

---

На правах рукописи

Лягги Матвей Валерьевич

**«Детекторные характеристики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  бикристаллических  
джозефсоновских переходов с взаимнонаклоненными осями [001]  
в терагерцовой области частот»**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ: 01.04.01 –

Приборы и методы экспериментальной физики.

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук.

---

Москва 2006 г.

Работа выполнена в Институте радиотехники и электроники РАН, а также в Исследовательском центре г. Юлиха (Германия), в рамках соглашения о научном сотрудничестве.

**Научные руководители:**

профессор К. Урбан,

кандидат физико-математических наук Ю.Я. Дивин.

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук В.Ф. Лукичев

доктор физико-математических наук Г.А. Овсянников

**Ведущая организация:**

НИИЯФ МГУ, г. Москва

Защита состоится «26» января 2007 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д002.231.03 в Институте радиотехники и электроники РАН (101999, г. Москва, ГСП-9, ул. Моховая, д. 11, корп. 7)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института радиотехники и электроники РАН

Автореферат разослан «21» декабря 2006 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета

к.ф.-м.н. М.И. Перцовский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ.

**Актуальность проблемы.** В последнее время, в связи с повысившимся интересом к применению терагерцовых технологий в сфере медицины, биологии и безопасности, разработаны новые типы источников терагерцового излучения, такие как квантовые каскадные лазеры, широкополосные источники, использующие релятивистские электроны, широкополосные источники, работающие на эффекте фотопроводимости или электрооптических эффектах при накачке фемтосекундными лазерными импульсами [1-3]. Отличительной чертой новых терагерцовых источников является нестационарность происходящих в них физических процессов и, как следствие этого, импульсный характер их выходного излучения. Импульсный характер излучения предъявляет определенные требования на спектроскопические методики, использующиеся для спектрального анализа данных источников терагерцового излучения. В первую очередь это малое время отклика, большой динамический диапазон по мощности и высокая скорость сканирования спектра.

По сравнению с традиционными спектроскопическими методами, используемыми в данной области частот [4,5], Гильберт-спектроскопия (ГС) [6], основанная на эффекте взаимодействия джозефсоновской генерации с внешним излучением, позволяет осуществлять быстрый спектральный анализ как непрерывных, так и импульсных терагерцовых источников с произвольным спектром излучения. В рамках резистивной модели (РМ) [7] джозефсоновского перехода (ДП) частотно-селективный отклик тока ДП связан со спектром внешнего излучения преобразованием Гильберта. Таким образом, спектр произвольного внешнего излучения может быть восстановлен из зависимости отклика ДП на это излучение при помощи обратного преобразования Гильберта [6]. Из-за использования преобразования Гильберта данная методика и получила название ГС, а детектор, использующий частотно-селективный режим работы ДП, получил название частотно-селективный джозефсоновский детектор.

Приближение РМ обычно выполняется в ДП при напряжениях  $V \ll 2\Delta/e$ , где  $2\Delta$  - величина энергетической щели в спектре возбуждений сверхпроводника. Так как напряжение на ДП связано с частотой джозефсоновской генерации  $f_j$  соотношением  $V = hf_j/2e$ , то, очевидно, что для осуществления ГС в терагерцовом диапазоне частот необходимы ДП из сверхпроводников с величиной энергетической щели порядка нескольких десятков миллиэлектронвольт. На данный момент такими сверхпроводниками являются высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП) на основе купратов. Среди ДП из ВТСП наилучшим согласием с РМ, а также самыми высокими значениями характерного напряжения  $V_c = I_c R_n$ , где  $I_c$  и  $R_n$  - критический ток и сопротивление ДП в нормальном состоянии, соответственно, обладают бикристаллические переходы (БП). Наибольшее распространение получили БП с вертикаль-

ными осями [001] (БПВ), которые получаются при напылении пленки из ВТСП с вертикальной осью [001] на бикристаллическую подложку [8]. Значения  $V_c$  данного типа переходов достигает 0,2-0,3 мВ при  $T = 77$  К и 2-3 мВ при  $T = 4,2$  К. Однако при температурах ниже 40 – 50 К характеристики БПВ существенно отклоняются от РМ. Минимум эквивалентной шумовой мощности  $NEP$  частотно-селективного джозефсоновского детектора находится при напряжении  $0,9V_c$ . Следовательно, при температуре кипения жидкого азота минимум  $NEP$  частотно-селективного детектора на основе БПВ будет лежать в области частот 90 – 130 ГГц [9].

Недавно были получены БП из ВТСП с наклонными осями [001] (БПН) с рекордными значениями характерного напряжения до 8 мВ при  $T = 4,2$  К [10,11]. Согласно оценкам, основанным на РМ, минимум  $NEP$  частотно-селективного джозефсоновского детектора на основе БПН должен лежать в диапазоне 400 – 500 ГГц даже при температуре кипения жидкого азота, что делает их перспективными для применения в терагерцовой области частот. Также было показано, что с геометрической точки зрения бикристаллическая граница в БПН обладает на порядок большей пространственной однородностью, чем в БПВ, в которых из-за островкового роста пленки с вертикальной осью [001] бикристаллическая граница состоит из отдельных фасеток с разной разориентацией [10,11]. Неоднородность бикристаллической границы сильно затрудняет теоретическое описание транспортных характеристик БПВ. БПН лишены этого недостатка, поэтому исследование электрических и шумовых характеристик данного типа переходов может пролить свет на механизмы транспорта тока в БП из ВТСП.

Вышесказанное обуславливает актуальность данной диссертационной работы, посвященной исследованию детекторных характеристик  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  бикристаллических джозефсоновских переходов с взаимнонаклоненными осями [001] в терагерцовой области частот.

**Целью настоящей работы** являлось исследование электрических, низкочастотных (НЧ) шумовых и детекторных характеристик в терагерцовой области частот  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  БП с взаимнонаклоненными осями [001], а также исследование возможности использования таких БП для Гильберт-спектроскопии в терагерцовой области частот.

**На защиту выносятся** оригинальные результаты, составляющие научную новизну и практическую ценность данной работы.

**Научная новизна работы и представленных в ней результатов:**

1. Впервые получены  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  бикристаллические джозефсоновские переходы с наклонными осями [001], у которых вольт-амперные характеристики в диапазоне температур 55 - 75 К с точностью до долей процента согласуются с аналогичными характеристиками из РМ, что существенно упрощает анализ работы де-

текторов и спектрометров на основе данных переходов.

2. Впервые для переходов из ВТСП экспериментально продемонстрированы полная корреляция флуктуаций критического тока  $\delta I_c$  и нормального сопротивления  $\delta R_n$ , а также равенство их нормированных спектральных плотностей. Сделан вывод о том, что механизмом переноса сверхтока и тока квазичастиц в БП с наклонными осями [001] является прямое туннелирование через одни и те же места барьера.
3. Впервые экспериментально исследовано детектирование электромагнитного излучения  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  БП с наклонными осями [001]. На частоте 0,7 ТГц в частотно-селективном режиме достигнуты значения вольт-ваттной чувствительности, эквивалентной шумовой мощности  $NEP$  и динамического диапазона по мощности, равные  $(7 \pm 2) \cdot 10^{-4}$  В/Вт,  $(2,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-13}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> и  $47 \pm 3$  дБ, соответственно. Показано, что достигнутые величины вольт-ваттной чувствительности согласуются с аналогичными значениями, следующими из РМ с учетом тепловых флуктуаций.

#### **Практическая ценность работы:**

1. Разработана технология низкотемпературного отжига  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  БП с наклонными осями [001] в атмосфере озона, активированного ультрафиолетовым излучением, которая позволяет повышать проводимость переходов, снижать НЧ шумы и улучшать согласии их ВАХ с РМ без ухудшения характерного напряжения.
2. Разработаны экспериментальные установки для исследования электрических, НЧ шумовых и детекторных характеристик тонкопленочных БП в интервале температур  $7 \div 90$  К при напряжениях смещения на переходе до 20 мВ. Входные шумы напряжения криогенного усилителя установки для исследования шумовых характеристик составляли  $2,3 \cdot 10^{-10}$  В/Гц<sup>1/2</sup>, коэффициент нелинейных искажений был меньше  $10^{-4}$  при напряжениях на переходе до 10 мВ, а частотная полоса усилителя равнялась 0 – 180 кГц. Экспериментальная установка для исследования детекторных характеристик позволяла исследовать характеристики переходов в частотном диапазоне 0,5 - 5 ТГц и в диапазоне мощностей, изменяемом на 45 дБ.
3. На основании численных расчетов предложен критерий верхнего предела динамического диапазона по мощности частотно-селективного джозефсоновского детектора и продемонстрировано его соответствие полученным экспериментальным данным. Согласно этому критерию величина динамического диапазона по мощности частотно-селективного джозефсоновского детектора на основе  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  БПН с сопротивлением 1 Ом может достигать 62 дБ в терагерцовой области частот, если шумы перехода обусловлены тепловыми флуктуациями.
4. Впервые продемонстрирована возможность использования БПН, охлажденных до азотных температур, для терагерцовой ГС. Показано, что с помощью исследованных переходов возможно измерение полихроматических спектров излучения газового лазера в области частот до 3 ТГц за время 2 сек.

**Достоверность результатов:** Достоверность результатов не вызывает сомнений и подтверждена исследованиями на большом количестве  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  БП, теоретическими расчетами и результатами компьютерного моделирования. Часть результатов согласуется с другими исследованиями, выполненными в ИЭ РАН без участия автора, а также с исследованиями проведенными другими научными группами.

**Апробация работы:** Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях: Applied Superconductivity Conference ASC 2002, Houston, USA; 6th European Conference on Applied Superconductivity EUCAS 2003, Sorrento, Italy; Joint 29 Int. Conference on Infrared and Millimeter Wave and 12 Int. Conference on Terahertz electronics, Karlsruhe, Germany, 2004; 8th Int. Conference on Applied Electromagnetics and Communications, Zagreb, Croatia, 2005; 7th European Conference on Applied Superconductivity EUCAS 2005, Vienna, Austria; Int. Workshop on Terahertz Technology, Osaka, Japan, 2005; Applied Superconductivity Conference ASC 2006, Seattle, USA; 2-я международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости”, Звенигород, Россия, 2006.

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 12 печатных работах, список которых приведен в конце автореферата.

**Вклад автора** в проведенную работу заключался в следующем:

1. разработал экспериментальные установки для исследования электрических, шумовых и детекторных характеристик тонкопленочных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  БП.
2. разработал технологию низкотемпературного отжига  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  БП в атмосфере озона, активированного ультрафиолетовым излучением.
3. провел представленные в работе теоретические оценки.
4. разработал методики измерения шумовых и детекторных характеристик тонкопленочных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  бикристаллических джозефсоновских переходов.
5. провел измерения необходимых экспериментальных данных, на основе которых были получены результаты и сделаны выводы данной работы.
6. проанализировал и сделал выводы из полученных экспериментальных данных.
7. представлял и защищал результаты проведенной работы в процессе ее апробации на научных семинарах и конференциях, участвовал в написании статей.

**Структура и объем диссертации.** Данная диссертация состоит из введения, шести глав и списка цитированной литературы из 138 пунктов. Объем диссертации составляет 159 печатные страницы, в том числе 7 таблиц и 43 рисунка.

#### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ.**

**Введение** содержит краткое описание области применения терагерцовых технологий, характеристики основных спектроскопических методик, использующихся в терагерцовой области частот, также в нем перечислены недавно появившиеся мощ-

ные импульсные источники терагерцового излучения. В конце введения обосновывается актуальность выбранной темы, научная новизна и практическая ценность представленной работы.

В главе 1 представлен обзор литературы, непосредственно относящейся к теме работы и затрагиваемых в ней вопросов.

В разделах 1.1-1.2 приведены основные формулы и термины, которые описывают эффект Джозефсона в сверхпроводящих структурах, а также основные уравнения теории ГС.

В разделах 1.3-1.5 перечислены основные типы БП из ВТСП и приведены их характеристики. Рассмотрены модели барьера в БП из ВТСП и приведены основные экспериментальные материалы и представления, касающиеся НЧ шумов в БПВ.

В разделе 1.6 перечислены способы насыщения БП из ВТСП кислородом и рассмотрены изменения характеристик БП, к которым приводят различные методы насыщения БП кислородом.

В разделе 1.7 приведены известные из литературы характеристики частотно-селективного детектора на основе БП из ВТСП.

В разделе 1.8 сформулированы актуальные задачи, которые необходимо решить для обоснованного применения  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  БПН для ГС в терагерцовой области частот:

1. Исследовать электрические и НЧ шумовые характеристики БПН.
2. Исследовать влияние концентрации кислорода в области бикристаллического шва на электрические и НЧ шумовые характеристики БПН.
3. Экспериментально и теоретически исследовать детекторные характеристики БПН в терагерцовом диапазоне частот и сравнить их с аналогичными характеристиками БПВ.
4. Экспериментально исследовать возможность использования БПН для терагерцовой ГС.

Глава 2 содержит описание оригинальных экспериментальных установок, использовавшихся в данной работе.

В разделе 2.1 описано устройство и характеристики экспериментальной установки для исследования электрических и шумовых характеристик БП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Установка позволяла исследовать параметры БП при  $T = 7 - 90$  К. Электрические и шумовые характеристики БП измерялись при помощи специально разработанного криогенного усилителя, который имеет частотную полосу 0 - 180 кГц, входные шумы по напряжению  $2,3 \cdot 10^{-10}$  В/Гц<sup>1/2</sup>, коэффициент нелинейных искажений меньше  $10^{-4}$  при напряжениях на входе до 10 мВ.

В разделе 2.2 описано устройство и характеристики экспериментальной установ-

ки для исследования детекторных характеристик БП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в терагерцовой области частот. Установка позволяла исследовать характеристики БП в частотном диапазоне 0,5 - 5 ТГц и в диапазоне мощностей, изменяемом на 45 дБ. Отклик напряжения БП на внешнее излучение измерялся при помощи составного малошумящего усилителя с криогенным предусилителем, который имел частотную полосу 100 Гц - 1,5 МГц и входные шумы по напряжению  $1,6 \cdot 10^{-10}$  В/Гц<sup>1/2</sup>.

В разделе 2.3 приведено описание экспериментальной установки для насыщения БП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  кислородом и обоснован выбор методики низкотемпературного отжига в озоне, активированном ультрафиолетовым (УФ) излучением для насыщения БП кислородом. Установка позволяла отжигать БП при температурах до 250°C. Максимальная скорость нагрева/охлаждения БП превышала 100°C/мин.

В главе 3 приведены результаты предварительного исследования вольт-амперных и НЧ шумовых характеристик БП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с вертикальными и наклонными осями [001], которые были получены с помощью распыления мишени из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в атмосфере кислорода на бикристаллические подложки с различной разориентацией, УФ литографии и последующего химического травления.

В разделе 3.1 кратко описаны мотивы, побудившие провести предварительное исследование вольт-амперных и НЧ шумовых характеристик разных типов БП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .

В разделе 3.2 описана методика измерения электрических и НЧ шумовых характеристик БП. Также предложена модификация уравнения для спектральной плотности мощности флуктуаций напряжения БП  $S_V$ , в которую в явном виде входит коэффициент корреляции между флуктуациями критического тока  $\delta I_c$  и флуктуациями сопротивления БП  $\delta R_n$ :

$$S_V(f) = \left( \frac{I_c^2 R_d}{I} \right)^2 S_i(f) + V^2 S_r(f) - 2k(f) V_c^2 [S_i(f) S_r(f)]^{1/2}, \quad (1)$$

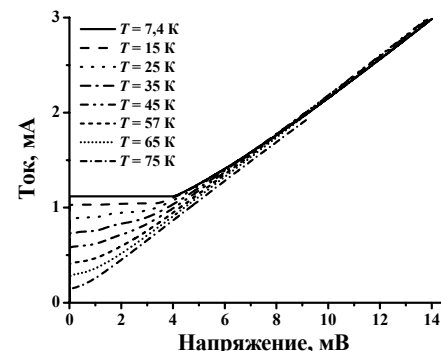


Рис. 1. Семейство ВАХ БПН.

где  $V$  и  $I$  — напряжение и ток через переход,  $f$  — частота,  $R_d$  — дифференциальное сопротивление БП,  $S_i = (S_{I_c}/I_c^2)$  и  $S_r = (S_{R_n}/R_n^2)$  — нормированные спектральные плотности мощности флуктуаций критического тока и сопротивления БП, соответственно,  $k(f)$  — коэффициент корреляции между флуктуациями  $\delta I_c$  и  $\delta R_n$ .

В разделе 3.3 приведены результаты исследования вольт-амперных характе-

ристик (ВАХ) 20-ти БП из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  с  $R_n = 0,6 - 12$  Ом на подложках из  $\text{NdGaO}_3$ ,  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{MgO}$ . Так как ВАХ БПВ достаточно хорошо изучены, то особое внимание в данном разделе уделено анализу ВАХ БПН. В диапазоне температур  $T > 40$  К ВАХ БПН были близки к гиперболической зависимости, характерной для РМ, как это показано на рис. 1. Более детальное сравнение экспериментальных ВАХ БПН с ВАХ, вычисленными согласно РМ с аналогичными значениями  $I_c$  и  $R_n$ , показало, что ВАХ БПН лежат ниже ВАХ, соответствующих РМ. Избыточного тока в исследованных БП не наблюдалось. Относительное отклонение ВАХ БПН от РМ увеличивалось с уменьшением температуры и при температурах выше 55 К не превышало 10%.

В разделе 3.4 проанализированы отклонения ВАХ БПН от РМ. Согласно [7] понижение ВАХ относительно ВАХ, соответствующих РМ, может происходить из-за шунтирования джозефсоновских осцилляций внешней системой с импедансом  $z_e$ . Сравнение экспериментальных ВАХ с результатами численного моделирования показало, что импеданс внешней системы  $z_e$  не может быть представлен в виде частотонезависимой емкости или в виде идеальной длинной линии с постоянным волновым сопротивлением. При  $T < 50$  К на зависимости  $R_d(T)$  появлялись резонансные особенности, выраженность которых уменьшалась с увеличением температуры. Появление резонансов на частотах выше 1 ТГц может быть вызвано взаимодействием джозефсоновской генерации с фоновыми модами  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ,  $\text{NdGaO}_3$  и  $\text{SrTiO}_3$ . Происхождение резонансов на частотах ниже 1 ТГц, по-видимому, связано с геометрическими резонансами в подложке.

В разделе 3.5 в диапазоне частот 0,1 – 25,6 кГц исследовались НЧ шумовые характеристики БП из  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ . Также как и в разделе 3.3 основное внимание было уделено БПН. НЧ шумы напряжения в исследованных переходах имели вид  $1/f^\alpha$  с  $\alpha = 0,7 - 1,0$ , как при токе смещения  $I \approx I_c$ , когда шумы БП обусловлены флуктуациями критического тока, так и при  $I \gg I_c$ , когда доминируют флуктуации сопротивления перехода, как это показано на рис. 2. Лишь для небольшого числа БП наблюда-

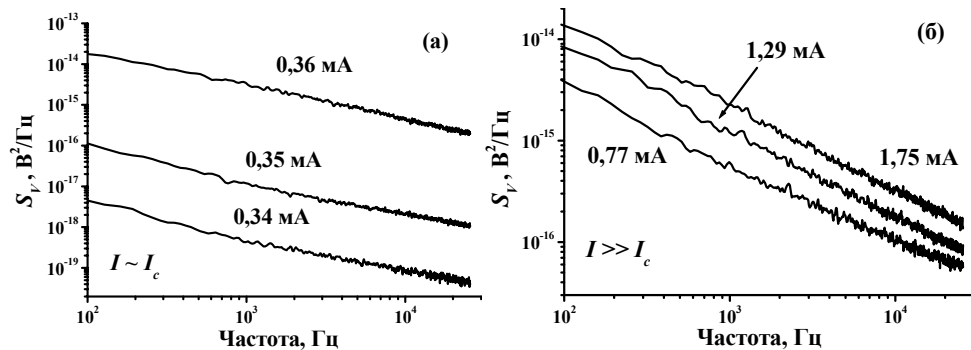


Рис. 2. Зависимости спектральной плотности мощности флуктуаций напряжения  $S_V$  БПН от частоты при токах смещения  $I \approx I_c$  (а) и  $I \gg I_c$  (б).

лись отклонения от зависимости  $1/f^\alpha$ , которые могут быть объяснены влиянием отдельных ловушек [12].

Экспериментальные зависимости спектральной плотности мощности флуктуаций напряжения  $S_V$  на частоте 3,2 кГц от тока смещения для БП с взаимнонаклоненными на углы  $\pm 14^\circ$  осями [001], при различных температурах представлены на рис. 3а символами. С качественной точки зрения форма зависимости спектральной плотности мощности флуктуаций напряжения БПН от тока смещения сходна с хорошо известными аналогичными зависимостями для БПВ. Следовательно, также как и в случае БПВ, можно попытаться описать зависимость  $S_V(I)$  БПН при помощи модели, в которой источниками НЧ шума являются флуктуации  $\delta I_c$  и  $\delta R_n$ . Анализ шумовых параметров БП проводился при  $T > 55$  К, где ВАХ БП удовлетворительно описывается РМ. На рис. 3б штриховыми линиями показаны результаты подгонки экспериментальных данных при помощи уравнения (1). В качестве параметров подгонки использовались  $S_i$ ,  $S_r$  и коэффициент корреляции  $k$  между флуктуации  $\delta I_c$  и  $\delta R_n$ . Видно, что экспериментальные результаты хорошо описываются уравнением (1).

Согласно результатам шумового анализа усредненная величина коэффициента корреляции в БПН равнялась -0,9. Это свидетельствует о том, что в среднем флуктуации  $\delta I_c$  и  $\delta R_n$  в БПН почти полностью коррелированы, и сверхток и ток квазичастиц в значительной степени текут через одни и те же места барьера. В исследованных нами БПВ средняя величина коэффициента корреляции равнялась -0,7. Таким образом, анализ значений коэффициента корреляции подтверждает предположение о том, что в среднем барьер БПН более однороден, чем барьер БПВ.

Несмотря на сильные отклонения ВАХ БП от РМ в области низких температур, линейная зависимость  $S_V$  от  $V^2$  при больших смещениях позволяла вычислить значения  $S_r$  в широком диапазоне температур 7 – 75 К. Вычисленные значения  $S_r$  для БПВ, также как и для БПН, не демонстрировали явной зависимости от температуры,

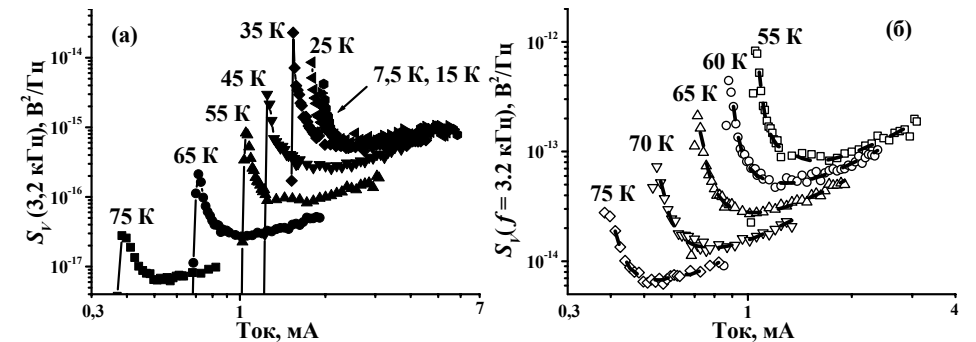


Рис. 3. Зависимости спектральной плотности мощности флуктуаций напряжения  $S_V$  на частоте 3,2 кГц от тока смещения (а). Экспериментальные зависимости  $S_V(I)$  (символы) и результаты подгонки экспериментальных данных при помощи уравнения (1) (штриховые линии) (б).

что хорошо согласуется с известными из литературы данными для БПВ [13]. Значения  $S_i$  были получены в более узком диапазоне температур 55 – 75 К, где ВАХ БП удовлетворительно описывается РМ.

В исследованных БПВ усредненное значение параметра  $p = (S_i / S_r)^{1/2}$  равнялось 1,5. В БПН среднее значение параметра  $p$  равнялось 1,2. Таким образом, параметры барьера в БПН более близки к параметрам однородного барьера, для которого  $k = -1$  и  $p = 1$ , чем параметры барьера в БПВ.

Наилучшего спектрального разрешения частотно-селективный детектор на основе ДП достигает в диапазоне напряжении  $V > V_c$ , где основной вклад в шумы перехода вносят флуктуации сопротивления  $\delta R_n$ . Поэтому, для ответа на вопрос, БП какого типа более предпочтительны для практического использования в частотно-селективном детекторе, необходимо сравнить величины  $S_r$  для БП разного типа, имеющих одинаковое сопротивление. Анализ значений  $S_r$  показал, что для БП, изготовленных в рамках одной оптимизации условий напыления эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , отношение  $(S_r / R_n)$  не зависит от типа БП. Следовательно, благодаря более высоким (до трех раз) значениям  $V_c$ , БПН более перспективны для использования в частотно-селективном детектировании, чем БПВ. Однако для окончательного ответа на поставленный вопрос необходимо исследование детекторных характеристик БПН.

В разделе 3.6 проанализированы экспериментальные данные, представленные в данной главе, и на их основе в разделе 3.7 сделаны выводы.

**В главе 4** исследовано влияние низкотемпературного отжига в озоне, активированном УФ излучением, на электрические и шумовые характеристики БПН.

В разделе 4.1 кратко описаны возможные причины изменения характеристик бикристаллического шва в процессе формирования БП.

В разделе 4.2 показано, что при формировании БП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  при помощи травления в 0,1 % растворе брома в этаноле происходит увеличение удельного сопротивления, уменьшение плотности критического тока  $j_c$ , а характерное напряжение БП уменьшается. После длительного отжига при комнатной температуре в атмосфере сухого воздуха удельные электрические характеристики БП, а также значение  $V_c$ , восстановились. Это свидетельствует о том, что травление в растворе брома в этаноле не приводит к изменениям катионной подсистемы в области бикристаллического шва, а затрагивает лишь кислородную подсистему. Наиболее вероятной причиной восстановления удельных электрических характеристик БП после отжига при комнатной температуре является диффузия кислорода из берегов в область бикристаллического шва. Однако восстановление концентрации кислорода в области бикристаллического шва можно обеспечить не только за счет диффузии из берегов, но также и при помощи отжига БП в атмосфере, содержащей атомарный кислород.

В разделе 4.3 описана методика отжига мостиков и БП из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в атмосфере смеси озона и кислорода, активированных УФ излучением.

В разделе 4.4 показано, что отжиг тонкопленочных мостиков из  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с вертикальной и наклонной осью [001] приводит к незначительному уменьшению критической температуры, которое может быть объяснено температурноактивированным перераспределением кислорода. Ширина перехода в сверхпроводящее состояние и критический ток мостиков после отжига не менялись. Также в данном разделе показано, что отжиг в активированном УФ излучением озоне при  $T = 140^\circ\text{C}$  приводит к изменению концентрации кислорода в границах между зернами, но не в самих зернах  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .

В разделе 4.5 описано влияние низкотемпературного отжига в озоне, активированном УФ излучением, на ВАХ БПН. БПН были подвергнуты серии последовательных отжигов в течение 0,5, 1 и 2 часов при  $T = 140^\circ\text{C}$ . Первый же отжиг в течение 0,5 часа привел к двукратному уменьшению сопротивления переходов вне зависимости от их ширины. Увеличение значения  $V_c$  БПН составило несколько процентов. Таким образом, показано, что в БПН величина характерного напряжения не зависит от плотности критического тока  $j_c$ . Последующие отжиги в течение 1 и 2 часов не привели к дальнейшим изменениям ВАХ. Так как величина изменения сопротивления не зависела от ширины переходов, то можно сделать предположение, что отжиг привел к уменьшению толщины барьера, а не к увеличению эффективной площади перехода.

Семейство ВАХ БПН после серии отжигов показано на рис. 4а. Из рис. 4а видно, что сопротивление БПН не зависит от температуры. Так же как и в случае не отожженных БПН, избыточного тока не наблюдалось. Зависимость характерного напряжения перехода от температуры показана на вставке в рис. 4а. В диапазоне тем-

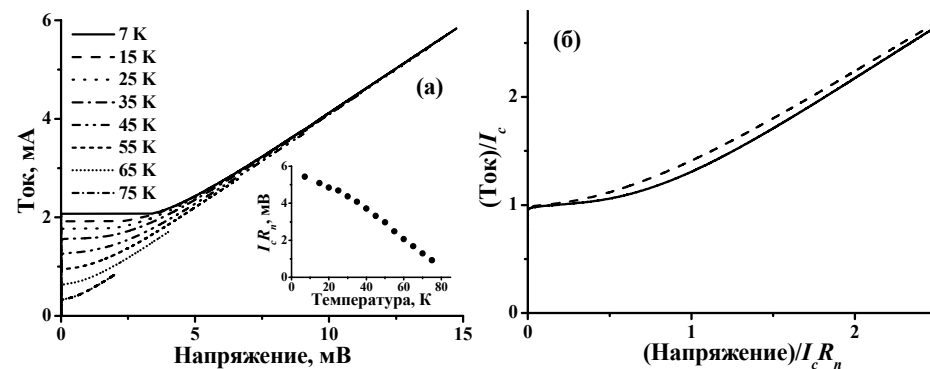


Рис. 4. Семейство ВАХ и температурная зависимость характерного напряжения БПН после серии отжигов в озоне, активированном УФ излучением (а). ВАХ БПН при  $T = 55$  К до (сплошная линия) и после (штриховая линия) серии отжигов.

ператур 35 – 75 К характерное напряжение линейно зависит от температуры, однако при более низких температурах  $T < 35$  К наклон зависимости  $V_c(T)$  меняется. Изменение наклона зависимости  $V_c(T)$  может быть связано с тем, что при низких температурах перестает выполняться неравенство  $w < 4\lambda_j$ , где  $w$  – ширина БП, а  $\lambda_j$  – джоузефсоновская глубина проникновения, и распределение сверхтока по ширине перехода перестает быть однородным. Отжиг привел не только к уменьшению сопротивления, но и к изменению формы ВАХ, как это показано на рис. 4б. После отжига относительное отклонение ВАХ БПН от РМ значительно уменьшилось и при  $T = 55$  К не превышало 0,4 %. На рис. 4б штриховая линия совпадает с ВАХ, вычисленной согласно РМ с аналогичными значениями  $I_c$  и  $R_n$ . Столь малые отклонения ВАХ БПН от РМ существенно упрощают анализ работы детекторов и спектрометров на основе данного типа переходов.

В разделе 4.6 описано влияние низкотемпературного отжига в озоне, активированном УФ излучением, на НЧ шумы БПН. Наряду с изменениями ВАХ БПН отжиг в течение 0,5 часа также привел к уменьшению амплитуды НЧ шумов БПН. Последующие отжики в течение 1 и 2 часов не привели к дальнейшим изменениям шумов. Зависимость  $S_V$  БПН от частоты до и после серии отжигов показана на рис. 5а. Для численного анализа изменений из зависимостей  $S_V(V)$  были найдены величины  $S_i$ ,  $S_r$  и коэффициента корреляции  $k$ . Результаты подгонки показаны на рис. 5б штриховыми линиями. Оказалось, что вследствие отжига величина  $S_r$  уменьшилась в 2,8 – 3,2 раза. Так как при отжиге площадь переходов не менялась, то в рамках модели, предложенной в [13], уменьшение величины  $S_r$  можно объяснить уменьшением количества ловушек, ответственных за возникновение НЧ шума.

Вычисленная для отожженных переходов величина коэффициента корреляции  $k$  с точностью до ошибки подгонки равнялась -1 (см. таблицу 1), что означает полную коррелированность флуктуаций  $\delta I_c$  и  $\delta R_n$ . Следовательно, в данных переходах ток

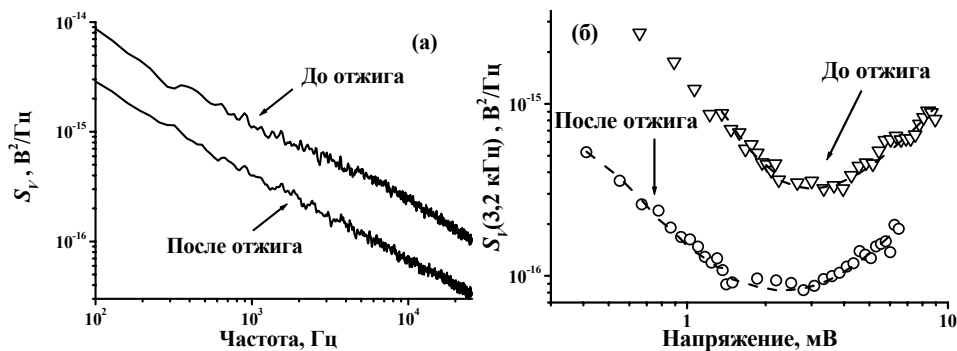


Рис. 5. Зависимость  $S_V$  БПН от частоты при  $V = 6$  мВ (а) и от напряжения (б) при  $T = 55$  К до и после серии отжигов в озоне, активированном УФ излучением. Штриховыми линиями показаны результаты подгонки экспериментальных данных при помощи уравнения (1).

$R_n$ , Ом	$I_c R_n$ , мВ	$S_i(3,2\text{кГц})$ , $10^{-12}$ Гц $^{-1}$	$S_r(3,2\text{кГц})$ , $10^{-12}$ Гц $^{-1}$	$(S_i/S_r)^{1/2}$	k
2,3	2,5	3,6±0,1	3,6±0,2	1,0±0,1	-1,0±0,1
3,3	1,9	3,4±0,1	3,5±0,2	1,0±0,1	-1,0±0,1
5,7	1,9	14±1	11±0,5	1,1±0,1	-1,0±0,1

Таблица 1. Шумовые характеристики БПН при  $T = 55$  К после серии низкотемпературных отжигов в озоне, активированном УФ излучением.

квазичастиц и сверхток текут через одни и те же места барьера. Влияние корреляции между флуктуациями  $\delta I_c$  и  $\delta R_n$  на шумы БПН наглядно показано на рис. 6, где для разных температур построены зависимости  $S_V(3,2\text{кГц})$  от  $V^2$ . Видно, что кривые на рис. 6 при больших смещениях не сливаются, а идут параллельно друг другу. Такое поведение можно объяснить при помощи уравнения (1), в котором корреляционный член пропорционален  $V_c^2$  и не зависит от смещения. Также оказалось, что в отожженных переходах с точностью до ошибки подгонки нормированные спектральные плотности  $S_i$  и  $S_r$  равны (см. таблицу 1), что свидетельствует о том, что параметры барьера для сверхтока и тока квазичастиц одинаковы. Учитывая отсутствие избыточного тока и независимость сопротивления перехода от температуры, можно сделать вывод, что механизмом переноса сверхтока и тока квазичастиц в БПН является прямое туннелирование.

В разделе 4.7 проанализированы экспериментальные данные, и на их основе в разделе 4.8 сделаны выводы.

В главе 5 представлены теоретические оценки детекторных характеристик частотно-селективного детектора на основе ДП с учетом и без учета влияния избыточных флуктуаций.

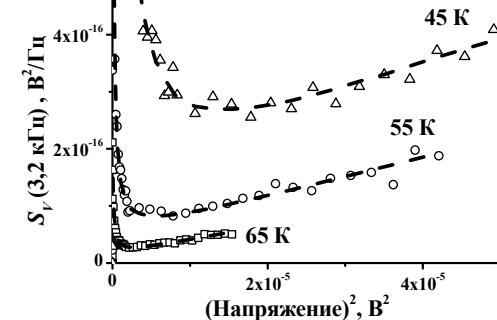


Рис. 6. Экспериментальные зависимости  $S_V(V^2)$  (символы) при  $T = 45, 55, 65$  К и результаты подгонки экспериментальных данных при помощи уравнения (1) (штриховые линии).

В разделе 5.1 обусловлена необходимость учета флуктуаций типа  $1/f$  при оценке характеристик частотно-селективного детектора в терагерцовом диапазоне частот.

В разделе 5.2 рассматриваются динамические ошибки, определяющие предельную скорость сканирования спектра при помощи частотно-селективного детектора на основе ДП. Показано, что при линейной развертке напряжения на ДП, предельная скорость сканирования спектра  $\nu$  в режиме задания напряжения на ДП определяется уравнением  $\nu = (2e/h) \cdot (\pi \text{Err} \cdot \delta V)^2 / (\ln(\sqrt{2}/\text{Err}))$ , а в режиме задания тока через ДП  $\nu = \pi B_{\text{resp}} \delta V / (\ln(\sqrt{2}/\text{Err}))$ , где  $B_{\text{resp}}$  – частотная полоса

14

канала измерения отклика тока ДП,  $\delta V$  – ширина линии джозефсоновской генерации, выраженная в вольтах,  $Err$  – относительное отклонение амплитуды и положения частотно-селективного резонанса, вызванного взаимодействием джозефсоновской генерации с внешним монохроматическим излучением, от их истинных значений, вычисленных согласно РМ. Согласно численным оценкам, при спектральном разрешении 1 ГГц и относительной ошибке измерения амплитуды и положения частотно-селективного резонанса, не превышающей 0,1 %, предельная скорость сканирования спектра частотно-селективного детектора в режиме задания тока может достигать  $9,2 \cdot 10^3$  ТГц/сек, если  $B_{resp} = 1$  МГц.

В разделе 5.3 приведена оценка  $NEP$  частотно-селективного детектора на основе БПН с учетом НЧ шумов типа  $1/f$ . Показано, что  $NEP$  частотно-селективного детектора на основе исследовавшихся БПН может быть найдена как

$$NEP = 2,3 \cdot 10^{-4} \pi \left( \frac{2e}{h} \right) kTR_n^{1/2} V_c \cdot \frac{(1 + \Omega^2) \cdot (3 + 2\Omega^2)}{\Omega \cdot f_m^{1/2}} \left[ \frac{Bm}{\sqrt{G\zeta}} \right], \quad (2)$$

где  $\Omega = hf/2eI_c R_n$  – безразмерная частота,  $f$  – частота внешнего монохроматического сигнала,  $f_m$  – частота, на которой измеряется  $NEP$ . Результаты численных оценок  $NEP$  частотно-селективного детектора на основе типичного БПН с  $R_n = 1$  Ом для  $f_m = 10$  кГц приведены на рис. 7а.

В разделе 5.4 приведена оценка величины динамического диапазона по мощности частотно-селективного детектора на основе БПН с учетом и без учета избыточных шумов типа  $1/f$ . Одним из главных вопросов при оценке величины динамического диапазона по мощности  $D$  является определение его верхней границы. В данной работе верхняя граница динамического диапазона по мощности определялась при помощи, так называемого, 3 дБ критерия, согласно которому верхней границей  $D$  является мощность внешнего излучения  $P_s$ , при которой чувствительность детек-

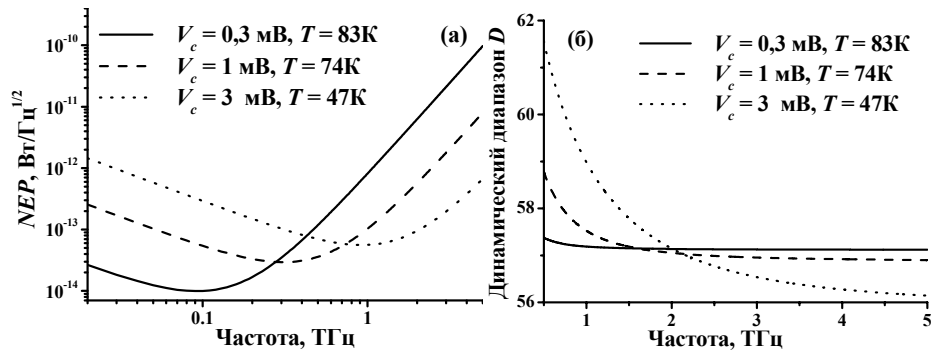


Рис. 7. Зависимость  $NEP$  частотно-селективного детектора на основе БПН, обусловленная НЧ шумами типа  $1/f$ , от частоты внешнего излучения (а). Частотная зависимость динамического диапазона по мощности  $D$  частотно-селективного детектора на основе БПН (б).

тора падает в 2 раза. При помощи численного моделирования зависимости амплитуды частотно-селективного отклика от мощности внешнего сигнала согласно 3 дБ критерию нами были найдены значения  $P_s$  для различных температур  $T = 40 \div 80$  К, сопротивлений ДП  $R_n = 1 \div 20$  Ом и безразмерных частот внешнего излучения  $\Omega$  в диапазоне  $0,3 \div 10$ . Оказалось, что найденный при помощи численного моделирования ход зависимости  $P_s(\Omega, T, R_n)$  может быть описан выражением

$$P_s = 10R_n \left[ 2\pi \left( \frac{2e}{h} \right) kT \frac{3 + 2\Omega^2}{\Omega} \right]^2 \quad (3)$$

Согласно данным численного моделирования формула (3) оценивает величину верхней границы динамического диапазона частотно-селективного детектора с точностью не хуже 5% при условии, что  $(4\pi kTe/hI_c) \leq 5 \cdot 10^{-2}$ .

Если величина  $NEP$  частотно-селективного детектора обусловлена тепловыми равновесными шумами, то выражение для динамического диапазона по мощности может быть записано как:

$$D = \frac{P_s}{NEP} = \frac{10\pi \left( \frac{2e}{h} \right) \sqrt{kTR_n \frac{3 + 2\Omega^2}{\Omega^2}}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

Результаты численной оценки динамического диапазона по мощности частотно-селективного детектора на основе типичного БПН с  $R_n = 1$  Ом приведены на рис. 7б. Из рис. 7б видно, что в терагерцовой области частот величина  $D$  варьируется в диапазоне 56 – 62 дБ.

В разделе 5.5 приведены выводы, сделанные на основе представленных в данной главе теоретических оценок.

**В главе 6** представлены результаты экспериментального исследования детекторных характеристик частотно-селективного детектора на основе БПН в терагерцовой области частот.

В разделе 6.1 кратко обоснована необходимость исследования детекторных характеристик БПН в терагерцовой области частот.

В разделе 6.2 описана методика измерения зависимости отклика напряжения  $\Delta V(V)$  БП на внешнее излучение произвольной мощности.

В разделе 6.3 рассмотрены ограничения, которые накладывает на частотную полосу квазиоптического тракта его устройство, рассчитаны и экспериментально измерены потери излучения на оптических элементах квазиоптического тракта, оценены потери при согласовании излучения с низкоомным БП.

В разделе 6.4 представлены результаты экспериментального исследования детекторных характеристик БПН и БПВ на частоте  $f = 0,692$  ТГц в диапазоне температур 54 – 75 К. Отклик напряжения БПН на внешнее излучение с частотой 0,692 ТГц из-



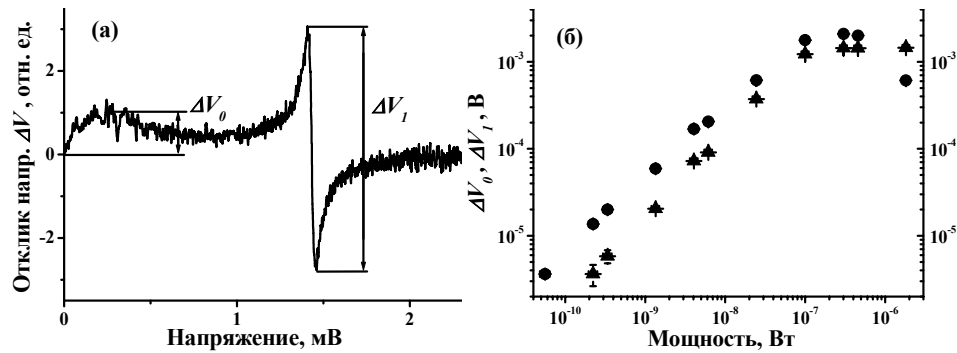


Рис. 8. Зависимость отклика напряжения БПН на монохроматическое излучение с частотой 0,692 ТГц от напряжения (а). Зависимость амплитуд неселективного  $\Delta V_0$  (треугольники) и частотно-селективного  $\Delta V_1$  (круги) откликов БПН от мощности внешнего излучения при  $T = 55$  К (б).

мерялся при помощи синхронного детектора на частоте  $f_m = 1,8$  кГц с постоянной времени  $\tau = 5$  мсек. В качестве источника излучения использовался НСООН лазер с оптической накачкой. Для изменения мощности излучения, попадающего на БПН, использовались тонкопленочные аттенуаторы, откалиброванные при помощи пироэлектрического и оптикоакустического приемников. Амплитуда частотно-селективного отклика напряжения  $\Delta V_1$  при напряжении  $V \cong hf/2e = 1.43$  мВ определялась из зависимости  $\Delta V(V)$ , как это показано на рис. 8а. Также на рис. 8а видно, что на зависимости  $\Delta V(V)$  при напряжениях близких к нулю есть максимум отклика с амплитудой  $\Delta V_0$ . Данный отклик связан с подавлением критического тока внешним излучением.

Зависимость амплитуды частотно-селективного отклика  $\Delta V_1$  БП с взаимнонаклоненными на углы  $\pm 14^\circ$  осями [001] с  $R_n = 4,1$  Ом от мощности внешнего излучения при  $T = 55$  К показана на рис. 8б при помощи кругов. Значение  $V_c$  БПН при данной температуре составляло 2,6 мВ. Для абсолютной калибровки оси поглощенной мощности было использовано известное теоретическое значение, соответствующее первому минимуму зависимости критического тока от мощности. Для уточнения величины поглощенной мощности внешнего излучения экспериментальные ВАХ сравнивались с результатами численного моделирования, основанного на РМ. Также в эксперименте измерялась зависимость амплитуды неселективного отклика напряжения  $\Delta V_0$  от мощности внешнего излучения, показанная на рис. 8б треугольниками. Особенностью неселективного отклика является то, что динамический диапазон по мощности неселективного отклика намного больше, чем динамический диапазон по мощности частотно-селективного отклика. На рис. 8б видно, что величина  $\Delta V_0$  линейно зависит от мощности внешнего излучения вплоть до напряжения насыщения,

которое соответствует ограничению амплитуды неселективного отклика первой ступени тока при  $V = 1,43$  мВ. Это свидетельствует о правильной калибровке аттенуаторов.

При малых мощностях внешнего излучения амплитуда частотно-селективного отклика  $\Delta V_1$  перехода линейно зависит от мощности  $P$  излучения, что позволяет вычислить вольт-ваттную чувствительность БПН в частотно-селективном режиме. Значения вольт-ваттной чувствительности  $r_V = \Delta V_1/P$ , полученные из экспериментальных зависимостей  $\Delta V_1(P)$  при разных температурах, приведены в таблице 2. Наибольшая вольт-ваттная чувствительность, равная  $(7 \pm 2) \cdot 10^4$  В/Вт, была получена при  $T = 55$  К. Как видно из таблицы 2, полученные значения  $r_V$  с точностью до ошибок эксперимента совпадают с теоретическими оценками, что свидетельствует о хорошем согласии характеристик исследованных БПН с РМ.

Также в таблице 2 приведены величины  $NEP$ , полученные из экспериментальных данных по формуле  $NEP = S_V^{1/2}/r_V$ , где спектральная плотность мощности флуктуаций напряжения БПН  $S_V$  была измерена на частоте 1,8 кГц при напряжении  $V = 1,43$  мВ. Для сравнения в таблице 2 приведены оценки  $NEP$ , вычисленные согласно РМ с учетом тепловых флуктуаций. Лучшие экспериментальные величины  $NEP$ , достигнутые в температурном интервале 54 - 75 К, составляли  $(2,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-13}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. При повышении частоты модуляции излучения до мегагерцового диапазона частот, что приведет к уменьшению шумов типа  $1/f_m$  до уровня тепловых флуктуаций, возможна реализация величин  $NEP$  около  $5 \cdot 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Из рис. 8б следует, что амплитуда отклика напряжения при  $T = 55$  К отклоняется от линейного закона в два раза при поглощенной мощности внешнего излучения  $P_s = (1,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-8}$  Вт, что соответствует величине динамического диапазона  $P_s/NEP$  по мощности равной  $47 \pm 3$  дБ в частотной полосе 1 Гц. Величины динамического

БП с взаимнонаклоненными осями [001] с $R_n = 4,1$ Ом				
		$r_V$ , В/Вт	$NEP$ , Вт/Гц <sup>1/2</sup>	$D$ , дБ
T= 54К $V_c = 2,6$ мВ	Теор. оценка	$6,1 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^{-15}$	63
	Эксперимент	$(7 \pm 2) \cdot 10^4$	$(3 \pm 1) \cdot 10^{-13}$	$47 \pm 3$
T= 65К $V_c = 1,7$ мВ	Теор. оценка	$4,1 \cdot 10^4$	$5,1 \cdot 10^{-15}$	62
	Эксперимент	$(3,6 \pm 1,1) \cdot 10^4$	$(2,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-13}$	$47 \pm 3$
T= 75К $V_c = 0,9$ мВ	Теор. оценка	$1,9 \cdot 10^4$	$8,3 \cdot 10^{-15}$	61
	Эксперимент	$(1,6 \pm 0,5) \cdot 10^4$	$(3,4 \pm 1,0) \cdot 10^{-13}$	$46 \pm 3$
БП с вертикальными осями [001] с $R_n = 5$ Ом				
T= 65К $V_c = 0,51$ мВ	Теор. оценка	$9,9 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^{-14}$	60,5
	Эксперимент	$(8,3 \pm 2,5) \cdot 10^3$	$(5,4 \pm 1,6) \cdot 10^{-13}$	$46 \pm 3$

Таблица 2. Детекторные характеристики БПН и БПВ в частотно-селективном режиме.

диапазона, полученные из экспериментальных данных аналогичным образом при других температурах, также приведены в таблице 2. Измеренные величины  $P_s$  также с точностью до ошибок эксперимента согласуются с формулой (3). Экспериментальные величины динамического диапазона по мощности для исследовавшихся переходов были в несколько десятков раз меньше, чем соответствующие теоретические величины, из-за избыточных шумов типа  $1/f_m$ .

Однако, так как было показано, что характеристики БПН хорошо описываются РМ, то следует ожидать, что при использовании более высокочастотных модуляторов или импульсных источников терагерцового излучения джозефсоновские детекторы на основе БПН, работающие при азотных температурах, будут иметь величины  $NEP$  около  $5 \cdot 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> и динамического диапазона около 60 дБ.

Для сравнения были исследованы детекторные характеристики БП с вертикальными осями [001] с  $R_n = 5$  Ом. Результаты исследования также приведены в таблице 2. Видно, что при одинаковой температуре БПН имеет вдвое лучшее значение  $NEP$  и в 4 раза более высокое значение вольт-ваттной чувствительности, чем БПВ. Таким образом, экспериментально подтверждено, что БПН имеют лучшие детекторные характеристики в терагерцовой области частот, чем БПВ.

В разделе 6.5 представлены результаты экспериментального исследования полихроматического спектра излучения газового лазера дальнего ИК диапазона при помощи частотно-селективного детектора на основе БПН. Эти лазеры в течение многих лет используются в спектроскопии, а так же в качестве генераторов накачки для гетеродинных приемников. Наибольшая выходная мощность данного типа лазеров достигается на частоте 2,523 ТГц при накачке паров метанола излучением CO<sub>2</sub> лазера. Однако из-за сложной структуры молекулы метанола и используемого многомодового резонатора, при максимизации выходной мощности такого лазера его излучение, как правило, имеет полихроматический спектр, в то время как для работы различных спектроскопических устройств требуется монохроматическое излучение.

Обычная процедура оптимизации спектрального состава излучения газового лазера заключается в сканировании длины резонатора лазера для поиска максимумов выходной мощности лазера при помощи широкополосного детектора. По разности между длинами резонатора, соответствующими разным максимумам выходной мощности, можно определить длину волны излучения, соответствующую данной длине резонатора. Однако гораздо быстрее оптимизация спектрального состава излучения лазера дальнего ИК диапазона может быть произведена при помощи частотно-селективного детектора на основе БПН и Гильберт-спектроскопии.

Для демонстрации возможности использования БПН для терагерцовой ГС полихроматического излучения газового лазера был выбран переход с  $R_n=3,1$  Ом. Температура перехода была понижена до 51 К, при этом его величина его  $V_c$  достигла 2,9

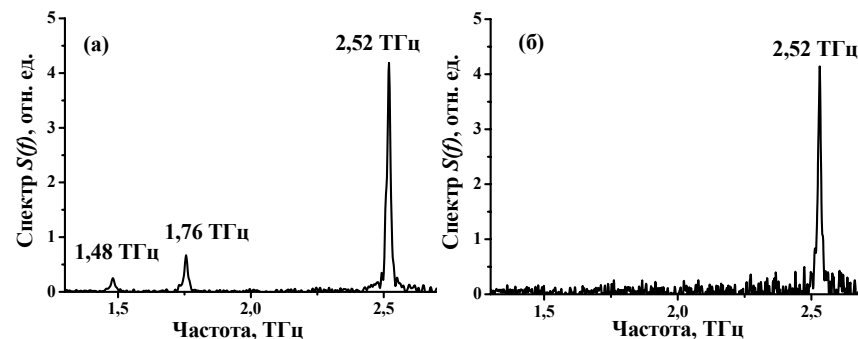


Рис. 9. Спектр выходного излучения HCOOH лазера с оптической накачкой при максимальной выходной мощности (а) и оптимизированный спектр выходного излучения (б), полученные при помощи ГС и частотно-селективного детектора на основе БПН за время, равное 2 сек.

мВ. Область спектрального анализа была сужена до 2,7 ТГц, а постоянная времени синхронного детектора уменьшена до 0,64 мсек, что позволило уменьшить время одного скана до 2 сек. Пример спектра выходного излучения газового лазера дальнего ИК диапазона при максимальной выходной мощности, полученный при помощи ГС на основе БПН, показан на рис. 9а. Видно, что спектр излучения лазера содержит три линии с частотами 1,48 ТГц, 1,76 ТГц и 2,52 ТГц. Сканируя длину резонатора лазера можно было добиться полного исчезновения излучения на частотах 1,48 ТГц и 1,76 ТГц. Оптимизированный таким образом спектр излучения лазера представлен на рис. 9б.

Спектральное разрешение частотно-селективного детектора на основе БПН в данном эксперименте на частоте 2,52 ТГц равнялось 13 ГГц. Таким образом, нами была продемонстрирована возможность использования БПН для ГС в терагерцовой области частот.

В заключении приведены основные результаты диссертации и сформулированы выводы.

### Основные результаты и выводы.

1. Разработаны экспериментальные установки для исследования электрических, низкочастотных шумовых и детекторных характеристик тонкопленочных БП в интервале температур  $7 \div 90$  К при напряжениях смещения на переходе до 20 мВ. Входные шумы напряжения криогенного усилителя установки для исследования шумовых характеристик составили  $2,3 \cdot 10^{-10}$  В/Гц<sup>1/2</sup>, коэффициент нелинейных искажений был меньше  $10^{-4}$  при напряжениях на переходе до 10 мВ, а частотная полоса усилителя равнялась 0 – 180 кГц. Экспериментальная установка для исследования детекторных характеристик позволяла исследовать характеристики переходов в частотном диапазоне 0,5 – 5 ТГц и в диапазоне мощно-

- стей, изменяемом на 45 дБ.
2. Впервые исследованы низкочастотные шумовые характеристики  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  БП с взаимнонаклоненными осями [001] и их связь с транспортными характеристиками перехода. Обнаружено, что спектральная плотность мощности низкочастотных флуктуаций напряжения  $S_V(f)$  имеет вид  $1/f^a$  с  $a = 0,7-1,0$  в диапазоне частот 100 Гц – 25,6 кГц.
  3. Разработана технология низкотемпературного отжига  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  БПН в атмосфере озона, активированного ультрафиолетовым излучением, которая позволяет повышать проводимость и снижать низкочастотные шумы  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  БП без ухудшения характерного напряжения. Изменения электрических характеристик бикристаллических переходов вследствие отжига могут быть объяснены уменьшением толщины барьера перехода из-за повышения концентрации кислорода в области бикристаллического шва.
  4. Обнаружено, что после отжига ВАХ исследовавшихся переходов при температурах выше 50 К с точностью до долей процента описывается резистивной моделью ДП, что существенно упрощает оптимизацию параметров детекторов и спектрометров на основе этих переходов.
  5. На основе модели, в которой причиной избыточного шума являются флуктуации критического тока  $\delta I_c$  и флуктуации сопротивления перехода  $\delta R_n$ , показано, что в отожженных БПН флуктуации  $\delta I_c$  и  $\delta R_n$  полностью коррелированы, а их нормированные спектральные плотности равны. Сделан вывод о том, что механизмом переноса сверхтока и тока квазичастиц является прямое туннелирование через одни и те же места барьера.
  6. В рамках резистивной модели с учетом тепловых флуктуаций получена формула, связывающая величину скорости сканирования спектра при помощи частотно-селективного джозефсоновского детектора с относительной ошибкой измерения положения и амплитуды нечетно-симметричного резонанса, вызванного взаимодействием внешнего монохроматического излучения с джозефсоновской генерацией. Показано, что если относительная ошибка измерения положения и амплитуды частотно-селективного отклика не превышает  $10^{-3}$ , а спектральное разрешение равно 1 ГГц, то можно достичь предельной скорости сканирования спектра  $9,2 \cdot 10^3$  ТГц/сек.
  7. Проведен численный расчет величины верхней границы динамического диапазона по мощности частотно-селективного джозефсоновского детектора и предложен соответствующий критерий, согласующийся с численным расчетом. Согласно этому критерию величина динамического диапазона по мощности частотно-селективного джозефсоновского детектора на основе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  БПН с сопротивлением 1 Ом варьируется от 56 до 62 дБ в терагерцовой области частот.

8. Впервые экспериментально исследован полный набор детекторных характеристик  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  БПН. На частоте 0,7 ТГц достигнуты значения вольт-ваттной чувствительности,  $NEP$  и динамического диапазона по мощности, равные  $(7 \pm 2) \cdot 10^4$  В/Вт,  $(2,6 \pm 0,8) \cdot 10^{-13}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> и  $47 \pm 3$  дБ, соответственно. Экспериментально подтверждено, что БПН имеют лучшие детекторные характеристики в терагерцовой области частот, чем БПВ.
9. Экспериментально показано, что измеренные величины вольт-ваттной чувствительности и верхней границы динамического диапазона по мощности частотно-селективного детектора на основе  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  БПН с точностью до ошибки эксперимента соответствовали предложенным теоретическим оценкам, базирующимся на резистивной модели с учетом тепловых флуктуаций. Сделан вывод, что при более высоких частотах модуляции внешнего излучения или при использовании импульсных источников излучения, уже при азотных температурах детектора можно достигнуть предельные значения  $NEP$  около  $5 \cdot 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> и динамического диапазона по мощности около 60 дБ.
10. Продемонстрирована возможность использования БПВ для терагерцовой Гильберт-спектроскопии полихроматического излучения газового лазера. Показано, что с помощью исследовавшихся переходов возможно измерение спектров в области частот до 3 ТГц за время 2 сек.

#### Список публикаций.

Основное содержание диссертации было представлено в следующих статьях в научные журналы, а также в трудах конференций:

1. Y. Y. Divin, O. Y. Volkov, M. Liatti, V. V. ShirotoV, V. V. Pavlovskii, U. Poppe, P. M. Shadrin, K. Urban// Physica C. 2002. V. 372-376. P. 416-419.
2. Yuri Y. Divin, Oleg Y. Volkov, Matvei V. Liatti and Vladimir N. Gubankov// IEEE Trans. Appl. Supercond. 2003. V. 13(2). P. 676-679.
3. M.V. Liatti, Y.Y. Divin, V.N. Gubankov, K. Urban// Appl. Supercond. 2003. Proc. 6th European Conf. Appl. Superconductivity (Sorrento, Italy, 14-16 Sept. 2003) ed. by A. Andreone et al., IOP Publishing (Bristol, Philadelphia). 2004. IOP Conf. Series N 181. P. 3106-3111.
4. Y. Y. Divin, O. Y. Volkov; M. Liatti, V. N. Gubankov, K. Urban// Appl. Supercond. 2003. Proc. 6th European Conf. Appl. Superconductivity (Sorrento, Italy, 14-16 Sept. 2003) ed. by A. Andreone et al., IOP Publishing (Bristol, Philadelphia). 2004. IOP Conf. Series N 181. P. 2970-2977.
5. Y.Y. Divin, M.V. Liatti, V.V. ShirotoV, U. Poppe, V.N. Gubankov, K. Urban// Conf. Digest of 2004 Joint 29 Int. Conf. on Infrared and Millimeter Wave and 12 Int. Conf. on Terahertz electronics (Sept.27-Oct.1, 2004, Karlsruhe, Germany), ed. by M. Thumm, W. Wiesbeck, IEEE (Piscataway, NJ, USA). 2004. P. 277-278.

6. Y.Y. Divin, M.V. Liatti, D.A. Tkachev, V.V. Pavlovskii, V.V. Shirotov, O.Y. Volkov, U. Poppe, C.L. Jia, V.N. Gubankov, K. Urban// Proc. of 18th Int. Conf. on Appl. Electromagnetics and Communications (12-14 Oct. 2005, Dubrovnik, Croatia), ed. by D. Bonafacic', KoREMA (Zagreb, Croatia). 2005. P. 149-152.
7. M. Liatti, Y. Divin, U. Poppe, V. Gubankov, K. Urban// Journal of Physics: Conf. Series. 2006. V. 43. P. 1211-1214.
8. Y. Divin, D. Tkachev, V. Pavlovskii, O. Volkov, M. Liatti, V. Gubankov, K. Urban// Journal of Physics: Conf. Series. 2006. V. 43. P. 1322-1325.
9. Y.Y. Divin, D.A. Tkachev, U. Poppe, C.L.Jia, K. Urban, M.V. Liatti, V.V. Pavlovskii, V. Shirotov, V. Gubankov// Extended Abstracts of Int. Workshop on Terahertz Technology (Nov. 16-18, 2005, Osaka, Japan). 2005. P. 81-84.
10. M.V. Liatti, U. Poppe and Y.Y. Divin// Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. 152504.
11. М.В. Лягги, Д.А. Ткачев, Ю.Я. Дивин//Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32(19). С. 79-85.
12. Лягги М.В., Дивин Ю.Я., Поппе У., Урбан К., Губанков В.Н.// Труды 2-й международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости" (9-13 октября, 2006 г., Звенигород). 2006. С. 267-268.

#### **Список цитированной литературы.**

1. R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram et al.// Nature. 2002. V. 417. N. 6885. P. 156-159.
2. G. Carr, M. Martin, W. McKinney et al.// Nature. 2002. V. 420. N 6912. P. 153-156.
3. C. Baker, I. Gregory, W. Tribe et al.// Appl. Phys. Lett. 2003. V. 83.(20). P. 4113-4115.
4. G.W. Chantry, Submillimetre Spectroscopy/ Academic Press, London, 1971.
5. Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids/ Ed. G. Gruener. Springer-Verlag, Berlin. 1998.
6. Ю.Я. Дивин, О.Ю. Полянский, А.Я. Шульман// Письма в ЖТФ. 1980. Т. 6. С. 454-457.
7. К. К. Лихарев, Б. Т. Ульрих, Системы с джозефсоновскими контактами/ МГУ, 1978. С. 128.
8. H. Hilgenkamp, J. Mannhart// Rev. Mod. Phys. 2002. V. 74. P. 485.
9. В.В. Широков, Ю.Я. Дивин// Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30.(12). С. 79-84.
10. Y.Y. Divin, U. Poppe, C.L. Jia et al.// Physica C. 2002. V. 372–376. P. 115-118.
11. Y.Y. Divin, I.M. Kotelyanskii, P.M. Shadrin et al.// Appl. Supercond. 2003. Proc. 6th European Conf. Appl. Superconductivity (Sorrento, Italy, 14-16 Sept. 2003) ed. by A. Andreone et al., IOP Publishing (Bristol, Philadelphia). 2004. IOP Conf. Series N 181. P. 3112-3118.
12. F. Herbstritt, T. Kemen, L. Alff et al.// Appl. Phys. Lett. 2001. V.78.(7). P. 955.
13. A. Marx, R. Gross// Appl. Phys. Lett. 1997. V. 70.(1). P. 120.