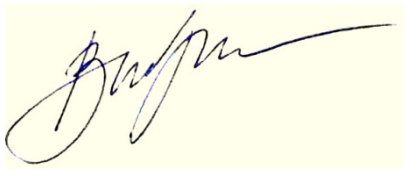
На правах рукописи



Выборнов Павел Викторович

НЕОХЛАЖДАЕМЫЙ БОЛОМЕТР НА ОСНОВЕ $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждение науки «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук» (ИМКЭС СО РАН) и Сибирском физико-техническом институте им. акад. В. Д. Кузнецова Национального исследовательского Томского государственного университета (ТГУ).

Научный руководитель: **Андреев Юрий Михайлович**
доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник,
ИМКЭС СО РАН, г. Томск

Официальные оппоненты: **Фирсов Константин Николаевич**
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией физики импульсных газовых лазеров, ФГБУН «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», г. Москва

Федоров Евгений Михайлович
кандидат технических наук,
доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Ведущая организация: ФГБУН «Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук», г. Новосибирск

Защита состоится « 6 » июня 2017 года в 9 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.268.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) по адресу г. Томск, пр. Ленина, д. 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУР по адресу: г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте https://tusur.ru/urls/3m7rtfam

Автореферат разослан « 12 » апреля 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук Мандель А. Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Неохлаждаемыми детекторами длинноволновой области спектра преимущественно являются тепловые приемники излучения. Наибольшее распространение из них, в силу высокой чувствительности, получили полупроводниковые болометры. Вместе с тем, разработка недорогих приемников излучения с высокими эксплуатационными характеристиками для применения в опорных каналах систем прикладной оптики и устройствах рутинного применения представляет большой практический интерес. На роль таких детекторов могут претендовать неохлаждаемые металлические болометры, при условии разработки новых технических решений увеличения их чувствительности. В отличие от полупроводниковых, металлические болометры характеризуются высокой технологичностью, низким уровнем шумов, простотой конструкции и невысокими производственными затратами. Их активные элементы имеют высокие физико-химические свойства, демонстрируют высокую стабильность параметров и лучевую стойкость, способны работать в условиях высоких (до сотен градусов Цельсия) температур, а быстродействие может составлять единицы наносекунд. Ключевые характеристики неохлаждаемых металлических болометров определяются свойствами используемого металла, размером и конструкцией резистивного элемента. Количество технологически применимых металлов ограничено, а их свойства предопределены природой, что, казалось бы, облегчает выбор эффективных материалов резистивных элементов. На сегодняшний день критерием такого выбора считается высокий температурный коэффициент сопротивления (ТКС) металла и низкая теплопроводность элемента в целом. В то же время результаты научных работ показывают, что значения теплопроводности металлических резистивных элементов различной конструкции, полученные экспериментально, могут кратно отличаться от расчетных данных с использованием справочных источников. Поэтому провести модельную оценку эффективности неохлаждаемых болометров на основе того или иного металла, согласно существующим методикам, крайне затруднительно. Тем не менее, вопрос выбора эффективных материалов резистивных элементов, к числу которых относят Ti, Pt, Nb и Ni, считается решенным.

В настоящее время улучшение ключевых характеристик неохлаждаемых металлических болометров осуществляется, в основном, за счет уменьшения размера и толщины резистивных элементов и оптимизации их конструктивного исполнения. Данный подход не только увеличивает производственные затраты, но и практически достиг физических и технологических пределов. Поэтому разработка новых способов дальнейшего повышения чувствительности неохлаждаемых болометров на основе металлов является актуальной задачей, реализация которой позволит увеличить их конкурентные преимущества перед аналогами на основе полупроводниковых материалов.

Цели и задачи диссертационной работы. Цель работы заключается в разработке нового технического решения увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров и оценки возможности их использования в составе оптико-электронных измерительных систем.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обзорный анализ неохлаждаемых металлических болометров.
2. Оценка эффективности использования металлов и их сплавов в качестве материалов резистивных элементов неохлаждаемых болометров.
3. Разработка и экспериментальное исследование макетов неохлаждаемых болометров с резистивными элементами из металлов и их сплавов.
4. Проведение модельных и экспериментальных исследований по оценке возможности применения неохлаждаемых металлических болометров в составе измерителей средней мощности излучения, оптических абсорбционных газоанализаторов и актинометрических приборов.
5. Разработка системы автоматизации процесса измерения характеристик неохлаждаемых болометров с оперативной сменой временных параметров сбора данных.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен новый критерий выбора материала резистивного элемента для неохлаждаемых металлических болометров и условие сравнения их пороговых чувствительностей.
2. Разработана новая методика оценки соотношения пороговой чувствительности двух неохлаждаемых болометров из 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).

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. 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.
2. Разработан макет неохлаждаемого болометра на основе сплава $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ с минимальной пороговой чувствительностью 175 нВт/Гц$^{1/2}$ на частоте модуляции регистрируемого излучения 1 Гц и приемной апертурой 1,6 мм^2, который может быть использован в качестве простого и недорогого широкополосного приемника излучения в составе оптико-электронных приборов различного назначения.
3. Разработана автоматизированная система управления, которая может быть использована в устройствах различного назначения для последовательного управления и контроля отдельными электронными узлами с возможностью оперативной смены их временных параметров и режимов работы.

Основные положения, выносимые на защиту:

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.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические, экспериментальные и сравнительные методы исследования, применялась статистическая обработка прямых и косвенных измерений.

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.

Личный вклад. Личный вклад автора заключается в разработке методики оценки эффективности неохлаждаемых металлических болометров и нового технического решения увеличения их чувствительности. Автором проведены экспериментальные исследования разработанных болометров и оценка возможности их использования в составе измерителя мощности оптического излучения, пиранометре и анализаторе паров ртути в открытой атмосфере, самостоятельно обработаны результаты измерений. Автор также участвовал в постановке цели и задачи исследования, интерпретации полученных данных и формулировании выводов совместно с научным руководителем. Совместно с В. Я. Ерофеевым изготовлены резистивные элементы, со студентом ТУСУР Терликбаевым Р. А. разработано системное программное обеспечение.

Реализация и внедрение результатов исследований. Результаты работы использованы при разработке и создании спектрометра среднего ИК и терагерцового диапазона, входящего в состав лазерного исследовательского стенда лаборатории новых материалов и перспективных технологий Сибирского физико-технического института им. акад. В. Д. Кузнецова, в рамках государственного контракта ВИУ 8.1.51.2015 «Разработка комплексной системы определения состава и свойств различных объектов и сред» (2015-2016).

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы рассматривались на международных и всероссийских научных конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2005» (Томск, 2005); Восьмое Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (Томск, 2009); IV Всероссийская конференция молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии» (Томск, 2009); Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2010» (Томск, 2010; получен диплом I-ой степени за лучший доклад на секции «Информационно-измерительные приборы и устройства»); II Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (Томск, 2011); X International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser» (Томск, 2011); VIII Всероссийский симпозиум «Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2012» (Томск, 2012); XI International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser» (Томск, 2013); XII International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser» (Томск, 2015).

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.

Структура и объем диссертационной работы. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований, показана научная новизна, практическая значимость и апробация результатов исследования, сформулированы научные положения, выносимые на защиту диссертации.

Первая глава диссертации посвящена описанию исторических аспектов разработки неохлаждаемых металлических болометров, их современных конструкций, ключевых характеристик и областей применения.

Первый болометр на основе тонких платиновых пленок был разработан в 1878 году профессором Лэнгли для исследования ИК области спектра. Применение железа в качестве материала резистивного элемента и дальнейшее совершенствование конструкции позволило болометрам на протяжении нескольких десятилетий оставаться одними из самых эффективных детекторов излучения, в том числе видимого диапазона. Синтез новых материалов, преимущественно полупроводниковых, способствовал появлению детекторов длинноволнового диапазона, работающих при комнатных температурах, с лучшими показателями обнаружительной способности и быстродействия. Это обусловило значительное снижение интереса к неохлаждаемым болометрам на основе металлов. В настоящее время их доля на рынке остается на уровне нескольких процентов относительно современных VOx болометров, которые по объему производства в матричном исполнении превосходят остальные ИК детекторы аналогичной конструкции. Анализ ключевых характеристик современных неохлаждаемых металлических болометров показал, что они кратно уступают VOx болометрам в предельной обнаружительной способности. На сегодняшний день в научных работах не рассматриваются принципиально новые технические решения по улучшению обнаружительной способности неохлаждаемых болометров на основе металлов, которые являются более простыми и менее затратными при производстве, чем VOx болометры. *На основании приведенных данных сделан вывод, что разработка новых технических решений совершенствования ключевых характеристик неохлаждаемых металлических болометров является актуальной задачей.*

Во второй главе диссертации представлено теоретическое и практическое обоснование нового технического решения увеличения чувствительности неохлаждаемых металлических болометров.

Исследования сплавов никелида титана (TiNi) вызвали интерес к возможности их применения в совершенно новых областях науки и техники, в частности, такой как тепловые приемники излучения. Это потребовало проведение анализа научных работ по неохлаждаемым металлическим болометрам, который выявил неоднозначность действующего условия сравнения чувствительности болометров и критерия выбора металла резистивного элемента, что указало на необходимость их уточнения и разработки новой методики оценки эффективности подобных детекторов.

Предложенная методика была основана на сравнительной оценке пороговой чувствительности болометров, которая определяется выражением:

$$NEP = \frac{\sqrt{V_J^2 + V_{th}^2 + V_{1/f}^2 + V_{iamp}^2}}{R_V}, \quad (1)$$

где R_V – вольт-ваттная чувствительность болометра [В/Вт]; V_{iamp} – напряжение шума на входе первичного усилительного каскада [В]; V_J, V_{th} и $V_{1/f}$ – напряжения Джонсоновского шума, дробового шума фононной теплопроводности и $1/f$ шума (фликкер-шума) болометра, соответственно [В].

Известно, что R_V болометра может быть определена согласно формуле:

$$R_V = \eta IR \cdot \frac{\alpha}{G}, \quad (2)$$

где η – нормированный коэффициент поглощения излучения; I – рабочий ток болометра (ток смещения) [А]; α – ТКС материала резистивного элемента [$К^{-1}$]; R – его сопротивление при рабочей температуре [Ом]; G – теплопроводность элемента [Вт/К]. Из выражения (2) следует принятое условие сравнения эффективности болометров и критерий выбора материала их резистивных элементов. Вместе с тем, на основании литературных данных установлено, что оценка G тонкопленочных резистивных элементов, в том числе тривиальных конструкций, проводимая согласно известному выражению:

$$G = \chi \frac{hw}{l}, \quad (3)$$

где χ – коэффициент теплопроводности материала элемента [Вт/м·К]; l, h и w – соответственно его длина, ширина и толщина [м], в целом не соответствуют практическим результатам. Вероятнее всего это связано с отличием χ элементов от справочных данных, что ограничивает оценку *NEP* болометров и указывает на необъективность использования G в качестве критерия выбора материала их резистивных элементов. Вместе с тем, одним из условий сравнения *NEP* болометров из разных металлов принято считать равенство их сопротивлений. Однако в этом случае, исходя из выражения для R, w резистивных элементов из низкоомных металлов будет на порядки меньше, чем w резистивных элементов из высокоомных металлов ($h = l$). Соответственно, исходя из действующей теории, подтвержденной практическими результатами, болометры на базе резистивных элементов наименьшей толщины будут обладать заведомо лучшей *NEP*. Следовательно, равенство R неохлаждаемых металлических болометров нецелесообразно использовать в качестве условия сравнения их эффективности.

Наряду с вышеизложенным было установлено, что модельные расчеты теплоёмкости элементов разных конструкций согласно выражению:

$$H = c\rho lhw, \quad (4)$$

где ρ и c – соответственно плотность [кг/$м^3$] и удельная теплоемкость [Дж/кг·К] материала элемента, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Воспользовавшись зависимостью $H = G \cdot \tau$, где τ – постоянная времени отклика болометра, и известным выражением для R, вольт-ваттная чувствительность болометра может быть определена следующим образом:

$$R_V = \frac{\eta I}{h^2 w^2} \cdot \frac{\alpha \rho_i \tau}{c\rho}, \quad (5)$$

где ρ_i – удельное электросопротивление материала резистивного элемента при рабочей температуре [Ом·м]. Из выражения (5) следует, что при сравнении эффективности неохлаждаемых металлических болометров целесообразно исходить из условия равенства размеров резистивных элементов, тока смещения и коэффициента поглощения. Предварительные исследования неохлаждаемых болометров с резистивными элементами близких геометрических размеров из разных металлов показали несущественное различие их τ. Таким образом, R_V неохлаждаемого металлического болометра будет определяться совокупностью 4-х электрофизических параметров материала его резистивного элемента: α, ρ_i, ρ и c.

Литературный анализ шумовых характеристик неохлаждаемых болометров из разных металлов показал, что при наименьших значениях *NEP* основными источниками шума таких детекторов являются V_J и V_{iamp}. Рассмотрение спектральной плотности шумового напряжения, приведенного к входу современных малошумящих усилителей, выявило, что V_{iamp} на частотах свыше 200-500 Гц в единичной шумовой полосе (Δf = 1 Гц) имеет минимальное значение 0,9 нВ. Наряду с этим, был проведен расчет зависимости V_J от R и w при Δf = 1 Гц для наиболее распространенной конструкции резистивных элементов ($h = l$) и различных значений ρ_i, на сновании выражений:

$$V_J(R) = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (6)$$

$$V_J(w) = \sqrt{4kT\rho_i w\Delta f}, \quad (7)$$

где k – постоянная Больцмана, $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – рабочая температура болометра [K], результаты которого представлены на рисунке 1. В итоге были определены граничные условия преобладания того или иного шумового напряжения. Для неохлаждаемых металлических болометров с R < 10 Ом основным источником шума является V_{iamp}, а с R > 10 Ом – V_J, либо $(V_J^2 + V_{amp}^2)^{1/2}$. Таким образом, сравнение *NEP* двух неохлаждаемых болометров из разных металлов можно провести с помощью следующих выражений:

$$\frac{NEP^{metal2}}{NEP^{metal1}} = N \geq 0{,}94 \cdot \left(\frac{\rho_{01}\alpha_1}{c_1\rho_1}\right) \cdot \left(\frac{c_2\rho_2}{\rho_{02}\alpha_2}\right)$$

$$для\ R < 10\ Ом\ и\ w > 0{,}2\ мкм, \quad (8)$$

$$N > \frac{NEP^{metal2}}{NEP^{metal1}} \geq 0{,}94 \cdot \left(\frac{\sqrt{\rho_{01}}\alpha_1}{c_1\rho_1}\right) \cdot \left(\frac{c_2\rho_2}{\sqrt{\rho_{02}}\alpha_2}\right)$$

$$для\ R > 10\ Ом\ и\ w < 0{,}2\ мкм. \quad (9)$$

Из выражений (8) и (9) следует принципиально важный вывод о том, что *для создания высокочувствительных неохлаждаемых металлических болометров материал резистивного элемента должен обладать лучшей совокупностью ряда электрофизических свойств. А именно, характеризоваться не только высоким значением ТКС, как это принято, но и высоким значением удельного электросопротивления, минимальной удельной теплоемкостью и плотностью.*

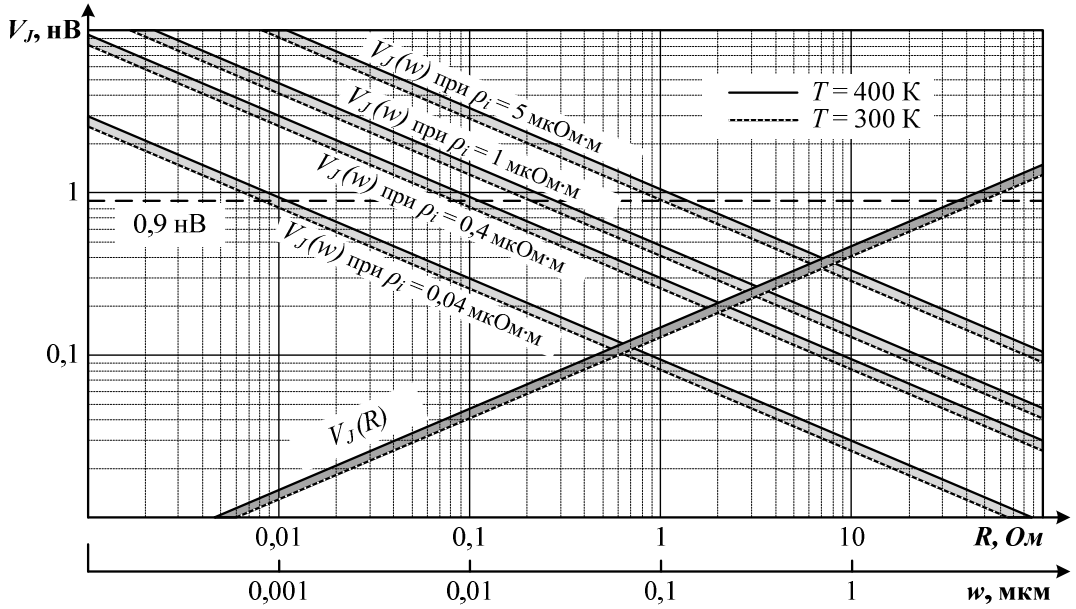


Рисунок 1 – Зависимость напряжения Джонсоновских шумов болометра от R и w для элемента с квадратной формой приемной площадки

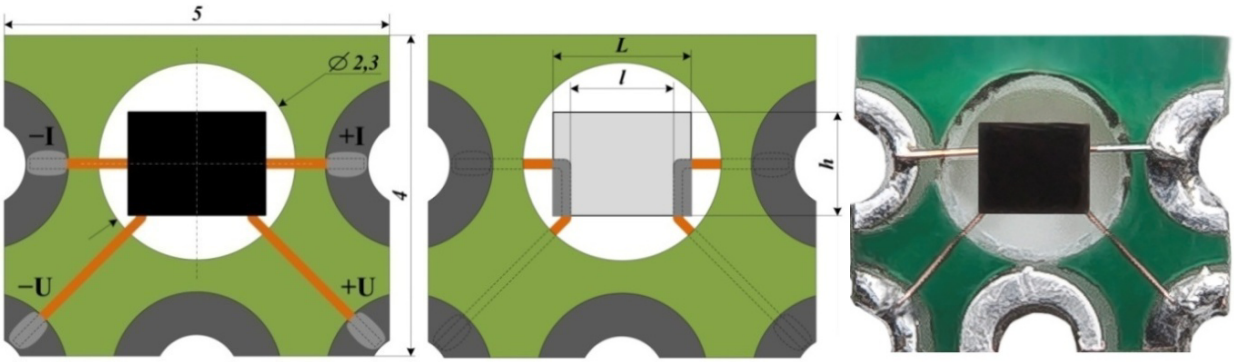
Большинство металлических сплавов обладает существенно меньшим ТКС, чем металлы. Поэтому их использование в качестве материалов резистивных элементов неохлаждаемых болометров не предпринималось, что подтверждается отсутствием соответствующих научных работ. На этапе предварительных исследований были отобраны следующие сплавы, потенциально обладающие необходимой совокупностью параметров: $Ti_{50}Ni_{50}$, $Ti_{49}Ni_{51}$, $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$, $Ti_{50}Ni_{40}Cu_9W_1$, $Ti_{49}Ni_{47}Mo_4$, $Ti_{50}Ni_{41}Cu_9$, $Ti_{50}Ni_{35}Cu_{15}$ (соотношение компонентов указано в атомных процентах) и измерены их характеристики, а также проанализированы свойства всех сплавов из базы данных MatWeb. По результатам оценки (таблица 1) согласно выражению (8) было установлено, что отобранный сплав $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ в сравнении со всеми технологическими применимыми металлами обладает наилучшей совокупностью свойств, требуемой для создания высокочувствительных неохлаждаемых болометров.

Таблица 1 – Сравнение *NEP* потенциальных неохлаждаемых болометров из металлов и некоторых высокоомных сплавов

Материал	Параметр				$\frac{NEP_{материал}}{NEP_{Ti50.5Ni49.5}}$
	α, 10^{-3} К$^{-1}$	ρ, г/см^3	ρ_0, мкОм·м	c, Дж/кг·К	
$Ti_{50.5}Ni_{49.5}$	3,22	6,45	1,09	259	1
$Ti_{50}Ni_{35}Cu_{15}$ (II)	2,1	6,45	1,25	419	2,1
Zr (цирконий)	4,4	6,5	0,4	285	2,1
Ti (титан)	3,5	4,5	0,54	528	2,4
Hf (гафний)	4,4	13,3	0,35	144	2,5
Pb (свинец)	4,2	11,4	0,2	129	3,5
$Ni_{48}Fe_{52}$	3,6	8,18	0,48	502	4,7

$Ni_{50}Fe_{50}$	3,5	8,25	0,43	481	5,3
V (ванадий)	3,9	6,1	0,248	502	6,3
$Ti_{50}Ni_{35}Cu_{15}$ (I)	0,74	6,45	1,25	419	6,6
--------	----	----	----	----	----
Pt (платина)	3,9	21,5	0,106	134	14
Pd (палладий)	4,2	12	0,1	247	14
Ni (никель)	7,2	8,9	0,069	452	16
--------	----	----	----	----	----
Ag (серебро)	4,1	10,5	0,016	234	74
Cu (медь)	4,3	8,9	0,017	385	93

Для сравнительных исследований были изготовлены макеты болометров идентичной конструкции (рисунок 2) на основе $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$, Ni и Ti. Выбор Ti был обусловлен тем, что его относят к наиболее эффективным материалам неохлаждаемых болометров, а Ni – как металла, обладающего наибольшим ТКС. Характеристики болометров, приведенные в таблице 2, были измерены с помощью экспериментальной установки, представленной на рисунке 3. Для упрощения проводимых в ходе эксперимента процедур, состоящих из многократного цикла измерений, была разработана система автоматизации сбора данных, описанная в главе 4.



а) б) в)

Рисунок 2 – Конструкция макетов болометров с обозначением линейных размеров: а) вид сверху; б) вид снизу; в) фото

Таблица 2 – Характеристики разработанных макетов болометров

Параметр	Ti	Ni	$Ti_{50.5}Ni_{49.5}$
R_V, мВ/Вт	28,8 ± 0,4	4,53 ± 0,05	80,7 ± 0,8
τ, мс	293 ± 8	301 ± 7	278 ± 6
H, 10^{-4} Дж/К	1,97 ± 0,07	3,2 ± 0,2	1,39 ± 0,05
G, 10^{-3} Вт/К	0,68 ± 0,01	1,07 ± 0,06	0,51 ± 0,01
V_J, пВ (Δf = 1 Гц)	14,96 ± 0,01	5,10 ± 0,02	23,27 ± 0,03
V_{th}, пВ (Δf = 1 Гц)	1,71 ± 0,06	0,32 ± 0,02	4,4 ± 0,2

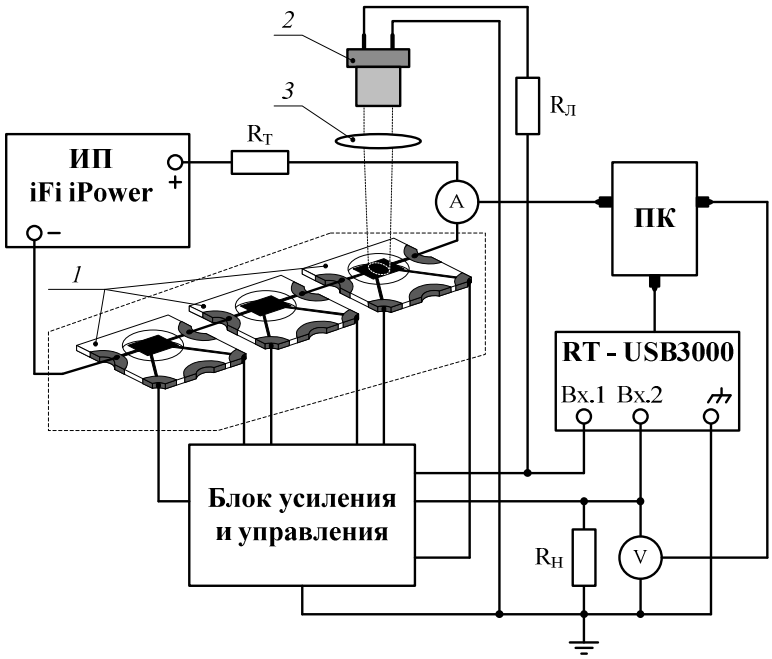


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки измерения характеристик болометров: 1) болометры; 2) лазерный диод; 3) фокусирующая линза; RT-USB3000 – модуль аналоговых сигналов с 14-битным АЦП

Далее по известным методикам с использованием полученных результатов были произведены расчеты, необходимые для построения частотной зависимости *NEP* для трех исследуемых болометров. В итоге, соотношения их *NEP*, рассчитанные согласно выражению (8), соответствовали результатам эксперимента, представленным на рисунке 4.

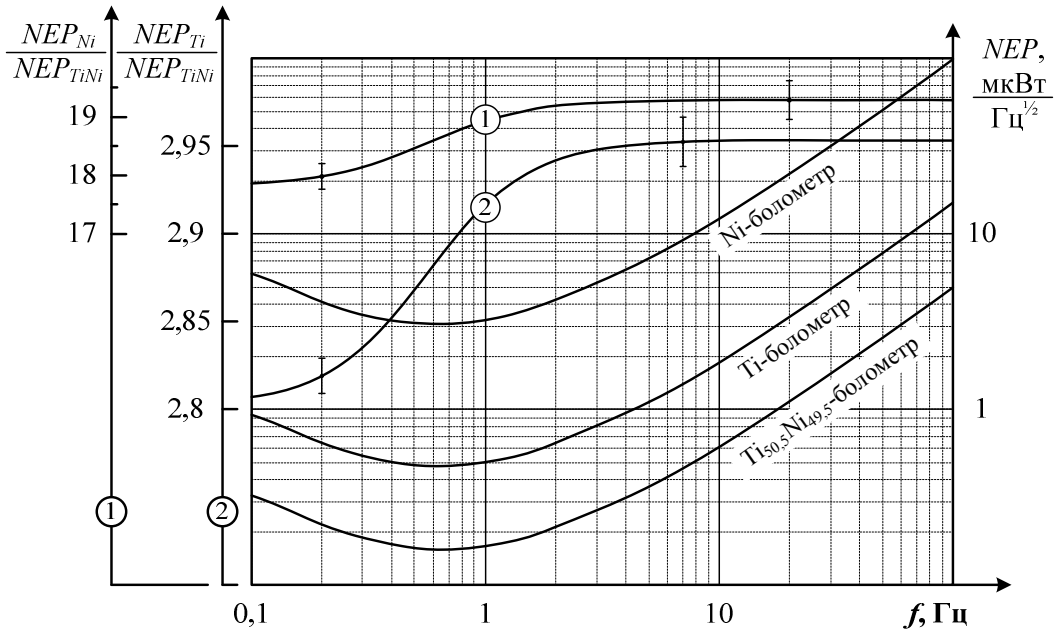


Рисунок 4 – Частотная зависимость *NEP* болометров и их сравнительная оценка

В итоге был сделан вывод, что $Ti_{50,5}Ni_{49,5}$-болометр 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.

Расчеты, проведенные согласно (9) на основании известных литературных данных также подтвердили, что сплавы на основе TiNi находятся в числе наиболее перспективных материалов для неохлаждаемых болометров. Наряду с этим, результаты работы показали, что установление зависимости τ от размеров резистивных элементов позволит снять ограничения оценки *NEP* неохлаждаемых металлических болометров. Для этого предложен алгоритм подобных исследований, который может быть также использован для оценки эффективности неохлаждаемых болометров из металлов и их сплавов, основанный на измерении характеристик резистивных элементов известных размеров, при их нагреве под действием тока смещения в импульсном режиме.

В третьей главе диссертации описаны результаты экспериментальных исследований разработанных макетов болометров в составе измерителя средней мощности излучения и суммарной солнечной радиации, а также модельной оценки предела обнаружения потенциального анализатора паров ртути в открытой атмосфере.

Для исследования Ni-, Ti- и $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометров в качестве детекторов средней мощности излучения использовалась схема измерения, представленная на рисунке 3. Источниками оптического излучения служили лазерные диоды. В качестве эталонного прибора выступал термоэлектрический приемник 818P-001-12 совместно с блоком 841-P-USB. Расчет мощности излучения, измеряемой болометрами, учитывал собственный разогрев (δP) резистивных элементов и проводился согласно выражениям:

$$P_{изл.} = \frac{\Delta V}{k_{ус.} R_V} - \delta P, \tag{10}$$

$$\delta P = \frac{I \Delta V}{k_{ус.}}, \tag{11}$$

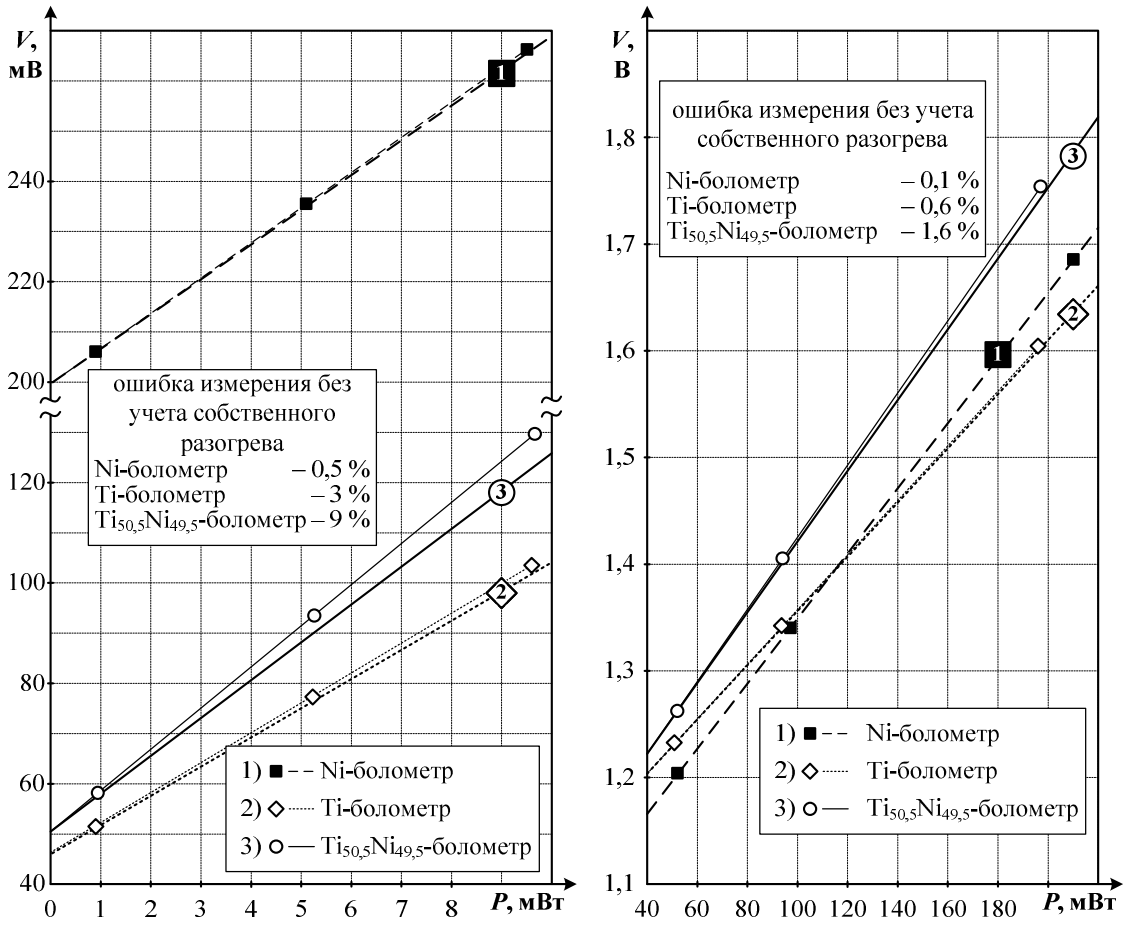
где $k_{ус.}$ – коэффициент усиления схемы; ΔV – падение напряжение на болометре в результате воздействия оптическим излучением, измеряемое на выходе схемы усиления [В]. Сравнение практических результатов измерения с модельными оценками показало (рисунок 5), что проведение расчета $P_{изл.}$ без учета δP может приводить к существенным ошибкам его измерения. Для учета δP в экспериментальных исследованиях помимо вольтметра необходимо было дополнительно использовать амперметр. Вместе с тем установлено, что величина ошибки измерения $P_{изл.}$ без учета δP является постоянной. Следовательно, предварительно оценив эту величину для определенного болометра и схемы усиления как дополнительный коэффициент к аналитическому выражению (10) вместо δP, появляется возможность контролировать только один параметр ΔV. Данный способ компенсации δP является более практичным в сравнении с существующими методами.

В итоге результаты измерения показали следующее:

– данные Ti- и $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометров соответствовали показаниям эталонного приемника;

– данные Ni-болометра отличались от показаний образцового прибора, что объясняется нелинейной температурной зависимостью сопротивления никеля;

– при измерении $P_{изл.}$ необходимо выбирать материал резистивного элемента болометра с линейной температурной зависимостью электросопротивления, тогда как его чувствительность определяет только диапазон измерений.



а) б)

Рисунок 5 – Зависимость выходного напряжения экспериментальной установки от измеряемой мощности излучения: а) до 10 мВт б) до 220 мВт

На основании полученных результатов сделан вывод, что в ходе практических исследований, неохлаждаемые металлические болометры продемонстрировали высокую стабильность параметров и возможность эффективной замены фотодиодных и термоэлектрических приемников в измерителях энергетических параметров лазерного излучения.

Проведены модельные оценки предела обнаружения анализатора паров ртути в открытой атмосфере с использованием в своем составе неохлаждаемых металлических болометров. Массовая концентрация искомого газового компонента, измеряемая атомно-абсорбционным методом в нг/м^3, определяется согласно закону Бугера – Ламберта – Бера:

$$C(U) = \frac{10^6 M \ln(U_0/U)}{N_A \sigma L}, \qquad (12)$$

где U_0 и U – выходное напряжение приемного блока, эквивалентное оптической мощности излучения сравнительного и рабочего каналов соответственно [В]; M – молярная масса искомого газового компонента [г/моль]; N_A – число Авогадро, $6 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$; L – длина оптической оси рабочего канала [см]; σ –

площадь сечения поглощения анализируемого компонента [см^2]. Эквивалентом предела обнаружения анализатора служило утроенное значение его инструментальной погрешности измерения:

$$\Delta C(U) = \left[\left(\left| \frac{dC(U)}{dU_0} \right| \Delta U_0 \right)^2 + \left(\left| \frac{dC(U)}{dU} \right| \Delta U \right)^2 + \left(\left| \frac{dC(U)}{d(\sigma L)} \right| \Delta(\sigma L) \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (13)$$

где ΔU_0 и ΔU – среднеквадратическое напряжение шума в единичной полосе частот, приведенное к выходу приемного устройства сравнительного и рабочего каналов соответственно [В]; $\Delta(\sigma L)$ – совместная погрешность площади сечения поглощения паров ртути и длины оптической оси рабочего канала [см^3].

Для оценки $C(U)$ и $\Delta C(U)$ были взяты следующие исходные величины: σ = $3{,}3 \cdot 10^{-14}$ см^2; L = 100 см; $P_{изл.\ 253{,}652\ нм}$ = 10 мВт; $\Delta(\sigma L)$ = $0{,}001 \cdot \sigma L$. Расчет предусматривал применение оптического фильтра (к примеру, 10MLF10-254 с коэффициентом пропускания не более 12 % на длине волны 254 нм). Для устранения влияния скорости движения воздушной массы на измерения концентрации газового компонента в открытой атмосфере частота регистрации сигнала измерения должна быть выше 500 Гц. В связи с частотной зависимостью вольт-ваттной чувствительности тепловых детекторов:

$$R_V(f) = \frac{R_V}{\sqrt{1 + (2\pi\tau f)^2}}, \quad (14)$$

использование разработанного $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометра в составе анализатора оказалось неэффективным для определения фоновых концентраций паров ртути. Поэтому был произведен расчет характеристик $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометра с меньшей толщиной резистивного элемента по апробированной методике исходя из параметров никелевого болометра НБГ-1: l = 1,8 мм; h = 1,2 мм; w = 0,1 мкм; R_V составляла 1,5 и 0,5 В/Вт при частотах модуляции 9 и 80 Гц, соответственно. В итоге потенциальный $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометр с резистивным элементом идентичных с НБГ-1 размеров при условии I = 16,6 мА, η = 95 %, τ = 6 мс, обладал $NEP(1\ кГц)$ = 1,7 нВт/Гц$^{1/2}$.

Расчет ΔU_0 и ΔU проведен для неохлаждаемых болометров идентичных размеров, включенных в разные плечи моста Уитстона. В качестве усилителя разностного сигнала был использован инструментальный усилитель INA163 с $k_{ус.}$ = 100. В итоге $\Delta U_0 = \Delta U \approx 2 \cdot 10^{-7}$ В, что при $U_0 = k_{ус.} \cdot P'_{изл.} \cdot R_V(1\ кГц)$ соответствовал отношению сигнал-шум на выходе схемы усиления 109,6 дБ. Зависимость $C = f(\Delta C)$ потенциального анализатора паров ртути в открытой атмосфере, иллюстрирующая его инструментальную погрешность измерения с использованием $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометра, а также показывающая эффективность применения ведущих моделей измерительных устройств в качестве эталонных средств калибровки приемного блока, представлена на рисунке 6. Проведенная оценка предела обнаружения анализатора предполагала использование в его составе известных УФ лазерных систем, шумы которых пренебрежимо малы на фоне шумов его аппаратной части. Таким образом, расчетный предел обнаружения потенциального анализатора паров ртути в открытой атмосфере составил 1,5 нг/м^3.

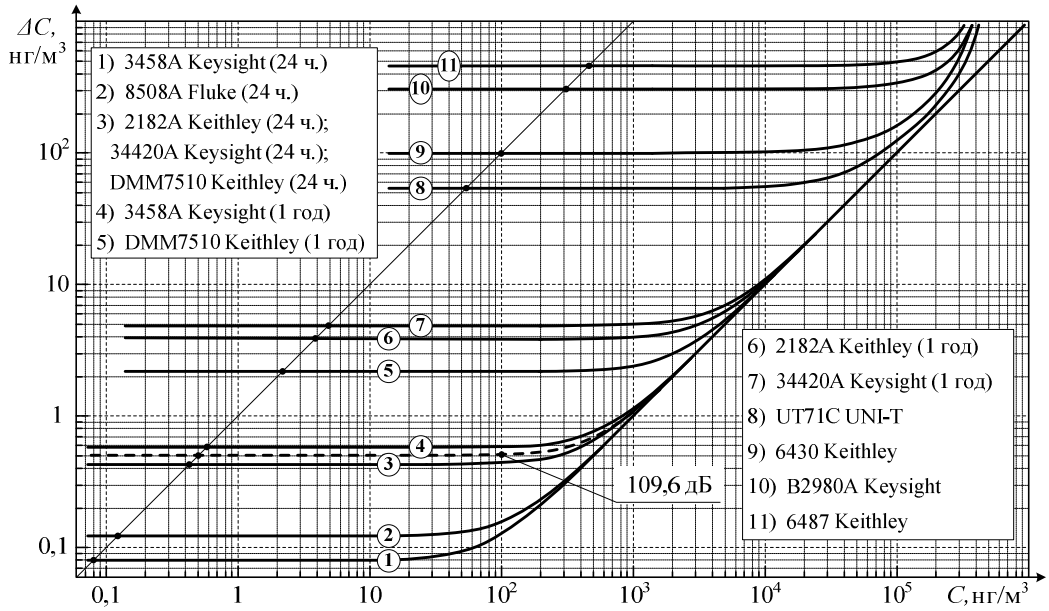


Рисунок 6 – Зависимость массовой концентрации паров ртути и погрешности её измерения (в скобках указано время, прошедшее с момента поверки приборов)

В итоге сделан вывод, что применение детекторов с NEP ≤ 1 нВт/Гц$^{1/2}$ при рабочей частоте свыше 500 Гц и отношением сигнал-шум 110 дБ в составе анализатора является достаточным для обнаружения фоновых концентраций паров ртути в открытой атмосфере. При этом использование неохлаждаемых металлических болометров с соответствующими параметрами является предпочтительным с точки зрения простоты конструкции и высоких эксплуатационных параметров.

Для измерения суммарной солнечной радиации был использован один разработанный $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометр. Его входным окном служило кварцевое стекло марки КИ с коэффициентом пропускания 0,9 в спектральном диапазоне 0,28 – 2,8 мкм. Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 7. Полученные данные после обработки сравнивались с показаниями пиранометра СМР-11 (Kipp&Zonen, Нидерланды), расположенного вблизи места проведения эксперимента. Результаты сравнения представлены в таблице 3. Плотность потока солнечного излучения рассчитывалась согласно выражению:

$$Q_{\Sigma} = \frac{10}{9} \cdot \beta \cdot \frac{\Delta V}{A k_{ус.} R_V}, \qquad (11)$$

где A – апертура $Ti_{50.5}Ni_{49,5}$-болометра [м^2]; β – поправочный коэффициент, учитывающий компенсацию δP. Как видно, результаты измерения суммарной солнечной радиации разработанным макетом пиранометра соответствовали показаниям пиранометра СМР-11, рекомендованного службой Росгидромет.

Таблица 3 – Результаты измерения суммарной солнечной радиации

Дата:	30.07.12	31.07.12	1.08.12	2.08.12	3.08.12	4.08.12	5.08.12
Приемник	Q_{Σ}, Вт/м^2						
Болометр	690 ± 10	700 ± 10	259 ± 4	603 ± 7	119 ± 2	619 ± 9	376 ± 5
СМР-11	690 ± 10	700 ± 10	264 ± 4	610 ± 10	124 ± 2	621 ± 9	379 ± 6

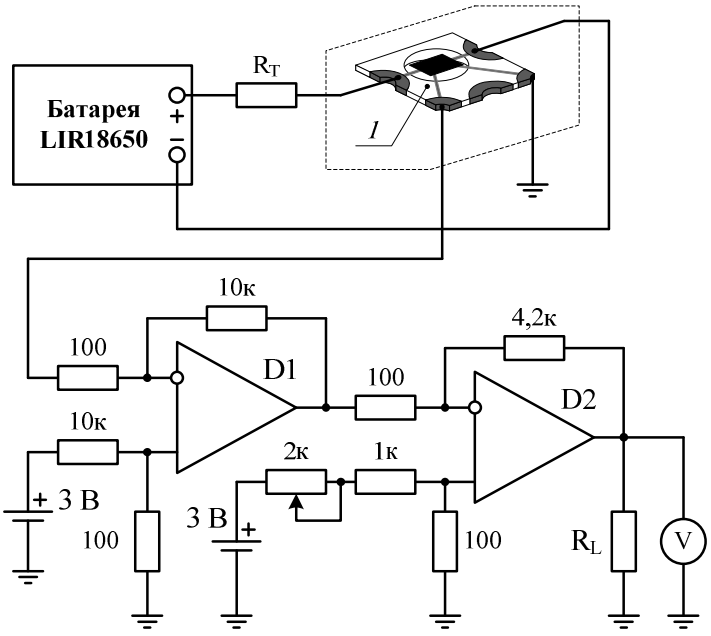


Рисунок 7 – Схема экспериментальной установки измерения суммарной солнечной радиации: 1) $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометр

Модельные оценки установили, что для исследуемого макета пиранометра на базе разработанного $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-болометра $\beta = 0{,}92$. $A = 1{,}6 \cdot 10^{-6}$ м^2, что на два порядка меньше приемной площадки термоэлектрического приемника СМР-11. На рисунке 8 представлена зависимость погрешности макета пиранометра от измеряемой суммарной солнечной радиации и проведено её сравнение с результатами эксперимента. В таблице 5 приведены ключевые характеристики термоэлектрического приемника коммерческого пиранометра СМР-11 и потенциального $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-приемника (два болометра, работающих по дифференциальной схеме), а также показано их количественное отличие.

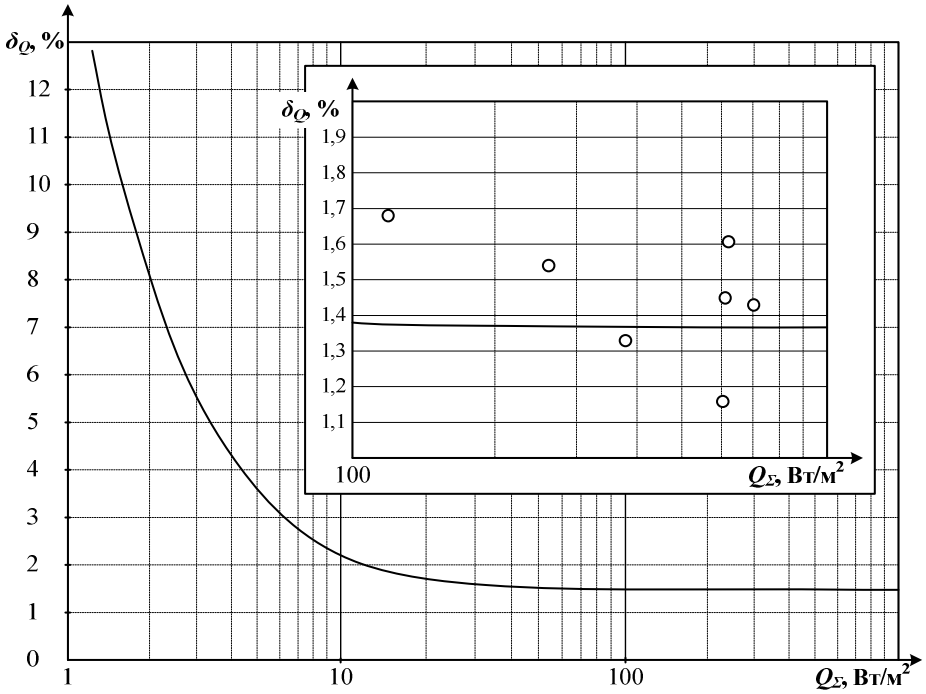


Рисунок 8 – Зависимость погрешности макета пиранометра от измеряемой суммарной солнечной радиации и результаты эксперимента

Таблица 4 – Сравнение приемников СМР-11 и разработанного макета

Параметр	Приемник СМР-11	$Ti_{50.5}Ni_{49.5}$-приемник	Отношение
Время отклика (уровень сигнала 95 %)	5 с	0,9 с	5,6
Температурное смещение или его эквивалент	мин. 2 Вт/м^2	0,4 Вт/м^2	мин. 5
Чувствительность	7-14 мкВ/Вт/м^2	130 нВ/Вт/м^2	53-107
Апертура приемника	450 мм^2	1,6 мм^2	281
Пиковое шумовое напряжения приемника	14-28 мкВ	52 нВ	> 270

В итоге сделан вывод, что применение высокочувствительных неохлаждаемых металлических болометров в актинометрических приборах позволит уменьшить предел обнаружения и время измерения анализируемой величины, а также повысить эксплуатационные характеристики и снизить массогабаритные параметры прибора.

В четвертой главе диссертации приведены результаты разработки системы автоматизации процесса измерения характеристик неохлаждаемых болометров с возможностью смены временных параметров сбора данных.

Функциональной задачей разработанной системы управления являлось создание аппаратно-программного комплекса на базе микроконтроллера (МК), осуществляющего формирование последовательности 3-х основных сигналов и 1-го тактового с возможностью оперативной смены длительности импульсов и интервалов между ними в пакетно-импульсном режиме. Основными сигналами управления задавался режим работы герконовых реле, осуществляющих поочередное подключение исследуемых болометров к каскаду усиления и задание соответствующего коэффициента усиления. Схема блока усиления и управления и эпюры напряжения, поясняющие его работу, представлены на рисунках 9 и 10. Тактовые сигналы служили для формирования импульсов питания полупроводникового лазера.

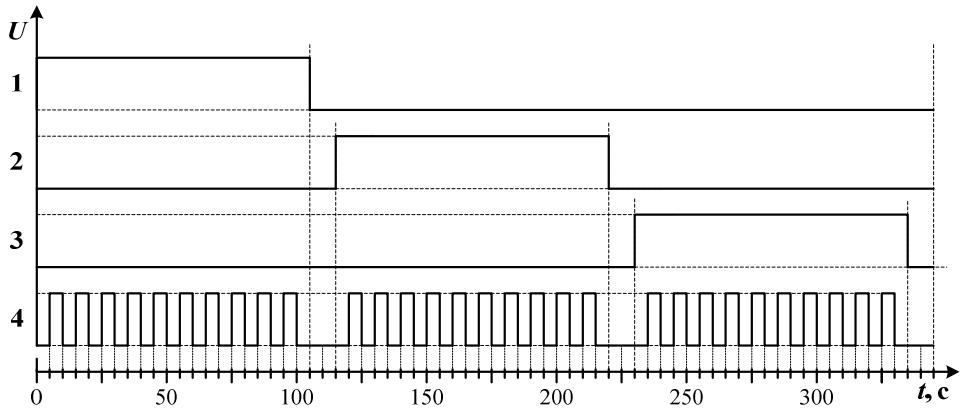


Рисунок 9 – Эпюры напряжения на выходе МК

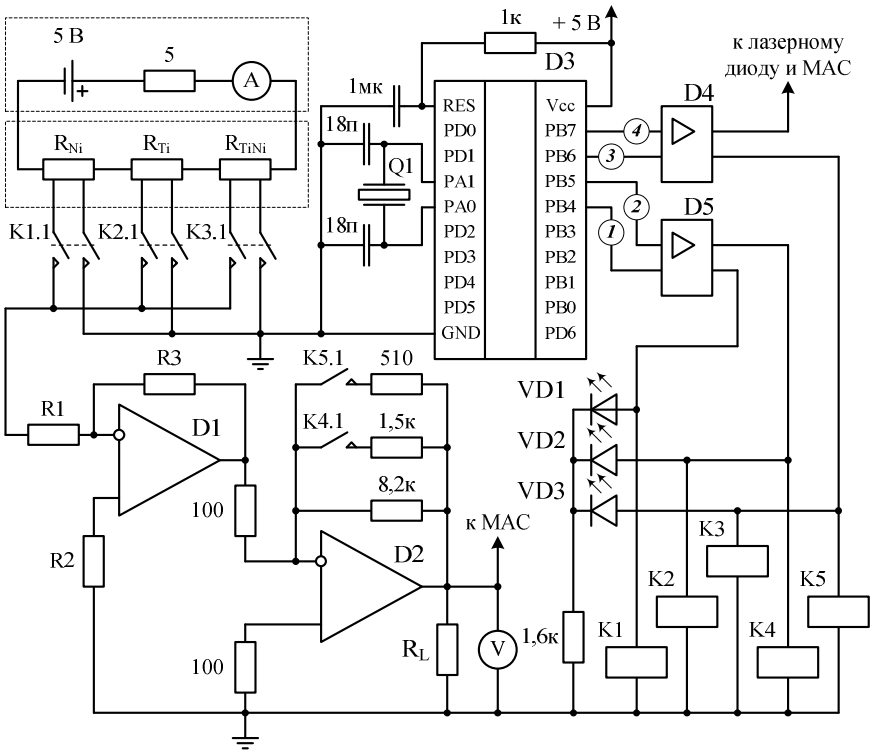


Рисунок 10 – Принципиальная электрическая схема блока усиления и управления

Разработанный аппаратно-программный комплекс представлял собой доработанную версию созданной ранее системы управления и контроля «BppS». Модификация коснулась системного программного обеспечения (СПО), осуществляющего смену режимов работы системы и изменения длительностей выходных сигналов без вмешательства оператора в программный код МК. Прикладное программное обеспечение МК было написано на макроассемблере, реализующем алгоритм работы МК (рисунок 11), как наиболее оптимальном машинно-ориентированном языке с точки зрения затрат оперативной памяти и машинного времени выполнения одной команды. СПО было написано в среде Borland Delphi Enterprise Version 7.0, а пользовательский интерфейс на языке Object Pascal. На рисунке 12 показано начальное диалоговое окно СПО, где осуществляется выбор режима работы МК, ввод или корректировка параметров сигналов управления и вывод данных.

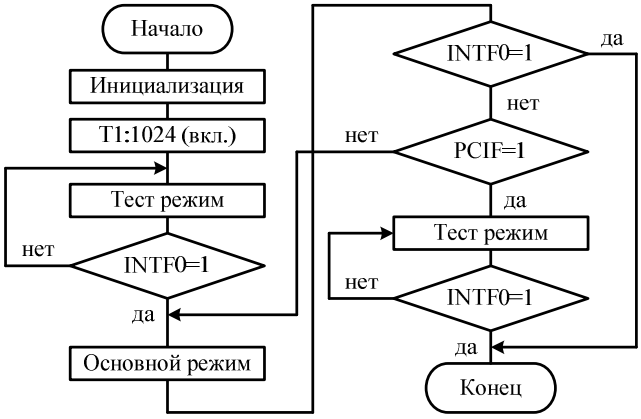


Рисунок 11 – Общий алгоритм работы МК.

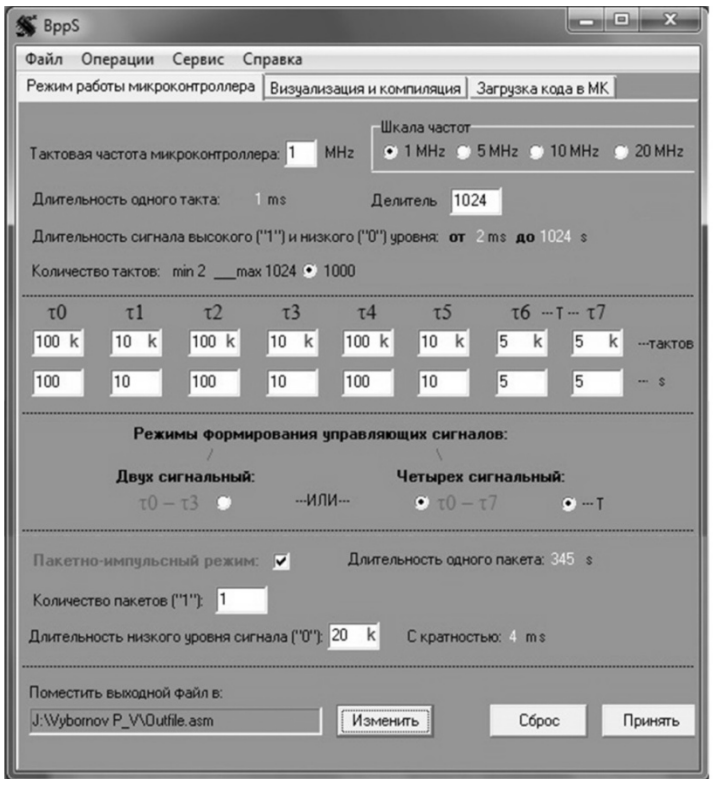


Рисунок 12 – Основное диалоговое окно СПО

Программный код компилятора «avrasm32.exe» для МК серии AVR, используемый в составе СПО, был приобретен в 2005 году по лицензионному соглашению у его разработчика. Практические испытания системы управления на базе МК ATtiny-2313 показали полное соответствие поставленной задачи по функциональным, техническим и эксплуатационным параметрам.

В заключении представлены основные результаты диссертационной работы:

1. Сформулирован новый критерий выбора материала резистивного элемента неохлаждаемых металлических болометров и условие сравнения их пороговых чувствительностей.

2. 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.

3. На основании данных п.1 и п.2 разработана методика, позволяющая произвести сравнительную оценку эффективности использования металлов и их сплавов в качестве резистивных элементов неохлаждаемых болометров, которая показала хорошее соответствие модельных оценок с результатами экспериментов.

4. 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.

5. 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.

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

7. Модельные оценки показали, что применение неохлаждаемых металлических болометров с пороговой чувствительностью менее 1 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.

8. 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.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Выборнов П. В., Ерофеев В. Я., Тихомиров А. А., Шейдель А. И. Датчики и индикаторы на основе металла с памятью формы для систем мониторинга окружающей среды // Датчики и системы. 2012. №3. С. 61-66.
2. Vybornov P., Erofeev V. TiNi alloy as a highly sensitive bolometer material // Sensors & Materials. 2014. V. 26, № 1. P. 1-7.
3. Vybornov P., Andreev Yu. Perspective material and applications of uncooled metal bolometers // IEEE Sensors J. 2016. V. 16, № 16. P. 6155-6160.
4. Выборнов П. В., Кабанов М. В., Андреев Ю. М. Алгоритм оценки эффективности неохлаждаемых болометров на основе металлов и их сплавов // Известия ВУЗов. Физика. 2016. Т. 59, № 9. С. 170-172.

Патенты РФ на изобретение

5. Способ измерения мощности лазерного излучения: пат. 2345334 Рос. Федерация: МПК^7 G 01 J 5/58 / Выборнов П. В., Ерофеев В. Я., заявитель и патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2007133060/28. заявл. 03.09.2007, опубл. 27.01.2009, Бюл. № 3.
6. Оптический абсорбционный газоанализатор: пат. 2421709 Рос. Федерация: МПК^7 G 01 N 21/61 / Выборнов П. В., Ерофеев В. Я., заявитель и патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2009121770/28. заявл. 08.06.2009, опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17.

7. Актинометрический приемник болометрического типа: пат. 2469282 Рос. Федерация: МПК[7] G 01 J 5/20 / Выборнов П. В., Ерофеев В. Я., Зуев С. В., Тихомиров А. А., заявитель и патентообладатель Томск, ИМКЭС СО РАН. – № 2011122464/28. заявл. 02.06.2011, опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.

Свидетельства об официальной регистрации программ ЭВМ

8. Программа “Управление и контроль – пакетно-импульсный режим”. А.С. 2007610893 РФ / Выборнов П. В., заявитель и патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2006614596. заявл. 27.12.2006, опубл. 22.02.2007.
9. Программа “Управление и контроль”. А.С. 2007610894 РФ / Выборнов П. В., заявитель и патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2006614597. заявл. 27.12.2006, опубл. 22.02.2007.
10. Программа “Bipolar pulse power supply («BppS»)”. А.С. 2007611346 РФ / Выборнов П. В., заявитель и патентообладатель Томск. ИМКЭС СО РАН. – № 2007610522. заявл. 15.02.2007, опубл. 28.03.2007.

Доклады в материалах научных конференций

11. Выборнов П. В., Терликбаев Р. А. Микроконтроллерное управление в источнике накачки лазеров на парах металлов // Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2005». Томск.: Изд-во ТУСУРа, 2005. В четырёх частях. Ч. 1. С. 366.
12. Выборнов П. В., Ерофеев В. Я. Оптический абсорбционный газоанализатор, оснащенный чувствительным элементом из металла с эффектом памяти формы // Восьмое Сибирское совещание по климатоэкологическому мониторингу: Материалы российской конференции. / Под ред. М. В. Кабанова. Томск.: Аграф-Пресс, 2009. С. 391-393.
13. Выборнов П.В., Ерофеев В.Я. Разработка датчика из металла с памятью формы для задач оптической спектроскопии // Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии: Материалы IV Всероссийской конференции молодых ученых. Томск.: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2009. С. 297-299.
14. Выборнов П.В., Ерофеев В.Я. Тепловой приемник оптического излучения из металла с памятью формы // Научная сессия ТУСУР-2010: Материалы докладов Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск.: В-Спектр, 2010. Ч. 4. С. 122-125.
15. Выборнов П. В., Ерофеев В. Я. Высокочувствительный приемник из металла с эффектом памяти формы: Тезисы докл. // II Научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии». Томск, май, 2011. Томск.: Изд-во ТПУ, 2011. С. 10-11.
16. Vybornov P., Erofeev V. Laser power measurement with shape-memory-metal sensor: Abstracts // X International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser». Tomsk, September, 2011. Tomsk.: Publishing House of IAO SB RAS, 2011. С. 115.

17. Выборнов П. В., Ерофеев В. Я. Приемники на основе титановых сплавов и их применение в устройствах мониторинга окружающей среды // Тезисы докладов VIII Всероссийского симпозиума «Контроль окружающей среды и климата «КОСК-2012». Томск.: Аграф-Пресс, 2012. С. 49.
18. Vybornov P., Erofeev V. Investigation of the characteristics of the bolometer with TiNi sensitive element: Abstracts // XI International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser». Tomsk, September, 2013. Tomsk.: Publishing House of IAO SB RAS, 2013. P. 112-113.
19. Vybornov P., Erofeev V. Optoelectronic system based on uncooled metal bolometers: Abstracts // XII International Conference «Atomic and Molecular Pulsed Laser». Tomsk, September, 2015. Tomsk.: Publishing House of IAO SB RAS, 2015. P. 124.