излучения. ТГц-ИК-конвертера представляет собой многослойную структуру, толщиной много меньше рабочей длины волны ТГц-излучения, состоящую из ультратонкого резонансного поглотителя с коэффициентом поглощения, близким к 100 % на рабочей частоте и эмиссионного слоя толщиной < 40 мкм с коэффициентом черноты в ИК-диапазоне, близким к единице.

ТГц-ИК-конвертер работает следующим образом. Поглощение ТГц-излучения приводит к нагреву структуры конвертера, величина которого определяется мощностью излучения и теплоемкостью конвертера. В результате, согласно закону Стефана–Больцмана, увеличивается поток теплового излучения со стороны эмиссионного слоя, которое регистрируется ИК-камерой. Пространственное распределение интенсивности падающего на конвертер ТГц-излучения отображается в распределении интенсивности его теплового поля.

В данной работе для изготовления эмиссионного слоя с минимально возможной толщиной (для минимизации теплоемкости) и высоким коэффициентом эмиссии использовались смеси из графита и полимерных компонентов с размерами зерен 3–5 мкм. Смесь наносилась на обратную сторону поглотителя и затем отжигалась при температуре 100–120 °С для закрепления на поглотителе. Итоговая толщина эмиссионного слоя составила 20–40 мкм, а теплопроводность значительно более низкой по сравнению с теплопроводностью структуры поглотителя. Измеренный коэффициент черноты был не хуже 0,9. В данной главе изложены 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/см² лучше, чем для современных тепловых детекторов ИК-диапазона, таких как Infrared Vision Technology и L-3 Communications (США), ULIS (Франция), NEC (Япония), SCD (Израиль) с NEP = $(1-6) \times 10^{-9}$ Вт/Гц^{1/2}/пикс. или $(6-36) \times 10^{-5}$ Вт/см² при размере пикселя 40×40 мкм. Время отклика оказалось достаточно большим – около 0,3 секунд при толщине диэлектрика 3 мкм и толщине металла 0,5 мкм. Однако установленная с помощью моделирования линейная зависимость времени срабатывания от толщины конвертера указывает путь для повышения быстродействия детектора – дальнейшее уменьшение толщины диэлектрика. Тем не менее, низкая кадровая частота позволяет накапливать сигнал за время кадра и еще в 2–3 раза увеличить соотношение сигнал/шум. Эффективность конверсии оказалась достаточно высокой – потери в конвертере за счет теплопроводности вдоль его структуры и

теплообмена с окружающим воздухом не превышают 20 %. Зависимость максимального изменения температуры конвертера (ΔT_{\max} , К) от амплитуды плотности мощности поглощенного ТГц-излучения (p , Вт/м²) является линейной функцией в диапазоне 3-х порядков величины p , что обеспечивает линейность преобразования в данном динамическом диапазоне.

В четвёртой главе изложен новый метод изготовления сквозных разрезов в структуре ТГц-ИК-конвертера для уменьшения эффекта расплывания теплового изображения (блюминга) в тепловом изображении конвертера. Для этого специально разработанным методом лазерной резки были выполнены сквозные разрезы шириной менее 20 мкм, не нарушающие целостности структуры, и образующие пиксели размером $\sim \lambda \times \lambda$. Рассчитанная величина межпиксельной связи составила менее 2 мкВт/К, что соответствует современным тепловым приемникам ИК-излучения. При $\lambda \sim 100$ мкм (~ 3 ТГц) и размере рабочей области конвертера 50×50 мм (которая ограничивается только возможностями фотолитографического оборудования) без каких-либо затруднений может быть сформирована матрица размерностью 500×500 пикселей.

В пятой главе приводится устройство ТГц-детектора на основе ТГц-ИК-конвертера. На рисунке 1 слева показана схема ТГц-детектора на основе ТГц-ИК-конвертера и охлаждаемого ИК-ФПУ Sofradir Epsilon MW на CaHgTe-матрице размерностью 384×288 и размером пикселя 15×15 мкм, с диагональю 7,2 мм и диапазоном спектральной чувствительности 3,6–4,9 мкм.

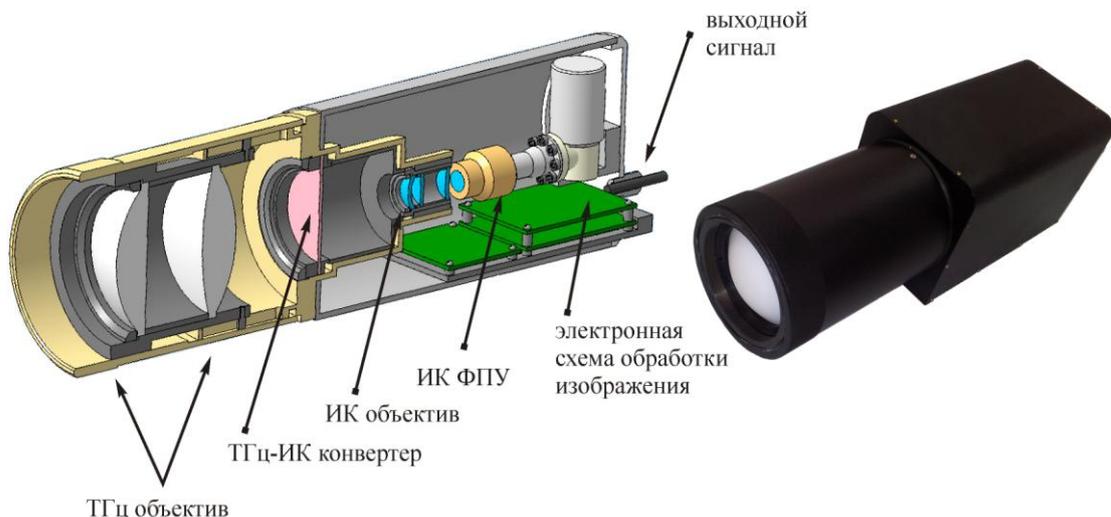


Рисунок 1 — Схема (слева) и внешний вид (справа) ТГц-детектора

Температурное разрешение ФПУ ≤ 40 мК. ФПУ оснащено криостатом Sofradir и холодильной машиной Ricor. 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. Они, естественно, обладают меньшей чувствительностью, зато значительно дешевле и могут использоваться при достаточно больших мощностях подсветки.

Линзы ТГц-объектива с рабочей апертурой 100 мм изготовлены из фторопласта – материала, прозрачного в ТГц-области и обладающего наименьшим показателем преломления, что снижает потери на отражение. Количество линз в ТГц-объективе сведено к двум за счет асферических форм их поверхностей. ТГц-ИК-конвертер диаметром 50–70 мм в оправе располагается в плоскости изображения ТГц-объектива. Для передачи теплового изображения эмиссионного слоя конвертера на поверхность ИК-матрицы в ИК-ФПУ служит специально рассчитанный и изготовленный входной трехлинзовый Si–Ge-объектив. Оптические системы обеспечивают качество изображения, близкое к дифракционному, по всему полю зрения. Внешний вид экспериментального образца ТГц-детектора показан на рисунке 1 справа.

В шестой главе приводятся результаты исследований пироэлектрических детекторов на основе слоёв тетрааминодиенила (ТАДФ), толщиной 0,6–1,0 мкм. В качестве материала входного окна использовались сапфир и полиэтилентерефталат, прозрачные в ТГц- и субТГц-диапазонах. Датчик с первичным усилителем, расположенным на чипе сенсора, вставляется в корпус вторичного усилителя, который подсоединяется к многоканальному блоку питания и формирователя выходного сигнала. К одному блоку могут одновременно подсоединяться до 5 датчиков. Такое исполнение удобно и эффективно как с точки зрения эксплуатационных параметров (малый диаметр выносного датчика, компоновка нескольких датчиков в одном узле для получения текущей картины измеряемых параметров, возможность оперативной замены измерительного элемента), так и в части технических характеристик (малый шум усилителя и питающего напряжения, осуществление питания и от сетевого источника, и от аккумуляторной батареи). Измерения пока-

зали, 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. Использование компактных вторичных усилителей и многоканального блока питания позволяет строить относительно недорогие системы для спектрометрических измерений в научных и технологических исследованиях. Результаты исследований характеристик экспериментальных образцов пироэлектрических детекторов описаны в диссертации и опубликованы в рецензируемых журналах.

Седьмая глава посвящена разработке и исследованию пьезооптических преобразователей новой конструкции для высокочувствительных датчиков деформации. Несмотря на то, что пьезооптические преобразователи хорошо известны, датчики на их основе не нашли практического применения в промышленности. Одна из причин – появление на рынке относительно дешевых и простых в эксплуатации тензорезисторных датчиков, а также пьезооптических и волоконно-оптических датчиков деформации. Коэффициент тензочувствительности S_A для тензорезисторных датчиков в случае упругой деформации определяется как

$$S_A = (dR/R) / (dL/L) = (dp/\rho) / (dL/L) + 1 + 2\nu - \nu^2(dL/L),$$

где dR/R – относительное изменение сопротивления, dL/L – относительное удлинение, dp/ρ – относительное изменение удельного сопротивления, ν – коэффициент Пуассона, обычно равный 0,3. Величина S_A зависит только от используемого материала и варьируется в пределах 2–6. Коэффициент тензочувствительности для волоконно-оптических датчиков определяется только свойствами материала и составляет около 0,78, что заметно меньше, чем для тензорезисторных датчиков. Коэффициент тензочувствительности пьезоэлектрических датчиков зависит от величины заряда Δq , наведенного на поверхности пьезоматериала под нагрузкой, и может быть определен как

$$S_A = (\Delta q) / (dL/L) = d_{ij} E,$$

где d_{ij} – пьезоэлектрический модуль, E – модуль Юнга пьезоэлектрического материала. Величина S_A также зависит только от используемого материала и варьируется в пределах 0,1–36.

Однако перечисленные типы датчиков обладают рядом неустранимых недостатков и не отвечают комплексу современных повышенных требований: гистерезис, неустойчивость показаний во времени, низкая чувствительность к деформации и, наоборот, высокая чувствительность к перегрузкам.

Коэффициент тензочувствительности для пьезооптических датчиков может быть определен по аналогии с другими датчиками как

$$S_A = \Delta / (dL/L) = 2\pi d K \Delta\sigma / \lambda(dL/L) = 2\pi d K E / \lambda,$$

где Δ – изменение фазы электромагнитной волны при прохождении напряженного материала, обусловленное двулучепреломлением, d – длина пути, пройденного светом в напряженном материале, K – пьезооптический коэффициент, $\Delta\sigma$ – величина напряжений в фотоупругом материале, λ – длина волны света, E – модуль Юнга фотоупругого материала. Видно, что S_A для пьезооптического датчика зависит *не только* от материала (K , E), но и от толщины фотоупругого элемента (d), используемой длины волны излучения (λ), а величина $\Delta\sigma$ зависит от конструкции чувствительного элемента преобразователя – фотоупругого элемента и может быть увеличена оптимизацией его формы.

В качестве материала фотоупругого элемента (ФЭ) обычно рассматриваются кристаллы, например фосфид галлия, обладающие высокими пьезооптическими коэффициентами и модулем упругости, что определяет высокую чувствительность преобразователя. Однако кристаллы имеют низкий порог разрушения (раскалывания), дороги и сложны в обработке. Твердые полимеры, например поликарбонат, используемые в качестве материала для фотоупругого элемента, несмотря на высокий пьезооптический коэффициент, дешевизну и простоту обработки, имеют низкий порог пластической деформации и «плывут» под действием нагрузки. Поэтому полимерам присущи все те же недостатки, что и тензорезисторным датчикам: гистерезис, деградация параметров со временем и под нагрузкой, низкий динамическим диапазоном и др.

Таким образом, разработка пьезооптических преобразователей, пригодных для промышленного применения, с параметрами, превосходящими существующие датчики механических напряжений, и лишенных присущих им недостатков, является актуальной задачей. Для ее решения сделано следующее:

– с помощью численного моделирования изучен процесс формирования выходного сигнала преобразователя и влияние на него особенностей конструктивного исполнения преобразователя;

– показано, что использование крестообразной формы ФЭ позволяет вдвое увеличить напряжения в рабочей области ФЭ при той же силе, в сравнении с квадратным или круглым ФЭ; при этом сохраняется технологичность изготовления ФЭ и его прочность;

– в качестве материала ФЭ использован дешевый плавленный кварц со стабильными оптическими и механическими характеристиками и хорошо развитыми технологиями изготовления и обработки. Обладая высоким порогом разрушения на сжатие и лишенный (при температурах до 1000 °С) пластических деформаций, он обеспечивает широкий динамический диапазон измерения механических напряжений без гистерезиса и деградации параметров датчиков со временем и под нагрузкой;

– все элементы крепления оптических компонентов преобразователя размещены внутри внешнего габарита ФЭ (благодаря его крестообразной форме), что позволило заключить преобразователь в собственный унифицированный корпус. Крепление преобразователя к контролируемому объекту осуществлено нагрузочным элементом, конструкция которого определяется способом монтажа (внутри отверстия или на поверхности). В результате, один унифицированный преобразователь может быть использован с разными нагрузочными элементами;

– ФЭ в собранном виде помещен под предварительную сжимающую нагрузку по двум ортогональным направлениям, вследствие чего: 1) осуществляется надежное бесклеевое силовое замыкание ФЭ в нагрузочном элементе; 2) появляется возможность работы преобразователя как на сжатие, так и на растяжение; 3) практически исключается температурная зависимость выходного сигнала устройства, поскольку одинаковое изменение нагрузки вследствие температурного расширения (сжатия) по двум ортогональным осям не приводит к изменению формы поля напряжений в рабочей области ФЭ, а, следовательно, и изменению выходного сигнала;

– электронная схема обработки сигнала расположена внутри экранированного корпуса преобразователя и имеет любой требуемый интерфейс, включая цифро-

вой. В результате пьезооптический преобразователь является законченным автономным прибором и не требует вторичных преобразователей, как в случае с датчиками других типов.

На рисунке 2 показаны: оптическая схема и внешний вид разработанного пьезооптического преобразователя; здесь 1 – источник света (обычно светодиод), 2 – поляризатор, 3 – четвертьволновая пластина, 4 – ФЭ, к которому прикладывается внешняя сила F , 5 – анализаторы, ориентированные под углом 90° друг к другу, 6 – фотоприемники, 7 – точки приложения измеряемой силы, 8 – рабочая область ФЭ (проходя через которую свет попадает на светочувствительные площадки фотодетекторов), 9 – место размещения узлов крепления оптических элементов преобразователя, 10 – преобразователь в корпусе, 11 – нагрузочный элемент в виде цанги, 12 – контролируемый объект, 13 – крепежная гайка.

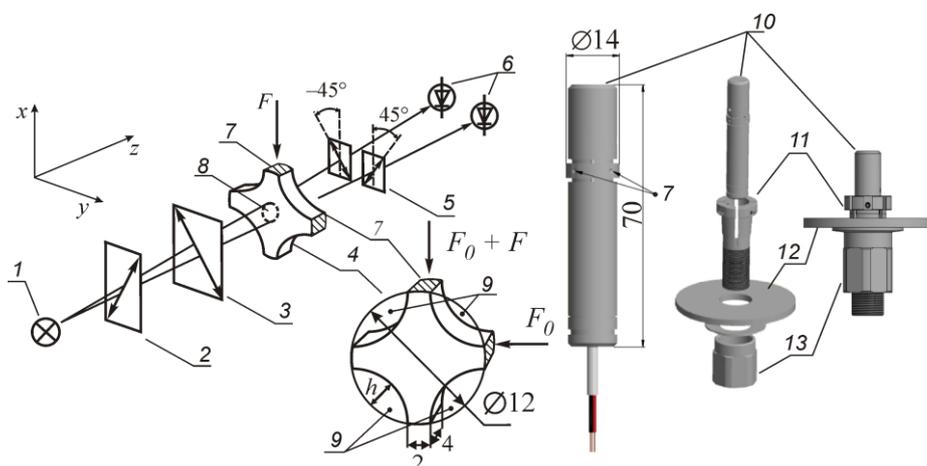


Рисунок 2 — Слева: схема пьезооптического преобразователя и форма ФЭ с размерами в мм, справа: внешний вид преобразователя в корпусе и метод его монтажа на контролируемом объекте

Под действием нагрузки F в рабочей области ФЭ возникают дополнительные ортогональные напряжения σ_x и σ_y и, как следствие, обусловленная двулучепреломлением дополнительная разность фаз Δ между взаимно перпендикулярными компонентами поляризации пучков, прошедших сквозь ФЭ. Изменение фазы поляризации влечет за собой изменение интенсивности световых потоков на фотоприемниках и, соответственно, вырабатываемых ими фототоков I_1 и I_2 . Регистрация полезного сигнала осуществляется по дифференциальной схеме, когда $(I_1 - I_2)/(I_1 + I_2) \sim \Delta \sim (dL/L)$. Итоговая чувствительность датчика к деформации ФЭ определяется соотношением сигнал/шум на выходе электронного тракта.

Прохождение излучения через элементы преобразователя моделировалось с помощью пакета Wolfram Mathematica™. Для описания поляризации и интенсивности световых волн использованы параметры Стокса и формализм Мюллера. При моделировании учитывались: диаграмма излучения светодиода и размеры светочувствительных площадок фотодиодов, используемых в преобразователе, преломление света в ФЭ, расстояния между элементами преобразователя. Построенная математическая модель позволила рассчитать величины напряжений в ФЭ и его деформации, величины выходных токов фотодетекторов и выходной сигнал преобразователя. Расчетный коэффициент тензочувствительности для разработанного пьезооптического датчика оказался равным 7389. Прямое измерение фототоков I_1 и I_2 с фотодетекторов преобразователя дало экспериментальную величину $S_A = 7340 \pm 70$, что хорошо согласуется с результатами моделирования и подтверждает правильность построенных моделей. Результаты измерений и расчетов суммированы в таблице 1.

Таблица 1 — Параметры пьезооптического преобразователя

Параметр	Величина
Коэффициент тензочувствительности расчетный	9330
Коэффициент тензочувствительности из модели	7389
Коэффициент тензочувствительности экспериментальный	7340 ± 70
Минимальная детектируемая абсолютная деформация, м	$3,5 \times 10^{-12}$
Минимальная детектируемая относительная деформация, $\Delta L/L$	$2,7 \times 10^{-10}$
Минимальная детектируемая сила, Н	$2,9 \times 10^{-4}$
Чувствительность к деформации, мкА/нм	36,6
Чувствительность к силе, мкА/Н	441
Динамический диапазон, не менее	6×10^4
Пороговая деформация разрушения (расчет), м	2×10^{-6}
Пороговая сила разрушения (расчет), Н	80

Полученные характеристики существенно превосходят аналогичные известных промышленных датчиков деформации. 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 фотоуп-

ругим 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 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 экспериментальных исследованиях параметров ТГц-детекторов в качестве источника излучения использовались лампы обратной волны (ЛОВ) с перестраиваемой частотой излучения или лавинно-пролетные диоды с фиксированной частотой. Калибровка чувствительности проводилась с помощью измерителя мощности производства Thomas Keating Instruments, Ltd. (Великобритания). Мощность ТГц-излучения, падающая на пиксель конвертера, определялась по измеренной мощности всего ТГц-пучка и его пространственного распределения, полученного с помощью ТГц-детектора.

Размерность ИК-матрицы (384×288) явно избыточна для получения качественного ТГц-изображения с длиной волны ~ 1 мм на конвертере диаметром ≈ 50 -70 мм. Это дало возможность повысить соотношение сигнал/шум в 10–15 раз за счет усреднения сигналов пикселей ИК-камеры, приходящихся на один пиксель ТГц-ИК-конвертера ($\lambda \times \lambda$), ограниченного разрезами.

Полученные характеристики ТГц-детектора приведены в таблице 2. Результаты исследования созданных экспериментальных образцов ТГц-детекторов описаны в диссертации и опубликованы в рецензируемых журналах.

Одним из применений разработанного ТГц-детектора является создание переносных/носимых систем локального (1–3 м) или (в зависимости от мощности излучателя) дистанционного (3–10 м) контроля скрытых (замаскированных) объектов, в том числе под одеждой.

Для экспериментальной проверки таких возможностей разработан и построен действующий макет носимого дистанционного обнаружителя скрытых под одеждой объектов, состоящий из субТГц-детектора и монохроматического источника излучения с рабочей длиной волны 2 мм на основе лавинно-пролетного диода

(минимально возможная длина волны для малогабаритных неохлаждаемых полупроводниковых источников с мощностью > 10 мВт). Перспективность подобных систем показывают примеры изображений на рисунке 3, полученных с помощью макета: слева – блик от сотового телефона во внутреннем кармане куртки; справа вверху – изображение «флэшки», стоящей вертикально на пачке с жевательной резинкой в стандартной пластиковой упаковке; справа внизу – изображение компакт-диска под одеждой.

Таблица 2 — Параметры ТГц-детектора

Параметр	Значение
Размерность ИК-матрицы	384×288
Спектральный диапазон чувствительности ИК-матрицы	3,6–4,9 мкм
Диапазон рабочей частоты ТГц-детектора $\lambda_{рез}$	0,1–1,0 ТГц
Спектральная селективность $\Delta\lambda_{рез} / \lambda_{рез}$	$< 0,05$
Поляризационная селективность, дБ	> 20
Мощность ТГц-излучения, эквивалентная шуму, Вт/Гц ^{1/2}	$\approx 10^{-9}$
Кадровая частота, Гц	≤ 3
Габаритные размеры: длина × диаметр, мм	375 × 110
Масса, кг	2,9
Питание, В	+12
Выходной сигнал	Аналоговый + USB

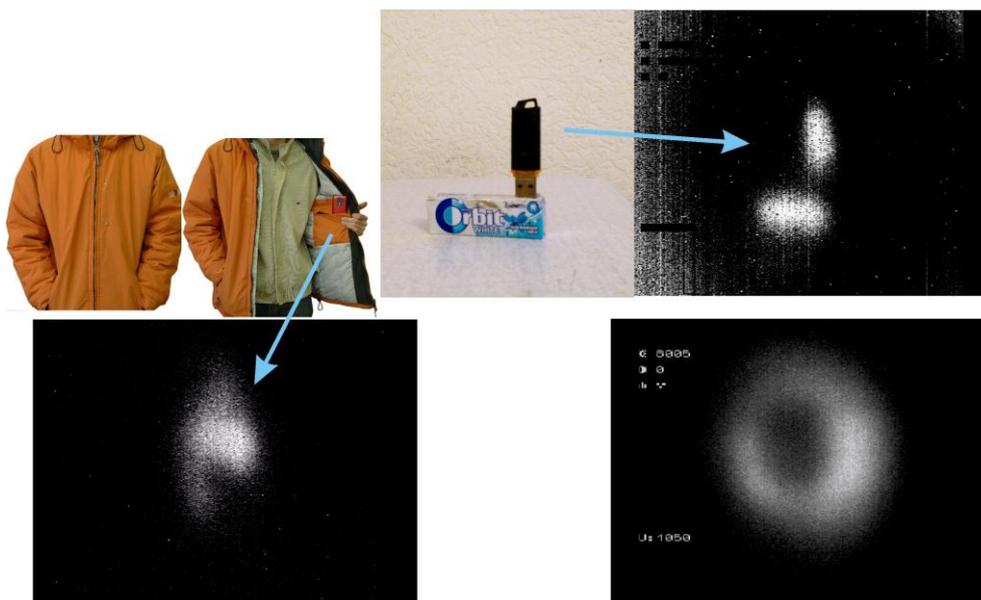


Рисунок 3 — Примеры изображений, полученных с помощью ТГц-детектора на основе ТГц–ИК-конвертера и источника излучения с длиной волны 2 мм

Также ТГц-детектор может использоваться для контроля профиля пучков ТГц-излучения в спектрометрах, гиротронах, рупорно-линзовых антеннах, в системах контроля качества продукции в фармацевтической, пищевой и строительной промышленности, в задачах обнаружения скрытых дефектов в различных конструкциях.

На основании проведенных исследований предложен и проработан конкретный прототип носимого/стационарного дистанционного обнаружителя скрытых (замаскированных) объектов, совмещающий в одном корпусе (120×120×250 мм, массой менее 2 кг) три источника излучения, ТГц-детектор, ИК-лазерные светодиодные целеуказатели и ТВ-камеру для видеофиксации объекта контроля.

Также предложен и проработан прототип дистанционного (10–50 м) металлообнаружителя на основе приемопередающего СВЧ-модуля с линейно-частотной модуляцией и ТВ-камеры с ИК-подсветкой, позволяющий скрытно обнаруживать спрятанное оружие и металлические компоненты взрывных устройств. Испытания макета показали надежное обнаружение металлических предметов, спрятанных под одеждой, на расстоянии более 10 м.

Измерения спектральных характеристик экспериментальных образцов ТГц-пиродетекторов проводились на квазиоптическом ЛОВ-спектрометре в диапазоне 110–970 ГГц. Измеренные спектры отклика изготовленных образцов нормировались на сигнал калиброванного оптоакустического преобразователя (ячейки Голя) производства Microtech Instruments, Inc. (США). Результаты измерений показали, что чувствительность разработанного ТГц-пиродатчика в 2–10 раз превышает чувствительность использованной ячейки Голя практически во всем измеренном диапазоне частот от 0,1 до 4,1 ТГц. На сегодня многоканальные пиродетекторы ТГц- и субТГц-излучения типа УМК-5 используются в ИЯФ СО РАН для исследования излучения высокотемпературной плазмы и на других научно-производственных предприятиях.

Первые испытания пьезооптических датчиков деформации проводились на гидравлической испытательной системе INSTRON 8802 (США) в Институте горного дела СО РАН (г. Новосибирск). Главной целью было определение категории точности первичного преобразователя УПС-10, согласно ГОСТ 28836-90 «Датчики силоизмерительные тензорезисторные. Общие технические требования и методы

испытаний». По результатам испытаний датчик УПС-10 отнесен к категории точности 0,5, что соответствует точности выдержки нагрузки испытательной системой (0,5 %) в соответствии с сертификатом на нее.

Далее в «Ростест-Москва» (Москва) на образцовой силоизмерительной машине ОСМ-2 были проведены сравнительные испытания датчика УПС-15 и тензорезисторного датчика серии ZEMIC BF модель 120-3AA(11)N6-X. Испытания показали, что пьезооптический преобразователь при прочих равных условиях обладает точностью измерений в 10–30 раз выше, чем тензорезисторный. Погрешность преобразования (среднее квадратическое отклонение случайной составляющей по ГОСТ 28836–90), обеспечиваемая пьезооптическим датчиком, достигала 0,01 % (таблица 3). Соотношение сигнал/шум для пьезооптического преобразователя более чем в 50 раз выше, чем для тензорезисторного датчика.

Таблица 3 — Эксплуатационные характеристики пьезооптического преобразователя

Параметр	Величина	Единица измерений
База датчика деформации	14	мм
Диапазон относительных деформаций	10^{-8} – 10^{-4}	отн. ед.
Максимальная относительная деформация	10^{-3}	отн. ед.
Погрешность преобразования, не более	0,1	%
Температура хранения	от –55 до +75	°С
Рабочий диапазон температур	от –20 до +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

В калибровочной лаборатории Detroit Calibration Lab Trescal (г. Детройт, США) датчик УПС-15 испытывался на силоизмерительной дедвейт машине NIST 113 kN (National Institute of Standards and Technology). Проводилось сравнение с нагрузочным элементом Ultra Precision LowProfile™ Load Cell Interface Force™, обладающим наибольшей чувствительностью среди тензорезисторных датчиков и

используемым только для калибровки силоизмерительных машин ввиду его сложности и дороговизне.

Испытания проводились согласно международному стандарту OIML R 60 Edition 2000 (E) (Метрологическое регулирование для тензодатчиков). Результаты сравнения УПС-15 в нагрузочном элементе в виде стального параллелепипеда 50×50×100 мм (с номинальной нагрузкой 1000 кг) и калибровочного датчика Ultra Precision LowProfile™ Load Cell Interface Force™ (с номинальной нагрузкой 2000 фунтов или 907,185 кг) суммированы в таблице 4. Соотношение сигнал/шум для УПС-15 примерно на порядок выше, чем для Load Cell. Это меньше, чем предсказывают расчеты, и связано с тем, что Load Cell содержит вакуумно-герметичную камеру, где расположена сложная и дорогостоящая схема стабилизации выходного сигнала и уменьшения шумов. 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 Load Cell, стоимость которого превышает 5000 долларов США.

Таблица 4 — Сравнение параметров пьезооптического преобразователя с параметрами калибровочного датчика Load Cell

Параметр	Единица измерения	УПС-15	Ultra Precision Load Cell
Среднеквадратичное отклонение выходного сигнала (шум)	% от сигнала при нагрузке 100 г	0,6	5,3
Коэффициент преобразования	(выходной сигнал)/г	0,124 мкА/г	0,023 мкВ/г
Погрешность преобразования	% от сигнала при нагрузке 100lb (45,3кг)	0,044	0,017
Минимально регистрируемая абсолютная нагрузка	г	1	10
Минимально регистрируемая относительная нагрузка	% от номинальной нагрузки	0,0001	0,0011

В испытательной лаборатории ИФХЭ РАН им. А. Н. Фрумкина датчики УПС-17 в нагрузочном элементе с номинальной нагрузкой 500 кг испытывались на силоизмерительной машине Zwick модель Z-010 (Германия) с датчиком силы на 1 тонну. Испытания проводились по методике согласно ГОСТ 28836-90 «Дат-

чики силоизмерительные тензорезисторные. Общие технические требования и методы испытаний» в диапазоне температур от -40 до $+50$ °С. Согласно испытаниям, параметры датчика УПС-17 превышают параметры тензорезисторных датчиков с категорией 0,02 (наивысшая категория).

С августа 2010 г. один из разработанных датчиков успешно эксплуатируется на лифте грузоподъемностью 500 кг административного корпуса ОАО «Могилевлифтмаш» (г. Могилев), еще три с февраля 2011 г. эксплуатируются без замечаний на лифтах грузоподъемностью 400 кг в московских жилых домах. Метод испытан и внедрен на ОАО «Могилевлифтмаш», в ряде московских жилых домов и рекомендован к более широкому внедрению.

В *Приложениях* приводятся патенты, протоколы испытаний и акты о практическом использовании полученных автором диссертации научных результатов.

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 проведенных исследований, направленных на создание новых схемотехнических и технологических решений оптико-электронных систем с улучшенными характеристиками, 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 расплывания 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 полученное 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 – $\Delta\lambda/\lambda < 0,05$, поляризационное – более 20 дБ;
- на основе разработанного ТГц-детектора предложен прототип компактного (120×120×250 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 пп. 9-14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основные статьи в научных журналах, которые включены в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций, и включены в международные базы данных цитирования Web of Science или Scopus:

1. 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. 291-296. DOI: 10.1108/SR-03-2020-0047.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Паулиш А.Г., Гусаченко А.В., В.А. Голяшов, Гусаченко А.В., Морозов А.О., Дорожкин К.В., Суслыев 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.
7. Паулиш А. Г., Загубисало П. С., Баракوف В. Н., Павлов М. А. Экспериментальное исследование пьезооптического преобразователя для высокочувствительных датчиков деформации // *Автометрия*.— 2018.— Т. 54, № 2.— С. 78–84. DOI: 10.15372/AUT20180209.
8. 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 J*.— 2018.— Vol.— 18, Iss. 20. — P. 8318–8328. DOI: 10.1109/JSEN.2018.2865917.

9. 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.
10. 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.— V. 5.— P. 1441009. DOI: 10.1142/S1793962314410098.
11. 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.— V. 490, Iss. 1.— P.012174. DOI: 10.1088/1742-6596/490/1/012174.
12. Паулиш А. Г., Загубисало П. С., Кузнецов С.А., Аржанников А.В., Тумм М. К. А. Моделирование теплофизических процессов в визуализаторе субтерагерцового излучения, основанном на тонкоплёночном конвертере из метаматериала // Известия вузов. Радиофизика.— 2013, Т.LVI, №1.— С. 22-38.
13. 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 Electromagnetic Research.— 2012.— V. 122.— P. 93-103.
14. 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.
15. 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.— V. 99, Iss. 2.— P. 023501.

Основные патенты:

1. Способ контроля параметров движения подъемного устройства (изобретение): пат. 2618862 РФ / 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.
2. 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.
3. Тензометрический преобразователь (изобретение): пат. 2564691 РФ / Паулиш А.Г., Поярков А. В., Бараков В. Н. заявл. 04.02.2014; опубл. 10.10.2015, Бюл. № 28.— 18 с.: ил.
4. Устройство обработки сигнала пьезооптического преобразователя (изобретение) пат. 2565856 РФ / Паулиш А. Г., Поярков А. В., Павлов М. А., Бараков В. Н.; заявл. 08.07.2014; опубл. 20.20.2015, Бюл. №29.— 7 с.: ил.

5. Фотоупругий элемент (изобретение): пат. 2552128 РФ / Паулиш А. Г., Поярков А.В., Бараков В. Н., Маслов О. П. заявл. 29.11.2013; опубл. 10.06.2015.— 8 с.: ил.
6. Матричный преобразователь терагерцового излучения (варианты) (изобретение): пат. 2482527 РФ / 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.
7. Преобразователь терагерцового излучения (варианты) (изобретение): пат. 2447574 РФ / 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.
8. Тензометрический преобразователь (изобретение): пат. 2422786 РФ / Паулиш А.Г., Рафаилович А. С., Шатов В. А., Федоринин В. Н.; заявл. 23.04.2010; опубл. 27.06.2011, Бюл. №18.— 7 с.: ил.
9. Tensometric transducer: United States Patent, Patent No.US 8887577 B2 / Paulish A.G., Royarkov A. V., Rafailovich A. S., Shatov V. F., Fedorinin. Priority Data 01.07.2010; Pub. Date 18.11.2014.
10. Тензометрический преобразователь (изобретение): Евразийский патент 024662 В1 / Паулиш А. Г., Поярков А.В., Рафаилович А. С., Шатов В. А., Федоринин В. Н.; заявл. 01.07.2010; опубл. 31.10.2016.
11. Тензометричний перетворюювач: патент України 104375 / Паулиш А. Г., Поярков А.В. Рафаилович А. С., Шатов В. А., Федоринин В. Н.; заявл. 01.07.2010; опубл. 27.01.2014.

Основные публикации в других научных изданиях:

1. Паулиш А. Г., Дорожкин К.В., Суслев В.И., Гусаченко А.В., Морозов А.О., Пыргаева С.М. Исследование спектральных характеристик чувствительности пироэлектрического детектора на основе тетрааминодифенила в терагерцовом диапазоне // Сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции Актуальные проблемы радиофизики (АПР-2019), г. Томск. 1–4 октября 2019 (Издательский дом ТГУ, 2019.– 490 с.) С. 482–485.
2. Паулиш А. Г., Загубисало П. С. Коэффициенты тензочувствительности датчиков механических напряжений на разных физических принципах // Тезисы Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2019», Новосибирск, 27-31 мая 2019, стр. 173.
3. Загубисало П. С., Паулиш А. Г. Теоретическое и экспериментальное исследование пьезооптического преобразователя для высокочувствительных датчиков деформаций // Тезисы Российской конференции по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2017», 11-15 сентября 2017, г. Новосибирск, с. 84.

4. Zagubisalo P. S., Paulish A. G., Kuznetsov S. A. Simulation of Thermal Processes in Metamaterial MM-to-IR Converter for MM-wave Imager // International Conference on Mathematical Modeling in Physical Sciences, September 1-5, 2013, Prague, Czech Republic.
5. Паулиш А. Г., Федоринин В.Н., Кузнецов С.А., Аржанников А.В. Детекторы изображения миллиметрового диапазона на основе ММ-ИК конвертера // Контентант.— 2013.— Т. 12, № 1.— С.58 – 64.
6. 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.
7. Сидоров В. И., Паулиш А. Г., Почкай Д. В. Регистрация изменения нагрузки на твердое тело при помощи пьезооптического преобразователя // Глобальная ядерная безопасность.— 2012.— №2-3 (4).— С. 58–63.
8. Паулиш А. Г. Тепловые способы регистрации терагерцового излучения на основе новых материалов // VIII Международный научный конгресс «Гео-Сибирь-2012» 10-20 апр. 2012, Новосибирск, с. 179-183 (приглашенный доклад).

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57.

Формат 60 × 84/16. Объем 2,5 п.л., тираж 120 экз.

Заказ №752. Подписано в печать 13.08.2020 г.