

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Института
автоматики и электрометрии
Сибирского отделения Российской
академии наук, д.ф.-м.н,
академик РАН, профессор,

A. M. Шалагин

«05» апреля 2017 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

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.

Актуальность диссертационной работы

Тема работы относится к разработке новых способов повышения
чувствительности неохлаждаемых болометров на основе металлов с целью
увеличения конкурентных преимуществ перед аналогами на основе
полупроводниковых материалов. Разработка недорогих приемников излучения
для использования в опорных каналах систем прикладной оптики и устройствах
рутинного применения с более высокими эксплуатационными
характеристиками, чем у существующих полупроводниковых и металлических
болометров, представляет большой практический интерес в связи с бурным
ростом числа разработок оптических и оптико-электронных приборов и
комплексов, в том числе работающих в слабо освоенном терагерцовом диапазоне
спектра. Данная работа проведена в рамках проектов базовых программ

Сибирского отделения Российской академии наук, предполагающих создание научно-методических основ информационно-вычислительных технологий и измерительных комплексов для мониторинга климатических и экологических систем, новых методов и средств мониторинга окружающей среды, а также в разработке и создании спектрометра среднего ИК и терагерцового диапазона, входящего в состав лазерного исследовательского стенда Лаборатории новых материалов и перспективных технологий СФТИ при Национальном исследовательском Томском государственном университете. В настоящее время создание нового поколения детекторов является также насущным вопросом импортозамещения.

Все вышесказанное указывает на то, что тема диссертационной работы является актуальной.

Соответствие темы работы научным специальностям

В диссертационной работе П.В. Выборнова получен ряд результатов по созданию болометров на основе сплава никелида титана: предложен критерий выбора материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров, условие сравнения их пороговых чувствительностей и методика оценки соотношения пороговой чувствительности двух болометров из разных металлов; предложено и экспериментально проверено новое техническое решение увеличения чувствительности металлических болометров – использование сплава $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$.

Кроме того, предложен способ измерения мощности лазерного излучения с использованием неохлаждаемого болометра на основе $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$ и актинометрический приемник болометрического типа, на основе которого создан макет пиранометра, показана возможность создания оптического анализатора фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере с использованием разработанного макета болометра.

Таким образом, тема диссертационной работы Выборнова Павла Викторовича соответствует по техническим наукам специальности 05.11.07 –

Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы в области исследования «Разработка, совершенствование и исследование характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн, предназначенных для решения задач в части создания оптического и оптико-электронного оборудования для научных исследований в различных областях науки и техники»(п. 2 в части п. 6 паспорта).

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и 2 приложений. Работа изложена на 132 страницах, включает 20 таблиц, 42 рисунка и список библиографических источников из 105 наименований.

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются цели и задачи исследований, показана научная новизна, практическая значимость и апробация результатов исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен обзор литературы, посвященный описанию исторических аспектов разработки неохлаждаемых металлических болометров, их современных конструкций, ключевых характеристик и областей применения. На основании приведенных данных сделан вывод о том, что возможности улучшений ключевых характеристик неохлаждаемых металлических болометров традиционными методами исчерпали себя, а разработка новых технических решений является перспективным путем их улучшения.

В главе 2, на основе детального проведенного анализа, показана необходимость модификации используемой методики сравнительной оценки пороговой чувствительности неохлаждаемых металлических болометров и условий проведения сравнительных исследований. Сделан принципиально важный вывод о том, что материал резистивного элемента должен обладать лучшей совокупностью ряда электрофизических свойств: не только высоким значением ТКС, как это принято, но и высоким значением удельного электросопротивления, минимальной удельной теплоемкостью и плотностью. Представлено теоретическое и практическое обоснование нового технического

решения увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров – использование сплава Ti_{50.5}Ni_{49.5}.

В главе 3 представлены результаты экспериментальных исследований разработанных макетов болометров в составе измерителя средней мощности излучения и суммарной солнечной радиации, а также модельные оценки предела обнаружения потенциального анализатора паров ртути на основе изготовленного макета болометра в открытой атмосфере. Экспериментально показана возможность эффективной замены фотодиодных и термоэлектрических приемников в измерителях энергетических параметров лазерного излучения на разработанный макет неохлаждаемого болометра, который продемонстрировали более высокую чувствительность при более высокой стабильности выходных параметров. По результатам модельных оценок, разработанный макет болометра позволит проводить измерение фоновых концентраций ртути в открытой атмосфере с помощью оптического измерителя методом дифференциального поглощения.

В главе 4 приведены результаты разработки системы автоматизации процесса измерения характеристик неохлаждаемых болометров с возможностью смены временных параметров сбора данных. Разработанный аппаратно-программный комплекс представляет собой модифицированную в части системного обеспечения версию созданной ранее системы управления и контроля «BppS». Смену режимов работы системы и изменения длительностей выходных сигналов система управления и контроля осуществляет без вмешательства оператора в программный код МК.

Новизна выполненных исследований и полученных результатов

В работе получены следующие научные результаты:

1. Предложен новый критерий выбора материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров и условие сравнения пороговых чувствительностей резистивных элементов из разных металлов.
2. Предложена новая методика оценки соотношения пороговой

чувствительности двух неохлаждаемых болометров на основе резистивных элементов разных металлов.

3. Предложено и экспериментально проверено новое техническое решение увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров путем использования сплава никелида титана в качестве материала резистивных элементов.

4. Предложен способ измерения мощности лазерного излучения неохлаждаемым болометром на основе сплавов никелида титана и показана практическая возможность его реализации (Патент РФ № 2345334).

5. Показана возможность создания анализатора фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере с использованием в качестве УФ детектора потенциального болометра из сплава $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ (Патент РФ № 2421709).

6. Предложен актинометрический приемник болометрического типа и создан макет пиранометра на его основе, обладающий лучшими техническими параметрами в сравнении с аналогичным прибором, рекомендованным службой Росгидромет (Патент РФ № 2469282).

7. Разработаны и реализованы в виде программного обеспечения алгоритмы работы системы управления, осуществляющей автоматизацию процесса измерения характеристик неохлаждаемых болометров (Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ РФ № 2007610893, № 2007610894 и № 2007611346).

Научная и практическая значимость полученных результатов

Установлено, что постоянная времени отклика резистивных элементов микронной толщины на основе металлов главным образом определяется их размерами; подтверждено несоответствие результатов модельных оценок теплопроводности подобных элементов экспериментальным данным.

Установлено, что неохлаждаемый болометр с $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ резистивным элементом сопротивлением до 10 Ом за счет наилучшей совокупности электрофизических характеристик сплава обладает в 2 раза более высокой чувствительностью в сравнении с элементами идентичных размеров из всех

технологически применимых металлов и некоторых металлических сплавов при прочих равных условиях.

Разработан алгоритм оценки эффективности неохлаждаемых металлических болометров, который может быть использован для выбора материалов резистивных элементов с целью создания на их основе болометров нового поколения.

Разработан макет неохлаждаемого болометра на основе сплава $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ с минимальной пороговой чувствительностью $175 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$ на частоте модуляции регистрируемого излучения 1 Гц и приемной апертурой $1,6 \text{ мм}^2$, который может быть использован в качестве простого и недорогого широкополосного приемника излучения в составе оптико-электронных приборов различного назначения.

Разработан макет пиранометра на основе $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ -болометра, который может быть использован в качестве более эффективного измерителя суммарной солнечной радиации, в сравнении с пиранометром СМР-11, рекомендованным службой Росгидромет.

Экспериментальные исследования показали, что неохлаждаемые металлические болометры обладают высокой стабильностью параметров и способны заменить термоэлектрические и фотодиодные приемники в измерителях энергетических характеристик оптического излучения.

Модельные оценки показали, что применение неохлаждаемых металлических болометров с пороговой чувствительностью менее $1 \text{ нВт/Гц}^{1/2}$ при частоте модуляции более 500 Гц и отношением сигнал-шум не менее 110 дБ в составе оптического абсорбционного анализатора является достаточным для обнаружения фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере и предпочтительны с точки зрения высоких эксплуатационных параметров и простоты конструкции.

Разработана система управления на базе МК ATtiny-2313, формирующая последовательность 4 импульсов в периодическом или пакетно-импульсном режиме, отслеживающая состояние 4 датчиков и осуществляющая подсчет

времени работы схемы, при этом смена алгоритма и временных параметров МК с минимальной дискретностью 50 нс производится оператором с помощью системного программного обеспечения.

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием апробированных исследовательских процедур, хорошим согласованием теоретических оценок с результатами экспериментов и положительными заключениями экспертиз о патентоспособности предложенных научных идей и их технических решений.

Апробация результатов исследования

Результаты работы рассмотрены на международных и всероссийских научных конференциях. По теме диссертационной работы опубликованы 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, получены 3 патента РФ на изобретение, 3 авторских свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ.

Рекомендации по использованию

Результаты диссертационной работы могут представлять интерес в разработке приборов прикладной оптики различного назначения и исследованиях окружающей среды оптическими методами в учреждениях ФАНО России, таких как Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Институт оптики атмосферы СО РАН, Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирский государственный университет, Новосибирский государственный технический университет, Дальневосточный государственный технический университет.

Замечания по диссертационной работе

Все задачи, поставленные в диссертационной работе, успешно решены. Однако по диссертации можно задать следующие вопросы и указать на некоторые недостатки:

1. Ограниченнное количество информации представлено по сравнению свойств выбранного сплава никелида титана и сплавов иных составов, что затрудняет определение адекватности выбора соотношения никель-титан.
2. В работе не обозначена перспективная область практического применения предложенных болометров. В частности, как уровень чувствительности разработанных на основе сплава никелида титана неохлаждаемых болометров соотносится с существующими на сегодняшний день решениями, каков их рабочий диапазон длин волн и в каких областях науки и техники предпочтительно их использование?
3. Пункт №5 научной новизны по своей сути скорее относится к практической значимости предлагаемого подхода по созданию анализаторов фоновых концентраций паров ртути.
4. Не указана ссылка на источник откуда взята фотография, представленная на Рис.1.1, стр. 17.
5. На стр. 52, рис. 2.16 – не указано какими характеристиками (длина волны излучения, интенсивность) обладает лазерный диод.
6. В работе замечены опечатки и пропуски слов: на стр. 60 диссертации, строка 10, пропущена запятая после слова «эксперимента», а на стр. 80, строка 4, пропущено слово «рассчитанная» перед словом «зависимость». Нет запятой после слова «соответственно» (стр. 8, строка 20 автореферата) и далее в строке 11 после слов «Вероятнее всего», а также на стр. 10 до и после фразы «в соответствии со всеми технологически применимы металлами»; пропущена фраза «более, чем» на стр. 20, 4-ая строка снизу перед словами «в 2 раза».

Выводы

Отмеченные недостатки не влияют на общую **положительную оценку диссертационной работы**, которая является законченным исследованием, выполненном по актуальной тематике и отвечающей критериям научной новизны и практической значимости. Основные результаты работы, раскрывающие сформулированные автором цель и задачи работы, в достаточной

степени опубликованы в периодической печати, защищены патентами на изобретения РФ и авторскими свидетельствами РФ об официальной регистрации программ для ЭВМ. Автореферат диссертации адекватно отражает ее основное содержание и оформлен в соответствии с требованиями ВАК РФ и ГОСТ 7.0.11-2011.

Заключение

Диссертационная работа Выборнова Павла Викторовича является научно-квалифицированной работой, в которой решена актуальная задача повышения чувствительности металлического неохлаждаемого болометра и демонстрации возможностей его использования в составе оптических и оптико-электронные приборов и комплексов, имеющих важное хозяйственное значение для решения задач мониторинга окружающей среды и проведения научных исследований, что соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении научных степеней», утвержденных постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

Отзыв о диссертации заслушан и одобрен на заседании научного семинара лаборатории информационной оптики Института автоматики и электрометрии СО РАН «05» апреля 2017 г., протокол №1.

Главный научный сотрудник,
д.т.н., профессор

О. И. Потатуркин

Старший научный сотрудник
лаборатории информационной оптики,
к.т.н.,

Н. А. Николаев

Полное название ведущей организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук

Сокращенное название организации: ИАЭ СО РАН

Адрес: Россия, 630090, Новосибирск, просп. Коптюга, 1

Электронная почта: IAE@iae.nsk.su

Телефон: +7 (383) 330-79-69

Сайт: www.iae.nsk.su