

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

кандидата технических наук, доцента Фёдорова Евгения Михайловича  
на диссертационную работу Выборнова Павла Викторовича  
**«НЕОХЛАЖДАЕМЫЙ БОЛОМЕТР НА ОСНОВЕ  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  ДЛЯ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и  
комплексы

На рассмотрение были представлены один том диссертации и автореферат. Диссертация изложена на 132 страницах, включает введение, четыре главы, заключение, список литературы, состоящий из 105 источников, и два Приложения. Отзыв составлен на основании изучения материалов диссертации, автореферата и опубликованных автором статей.

Использование неохлаждаемых металлических болометров обосновано в тех областях науки и техники, где требуются детекторы, способные работать в условиях широкого диапазона температур окружающей среды и обладающие не только высокой лучевой стойкостью и стабильностью параметров, но и приемлемо высокой чувствительностью. В последние десятилетия улучшение чувствительности неохлаждаемых металлических ( $Ti$ ,  $Pt$ ,  $Nb$  и  $Ni$ ) болометров осуществлялось, в основном, за счет уменьшения размера и толщины резистивных элементов и оптимизации их конструктивного исполнения. Такой подход практически исчерпал себя в физическом и технологическом плане, но металлические болометры так и не стали конкурентоспособными по отношению к полупроводниковым болометрам в практическом применении. В свою очередь, полупроводниковые болометры имеют ограниченную сферу применения по эксплуатационным характеристикам.

Конечно, разработку нового технического решения увеличения чувствительности неохлаждаемых болометров на основе резистивных элементов из металлов и оценку возможности их использования в составе

оптических и оптико-электронных приборов и комплексов нельзя отнести к передовым научным исследованиям, они затрагивает узкую область интересов. Тем не менее, сложившаяся ситуация с разработкой металлических болометров, с одной стороны, и практической потребностью, с другой стороны, при наличии физических предпосылок необходимости пересмотр критерия выбора материала резистивных элементов и перспективности применения сплавов металлов, дают основание утверждать, что сформулированная в диссертационной работе Выборнова П.В. тема исследований является актуальной.

**Диссертационная работа Выборнова П.В. посвящена разработке нового технического решения увеличения чувствительности неохлаждаемых болометров на основе резистивных элементов из металлов и оценке возможности их использования в составе оптических и оптико-электронных приборов и комплексов. Предмет исследования – сравнительный анализ характеристик резистивных элементов на основе сплавов металлов и разработка неохлаждаемых болометров на их основе, постановка научно-технических задач, перечень методов исследования и ожидаемые результаты изложены в тексте диссертации внятно и в достаточном объеме. Следует отметить высокое качество полиграфического оформления материалов диссертации. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Диссертация и автореферат оформлены по правилам ВАК.**

**Структура работы** построена логически целесообразно.

**Во введении** представлены необходимые структурные элементы диссертационной работы: актуальность работы, цели и задачи исследований, научная новизна, практическая значимость и апробация результатов исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** изложены исторические этапы развития в разработке неохлаждаемых металлических болометров, описаны достижения в части улучшения ключевых характеристик, конструкций и областей применения. Делаются выводы о достижении предельных пороговых чувствительностей металлических болометров и их быстродействия. Поднимается вопрос о

технической необходимости в металлических болометрах с улучшенной чувствительностью и их коммерческой привлекательности для современного рынка. Обсуждаются трудности и указывается возможный путь дальнейшего улучшения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров, что, в совокупности, показывает актуальность проводимых в работе исследований.

**Во второй главе** представлено обоснование нового технического решения увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров путем использования в качестве материалов резистивных элементов некоторых высокоомных сплавов никелида титана. Скорректированы действующие условия сравнения чувствительности детекторов данного типа и критерий выбора материала их элементов. Предложена методика оценки соотношения пороговой чувствительности двух неохлаждаемых болометров из разных металлов и сплавов, описан алгоритм оценки эффективности подобных болометров. Проведены сравнительные исследования макетов болометров на основе никеля, титана и никелида титана, которые показали, что численное соотношение пороговых чувствительностей разработанных болометров, полученное с помощью разработанной методики, имеет хорошее согласование с результатами экспериментов.

**В третьей главе** приведены результаты модельных и экспериментальных исследований эффективности использования неохлаждаемых металлических болометров на базе сплава никелида титана в качестве детекторов оптического излучения в составе измерителей средней мощности излучения, оптического абсорбционного анализатора паров ртути в открытой атмосфере и пиранометра. Показано, что подобные детекторы имеют хорошую перспективу применения в обозначенных оптико-электронных приборах. В итоге результаты исследований показали, что неохлаждаемые металлические болометры: способны эффективно заменить термоэлектрические и фотодиодные приемники в измерителях энергетических параметров оптического излучения; в составе анализатора позволяют обнаружить фоновые концентрации паров ртути в открытой атмосфере; в составе пиранометров позволяют уменьшить предел обнаружения и

время измерения суммарной солнечной радиации.

**В четвертой главе** предложена концепция аппаратно-программного комплекса на базе микроконтроллера (МК), основная идея которой заключается в том, что с помощью системного программного обеспечения комплекса, в рамках введенных оператором режима работы МК и параметров сигналов управления осуществляется необходимая корректировка базового кода прикладного программного обеспечения МК, написанного на машинно-ориентированном языке – макроассемблере. Это позволяет оператору без вмешательства в программный код МК, написание которого требует достаточной квалификации и знаний, оперативно задавать/менять характеристики функционирования системы. Данная идея реализована на примере разработки системы автоматизации процесса измерения характеристик неохлаждаемых болометров. Подробно описана общая характеристика МК систем и разработка программного обеспечения комплекса, что указывает на высокий уровень квалификации автора в данной области знаний.

**Оценка достоверности и новизны работы.** Достоверность результатов работы обеспечивается хорошим согласованием теоретических оценок с результатами экспериментов, использованием апробированных исследовательских процедур и современного оборудования. Полученные результаты не противоречат известным научным данным. О достоверности представленных результатов также свидетельствует их внедрение в научно-исследовательскую практику, что позволило повысить эффективность определения лучевой стойкости и возможностей выполнения условий фазового синхронизма для различных процессов параметрического преобразования частоты в нелинейных кристаллах в пределах среднего ИК и ТГц диапазона спектра, а также провести оценку состава и состояния естественных биологических объектов после физических воздействий методом абсорбционной дифференциальной спектроскопии.

**В качестве новых,** диссертантом представлены **следующие научные результаты:**

1. новый критерий выбора материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров и условие сравнения их пороговых чувствительностей;
2. новая методика оценки соотношения пороговой чувствительности двух неохлаждаемых болометров из разных металлов;
3. новое техническое решение увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров путем использования сплава никелида титана в качестве материала резистивных элементов,

а также **защищенные патентами**:

4. способ измерения мощности лазерного излучения неохлаждаемым болометром на основе сплавов никелида титана и показана практическая возможность его реализации;
5. демонстрация возможности создания анализатора фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере с использованием в качестве УФ детектора потенциального болометра из сплава  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ ;
6. актинометрический приемник болометрического типа (созданный на его основе макет пиранометра, обладает лучшими техническими параметрами в сравнении с аналогичным прибором, рекомендованным службой Росгидромет)

И, наконец, **защищенные тремя свидетельствами об официальной регистрации программ для ЭВМ РФ**, разработанные и реализованные, в виде программного обеспечения, алгоритмы работы системы управления, осуществляющей автоматизацию процесса измерения характеристик неохлаждаемых болометров.

В соответствии с изложенным материалом, **на защиту выносятся следующие основные положения, обладающие, по моему мнению, научной новизной и практической значимостью:**

1. Методика оценки соотношения пороговой чувствительности двух неохлаждаемых болометров из разных металлов и их сплавов, основанная на сопоставлении температурного коэффициента сопротивления, удельной

теплоемкости, удельного электросопротивления и плотности материалов резистивных элементов при равенстве их размеров и коэффициентов поглощения, токов смещения и температуры окружающей среды, позволяющая провести выбор наиболее эффективного материала.

2. Использование  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  в качестве материала резистивного элемента неохлаждаемого болометра сопротивлением менее 10 Ом в сравнении с самыми эффективными металлами Zr и Ti позволяет увеличить чувствительность в 2,1 и 2,4 раза соответственно, при прочих равных условиях за счет наилучшей совокупности электрофизических характеристик сплава.
3. Макет пиранометра на основе неохлаждаемого  $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$  болометра, позволяющий уменьшить предел обнаружения и время измерения суммарной солнечной радиации в 5 раз, в сравнении с аналогичными характеристиками пиранометра СРМ-11, рекомендованного службой Росгидромет.

Все защищаемые положения соответствуют п. 2 в части п. 6 паспорта специальности 05.11.07 - оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

В целом, представленную к защите диссертацию можно квалифицировать, с одной стороны, как **квалифицированную работу** прикладного характера, соответствующую всем установленным нормам и правилам, а с другой стороны – как завершенное на данном этапе **научное исследование**, которое имеет очевидную перспективу продолжения. После ознакомления с обзором и ссылками, оригинальный характер, впервые и лично полученных автором результатов, не вызывает сомнения. Число публикаций и уровень апробации (2 статьи в российских журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьи в зарубежных журналах, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science, 9 работ в сборниках трудов научных конференций российского и международного уровня, 3 патента РФ на изобретение, 3 авторских свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ) соответствует

общепринятым критериям. Результаты внедрения подтверждены приложенным актом внедрения.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Полученные в ходе диссертационных исследований результаты вносят вклад в развитие оптических и оптико-электронных приборов и комплексов, в части решение задач, связанных с созданием высокочувствительных неохлаждаемых детекторов с высокими эксплуатационными параметрами и низкими производственными затратами. Их можно рекомендовать для применения в организациях Российской академии наук, ведомственных институтах, высших учебных заведениях и на предприятиях различного профиля.

**Замечания по диссертационной работе.** По диссертации можно задать следующие вопросы и указать на некоторые недостатки не принципиального плана:

1. В работе проводится анализ шумовых характеристик неохлаждаемых болометров с резистивными элементами из разных металлов на основании литературных данных. Хотелось бы уточнить роль фликкер-шумов подобных детекторов при наименьших значениях их пороговой чувствительности и в обосновании выбора их ключевых источников шума.
2. Автором описан новый способ компенсации собственного разогрева резистивных элементов неохлаждаемых болометров и делается вывод, что он более практичен относительно двух известных способов, описанных в литературе, на которые даются ссылки, однако объяснения сути высказанных ранее методов в работе не дается, что несколько затрудняет их сравнение.
3. В работе имеются единичные опечатки в наборе текста.

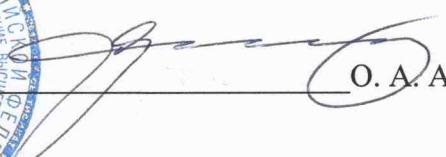
В заключение можно сказать, что рассматриваемая **диссертация является законченным научно-исследовательским трудом**, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне. В работе приведены научные результаты, позволяющие их квалифицировать как новые научно обоснованные технические решения, имеющие высокое значение в области

совершенствования оптико-электронных приборов и комплексов, предназначенных для широкого круга научных и прикладных применений.

Несмотря на указанные недостатки, которые не касаются ключевых результатов проведенного диссертационного исследования, считаю, что выполненная Выборновым Павлом Викторовичем научно-исследовательская квалификационная работа отвечает всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Официальный оппонент, доцент Кафедры физических методов и приборов контроля Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национального исследовательского Томского политехнического университета, кандидат технических наук

 Е. М. Фёдоров

Личную подпись Е. М. Фёдорова  
заверяю Учёный секретарь Учёного совета ТПУ  О. А. Ананьева

«16» мая 2017 г.

*Сведения о лице, представившем отзыв:*

Федоров Евгений Михайлович, доцент кафедры физических методов и приборов контроля Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Национального исследовательского Томского политехнического университета. Почтовый адрес: пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050. Телефон 8 (3822) 60-63-33, <http://www.tpu.ru>, E-mail: [fem@tpu.ru](mailto:fem@tpu.ru) Кандидат технических наук по специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.