

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук Фирсова Константина Николаевича

на диссертационную работу Выборнова Павла Викторовича

«НЕОХЛАЖДАЕМЫЙ БОЛОМЕТР НА ОСНОВЕ $Tl_{50.5}Ni_{49.5}$ 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

Модернизация действующих и создание новых оптических и оптико-электронных приборов и комплексов является одной из наиболее актуальных задач мирового научного сообщества, связанных с бурным развитием новых материаловедческих технологий. Особый интерес при этом представляют детекторы оптического излучения, как ключевые блоки оптических приборов и комплексов. Металлические болометры выделяются среди детекторов существенными достоинствами, к числу которых относятся:

- высокая технологичность, простота конструкции и относительно низкие производственные затраты;
- высокие физико-химические свойства и способность работать в условиях температур до сотен градусов Цельсия;
- высокие стабильность параметров и лучевая стойкость;
- высокое быстродействие;
- низкий уровень шумов.

Поэтому тема диссертационной работы Выборнова П.В., направленной на совершенствование металлических болометров, *представляется актуальной.*

Цель работы – разработка нового технического решения увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров и оценка возможности их использования в составе оптико-электронных измерительных систем – сформулирована четко. *Предмет исследования* определен внятно и

охарактеризован детально. Четко представлены области и мероприятия по планируемому применению полученных результатов исследования.

Постановка научно-технических задач и использованные методы исследования представлены доступно и в достаточном объеме, как и методы и средства проектирования.

Структура работы представляется логически выстроенной. **Первая глава** (см. с. 11-22 диссертации) является аналитическим обзором научной литературы, посвященной тепловым приемникам излучения, к которым относятся и неохлаждаемые болометры. Подробно рассмотрены характеристики приемников, их конструкционные особенности и области возможных применений. На основе проведенного анализа показано, что существующие методы совершенствования болометров исчерпали себя в физическом и техническом плане. Сделан вполне состоятельный вывод о том, что без развития новых подходов к кардинальному совершенствованию неохлаждаемых металлических болометров, обладающих рядом конкурентных преимуществ по отношению к полупроводниковым приемникам, трудно ожидать повышения к ним научного и, как следствие, практического интереса. Актуальность работы становится обоснованной.

Во второй главе (см. с. 21-49 диссертации), самой большой по объему,дается научно-техническое обоснование предложенной методики выбора материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров. На основе, возможно излишне детального, анализа практических ситуаций показана неоднозначность действующего условия сравнения чувствительности болометров и используемого критерия выбора металла резистивного элемента. Обоснованно указывается на необходимость их уточнения и разработки новой методики оценки эффективности подобных детекторов. На базе проведенных аналитических оценок сделан принципиально важный вывод о том, что для создания высокочувствительных неохлаждаемых металлических болометров материал резистивного элемента должен обладать лучшей совокупностью ряда электрофизических свойств: высоким значением

удельного электросопротивления, минимальной удельной теплоемкостью и плотностью, а не характеризоваться только высоким значением ТКС, как это было принято ранее. Предложенная методика применена для сравнительной оценки потенциальных возможностей резистивных элементов болометров на основе используемых в настоящее время металлов и сплавов, а также, впервые, на основе сплавов никелида титана. Для сравнительной экспериментальной проверки результатов оценок были изготовлены и исследованы макеты болометров идентичной конструкции, для чего была разработана система автоматизации сбора и обработки данных, подробно представленная в главе 4. В итоге было показано, что болометр на основе сплава $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ сопротивлением менее 10 Ом имеет более, чем 2-х кратное преимущество в пороговой чувствительности относительно болометров идентичной конструкции на основе всех технологически применимых металлов при прочих равных условиях.

Третья глава диссертации (см. с. 63-82 диссертации) содержит описание результатов экспериментальных исследований разработанных макетов болометров в составе измерителя средней мощности лазерного излучения и суммарной солнечной радиации, а также результаты модельной оценки ожидаемого предела обнаружения потенциального анализатора паров ртути в открытой атмосфере (на основе разработанного диссидентом болометра). На основании результатов прямых сравнительных измерений показана взаимозаменяемость фотодиодных и термоэлектрических приемников в промышленных измерителях энергетических параметров лазерного излучения и суммарной солнечной радиации на разработанный диссидентом неохлаждаемый металлический болометр. При этом разработанный болометр имеет следующие преимущества:

- более высокую технологичность, допускающую изготовление болометров на имеющейся производственной базе;
- более низкую себестоимость производства;
- более высокие эксплуатационные характеристики.

Модельными оценками показано, что применение металлического болометра с $NEP \leq 1 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$ при рабочей частоте свыше 500 Гц и отношением сигнал-шум 110 дБ в составе оптического абсорбционного анализатора ртути должно обеспечить обнаружение фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере.

Четвертая глава (см. с. 83-117 диссертации) содержит описание разработанной диссидентом специализированной системы автоматизации процесса измерений характеристик неохлаждаемых болометров. Система предусматривает возможность смены временных параметров сбора данных. Доработано системное программное обеспечение, осуществляющее смену режимов работы системы и изменения длительностей выходных сигналов без вмешательства оператора в программный код МК. Практические испытания системы управления на базе МК ATtiny-2313 показали полное соответствие поставленной задачи по функциональным, техническим и эксплуатационным параметрам.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации. **Язык и стиль** изложения материалов не вызывают нареканий. **Списки литературы** оформлены по правилам.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций представляется убедительной. Полученные новые данные научно корректны, в достаточной степени подтверждены и обоснованы, не противоречат известным базовым литературным данным. **Достоверность результатов работы** обеспечивается использованием апробированных исследовательских процедур, хорошим согласованием модельных оценок с результатами экспериментов и положительными заключениями экспертиз о патентоспособности предложенных научных идей и их технических решений.

Новизна полученных результатов логически вытекает из нового подхода к решению проблемы, предложенного и обоснованного диссидентом. Новизна подтверждена как статьями в двух наиболее престижных зарубежных журналах, публикующих результаты исследований по разработке сенсоров, так

и полученными патентами.

В соответствии с изложенным, на защиту выносятся следующие основные положения, обладающие необходимой, по моему мнению, научной новизной и практической значимостью и соответствуют п. 2 в части п. 6 паспорта специальности 05.11.07 - оптические и оптико-электронные приборы и комплексы:

- 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;
- 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;
- 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 СМР-11, рекомендованного службой Росгидромет.

В целом, представленную к защите диссертацию можно классифицировать, с одной стороны, как квалификационную работу прикладного характера, соответствующую всем установленным нормам и правилам, с другой стороны – как завершенное на данном этапе научное исследование, которое имеет очевидную перспективу продолжения. Чтобы закончить с обязательными формулировками отмечу также, что оригинальный характер впервые и лично полученных автором результатов сомнений не

вызывают: в обзорной главе диссертант корректно ссылается на источники заимствования материалов, а в оригинальных главах – на свои публикации и работы в соавторстве.

Число публикаций и уровень апробации (две статьи в журналах из перечня ВАК: «Датчики и системы» и «Известия ВУЗов. Физика»; две статьи в зарубежных журналах, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science: «Sensors & Materials» и «IEEE Sensors Journal»; материалы девяти научных конференций российского и международного уровня в г. Томске) соответствуют общепринятым критериям.

Имеется **внедрение** результатов исследования.

Существенных недостатков диссертационная работа не имеет.

Можно сделать частные замечания:

- проведенные аналитические оценки называются разработкой научных основ создания, с чем трудно согласиться;
- На рис 2.21, стр. 59 содержится мало экспериментальных точек для кривых 1 и 2, учитывая то, что частотная зависимость NEP болометров не является линейной;
- В работе встречаются некорректные выражения, как, например, на стр. 80: «На рисунке 3.7 представлена зависимость погрешности макета пиранометра от измеряемой суммарной солнечной радиации и проведено её сравнение с результатами эксперимента». Вероятно, имелась в виду зависимость погрешности измерения от регистрируемой макетом суммарной солнечной радиации.
- Глава 4 и Глава 5 содержат излишне детальные описания технического, явно второстепенного, плана и могли быть изложены более кратко;
- имеются единичные пропуски слов и знаков препинания.

Несмотря на отмеченные недостатки, которые не снижают уровня 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.

Сведения об официальном оппоненте

Фамилия, имя, отчество	Фирсов Константин Николаевич
Гражданство	Российская Федерация
Ученая степень (с указанием шифра специальности научных работников, по которой зашита диссертация)	доктор физико-математических наук, 01.04.21
Ученое звание (по кафедре, специальности)	нет
Основное место работы	
Должность	Заведующий лабораторией
Наименование подразделения (кафедра, лаборатория)	Отдел колебаний, лаборатория физики импульсных газоразрядных лазеров
Полное наименование организации в соответствии с уставом	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук.
Почтовый индекс, адрес, веб- сайт, телефон, адрес электронной почты организации	119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38 http://www.gpi.ru/ 8 (499) 135-4148 postmaster@kapella.gpi.ru

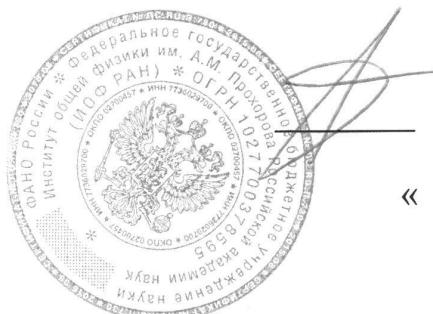
Официальный оппонент,
д. ф.-м. н.



Фирсов К. Н.

Подпись К.Н. Фирсова заверяю

Ученый секретарь Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института общей физики
им. А.М. Прохорова
Российской академии наук,
д. ф.-м. н.



Андреев С.Н.

« » мая 2017 г.