

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

Объект авторского права
УДК 681.586:621.315.592

ЧАН
Ван Чиеу

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
И ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ
ТЕПЛОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА КРЕМНИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника,
приборы на квантовых эффектах

Минск 2025

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель	Стемпицкий Виктор Романович , кандидат технических наук, доцент, проректор по научной работе учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (БГУИР)
Официальные оппоненты:	Насонова Наталья Викторовна , доктор технических наук, доцент, начальник научно-исследовательской лаборатории научно-внедренческого частного унитарного предприятия «НИИВТЭК» Петлицкая Татьяна Владимировна , кандидат технических наук, доцент, начальник сектора государственного центра «Белмикрoанализ» научно-технического центра ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Оппонирующая организация	Учреждение образования «Белорусская государственная академия связи»

Защита состоится 30 июня 2025 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.03 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. +375172938989.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан 30 мая 2025 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



Г. А. Пискун

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время успешно развиваются новые научные направления, связанные с созданием микроэлектронных тепловых детекторов в интегральном исполнении, предназначенных для использования в различных отраслях народного хозяйства. Одним из перспективных направлений усовершенствования данного типа устройств является создание эффективных конструкций интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа (микроболометров), которые представляют собой резистивный элемент, выполненный из материала с низкой теплоемкостью и высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС).

Данный класс приборов широко используется в системах видеонаблюдения, безопасности и управления производственными процессами, в автомобильной и бытовой электронике, конструкции очков ночного видения для наблюдения за военными объектами и при выполнении поисково-спасательных работ, для обнаружения пожаров и трещин в земной поверхности, а также в медицинской визуализации.

В связи с этим задачи разработки новых и улучшения характеристик существующих конструктивных решений приборов и устройств на основе микроболометров, а также поиск перспективных материалов и процессов для их изготовления представляются весьма актуальными.

Эффективным инструментом для решения перечисленных выше задач является применение методов компьютерного моделирования для всестороннего анализа физических процессов в исследуемых приборных структурах, учета механических напряжений, оптимизации оптических и геометрических параметров конструктивных элементов, а также обеспечения возможности схемотехнического моделирования устройства в составе систем обработки данных.

С точки зрения функциональных возможностей, а также соотношения скорости и точности моделирования описанных процессов, оптимальным решением является использование программного комплекса Coventor, реализующего полный цикл проектирования устройств на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС).

В диссертации представлены результаты исследования приборных структур микроболометров, сформированных по технологии МЭМС, обладающих рядом преимуществ перед другими реализациями аналогичных по функционалу и назначению приборов: малая потребляемая мощность, относительно низкая стоимость, возможность функционирования при комнатной температуре.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами, темами

Тема диссертации утверждена приказом ректора учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» от 14.12.2020 № 409-О, уточнена по результатам первичной экспертизы диссертации в совете по защите диссертаций Д 02.15.03 и соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг., утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 (п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: микро-, опто- и СВЧ-электроника, фотоника, микросенсорика»).

Диссертационная работа выполнялась в рамках обеспечения решения задач задания 3.3 «Разработка методов формирования конструктивных элементов и подходов к компьютерному проектированию приборных структур интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов на основе кремниевой технологии» государственной программы научных исследований «Фотоника, и электроника для инноваций» на 2021–2025 гг. на тему «Разработка подходов к компьютерному проектированию конструктивных решений интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа и в твердотельном исполнении», номер госрегистрации 20212766.

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является разработка методик компьютерного моделирования и оптимизации механических, тепловых, оптических и электрических характеристик неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа в интегральном исполнении, изготовленных с применением кремниевой технологии с термочувствительным слоем на основе аморфного кремния и оксида ванадия, предназначенных для регистрации ИК-излучения в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*:

1. Провести анализ областей применения, технических характеристик и особенностей функционирования современных неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа в интегральном исполнении с различными материалами активной области, подходов к компьютерному моделированию подобного типа устройств.

2. Предложить и исследовать структуры неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа в интегральном исполнении, изготовленных с применением кремниевой технологии с термочувствительным слоем на основе аморфного кремния и оксида ванадия.

3. Выполнить компьютерное моделирование механических, оптических, электрических и тепловых характеристик микроболометров для дальнейшей оптимизации конструктивных параметров и выработки предложений по их практическому применению.

4. На основе данных экспериментальных измерений параметров тонких пленок, входящих в состав структуры микроболометра, сформированного в условиях опытно-промышленного производства, определить действительную и мнимую части комплексного показателя преломления исследуемых пленок для обеспечения достоверности результатов компьютерного проектирования, а также оптимальный порядок относительного расположения слоев конструкционных материалов микроболометров и их толщин в поглощающей мембране для достижения наибольшего значения среднего коэффициента поглощения в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм.

5. Разработать базовую электрическую модель, предназначенную для схемотехнического моделирования структур микроболометров на основе оксида ванадия, а также исследовать схемотехнические решения для обработки сигналов, формируемых матрицей неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа.

Объектом исследования являются неохлаждаемые тепловые детекторы болометрического типа в интегральном исполнении, изготовленные с применением кремниевой технологии с термочувствительным слоем на основе аморфного кремния и оксида ванадия.

Предметом исследования являются механические, тепловые, оптические и электрические характеристики неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа в интегральном исполнении с термочувствительным слоем на основе аморфного кремния и оксида ванадия, а также методы их компьютерного проектирования и оптимизации.

Научная новизна

1. Установленные посредством компьютерного моделирования закономерности влияния параметров конструкции, типов используемых материалов термочувствительной мембраны на эксплуатационные характеристики микроболометров с термочувствительным слоем на основе аморфного кремния и оксида ванадия.

2. Предложенная и реализованная на языке программирования Python методика расчета и калибровки оптических характеристик материалов конструкции теплового неохлаждаемого детектора болометрического типа – действительной и мнимой части комплексного показателя преломления, основанная на использовании метода Ньютона – Рафсона, которая позволяет определить оптимальный порядок и толщины слоев поглощающей мембраны, а также повысить величину среднего поглощения микроболометра.

3. Реализованная на языке Verilog-A базовая электрическая модель микроболометра, предназначенная для описания его статических и динамических характеристик с учетом влияния эффекта самонагрева и воздействия теплового потока, а также типа материала термопоглощающего слоя, обеспечивающая возможность схемотехнического моделирования данного типа устройств в программных комплексах проектирования интегральных микросхем.

Положения, выносимые на защиту

1. В рамках термомеханического компьютерного моделирования характеристик неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа в интегральном исполнении с термочувствительным слоем на основе аморфного кремния и оксида ванадия установлено, что улучшение механической прочности пикселя обеспечивается определением в его конструкции оптимальных значений ширины и длины плеча, выбором толщины и типа материала термопоглощающего слоя, а также учетом остаточных механических напряжений в каждом из слоев.

2. Применение реализованной на языке программирования Python методики расчета и калибровки оптических характеристик материалов теплового неохлаждаемого детектора болометрического типа – значение действительной и мнимой части комплексного показателя преломления, основанной на использовании метода Ньютона – Рафсона, обеспечивает точность компьютерного моделирования с ошибкой, не превышающей 6 % для спектра пропускания и 3 % для спектра отражения по сравнению с данными натурных измерений в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм.

3. Структура неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа, содержащего мембрану, подвешенную на расстоянии 3 мкм над кремниевой пластиной типа КДБ-10, состоящую из последовательно осажденных пленок нитрида кремния, никрома (термопоглощающий слой) оксида ванадия (термочувствительный слой), оптимальные толщины и порядок расположения которых определены по результатам компьютерного моделирования с использованием рассчитанных с помощью предложенной методики значений комплексного показателя преломления и составляют для нижнего слоя Si_3N_4 – 70 нм, слоя NiCr – 4 нм, среднего слоя Si_3N_4 – 200 нм, термочувствительного слоя VO_x – 250 нм и верхнего слоя Si_3N_4 – 150 нм, обеспечивает величины среднего и пикового коэффициента поглощения в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм 0,86 и 0,99 о. е. соответственно.

4. Базовая электрическая модель, реализованная на языке описания аппаратуры Verilog-A, предназначенная для математического описания статических и динамических характеристик неохлаждаемого теплового детектора болометрического типа, отличающаяся учетом влияния эффекта

самонагрева и воздействия теплового потока, типа материала термопоглощающего слоя, которая обеспечивает возможность проведения схемотехнического моделирования данного типа устройств в программных комплексах проектирования интегральных микросхем с относительной погрешностью 1 и 2 % по сравнению с результатами приборного моделирования для статических и динамических характеристик соответственно.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад автора, заключающийся в разработке подходов и методик, получении, интерпретации и анализе результатов исследований. Совместно с научным руководителем кандидатом технических наук, доцентом Стемпицким Виктором Романовичем определены структура, цели и задачи исследования, обобщены основные научные результаты. Совместно с соавторами публикаций (Стемпицкий В. Р., Ловшенко И. Ю., Корсак К. В., Дао Динь Ха, Новиков П. Э., Завадский С. М., Голосов Д. А., Степанов А. А., Колос В. В., Губаревич А. А., Соловьев Я. А., Левчук Д. С., Чан Туан Чунг, Ган Н. С., Рощенко П. С., Садченко В. В.) осуществлялась подготовка, проведение исследований, обсуждение и интерпретация полученных результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на международных и республиканских научно-технических конференциях: 31-я Международная конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, РФ, 5–11 сентября 2021 года), XIX Международный симпозиум «Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование – NDTCS-2021» (Минск, РБ, 28-29 октября 2021 года), International Scientific and Technical Conference «Digital Technologies: Problems and Solutions for Practical Implementation in an Industry», (Toshkent, Uzbekistan, April 27–28, 2022).

Результаты диссертационных исследований внедрены в учебный процесс кафедры микро- и нанoeлектроники учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», а также переданы и используются в Ассоциации радиоэлектроники Вьетнама для анализа, улучшения характеристик и производства измерительных систем на основе интегральных неохлаждаемых болометрических тепловых детекторов с целью расширения диапазона и повышения точности обнаружения объектов.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертационных исследований опубликованы в 10 научных работах общим объемом 5,04 авторского листа. Из них 4 статьи

объемом 3,12 авторского листа в рецензируемых научных журналах в соответствии с пунктом 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 2 публикации в материалах и сборниках трудов научных конференций объемом 0,53 авторского листа, 3 тезиса докладов на научных конференциях объемом 0,55 авторского листа, 1 статья в других научных изданиях объемом 0,76 авторского листа.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав с выводами, заключения, списка использованных источников и приложений.

Общий объем диссертационной работы составляет 107 страниц, из них 63 страницы основного текста, 68 рисунков на 21 странице, 9 таблиц на 3 страницах, список использованных источников, включающий библиографический список из 105 наименований на 8 страницах и список публикаций автора из 10 наименований на 2 страницах, 3 приложения на 10 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В **первой главе** изложены результаты анализа современного состояния и тенденций развития тепловых детекторов. Рассмотрены приборные структуры неохлаждаемых инфракрасных детекторов в интегральном исполнении (микроболометров) и материалы, используемые в качестве термочувствительного слоя в приборных структурах данного типа.

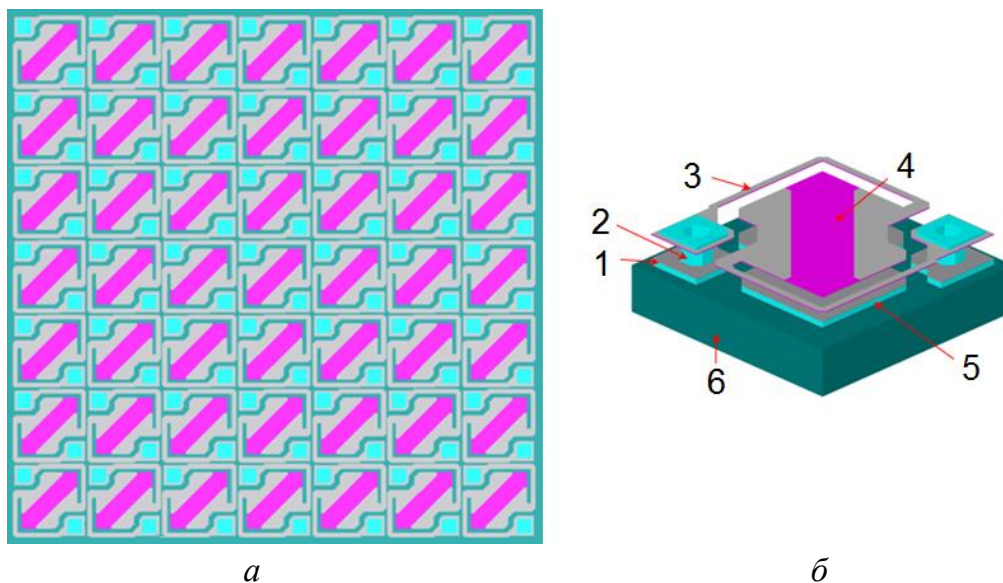
Выделяют две группы инфракрасных детекторов: детекторы фотонов и тепловые детекторы. В основе функционирования фотонных детекторов лежит принцип генерации пары свободных электронов и дырок при поглощении инфракрасных фотонов. Время отклика и чувствительность фотонных детекторов намного выше, по сравнению с тепловыми, однако для обеспечения эффективного функционирования их необходимо охлаждать и поддерживать постоянную температуру.

Принцип работы тепловых детекторов ИК-излучения основан на термоэлектрическом эффекте (термопары), тепловом расширении (ячейки Голея) или изменении сопротивления (микроболометр). В качестве термочувствительного слоя в последних применяется материал с очень малой теплоемкостью и большим температурным коэффициентом сопротивления. Приборы данного типа могут эффективно функционировать при комнатной температуре без необходимости охлаждения до криогенных температур, поэтому их также называют неохлаждаемыми инфракрасными детекторами.

С точки зрения соответствия требованиям, предъявляемым к термочувствительным материалам (высокое значение температурного

коэффициента сопротивления, умеренное удельное сопротивление, низкий уровень шума и совместимость с технологическим процессом изготовления кремниевых интегральных схем), наиболее перспективными являются аморфный кремний (α -Si) и оксид ванадия (VO_x).

Основным компонентом тепловых детекторов ИК-излучения на основе микроболометров является матрица в фокальной плоскости (МФП), представленная на рисунке 1, *а*, состоящая из отдельных термочувствительных пикселей, конструкция которого представлена на рисунке 1, *б*.



а – матрица в фокальной плоскости; *б* – отдельный пиксель микроболометра

Рисунок 1 – Основные компоненты тепловых детекторов
ИК-излучения на основе микроболометров

Типовая структура пикселя микроболометра, представленная на рисунке 1, *б*, состоит из электрического контакта (1), опоры или «ножки» (2) плеча или балки (3), термопоглощающего слоя (4), отражающего слоя (5), а также интегральной схемы считывания (ИСС), как правило, располагаемой под устройством (6).

Поглощающая тепловое излучение мембрана представляет собой многослойную, состоящую из тонких пленок структуру и включает чувствительный к ИК-излучению слой, сопротивление которого сильно зависит от температуры. Мембрана состоит из пленок проводящего и поглощающего (NiCr), диэлектрического (Si_3N_4) и термочувствительного (α -Si или VO_x) материалов. Воздушный зазор обеспечивается за счет опорных «ножек», которые также являются контактами микроболометра.

Важным этапом создания измерительных приборов на основе микроболометров является схемотехническое моделирование их отдельных компонентов с последующей интеграцией в состав системы цифровой обработки конечного устройства. В процессе преобразования теплового

излучения в цифровой сигнал (видеопоследовательность) малый ток, индуцированный ИК-излучением, интегрируется и отбирается в соответствующей элементарной ячейке. ИСС представляет собой интерфейс между МФП и блоком обработки сигналов и выполняет функции интеграции, усиления и мультиплексирования слабых зарядов детектора.

Во **второй главе** приведено описание методов и программных средств, используемых для проектирования интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа. Рассмотрены основные характеристики интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа, описана предложенная методика определения оптических коэффициентов преломления и поглощения слоев термочувствительной мембраны микроболометров. Представлен анализ функциональных возможностей программных средств моделирования механических и оптических характеристик микроболометров: комплексов Coventor и ANSYS Lumerical.

Показано, что обеспечение высокого уровня поглощения ИК-излучения мембраной микроболометра достигается за счет оптимизации расстояния между мембраной болометра и зеркалом на подложке с учетом длины волны теплового излучения λ . Для целевого диапазона длин волн от 8 до 14 мкм мембрану следует располагать на расстоянии, равном $\lambda/4$, что соответствует величинам от 2 до 3,5 мкм.

Предложена и программно реализована на языке программирования Python методика определения значений оптических параметров материалов, входящих в состав термочувствительной мембраны пикселя микроболометра, которая заключается в решении нелинейных уравнений путем построения последовательных приближений с использованием метода Ньютона –Рафсона. Данная методика позволяет рассчитать такие параметры отдельных слоев мембраны, как отражение, пропускание и поглощение, состоящих из различных компонентов, важнейшими из которых являются значения действительной n и мнимой k части комплексного показателя преломления.

Предложена обобщенная методика моделирования и оптимизации характеристик интегральных неохлаждаемых болометрических тепловых детекторов, включающая этапы разработки типовой приборной структуры микроболометра в программном комплексе Coventor, экспериментального исследования тестовых структур и измерения их параметров, расчета тепловых, механических, оптических, динамических и электрических параметров, оптимизации состава и геометрических характеристик пленок мембраны пикселя микроболометра, а также разработки электрической (компактной) модели на языке описания аппаратуры Verilog-A и схемы обработки данных проектируемого устройства с использованием платформы аналогового проектирования Cadence Virtuoso.

На определенных этапах исследований, требуется вычисление *средней ошибки* $\Delta_{\text{ср}}$ определения (моделирования) анализируемой величины, которая представляет собой среднее арифметическое абсолютных значений относительных погрешностей для всех значений входного параметра, например, длины волны, для которых производился расчет.

В **третьей главе** представлены результаты исследования эксплуатационных характеристик интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа на основе аморфного кремния и оксида ванадия.

Для пикселя микроболометра с термопоглощающим слоем на основе аморфного кремния исследованы варианты структур с различной геометрией активной области (ширина плеча, количество тонких пленок термопоглощающего слоя нитрида титана (TiN) и других параметров). По результатам моделирования установлено, что увеличение ширины плеча и количества поглощающих слоев приводит к снижению теплопроводности структуры.

В рамках исследования структуры пикселя микроболометра с размерами 16×16 мкм², состоящего из термочувствительной мембраны на основе аморфного кремния толщиной 0,1 мкм с термопоглощающим слоем нихрома (NiCr) толщиной 15 нм, расположенной на расстоянии 2,5 мкм над интегральной схемой считывания на опорах шириной 1 мкм, посредством термического анализа определена величина теплопроводности рассматриваемой структуры $G = 9,84 \cdot 10^{-8}$ Вт/К, а также рассчитаны значения постоянной времени $\tau = 380$ мкс и полной теплоемкости $C = 3,74 \cdot 10^{-11}$ Дж/К, при этом из-за джоулева нагрева устройство достигает максимальной температуры 303 К.

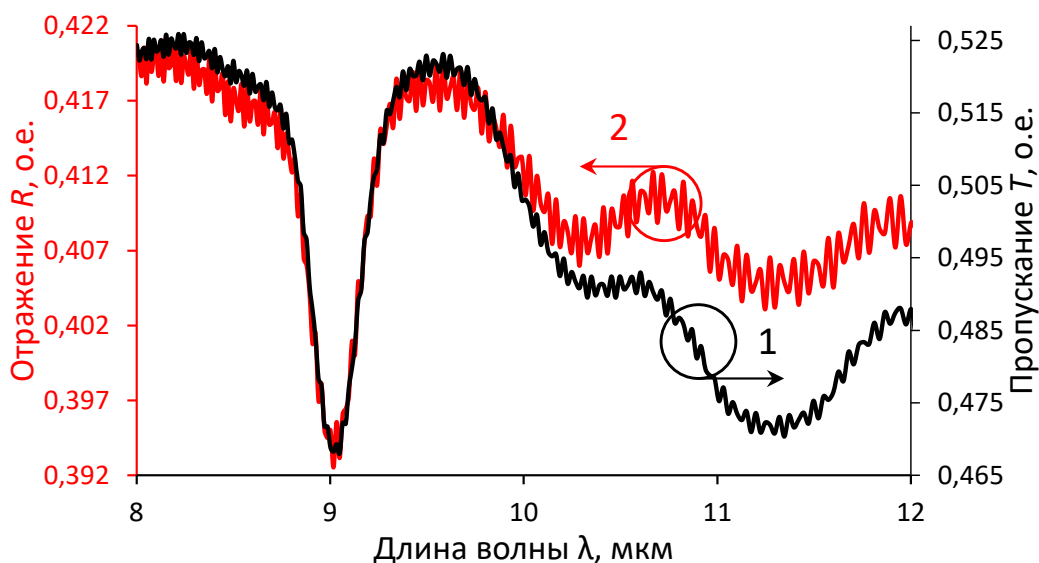
На основании результатов исследования теплового отклика пикселя микроболометра на импульс входного напряжения посредством переходного электротермического анализа установлено, что тепло рассеивается в подложке за счет тепловой проводимости «ножек» (опор) с характерной постоянной времени. Показано, что применение импульсного режима работы микроболометра (подача импульсов напряжения) предотвращает возможное повреждение пикселей из-за чрезмерного джоулева нагрева.

Посредством статического механического анализа исследовано влияние механических напряжений, возникающих в конструктивных материалах приборных структур микроболометров, на устойчивость конструкции. Установлено, что для обеспечения нормального функционирования микроболометра (уменьшения величины максимального отклонения термочувствительной мембраны от номинального значения) необходимо уменьшить внутренние механические напряжения в пленке NiCr. Для пленок Si₃N₄, напротив, это значение следует увеличивать.

По результатам исследования спектров пропускания и отражения экспериментально изготовленных тонких пленок материалов, входящих в состав термочувствительной мембраны пикселя микроболометра на основе оксида ванадия, с использованием оригинальной методики рассчитаны величины действительной и мнимой части комплексного показателя преломления, проведена оптимизация толщин механических и электрических характеристик пикселя микроболометра.

Данные экспериментальных исследований показали, что для всех измеренных спектров при величине длины волны, близкой к 9 мкм, имеется провал, обусловленный влиянием окружающей среды; кремниевая подложка в составе исследуемых структур оказывает влияние на характеристики измеряемых спектров, в частности, для пленок нитрида кремния влияние подложки в большей степени проявляется для спектра пропускания, а для пленок нихрома влияние ярко выражено для спектра отражения.

Результаты измерения спектров отражения и пропускания пленки оксида ванадия VO_x толщиной 100 нм представлены на рисунке 2.



1 – спектр пропускания; 2 – спектр отражения

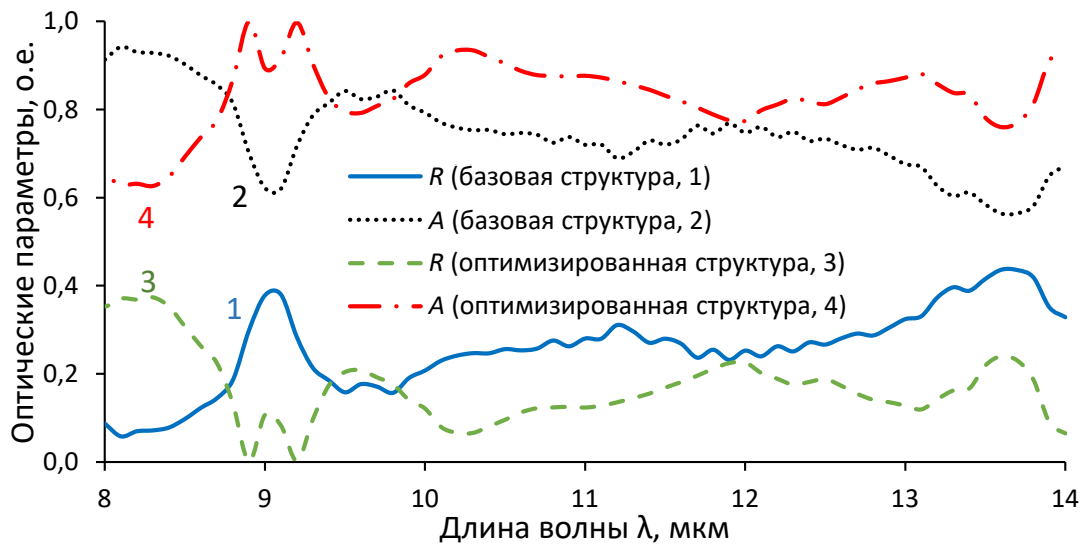
Рисунок 2 – Результаты измерения спектров пленки оксида ванадия VO_x

В рамках моделирования методом конечных разностей во временной области характеристик исследуемых структур на основе рассчитанных с использованием оригинальной методики значений действительной и мнимой части комплексного показателя преломления определены спектры поглощения, пропускания и отражения для диапазона длин волн от 8 до 14 нм.

В серии оптимизационных расчетов определены оптимальные с точки зрения обеспечения максимальной величины коэффициента поглощения параметры слоев, значения которых составили для нижнего слоя Si_3N_4 – 70 нм,

слоя NiCr – 4 нм, среднего слоя Si_3N_4 – 200 нм, термочувствительного слоя VO_x – 250 нм и верхнего слоя Si_3N_4 – 150 нм.

На рисунке 3 представлены результаты сравнения характеристик приборных структур (коэффициентов отражения R и поглощения A) микроболометров до и после оптимизации. Значение воздушного зазора между термочувствительной мембраной и отражающим слоем, которое обеспечивает увеличение величины среднего поглощения в диапазоне длин волн от $\lambda = 8$ до 14 мкм, составляет 3 мкм.



R – коэффициент отражения; A – коэффициент поглощения
Рисунок 3 – Зависимости оптических параметров структуры от длины волны падающего излучения

Электрическая (компактная) модель пикселя микроболометра позволяет учитывать зависимость сопротивления от считывающего импульса и теплового потока (ИК-излучения), а также определять тип процесса, который будет запущен в результате изменения внешних параметров – нагрев или остывание приборной структуры (рисунок 4).

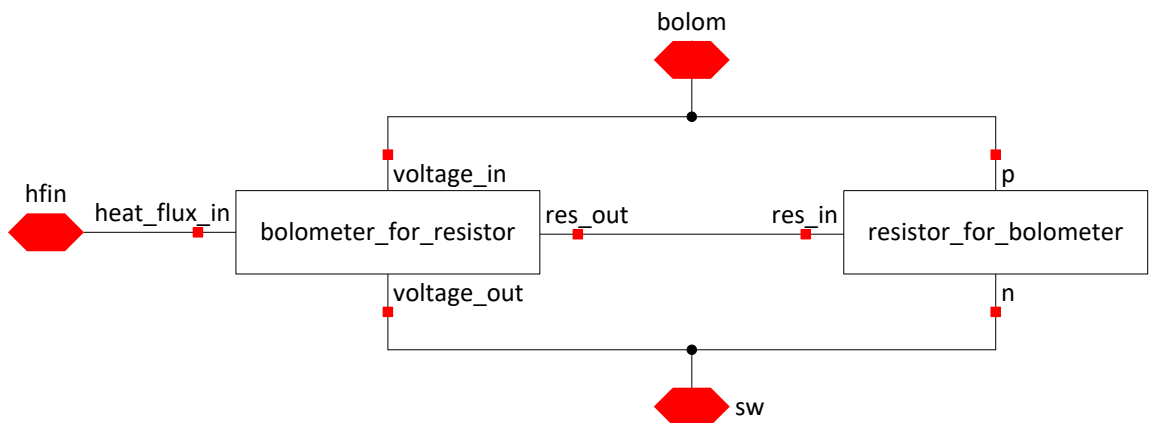


Рисунок 4 – Электрическая (компактная) модель пикселя микроболометра

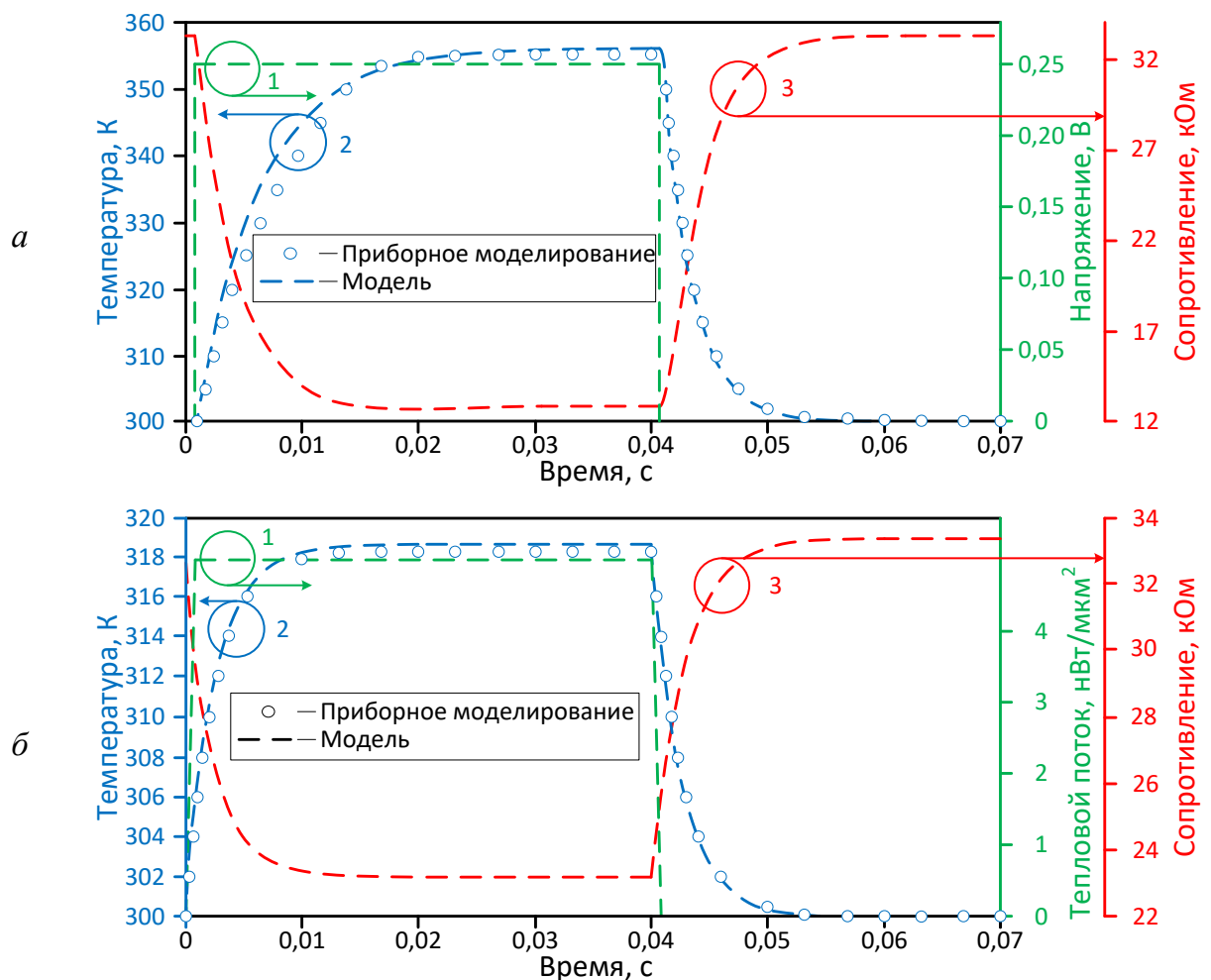
Модель состоит из двух блоков:

1. Включаемый непосредственно в цепь блок сопротивления `resistor_for_bolometer`, величина которого задается управляющим сигналом `res_in`.

2. Блок ожидания изменения напряжения на микроболометре и/или величины теплового потока `bolometer_for_resistor`, а также определения процесса, который будет запущен в результате наступления такого события (нагрев или остывание приборной структуры).

Входными сигналами являются значения напряжения на электродах `voltage_in`, `voltage_out` и `heat_flux_in`.

На рисунке 5 представлено сравнение результатов расчетов в программных комплексах приборного (Coventor) и схмотехнического (Cadence) моделирования. Показано, что разработанная модель адекватно описывает поведение пикселя микроболометра.



a – подача импульса считывания; *б* – воздействие теплового потока;

1 – тепловой поток; 2 – температура; 3 – сопротивление

Рисунок 5 – Сравнение результатов моделирования в программных комплексах Coventor и схмотехнического Cadence

Исследовано схемотехническое решение для приема, усиления и обработки данных микроболометров, состоящее из матрицы в фокальной плоскости, трех трансимпедансных усилителей, трех схем выборки и хранения (буфера), аналогового мультиплексора (коммутатора), параллельного n -разрядного аналого-цифрового преобразователя и шифратора.

Топологическое представление предложенного схемотехнического решения реализовано с использованием библиотеки проектирования с проектными нормами 0,18 мкм и представляет собой интегрированные на одном кристалле матрицу в фокальной плоскости и интегральную схему считывания данных площадью 20,4 мм². Результаты моделирования свидетельствуют об эффективности разработанной электрической (компактной) модели пикселя микроболометра, а также демонстрируют соответствие полученных результатов функциональным параметрам компонентов схемы обработки сигналов (рисунок 6).

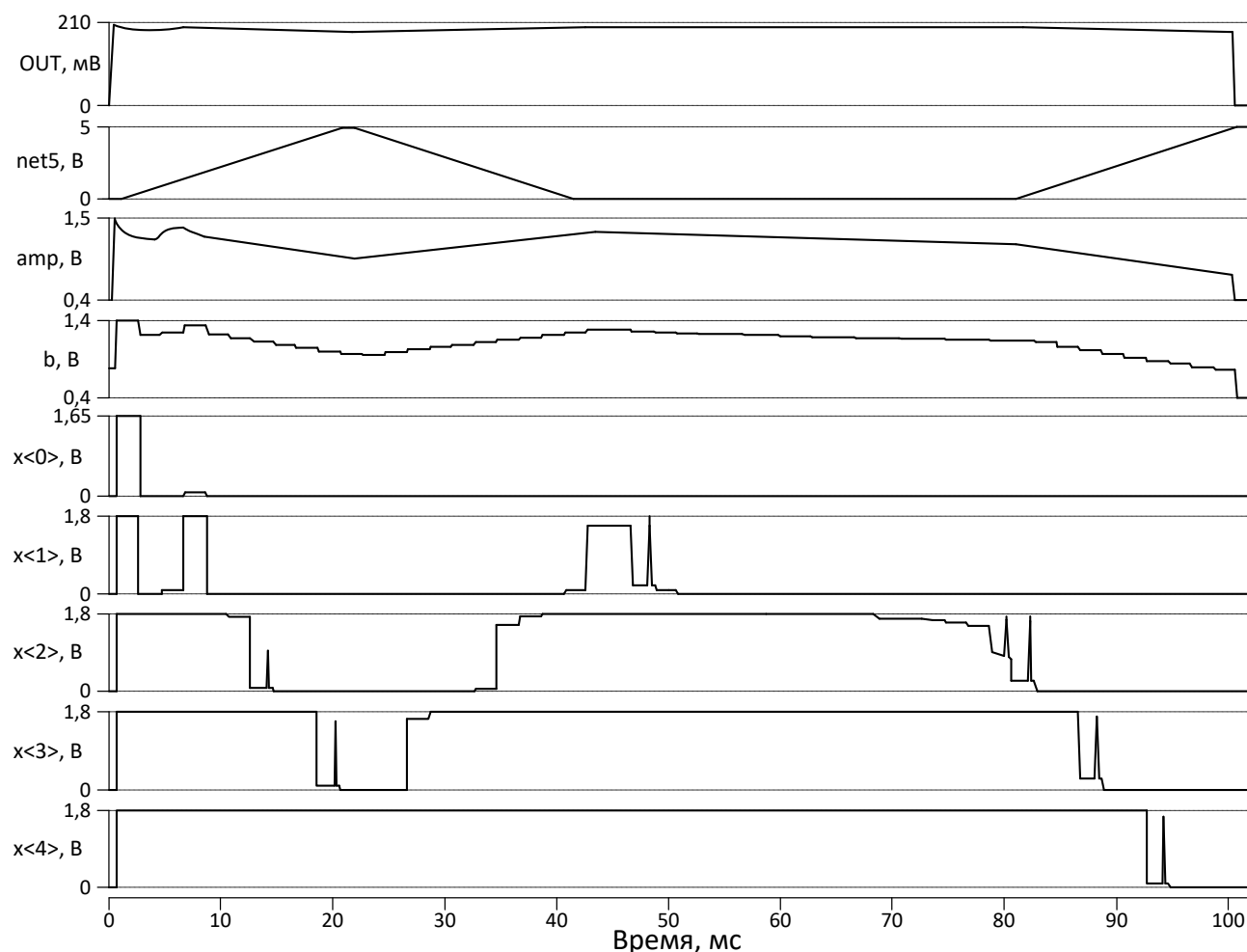


Рисунок 6 – Результаты моделирования схемы обработки сигналов микроболометра

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Анализ современного состояния в области фундаментальных исследований и практического применения тепловых детекторов показывает, что разработка эффективных конструкций неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа с использованием кремниевой технологии и микроэлектромеханических систем является перспективной. Наиболее востребованными термочувствительными материалами для микроболометров являются аморфный кремний (α -Si) и оксид ванадия (VO_x), которые обладают высоким температурным коэффициентом сопротивления, удовлетворительной механической прочностью и совместимостью с КМОП-технологией [1–А; 5–А; 7–А; 9–А; 10–А].

2. В качестве базовой конструкции пикселя микроболометра, предназначенной для интеграции в состав матрицы в фокальной плоскости неохлаждаемых тепловых детекторов и обеспечивающей наибольшее поглощение в диапазоне инфракрасного излучения от 8 до 14 мкм, предложена структура, состоящая из термочувствительной многослойной мембраны, включающей пленки проводящего и поглощающего нихрома (NiCr), диэлектрического (Si_3N_4) и термочувствительного (α -Si или VO_x) материалов. Мембрана размещается на расстоянии от 2,5 до 3 мкм от кремниевой подложки с отражающим слоем из алюминия (Al). При этом интегральная схема считывания располагается под мембранами пикселей микроболометров [1–А; 5–А; 8–А; 9–А; 10–А].

3. Предложена и программно реализована на языке программирования Python методика определения значений оптических параметров материалов, входящих в состав термочувствительной мембраны пикселя микроболометра, которая заключается в решении нелинейных уравнений путем построения последовательных приближений с использованием метода Ньютона – Рафсона. Предложенная методика позволяет рассчитывать коэффициенты отражения, пропускания и поглощения, состоящие из различных компонентов, важнейшими из которых являются значения действительной и мнимой части комплексного показателя преломления [2–А; 3–А].

4. Предложена обобщенная методика моделирования и оптимизации характеристик интегральных неохлаждаемых болометрических тепловых детекторов, включающая этапы разработки типовой структуры микроболометра, экспериментального исследования тестовых структур и измерения их параметров, расчета тепловых, механических, оптических, динамических и электрических параметров и оптимизации состава и геометрических характеристик пленок мембраны пикселя микроболометра, а также разработки компактной (электрической) модели и схемы обработки

данных проектируемого устройства. Для каждого из перечисленных этапов исследования определено соответствующее программное обеспечение [1–А; 2–А; 3–А; 4–А; 5–А; 7–А; 10–А].

5. Для структуры пикселя микроболометра с геометрическими размерами 16×16 мкм², состоящего из термочувствительной мембраны на основе аморфного кремния толщиной 0,1 мкм и термопоглощающего слоя нихрома (NiCr) толщиной 15 нм, проведен статический термический анализ и термический анализ переходных процессов. Определена теплопроводность исследуемой структуры $G = 9,84 \cdot 10^{-8}$ Вт/К, а также рассчитаны значения постоянной времени $\tau = 380$ мкс и полной теплоемкости $C = 3,74 \cdot 10^{-11}$ Дж/К. В ходе исследования теплового отклика на импульс входного напряжения установлено, что устройство достигает максимальной температуры 303 К из-за джоулева нагрева. Импульсный режим работы микроболометра предотвращает возможное повреждение пикселей из-за чрезмерного джоулева нагрева, поскольку самонагрев остается минимальным [1–А].

6. В рамках исследования механических характеристик пикселя микроболометра проведен статический механический анализ, результаты которого позволили оценить влияние механических напряжений в конструктивных материалах на устойчивость конструкции устройства. Установлено, что в диапазоне напряжений Si₃N₄ от минус 300 до 300 МПа структура пикселя остается стабильной при отсутствии теплового потока. Оптимальным значением внутренних механических напряжений является $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа. Воздействие теплового потока величиной более 300 пВт/мкм² вызывает разрушение конструкции из-за низкой теплопроводности Si₃N₄. Установлено, что структура Si₃N₄/NiCr более устойчива к воздействию тепловых потоков величиной более 100 пВт/мкм². Так, структура Si₃N₄/NiCr с $\sigma_{\text{NiCr}} = 0$ МПа и $\sigma_{\text{Si}_3\text{N}_4} = 300$ МПа остается стабильной при воздействии теплового потока величиной до $P = 700$ пВт/мкм². При этом максимальное отклонение мембраны не превышает 9 нм для $P = 0$ пВт/мкм², 227 нм ($P = 100$ пВт/мкм²), 457 нм ($P = 200$ пВт/мкм²), 901 нм ($P = 400$ пВт/мкм²) и 1,5 мкм для $P = 700$ пВт/мкм². Для нормального функционирования микроболометра необходимо уменьшить внутренние механические напряжения в пленке NiCr, в то время как для пленок Si₃N₄ их следует увеличивать [1–А; 6–А; 10–А].

7. По результатам моделирования методом конечных разностей во временной области спектров поглощения, пропускания и отражения материалов микроболометра на основе ранее рассчитанных значений действительной и мнимой части комплексного показателя преломления установлено, что наибольшая максимальная ошибка наблюдается при моделировании спектра пропускания для пленок NiCr толщиной 50 нм и Si₃N₄ толщиной 100 нм и составляет 7,53 % (в диапазоне длин волн от 8 до 9 мкм) и

7,87 % (от 11 до 12 мкм) соответственно, при этом средняя ошибка расчетов по сравнению с данными экспериментальных измерений не превышает 5,86 % для спектров пропускания и 0,79 % для спектров отражения. Наименьшая ошибка моделирования спектров пропускания и отражения получена для кристаллического кремния и пленки NiCr толщиной 10 нм и ее значение не превышает 0,65 % и 0,81 % соответственно. Для остальных исследуемых образцов величина средней ошибки находится в диапазоне от 0,6 до 2,22 % [2-А; 3-А].

8. Посредством проведения серии оптимизационных расчетов определены оптимальные с точки зрения коэффициента поглощения параметры слоев: нижний слой Si_3N_4 – 70 нм, слой NiCr – 4 нм, средний слой Si_3N_4 – 200 нм, термочувствительный слой VO_x – 250 нм, верхний слой Si_3N_4 – 150 нм, определено оптимальное значение величины воздушного зазора, которое составляет 3 мкм, что обеспечило увеличение величины среднего поглощения в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм на 9 % (со значения 0,77 до 0,86 о. е.) и увеличение пикового значения на 0,06 (со значения 0,94 до 0,99 о. е.), а также уменьшение на 39,4 % величины отклонения термочувствительной мембраны микроболометра относительно ее исходного состояния. При этом имеет место увеличение значений теплопроводности (изменение на 9,3 %), постоянной времени (33,3 %) и удельной теплоемкости (64,3 %) [2-А; 3-А].

9. На языке описания аппаратуры Verilog-A реализована электрическая (компактная) модель пикселя микроболометра, учитывающая зависимость сопротивления от считывающего импульса и теплового потока (ИК-излучения), а также определяющая тип процесса, который будет запущен в результате изменения внешних параметров (нагрев или остывание приборной структуры) [4-А].

10. Предложено и исследовано схемотехническое решение для приема, усиления и обработки данных микроболометров, которое включает матрицу в фокальной плоскости, три трансимпедансных усилителя, три схемы выборки и хранения (буфера), аналоговый мультиплексор (коммутатор), параллельный n -разрядный аналого-цифровой преобразователь и шифратор. Данные компьютерного моделирования подтвердили эффективность разработанной электрической (компактной) модели пикселя микроболометра и соответствие полученных результатов функциональным параметрам компонентов схемы обработки сигналов. С учетом наличия паразитных компонентов, вносимых топологическим решением, наблюдается увеличение величины задержки переключения на 14 %, что не оказывает существенного влияния на работоспособность схемотехнического решения [4-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Предложенная методика моделирования и оптимизации характеристик интегральных неохлаждаемых болометрических тепловых детекторов может эффективно использоваться в процессе проектирования указанного типа устройств и приборов на их основе на этапах разработки типовой приборной структуры микроболометра, расчета тепловых, механических, оптических, динамических и электрических параметров, оптимизации состава и геометрических характеристик пленок мембраны пикселя микроболометра, а также разработки схемотехнических решений для приема, усиления и обработки данных микроболометров.

2. Реализованная на языке описания аппаратуры Verilog-A компактная (электрическая) модель пикселя микроболометра, учитывающая особенности приборной структуры и используемых для его изготовления материалов, может быть интегрирована в состав комплексов схемно-топологического моделирования интегральных микросхем, что обеспечит снижение временных затрат и повысит надежность разрабатываемых интегральных схем считывания данных с матрицы детекторов, расположенных в фокальной плоскости [4–А].

3. Разработанные подходы к построению конструкции и принципов функционирования микроболометров, а также методики приборно-технологического и схемно-топологического проектирования и оптимизации характеристик указанных устройств и систем могут использоваться для повышения уровня подготовки студентов учреждений высшего образования по дисциплинам, связанным с изучением методов проектирования интегральных микросхем с использованием специального программного обеспечения.

4. Основные результаты диссертационной работы, в частности предложения по практическому использованию программного обеспечения для проектирования и оптимизации характеристик инфракрасных детекторов, переданы для использования в Ассоциацию радиоэлектроники Вьетнама для анализа, улучшения характеристик и производства измерительных систем на основе интегральных неохлаждаемых болометрических тепловых детекторов с целью расширения диапазона и повышения точности обнаружения объектов.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ НАУЧНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. Конструкция и характеристики неохлаждаемых болометрических инфракрасных решеток на основе аморфного кремния / Чан Ван Чиеу, В. Р. Стемпицкий, И. Ю. Ловшенко, К. В. Корсак, Динь Ха Дао// Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 2. – С. 77–85.

2–А. Расчет оптических параметров тонких пленок конструкционных материалов теплового неохлаждаемого детектора болометрического типа / Чан Ван Чиеу, К. В. Корсак, П. Э. Новиков, И. Ю. Ловшенко, С. М. Завадский, Д. А. Голосов, А. А. Степанов, А. А. Губаревич, В. В. Колос, Я. А. Соловьев, Д. С. Левчук, В. Р. Стемпицкий // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 5. – С. 73–80.

3–А. Оптические, механические и электрические характеристики теплового неохлаждаемого детектора болометрического типа на основе оксида ванадия / Чан Ван Чиеу, К. В. Корсак, П. Э. Новиков, И. Ю. Ловшенко, С. М. Завадский, Д. А. Голосов, А. А. Степанов, А. А. Губаревич, В. В. Колос, Я. А. Соловьев, Д. С. Левчук, В. Р. Стемпицкий // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 6. – С. 84–91.

4–А. Интегральная схема считывания данных с неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа / Чан Ван Чиеу, Дао Динь Ха, П. Э. Новиков, К. В. Корсак, И. Ю. Ловшенко, В. Р. Стемпицкий // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – Т. 58, № 1. – С. 79–85.

Статьи в сборниках материалов конференций

5–А. Моделирование эксплуатационных характеристик тепловых детекторов болометрического типа / И. Ю. Ловшенко, В. В. Садченко, В. Р. Стемпицкий, Чан Ван Чиеу // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2021). Вып. 3 : сб. науч. тр. 31-й Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 5–11 сен. 2021 г. / СевГУ ; редкол.: П. П. Ермолов (гл. ред.) [и др.]. – Севастополь, 2021. – С. 394–395.

6–А. Influence of internal mechanical stresses on the characteristics of the integral uncooled infrared bolometer / Tran Van Trieu, Polina Roshchenko, Ivan Lovshenko, Viktor Stempitsky, Tran Tuan Trung and Dao Dinh Ha // International Scientific and Technical Conference «Digital Technologies: Problems and Solutions for Practical Implementation in an Industry», Toshkent, 27–28 apr., 2022. – Toshkent, 2022. – P. 175–178.

Тезисы докладов на научных конференциях

7–А. Садченко, В. В. Тепловые детекторы болометрического типа / В. В. Садченко, Чан Ван Чиеу // Радиотехника и электроника : сб. тез. докл. 57-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 19–23 апр. 2021 г. / БГУИР. – Минск, 2021. – С. 139–141.

8–А. Studying the influence of microbolometer structure and geometry on the parameters of infrared detectors / Tran Van Trieu, I. Lovshenko, V. Sadchenko, V. Stempitsky // Нанопроектирование, технология, компьютерное моделирование – NDTCS-2021 : тез. докл. XIX Междунар. симпозиума, Минск, 28–29 окт. 2021 г. / БГУИР ; редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск, 2021. – С. 93–95.

9–А. Микроболометры на основе пленок аморфного кремния и оксида ванадия / Н. С. Ган, К. В. Корсак, Чан Ван Чиеу, И. Ю. Ловшенко // Радиотехника и электроника : сб. тез. докл. 59-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Минск, 17–21 апр. 2023 г. / БГУИР. – Минск, 2023. – С. 159–160.

Статьи в других научных рецензируемых изданиях

10–А. Применение систем автоматизированного проектирования для учета механических напряжений при разработке неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа / Чан Ван Чиеу, И. Ю. Ловшенко, В. Р. Стемпицкий, К. В. Корсак, Чан Туан Чунг, Дао Динь Ха, В. В. Колос // Цифровая трансформация. – 2023. – Т. 29, № 1. – С. 72–80.



РЭЗІЮМЭ

Чан Ван Чыеў

Камп'ютарнае мадэляванне структуры і параметраў інтэгральных неахалоджваемых цеплавых дэтэктараў на крэмніі

Ключавыя словы: камп'ютарнае мадэляванне, мікрабалометр, тэрмаадчувальная мембрана, аксід ванадыю, аморфны крэмній.

Мэта працы: распрацоўка метадаў камп'ютарнага мадэлявання і аптымізацыі механічных, цеплавых, аптычных і электрычных характарыстык неахалоджваемых цеплавых дэтэктараў баламетрычнага тыпу ў інтэгральным выкананні, вырабленых з ужываннем крэмніевай тэхналогіі з тэрмаадчувальным слоём на аснове аморфнага крэмнію і аксиду ванадыю, прызначаных для рэгістрацыі ІЧ-выпраменьвання ў дыяпазоне длін волн ад 8 да 14 мкм.

Метад даследавання: камп'ютарнае мадэляванне з выкарыстаннем метадаў канчатковых элементаў і канчатковых рознасцей у часовай вобласці, а таксама на аснове электрычных (кампактных) мадэляў прыборных структур.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: прапанавана метадыка разліку і каліброўкі аптычных характарыстык матэрыялаў прыборнай структуры цеплавога неахалоджываемага дэтэктара баламетрычнага тыпу – рэальнай і ўяўнай часткі каэфіцыента праламлення, заснаваная на выкарыстанні метаду Ньютана – Рафсана, якая дазваляе вызначаць аптымальны парадак і таўшчыні слаёў паглынальнай мембраны, а таксама павысіць велічыню сярэдняга паглынання мікрабалометра; прапанавана базавая электрычная мадэль мікрабалометра, прызначаная для апісання яго статычных і дынамічных характарыстык з улікам уплыву эфекту саманагрэву і ўздзеяння цеплавога патоку, а таксама тыпу матэрыялу тэрмопаглынаючага слоя, прызначаная для схематэхнічнага мадэлявання дадзенага тыпу прылад у комплексах праектавання інтэгральных мікрасхем.

Рэкамендацыі па выкарыстанні і галіна прымянення: прапанаваныя метадыкі мадэлявання і аптымізацыі характарыстак мікрабалометраў могуць выкарыстоўвацца падчас праектавання ўказанага тыпу прылад і прыбораў на іх аснове на этапах распрацоўкі тыпавай прыборнай структуры мікрабалометра, разліку цеплавых, механічных, аптычных, дынамічных і электрычных параметраў, аптымізацыі складу і геаметрычных характарыстак плёнак мембраны пікселя мікрабалометра, а таксама распрацоўкі схематэхнічных рашэнняў для прыёму, узмацнення і апрацоўкі дадзеных мікрабалометраў.

РЕЗЮМЕ

Чан Ван Чиеу

Компьютерное моделирование структуры и параметров интегральных неохлаждаемых тепловых детекторов на кремнии

Ключевые слова: компьютерное моделирование, микроболометр, термочувствительная мембрана, оксид ванадия, аморфный кремний.

Цель работы: является разработка методик компьютерного моделирования и оптимизации механических, тепловых, оптических и электрических характеристик неохлаждаемых тепловых детекторов болометрического типа в интегральном исполнении, изготовленных с применением кремниевой технологии с термочувствительным слоем на основе аморфного кремния и оксида ванадия, предназначенных для регистрации ИК-излучения в диапазоне длин волн от 8 до 14 мкм.

Метод исследования: компьютерное моделирование с использованием методами конечных элементов и конечных разностей во временной области, а также на основе компактных (электрических) моделей приборных структур.

Полученные результаты и их новизна: предложена методика расчета и калибровки оптических характеристик материалов приборной структуры теплового неохлаждаемого детектора болометрического типа – действительной и мнимой части комплексного показателя преломления, основанная на использовании метода Ньютона – Рафсона, позволяющая определять оптимальный порядок и толщины слоев поглощающей мембраны, а также повысить величину среднего поглощения микроболометра; предложена базовая электрическая модель микроболометра, предназначенная для описания его статических и динамических характеристик с учетом влияния эффекта самонагрева и воздействия теплового потока, а также типа материала термопоглощающего слоя, предназначенная для схемотехнического моделирования данного типа устройств в комплексах проектирования интегральных микросхем.

Рекомендации по использованию и область применения: предложенные методики моделирования и оптимизации характеристик микроболометров могут использоваться в процессе проектирования указанного типа устройств и приборов на их основе на этапах разработки типовой приборной структуры микроболометра, расчета тепловых, механических, оптических, динамических и электрических параметров, оптимизации состава и геометрических характеристик пленок мембраны пикселя микроболометра, а также разработки схемотехнических решений для приема, усиления и обработки данных микроболометров.

SUMMARY

Tran Van Trieu

Computer modeling of the structure and parameters of uncooled integrated thermal detectors on silicon

Keywords: computer modeling, microbolometer, heat-sensitive membrane, vanadium oxide, amorphous silicon.

The aim of the work: development of methods for computer simulation and optimization of mechanical, thermal, optical and electrical characteristics of uncooled thermal detectors of the bolometric type in an integrated design, manufactured using silicon technology with a heat-sensitive layer based on amorphous silicon and vanadium oxide, designed to record IR radiation in the range from 8 to 14 μm .

Research method: computer modeling using finite element and finite difference methods in the time domain, as well as based on compact (electrical) models of device structures.

The results obtained and their novelty: a method for calculating and calibrating the optical characteristics of the materials of the design of a thermal uncooled bolometric detector is proposed – the real and imaginary parts of the refractive index, based on the use of the Newton – Raphson method, which allows determining the optimal order and thickness of the layers of the absorbing membrane, as well as increasing the value of the average absorption of the microbolometer; a basic electrical model of the microbolometer is proposed, designed to describe its static and dynamic characteristics, taking into account the influence of the self-heating effect and the impact of heat flow, as well as the type of material of the heat-absorbing layer, designed for circuit modeling of this type of device in integrated circuit design complexes.

Recommendations for use and scope of application: the proposed methods for modeling and optimizing the characteristics of microbolometers can be used in the process of designing the specified type of devices and instruments based on them at the stages of developing a typical microbolometer design, calculating thermal, mechanical, optical, dynamic and electrical parameters, optimizing the composition and geometric characteristics of the membrane films of the microbolometer pixel, as well as developing circuit solutions for receiving, amplifying and processing microbolometer data.

Научное издание

Чан Ван Чиеу

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ
И ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ
ТЕПЛОВЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА КРЕМНИИ**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника,
радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника,
приборы на квантовых эффектах**

Подписано в печать 22.05.2025. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 188.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
№2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.

Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск