

На правах рукописи

Майрапетян Армен Самвелович

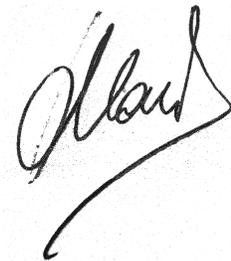
**ТЕПЛОВОЙ ОТКЛИК
ПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ВТСП - БОЛОМЕТРОВ**

01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор:



Москва 2011

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель: кандидат технических наук,
старший научный сотрудник
Харитонов Владимир Степанович, НИЯУ МИФИ

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Зайченко Виктор Михайлович,
заведующий лабораторией ОИВТ РАН

кандидат физико-математических наук
Губкин Михаил Константинович,
доцент кафедры
«Общая физика и ядерный синтез» МЭИ (ТУ)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Государственный научный
центр Российской Федерации
Физико-энергетический институт
имени А.И. Лейпунского»

Защита состоится 14 декабря 2011 года в 15 час. 00 мин. на заседа-
нии диссертационного совета Д 212.130.04 в НИЯУ МИФИ
по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д. 31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ.

Автореферат разослан «10» ноября 2011 года.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенном печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д. ф.-м. н., профессор



И.И. Чернов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Болومتر является детектором электромагнитного излучения, использующим зависимость электрического сопротивления от температуры для измерения поглощенной энергии. Одним из активно развивающихся направлений использования болометров является их применение в оптических каналах обмена информацией.

В большинстве оптических систем передачи в качестве приемника информации применяются лавинные фотодиоды, однако в последнее время появились работы о возможности использования для этой цели высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) болометров. К преимуществам их использования именно в этой области можно отнести низкую чувствительность к засветкам, радиационному облучению, электромагнитным импульсам. Температурные режимы (около 80 К), требующиеся ВТСП, легко достижимы с помощью криокулеров, что позволяет получать необходимые массогабаритные характеристики приемника. Чувствительность и другие характеристики ВТСП-болометров определяются в значительной степени тепловыми процессами, проходящими в структуре ВТСП-пленка – подложка при воздействии импульсов лазерного излучения, которое используется в оптических системах передачи информации.

Это определяет необходимость изучения механизмов формирования теплового отклика ВТСП-болометра на поглощаемое излучение в условиях реального применения, поскольку проектирование болометра предполагает решение оптимизационной задачи по достижению необходимых эксплуатационных характеристик исходя из всех особенностей конструкции устройства.

С учетом изложенного, диссертационная работа, сориентированная на исследование теплового отклика высокотемпературных сверхпроводящих болометров на импульсное лазерное излучение, является актуальной.

Целью диссертационной работы явилось экспериментальное исследование и численное моделирование теплового отклика приемников оптического излучения на основе ВТСП-пленок из висмутовой керамики и разработка с ис-

пользованием полученных данных рекомендаций для улучшения их характеристик при применении в оптических системах связи.

Научная новизна диссертационной работы:

- Получены новые данные о топографии поверхности ВТСП-пленки Bi-Sr-Ca-Cu-O, приготовленной магнетронным распылением. Обнаружено, что пленка имеет структурированный характер с кристаллитами шириной 20 ... 50 нм и длиной 0,3...1,1 мкм.
- Получены новые опытные данные по характеристикам теплового отклика, а именно амплитуде и времени релаксации ВТСП-болометра на последовательность импульсов излучения лазера. Экспериментально доказано, что 10 лет эксплуатации и хранения в естественных условиях не существенно повлияли на динамические характеристики ВТСП-болометра на основе пленки Bi-Sr-Ca-Cu-O.
- Разработана новая расчетная модель теплового отклика болометрической структуры на воздействие последовательности импульсов лазерного излучения. Предложен алгоритм определения доли энергии излучения лазера, поглощаемой болометром, на основе данных экспериментов с импульсами большой скважности.
- С использованием разработанной модели численно исследовано влияние частоты импульсов лазера и характеристик болометра (толщины ВТСП-пленки, доли поглощаемого в ней излучения) на величину теплового отклика. Определены частотный диапазон работы исследованной болометрической структуры, ее вольт-ваттная чувствительность, эквивалентная мощность шумов и обнаружительная способность. Показано, что основные характеристики болометра, изготовленного на основе ВТСП-пленки из висмутовой керамики, не хуже, чем при использовании иттриевых керамик.
- Путем решения задачи о тепловой стабилизации ВТСП-болометра, нагруженного транспортным током, предложена методика, связывающая параметры болометрической структуры (свойства сверхпроводящей

пленки, термическое сопротивление структуры) и режимы ее работы (транспортный ток и температура стока тепла), при которых возможно получение максимальной амплитуды отклика в заданном диапазоне частоты следования импульсов оптического излучения.

- Впервые проведено расчетное исследование влияния неоднородностей структуры ВТСП-пленки, нагруженной транспортным током, на характеристики теплового отклика болометра. Установлено, что неоднородности сверхпроводящих свойств и дефекты поверхности пленки существенно влияют на распределение температур в болометрической структуре, при этом сама величина теплового отклика и частотный диапазон эффективной работы болометра практически не изменяются.

Практическая значимость работы определяется важностью полученных результатов для уточнения и развития моделей, предназначенных для расчета теплового отклика ВТСП-болометров на импульсное излучение передающего лазера. Помимо этого, разработанные рекомендации будут полезны при создании высокочувствительных датчиков на основе ВТСП для открытых оптических систем связи, быстродействующих тепловизоров и систем локации.

Достоверность полученных данных по определению характеристик теплового отклика ВТСП-болометра на последовательность импульсов инфракрасного излучения подтверждается отработкой методики в тестовых экспериментах, оценками величин погрешности измерений. Результаты расчетного исследования подтверждены сравнением с аналитическими решениями в предельных областях и экспериментальными данными. Исследование топографии поверхности ВТСП-пленки проведено с помощью прецизионного сканирующего туннельного микроскопа, что позволило получить подробную информацию о рельефе поверхности, размерах и ориентации кристаллитов.

Основные результаты, выносимые на защиту:

- Новые опытные данные по характеристикам теплового отклика ВТСП-болометра, а именно зависимости перегрева ВТСП-пленки на основе

висмутовой керамики, от времени для различных частот следования импульсов излучения лазера.

- Разработанные модель и методика, позволяющие рассчитать тепловой отклик и чувствительность болометрической системы на воздействие лазерным излучением в широком диапазоне частоты следования импульсов.
- Результаты расчетных исследований влияния неоднородностей структуры ВТСП-пленки на тепловой отклик болометра.
- Предложенная методика выбора характеристик ВТСП-болометров (транспортный ток, температура основания, диапазон работы по частоте), обеспечивающая их максимальный отклик на тепловые воздействия.

Личный вклад автора. Постановка задачи осуществлена совместно с научным руководителем. Изготовление образцов пленок и их структурное исследование выполнено совместно с сотрудниками кафедры компьютерного моделирования и физики наноструктур и сверхпроводников НИЯУ МИФИ. Экспериментальные исследования, расчеты и анализ результатов выполнены автором самостоятельно или в соавторстве при его непосредственном участии.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы, докладывались на следующих конференциях и семинарах: 34-ое совещание по физике низких температур, Ростов-на-Дону, 2006 г.; Научные сессии МИФИ 2007 – 2009; Международная конференция «Телекоммуникационные системы и технологии», Харьков, 2008 г.; 2-ая Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях», Москва, 2009 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, в том числе в 3-х статьях в реферируемых журналах из перечня ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 88 наименований. Содержание диссертации изложено на 118 страницах, включая 47 рисунков и 4 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенных исследований, сформулирована цель работы, отмечены новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор работ посвященных анализу возможностей использования ВТСП-болометров в открытых оптических системах передачи информации. Приведены физические характеристики ВТСП – пленок важные для их применения в качестве чувствительного элемента болометра. Рассмотрены модели, используемые для описания зависимости амплитуды отклика болометра от частоты передающего лазера и теплофизических параметров болометрической системы.

На основании анализа работ, посвященных упомянутым вопросам, сформулированы следующие основные выводы:

1. Практически все исследования проведены с пленками $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. Недостатком этого материала является его деградация при естественных условиях хранения, чувствительность к влаге. Висмутовые керамики, устойчивые к таким воздействиям, являются наиболее перспективным кандидатом для применения их в качестве чувствительного элемента ВТСП-болометров.
2. Большинство опубликованных работ описывают экспериментальные и теоретические исследования теплового отклика на модулированное излучение лазерного диода. Для оптических систем передачи данных основной характеристикой болометра является отклик на последовательность импульсов оптического излучения одинаковой мощности и длительности в зависимости от частоты их следования.
3. Отсутствуют данные по влиянию однородности ВТСП-пленки на характеристики тепловых процессов и режимы работы болометров.
4. Использование нелинейных тепловых моделей и, соответственно, численных расчетов является перспективным направлением и должно позволить определить характеристики теплового отклика ВТСП – болометра в широком диапазоне частоты следования импульсов лазерного излучения.

На основании сделанных выводов поставлены цели и задачи экспериментального и теоретического исследования.

Во второй главе диссертации описаны методики и результаты экспериментальных исследований структурных характеристик ВТСП-пленок.

Фазовый состав ВТСП-пленок исследовался с помощью метода рентгеновской дифракции на рентгеновских дифрактометрах «ДРОН-3». Состав пленок Bi-Sr-Ca-Cu-O подбирался от чистой фазы 2212 до смесей 2212 + 2223, то есть, образцы состояли из смеси $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_y$ и $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$. Рентгеновская дифрактограмма одного из образцов, использованных для создания болометра, представлена на рис. 1.

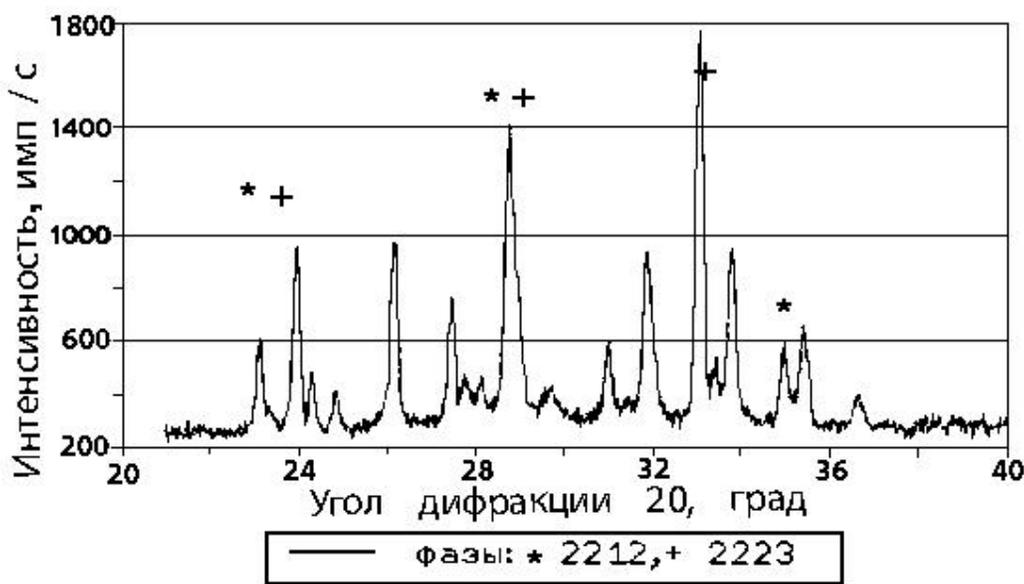


Рис. 1. Фрагмент дифрактограммы пленки Bi-Sr-Ca-Cu-O с содержанием фазы 2212 – 20%, фазы 2223 – 70 %

Образцы пленок Bi-Sr-Ca-Cu-O исследовались также в сканирующем туннельном микроскопе. Целью проводимых исследований было наблюдение рельефа поверхности, выявление наличия кристаллитов, определение их размеров, формы, направления роста. Исследования показали, что кристаллографическая решетка зерен в образцах присутствуют в явном виде (рис. 2).

Наблюдается горизонтальное расположение кристаллитов с преимущественной ориентацией в одном направлении. Были измерены размеры кристаллитов: 20-50 нм, то есть это – нанокристаллы, обладающие примерно одинаковой формой по всему объему образца.

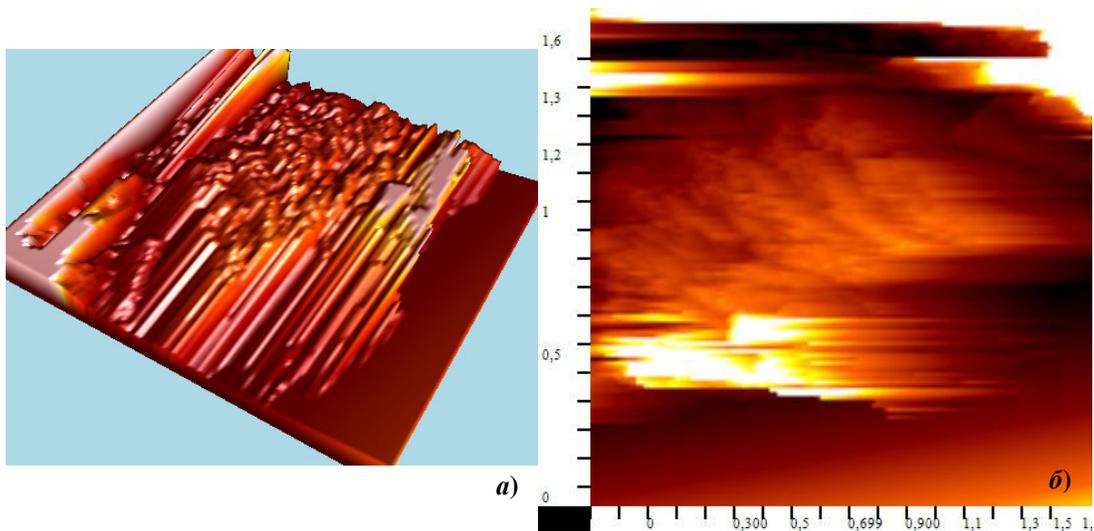


Рис. 2. Изображение поверхности пленки Bi-Sr-Ca-Cu-O, полученное с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Размер области сканирования образца: $1,67 \times 1,67 \times 1$ мкм³: а) 3-d изображение, б) 2-d изображение, по осям размеры приведены в нанометрах

Сама исследуемая болометрическая структура (рис. 3) представляла собой ВТСП-пленку, напыленную на подложку MgO магнетронным методом. На пленку методом термического испарения были нанесены четыре серебряных контакта для измерения сопротивления по четырехконтактной схеме и лазерным скрайбированием вырезан меандр. Площадь меандра $1,1 \times 1,1$ мм², 11 периодов, ширина реза 5 мкм. ВТСП -пленка на подложке крепилась апиэном к сапфировой подложке, которая в свою очередь фиксировалась на медной матрице хладопровода криостата. Измеренные размеры слоев и теплофизические свойства материалов структуры, принятые на основании литературных данных, представлены в табл. 1.

В третьей главе диссертации описаны методики и результаты экспериментальных исследований электрофизических и теплофизических характеристик ВТСП-болометра.

Для исследования зависимости электрического сопротивления болометра от температуры и транспортного тока, а также характеристик теплового отклика болометрической системы на воздействие последовательностью импульсов лазерного излучения был собран измерительный стенд, структурная схема которого показана на рис. 4.

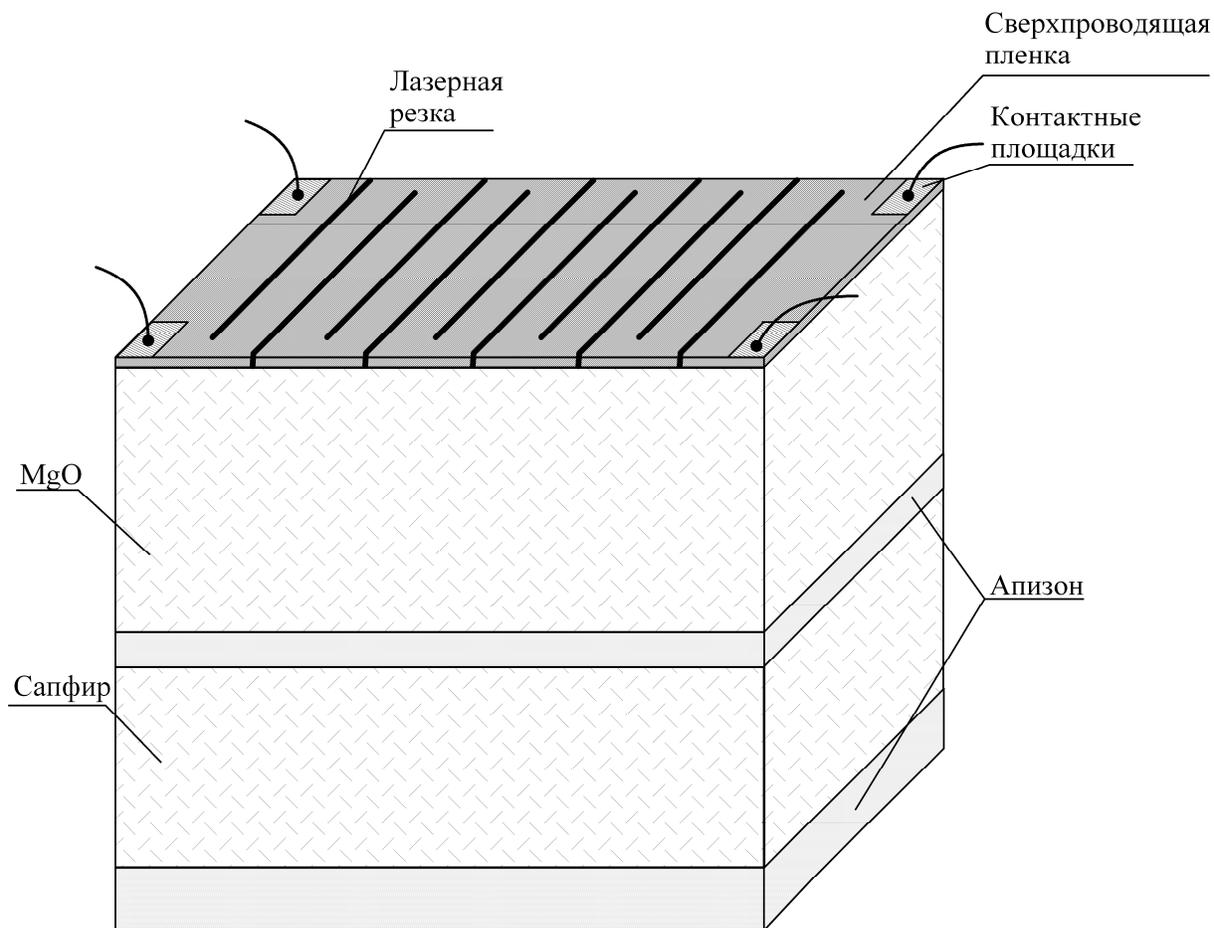


Рис. 3. Схематичное изображение исследуемого болометра

Таблица 1

Размеры слоев и теплофизические свойства материалов болометрической структуры

№	Материал	Толщина δ , м	Теплопроводность λ , Вт/(м·К)	Объемная теплоемкость (c_p), Дж/(м ³ ·К)
1	Апизон	$4 \cdot 10^{-4}$	0,15	$0,55 \cdot 10^6$
2	Сапфир	$6 \cdot 10^{-4}$	360	$0,40 \cdot 10^6$
3	Апизон	10^{-4}	0,15	$0,55 \cdot 10^6$
4	MgO	$9 \cdot 10^{-4}$	300	$0,53 \cdot 10^6$
5	Bi-Sr-Ca-Cu-O	10^{-6}	1,0	$1,32 \cdot 10^6$

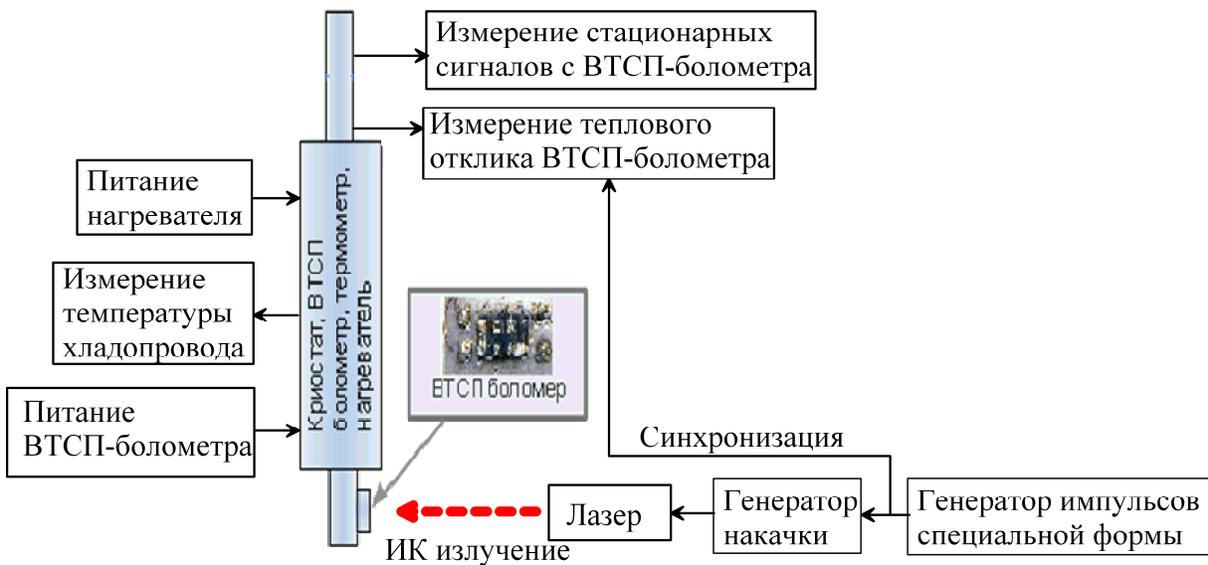


Рис. 4. Структурная схема измерительного стенда

Образец (болометрическая структура) укреплялся на медном хвостовике оптического криостата, внутренний объем которого заполнен жидким азотом. В медной матрице хладопровода в непосредственной близости от болометра располагались резистивный нагреватель и платиновый термометр.

Стенд включает в себя:

- оптический криостат с установленными болометром, нагревателем и термометром;
- систему задания и измерения температуры хладопровода;
- систему генерации импульсов излучения лазера с управляемой частотой следования;
- систему питания ВТСП-болометра;
- систему измерения стационарных и нестационарных сигналов с образца.

В качестве источника излучения использовался лазер ИЛПИ-110 со следующими основными характеристиками: длительность импульсов 100 нс, мощность в импульсе 100 Вт, частота следования от 1 Гц до 10 кГц, длина волны излучения 820 – 850 нм.

Измерения температурной зависимости сопротивления ВТСП-пленки проводились для различных значений измерительного тока как в процессе нагрева, так и охлаждения. Рабочая точка болометра, то есть температура основания

хладопровода, задавалась в середине сверхпроводящего перехода. Для силы тока 0,5 мА в рабочем диапазоне температур чувствительность болометра составила около 1000 Ом/К (рис. 5).

На рис. 6 приведены зависимости теплового отклика болометра от времени для частот следования оптических импульсов в диапазоне от 1,5 до 8 кГц. Под тепловым откликом (перегревом) болометра понимается разница между текущей температурой ВТСП-пленки $\langle T \rangle$ и ее минимальным значением в промежутках между импульсами лазера $\langle T \rangle_{\min}$. По результатам экспериментов среднее значение амплитуды перегрева ВТСП-пленки, $\langle T \rangle_{\max} - \langle T \rangle_{\min}$, не зависит от частоты и составляет $1,2 \cdot 10^{-3}$ К с погрешностью не более 25 %.

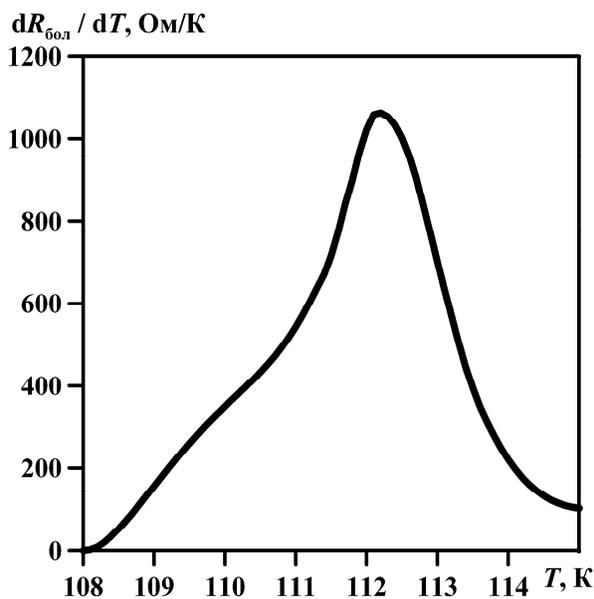


Рис. 5. Зависимость чувствительности болометра от температуры основания хладопровода криостата для тока 0,5 мА

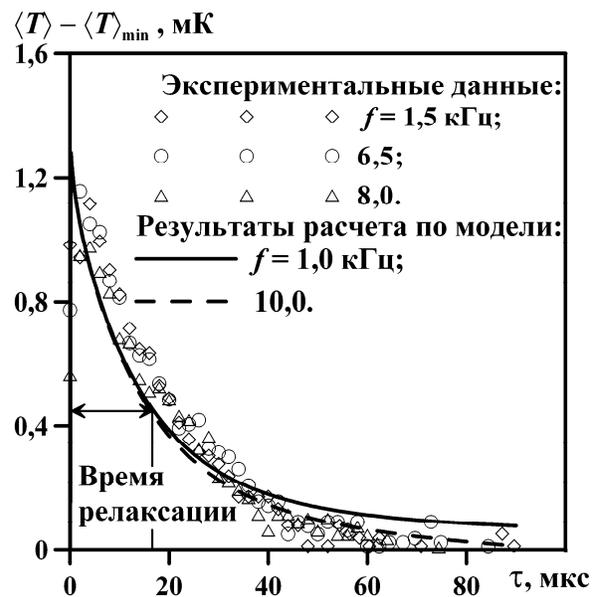


Рис. 6. График зависимости перегрева болометра от времени для различных частот следования импульсов лазера

Следует отметить, что постоянная времени релаксации болометра составила 17 мкс. Это примерно соответствует значению, полученному в предварительных экспериментах после приготовления ВТСП-пленки более 10 лет назад.

Данные, полученные в ходе экспериментальных исследований, позволили развить и протестировать модель теплового отклика ВТСП-болометров.

В четвертой главе представлена расчетная модель теплового отклика болометрической структуры на воздействие последовательности импульсов ла-

зерного излучения. Приведено сравнение результатов расчета с данными экспериментов и исследовано влияние различных факторов на эффективность работы болометра.

Поскольку засветка лазером по поверхности пленки равномерна, то для исследуемой структуры рассматривается одномерная задача нестационарной теплопроводности. Считая, что поглощение падающего излучения можно представить в виде функции удельного объемного тепловыделения, $q_{vi}(x, \tau)$, зависящей от времени и координаты, уравнения нестационарной теплопроводности запишутся в виде:

$$(c \cdot \rho)_i \frac{\partial T_i}{\partial \tau} = \lambda_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} + q_{vi}(x, \tau), \quad (1)$$

где индексы i относятся к различным слоям материалов, указанных в табл. 1, Координата $x = 0$ соответствует границе контакта хладопровода криостата и болометрической структуры. Граничными условиями являются:

$$\begin{aligned} T_1(0, \tau) &= T_0, \\ T_i\left(\sum_{j=1}^i \delta_j, \tau\right) &= T_{i+1}\left(\sum_{j=1}^i \delta_j, \tau\right), \\ \lambda_i \frac{\partial T_i\left(\sum_{j=1}^i \delta_j, \tau\right)}{\partial x} &= \lambda_{i+1} \frac{\partial T_{i+1}\left(\sum_{j=1}^i \delta_j, \tau\right)}{\partial x}, \quad \text{при } i = 1 \dots 4, \\ \frac{\partial T_5\left(\sum_{j=1}^5 \delta_j, \tau\right)}{\partial x} &= 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Начальным условием является решение уравнений (1) и (2) при равных нулю частных производных по времени и усредненной на периоде функции тепловыделения, то есть $q_{vi}(x) = f \cdot \int_0^{1/f} q_{vi}(x, \tau) d\tau$.

Зависимость излучения лазера от времени аппроксимировалась тригонометрической функцией

$$q_{vi}(x, \tau) = \begin{cases} q_{F_0} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi \tau}{2 \tau_0}\right) \cdot \varphi_i(x), & \text{при } \frac{k}{f} \leq \tau \leq \frac{k}{f} + 2\tau_0, \\ 0, & \text{при } \frac{k}{f} + 2\tau_0 < \tau < \frac{k+1}{f}, \end{cases} \quad (3)$$

где $k = 0, 1, 2, \dots$, $\tau_0 = 10^{-7}$ с.

В целях упрощения записи распределения тепловыделения от координаты принято, что доля излучения $p = 0,6$ поглощается в сверхпроводнике равномерно, а поглощение в слое MgO подчиняется закону Бугера – Ламберта с характерной длиной $x_\lambda = 10^{-5}$ м. Тогда, принимая во внимание условие нормировки, были получены следующие зависимости:

$$\varphi_1(x) = \varphi_2(x) = \varphi_3(x) = 0, \quad \varphi_4(x) = \frac{1-p}{x_\lambda} \cdot \frac{\exp\left[\frac{x - (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)}{x_\lambda}\right] - 1}{\exp\left[\frac{\delta_4}{x_\lambda}\right] - \frac{\delta_4}{x_\lambda} - 1}, \quad \varphi_5(x) = \frac{p}{\delta_5}. \quad (4)$$

Интересующим результатом решения задачи является изменение средней температуры в слое сверхпроводника $\langle T_5 \rangle$, а именно

$$\langle T_5 \rangle(\tau) = \frac{1}{\delta_5} \int_{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4}^{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5} T_5(x, \tau) dx. \quad (5)$$

Доля теплового потока излучения лазера, попадающего на поверхность болометра, q_{F0} , определялась на основе экспериментальных данных о перегреве сверхпроводящего слоя относительно температуры основания в промежутках между импульсами. Линейный вид этой зависимости от частоты свидетельствовал об отсутствии влияния отклика предыдущего импульса на последующий для данного диапазона частот. Угловым коэффициентом зависимости составил $(5,0 \pm 1,3) \cdot 10^{-2}$ К/кГц. Тогда можно записать:

$$\langle T_5 \rangle_{\min} - T_0 = \langle q_F \rangle \cdot \sum_{i=1}^5 R_{\text{терм},i}, \quad (6)$$

где $R_{\text{терм},i}$ – термическое сопротивление слоев болометрической структуры, а под средним тепловым потоком понимается

$$\langle q_F \rangle = f \cdot \int_0^{1/f} \int_0^{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5} q_{vi}(x, \tau) dx d\tau = q_{F0} \cdot \tau_0 \cdot f. \quad (7)$$

Из решения стационарной задачи теплопроводности в соответствующих слоях получим:

$$R_{\text{терм},1} = \frac{T_1(\delta_1) - T_0}{\langle q_F \rangle} = \frac{\delta_1}{\lambda_1}, \quad R_{\text{терм},2} = \frac{T_2(\delta_1 + \delta_2) - T_2(\delta_1)}{\langle q_F \rangle} = \frac{\delta_2}{\lambda_2},$$

$$R_{\text{терм},3} = \frac{T_3(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3) - T_3(\delta_1 + \delta_2)}{\langle q_F \rangle} = \frac{\delta_3}{\lambda_3},$$

$$R_{\text{терм,4}} = \frac{T_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4) - T_4(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3)}{\langle q_F \rangle} = \frac{\delta_4}{\lambda_4} \cdot \left(1 - (1-p) \cdot \frac{x_\lambda}{\delta_4} + \frac{(1-p) \cdot \frac{\delta_4}{2x_\lambda}}{e^{x_\lambda} - \frac{\delta_4}{x_\lambda} - 1} \right),$$

$$R_{\text{терм,5}} = \frac{\langle T_5 \rangle - T_5(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4)}{\langle q_F \rangle} = \frac{p \cdot \delta_5}{3 \cdot \lambda_5}. \quad (8)$$

Это позволяет, на основании данных о коэффициенте в линейной аппроксимации зависимости перегрева сверхпроводящего слоя относительно температуры основания в промежутках между импульсами, определив значения термических сопротивлений слоев болометрической структуры, найти тепловой поток q_{F0} , величина которого составила $1,45 \cdot 10^5$ Вт/м².

На рис. 6 представлено сравнение результатов расчета по описанной модели теплового отклика болометра с данными экспериментального исследования. Видно их хорошее согласование.

С целью выяснения потенциальных возможностей болометрической структуры для регистрации сигналов при высоких частотах следования импульсов передающего лазера было предпринято дополнительное расчетное исследование. На рис. 7 приведены результаты расчетов теплового отклика болометра $\langle T_5 \rangle - \langle T_5 \rangle_{\min}$ в зависимости от времени для различных частот следования лазерных импульсов вплоть до 5 МГц.

Вольт – ваттная чувствительность (рис. 8), рассчитывалась по следующей формуле

$$S_{\text{бол}} = \frac{I \cdot \left(\frac{d R_{\text{эл}}}{dT} \right) \cdot dT}{dQ}, \quad (9)$$

где dT – амплитуда отклика, а dQ – мощность излучения, попадающая на чувствительный элемент болометра. Вплоть до частоты 100 кГц чувствительность болометра остается практически постоянной и составляет $7,2 \cdot 10^{-3}$ В/Вт, далее она медленно падает и при частоте следования импульсов излучения 2 МГц ее значение достигает $5,0 \cdot 10^{-3}$ В/Вт.

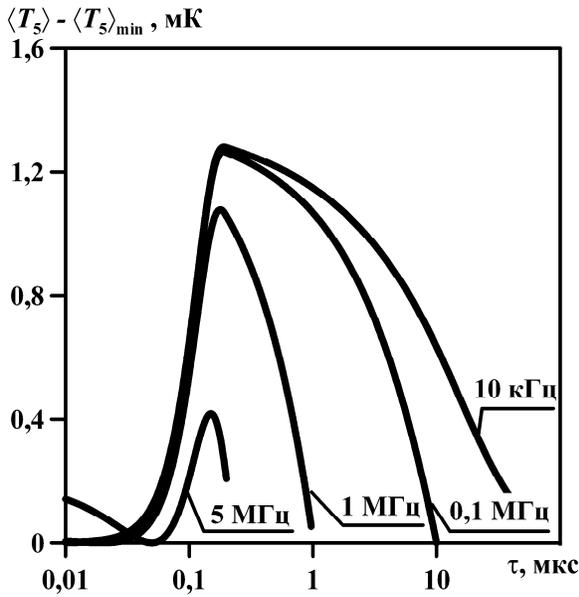


Рис. 7. Результаты расчетного исследования теплового отклика болометра в зависимости от времени для различных частот следования импульсов лазера

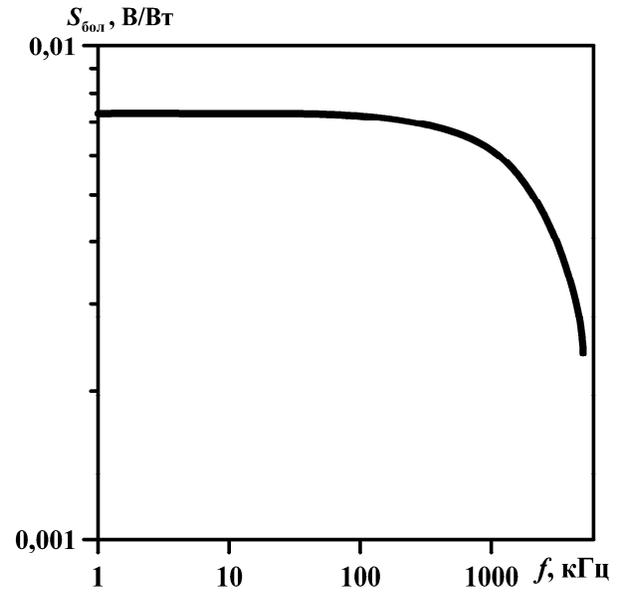


Рис. 8. Вольт – ваттная чувствительность болометра от частоты следования импульсов лазерного излучения.

Эквивалентная мощность шумов, NEP , рассчитывалась согласно следующему определению

$$NEP = \frac{U_{\text{шум}}}{U_{\text{сигнал}}} \cdot \frac{dQ}{\sqrt{\Delta f}}, \quad (10)$$

где $U_{\text{шум}}$ и $U_{\text{сигнал}}$ соответственно напряжение шума и полезного сигнала, а Δf – полоса пропускания измерительного устройства. Пороговые характеристики определяются при условии $U_{\text{шум}}/U_{\text{сигнал}} = 1$. В наихудшем случае тепловой отклик может быть зарегистрирован на уровне 0,5 мК, тогда $\Delta f = 4$ МГц, а $NEP = 4,39 \cdot 10^{-5}$ Вт·Гц^{-0,5}. Обнаружительная способность (величина, обратная NEP , умноженная на корень из активной площади приемника) равна 25 (Гц·м)^{0,5}/Вт.

Полученные характеристики исследованной болометрической структуры соответствуют приведенным в литературе данным для пленок $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Исследовался также вопрос о влиянии толщины ВТСП-пленки и доли поглощаемого в ней излучения на величину болометрического отклика. Проведенные расчеты показали, что изменение толщины ВТСП-пленки, при учете

изменения доли поглощаемого в ней излучения лазера, слабо влияет на частотные характеристики структуры.

В пятой главе диссертации представлен анализ работы ВТСП-болметра, нагруженного транспортным током. Чувствительность болметра к тепловым воздействиям определяется прежде всего амплитудой падения напряжения через ВТСП-пленку, которая в свою очередь зависит от силы тока. При этом необходимо учитывать эффекты, вызываемые Джоулевым тепловыделением в сверхпроводнике.

Для описания зависимости тепловыделения за счет Джоулева разогрева была выбрана трехзонная модель тепловыделения. В зависимости от температуры сверхпроводника рассмотрены три возможных состояния: сверхпроводящее, переходное и нормальное:

$$q_{v,эл}(T, j) = \begin{cases} \rho_{норм} j^2 & \text{при } T_{кр}(j=0) \leq T, \\ \rho_{норм} j^2 \left(1 - \frac{j_{кр}(T_s)}{j} \cdot \frac{T_{кр}(j=0) - T}{T_{кр}(j=0) - T_s} \right), & \\ \text{при } T_s + \left(1 - \frac{j}{j_{кр}(T_s)} \right) (T_{кр}(j=0) - T_s) \leq T \leq T_{кр}(j=0), & (11) \\ 0 & \text{при } T \leq T_s + \left(1 - \frac{j}{j_{кр}(T_s)} \right) (T_{кр}(j=0) - T_s). \end{cases}$$

Здесь j – плотность транспортного тока в пленке, $\rho_{норм}$ – удельное электрическое сопротивление в нормальном состоянии, $j_{кр}(T_s)$ – критическая плотность тока ВТСП-материала при температуре T_s , $T_{кр}(j=0)$ – критическая температура сверхпроводника, T – средняя по объему температура сверхпроводника $\langle T_5 \rangle$. Характеристики ВТСП-материала принимались на основании имеющихся в литературе данных для ВТСП-пленок 2212, а именно $\rho_{норм} = 10^{-4}$ Ом·м, $j_{кр}(77 \text{ К}) = 10^7 \text{ А/м}^2$, $T_{кр}(j=0) = 92 \text{ К}$.

Устойчивые состояния ВТСП-пленки, нагруженной транспортным током, в промежутках между импульсами излучения лазера находятся из уравнения теплового баланса и условия устойчивости

$$\begin{cases} q_{F,\text{эл}}(T, j) + q_F(f) = q_{\text{охл}}(T), \\ \frac{d}{dT}(q_{\text{охл}}(T) - q_{F,\text{эл}}(T, j) - q_F(f)) > 0, \end{cases} \quad (12)$$

где $q_F(f)$ есть тепловой поток, определяемый по формуле (7), $q_{F,\text{эл}}(T, j) = q_{v,\text{эл}}(T, j)\delta_5$, а $q_{\text{охл}}(T)$ – теплопередача к стоку тепла с температурой T_0

$$q_{\text{охл}}(T) = \left(\sum R_{\text{терм}}\right)^{-1}(T - T_0). \quad (13)$$

Использовался следующий подход при выборе рабочей точки ВТСП-болметра: температура основания T_0 выбиралась в начале переходной области ВТСП-пленки при частоте $f = 0$, а сила тока устанавливалась таким образом, чтобы угол наклона кривой уноса тепла был выше, чем у кривой Джоулева тепловыделения, то есть $\frac{\partial q_{F,\text{эл}}(T_0, j)}{\partial T} < \left(\sum R_{\text{терм}}\right)^{-1}$. Последнее условие накладывает

следующие ограничения на плотность тока и выбор температуры стока тепла:

$$j_{\text{раб}} < \frac{T_{\text{кр}}(j=0) - T_s}{\rho_{\text{норм}} j_{\text{кр}}(T_s) \delta_5 \sum R_{\text{терм}}}, \quad (14)$$

$$T_s + \left(1 - \frac{j_{\text{раб}}}{j_{\text{кр}}(T_s)}\right) (T_{\text{кр}}(j=0) - T_s) < T_0 < T_{\text{кр}}(j=0). \quad (15)$$

При выбранных согласно выражениям (14) и (15) плотности транспортного тока и температуре стока тепла максимальная частота импульсов лазера, до которой чувствительность болметра остается высокой, определяется по формуле (12) при $T_{\text{кр}}(j=0)$

$$f < \frac{\left(\sum R_{\text{терм}}\right)^{-1} (T_{\text{кр}}(j=0) - T_0) - \rho_{\text{норм}} j_{\text{раб}}^2 \delta_5}{q_{F_0} \tau_0}. \quad (16)$$

На рис. 9 представлены стационарные состояния болметрической системы при значениях $\sum R_{\text{терм}}$ и δ_5 , соответствующих исследованной болметрической структуре. Расчет стационарных состояний произведен для $j_{\text{раб}} = 3,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ и температуры основания $T_0 = 86,5 \text{ К}$.

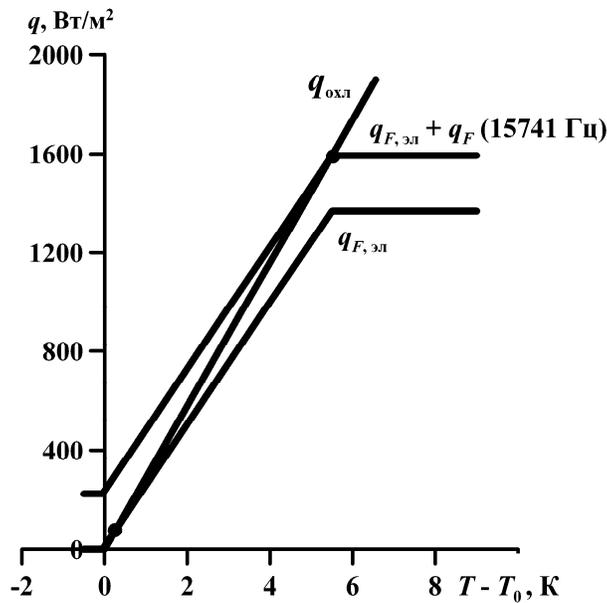


Рис. 9. Устойчивые состояния болометра, нагруженного транспортным током:
 $T_0 = 86,5 \text{ К}$; $j = 3,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$; $\sum R_{\text{терм}} = 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$

Для исследования влияния Джоулева тепловыделения на амплитуду теплового отклика был проведен расчет по описанной ранее модели, при этом к функции тепловыделения в слое 5 добавлялось слагаемое (11). Выполненный расчет показал, что температура $\langle T_5 \rangle_{\min}$ устанавливается в полном соответствии с выражением (12), а полученная зависимость перегрева ВТСП-пленки от времени практически совпадает с соответствующим расчетом, представленным на рис. 7. Выигрыш при регистрации отклика достигается лишь за счет увеличения падения напряжения через ВТСП-пленку, которое пропорционально силе тока.

Следует отметить, что при изготовлении самой пленки, формировании меандра, в процессе эксплуатации возможно появление локальных неоднородностей как в виде областей со сверхпроводящими свойствами пленки, существенно отличающимися от средних, так и неоднородностями геометрического характера (например локальное уменьшение толщины). Было проведено расчетное исследование влияния таких неоднородностей на отклик болометрической структуры. Рассматривалась ситуация, когда в ВТСП-пленке имеет место неоднородность сверхпроводящих свойств. Дефект представлял собой область, перекрывающую все сечение одной из полосок меандра. В пределах этой области удельное электрическое сопротивление пленки равно $\rho_{\text{норм}}$ (рис. 10).

В такой постановке задача похожа на описанную ранее выражениями (1 – 4), за исключением члена тепловыделения

$$q_{vi}(x, y, \tau) = \begin{cases} q_{vi}(x, \tau) & \text{при } i = 1 \dots 4, \\ q_{v5}(x, \tau) + q_{v,эл}(y, T_5) & \text{при } i = 5, \end{cases} \quad (17)$$

где $q_{vi}(x, \tau)$ записывается согласно формуле (3), $q_{v,эл}(y, T_5) = \rho_{норм} j^2$ при $-\frac{l_{деф}}{2} \leq y \leq \frac{l_{деф}}{2}$ и по формуле (11) для остальных значений y . Расчеты проводились при плотности транспортного тока $j_{раб} = 3,7 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$, температуре основания $T_0 = 86,5 \text{ К}$, частоте следования импульсов лазерного излучения $f = 10 \text{ кГц}$ и размерах дефекта от 0 % до 5 % от l .

Результатами решения задачи явилось падение напряжения

$$U(\tau) = \frac{1}{j} \int_{-\frac{l}{2}}^{\frac{l}{2}} q_{v,эл}(\langle T_5 \rangle(y, \tau), y) dy, \quad (18)$$

где $\langle T_5 \rangle(y, \tau) = \frac{1}{\delta_5} \int_{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4}^{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5} T_5(x, y, \tau) dx$.

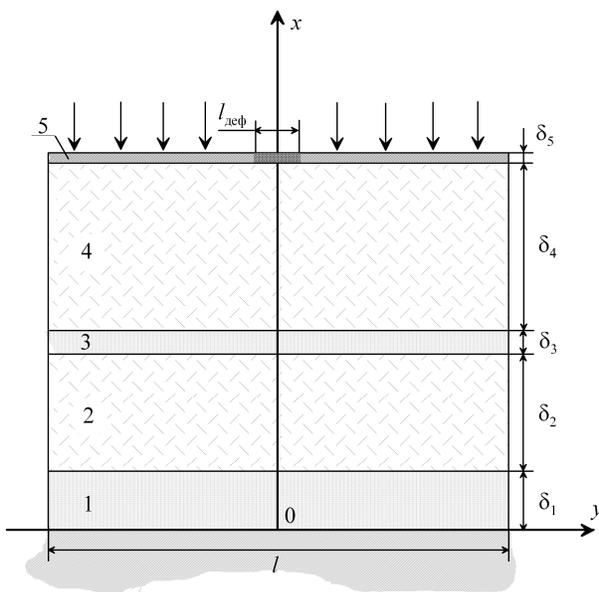


Рис. 10. Расчетная область для исследования влияния локальных неоднородностей сверхпроводящих свойств ВТСП-пленки на отклик болометрической структуры. Длина пленки $l = 1,1 \text{ мм}$. Обозначения слоев и их толщины δ_i соответствуют табл. 1

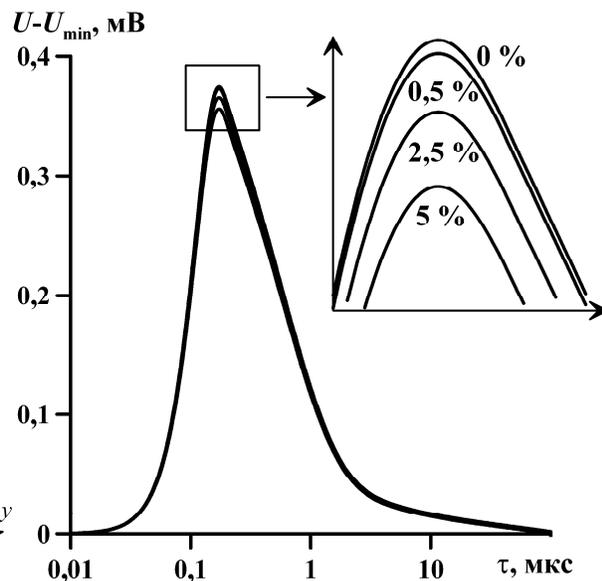


Рис. 11. Зависимость амплитуды отклика перепада напряжения через болометр от времени для различных размеров дефекта: $l_{деф} = 0; 0,5; 2,5 \text{ и } 5 \% l$

Проведенные расчеты зависимости теплового отклика от времени при различных размерах дефекта практически совпадают с полученными ранее. Это объясняется малой величиной амплитуды подогрева, что, в свою очередь, оказывает слабое влияние на разогрев за счет Джоулева тепловыделения. То есть влияние дефекта на температуру пленки ограничивается ее температурой в промежутках между импульсами $\langle T_5 \rangle_{\min}$. Зависимость перепада напряжения от времени представлена на рис. 11. Учитывая, что тепловой отклик для пленки с дефектом и без него практически не изменился, а удельное электрическое сопротивление линейно зависит от температуры, падение амплитуды перепада напряжения соответствует размерам дефекта.

Примером геометрического дефекта может служить локальное уменьшение толщины ВТСП-пленки. На практике длина такого дефекта весьма мала, зато глубина может быть значительной. В этом случае слагаемое тепловыделения в уравнениях нестационарной теплопроводности будет записываться с учетом локального изменения плотности транспортного тока и поглощения излучения. Расчеты проводились при длине дефекта 1 % от одной полоски меандра и глубины от 10 % до 90 % от толщины пленки. Анализ результатов исследования показал, что хотя наличие такого дефекта оказывает сильное влияние на общий уровень рабочих температур и падения напряжения через болометр, отклик практически не изменяется.

Основные выводы

1. Установлено, что пленка, приготовленная магнетронным распылением, имеет структурированный характер. Исследование топографии поверхности ВТСП - пленки Bi-Sr-Ca-Cu-O позволило получить информацию о наличии кристаллитов, их размерах, форме и направлении роста: расположение кристаллитов горизонтальное, преимущественно ориентированы в одном направлении, ширина 20 ... 50 нм, длина 0,3...1,1 мкм.
2. Проведено экспериментальное исследование характеристик теплового отклика ВТСП - болометра на последовательность импульсов излучения

лазера в диапазоне следования от 1 кГц до 10 кГц и получены зависимости перегрева ВТСП - пленки от времени. Установлено, что более чем через 10 лет после создания и хранения в естественных условиях постоянная времени релаксации приемного элемента на основе пленки Bi-Sr-Ca-Cu-O практически не изменилась и составила 17 мкс.

3. На основе экспериментальных данных развита и протестирована расчетная модель теплового отклика болометрической структуры. Численным моделированием теплового отклика ВТСП-болометра на воздействие последовательности импульсов излучения лазера в широком диапазоне частот установлено:

- вплоть до частоты 100 кГц чувствительность болометра остается практически постоянной и составляет не менее $7,2 \cdot 10^{-3}$ В/Вт, далее она медленно падает и при частоте следования импульсов излучения 2 МГц ее значение достигает $5,0 \cdot 10^{-3}$ В/Вт;
- абсолютные значения чувствительности, полученные для ВТСП – пленок на основе висмутовой керамики, согласуются с приведенными в литературе данными для иттриевых пленок;
- отношение поглощенной чувствительным элементом мощности излучения к квадратному корню из частотного диапазона, то есть эквивалентная мощность шумов, составила $4,39 \cdot 10^{-5}$ Вт·Гц^{-0,5}, а обнаружительная способность 25 (Гц·м)^{0,5}/Вт;
- толщина ВТСП - пленки при учете доли поглощаемого в ней излучения лазера слабо влияет на частотный диапазон работы болометра;

4. Проведением расчетного исследования влияния неоднородностей сверхпроводящих свойств ВТСП - пленки, нагруженной транспортным током, и дефектов ее поверхности на характеристики теплового отклика болометра, показано, что во всех случаях амплитуда теплового отклика практически не изменяется, влияние сказывается лишь на амплитуде падения напряжения через болометр и общем уровне температур структуры.

5. Исходя из условий тепловой стабилизации сверхпроводящих пленок, предложены рекомендации по выбору рабочих характеристик ВТСП-болометров, нагруженных транспортным током. Получены зависимости, связывающие характеристики болометрической структуры и ВТСП-материала с плотностью транспортного тока и температурой стока тепла. Предложено соотношение, ограничивающее частотный диапазон эффективной работы болометра.

Основные публикации по теме диссертации

1. Антоненко С.В., Коротков Д.П., Майрапетян А.С. Разработка макетного образца оптического канала связи с приемным элементом на основе ВТСП-болометра // В сб.: Труды 34-го совещания по физике низких температур (НТ 34). Т. 2. Ростов-на-Дону, 26-30 сент. 2006 г., Изд-во РГПУ. С. 260.
2. Майрапетян А.С., Харитонов В.С. Тепловой расчет макетного образца ВТСП болометра // В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2007. М.: МИФИ, 2007. Т. 4. С. 85–88.
3. Антоненко С.В., Коротков Д.П., Майрапетян А.С., Харитонов В.С. Экспериментальные исследования тепловой релаксации ВТСП болометра // В сб.: Труды научной сессии МИФИ-2008. М.: МИФИ, 2008. Т. 4. С. 110–111.
4. Коротков Д.П., Майрапетян А.С., Харитонов В.С. Исследование тепловой релаксации ВТСП болометра при воздействии оптических импульсов малой скважности // В сб: Науч. труды междунар. конф. «Телекоммуникационные системы и технологии», Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2008. Т. 2. С. 184–185.
5. Антоненко С.В., Коротков Д.П., Майрапетян А.С., Харитонов В.С. Исследование теплового отклика ВТСП болометра при воздействии оптических импульсов малой скважности // В сб.: Аннотации докладов научной сессии МИФИ-2009. М.: МИФИ, 2009. Т. 4. С. 110–111.

6. Антоненко С.В., Коротков Д.П., Майрапетян А.С., Харитонов В.С., Толкачева С.М. Исследование ВТСП Bi-Sr-Ca-Cu-O наноструктурированных болометров» // В сб.: Тезисы докладов 2-ой Всероссийской конференции «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях» М: МИФИ, 2009. С. 252–253.
7. Антоненко С.В., Коротков Д.П., Майрапетян А.С., Харитонов В.С., Толкачева С.М. Исследование наноструктурированных ВТСП болометров после 10 лет хранения // Нанотехника. 2009. № 2 (18). С. 78–80.
8. Антоненко С.В., Коротков Д.П., Майрапетян А.С., Харитонов В.С., Толкачева С.М. Изучение болометрического отклика приемных элементов на основе наноструктурированных ВТСП пленок // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2010. № 1. С. 24–26.
9. Антоненко С.В., Лаврухин А.А., Майрапетян А.С., Харитонов В.С. Моделирование теплового отклика приемных элементов болометров на основе ВТСП // Естественные и технические науки. 2010. № 4. С. 33–40.