

На правах рукописи

Пестов Евгений Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО СВЧ ОТКЛИКА
СВЕРХПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ
БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ СВЧ МИКРОСКОПИИ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород — 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (ИФМ РАН)

Научный руководитель: доктор физико–математических наук,
Курин Владислав Викторович

Официальные оппоненты: доктор физико–математических наук,
Резник Александр Николаевич

доктор физико–математических наук,
Овсянников Геннадий Александрович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук

Защита состоится 22 марта 2012 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.098.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики микроструктур Российской академии наук (607680, Нижегородская область, Кстовский район, д. Афоново, ул. Академическая, д.7).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики микроструктур Российской академии наук, Нижний Новгород.

Автореферат диссертации разослан 15 февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.098.01
доктор физико–математических
наук, профессор

К. П. Гайкович

Общая характеристика работы

Актуальность темы

С момента открытия явления высокотемпературной сверхпроводимости (ВТСП) прошло более двадцати лет. Однако, несмотря на большое количество работ [1], посвященных изучению физических свойств ВТСП, остается много нерешенных проблем: механизм ВТСП, симметрия параметра порядка ВТСП, вихревые состояния в сверхпроводниках и т.д. Исследования нелинейных СВЧ свойств открывают широкие возможности для изучения фундаментальных свойств сверхпроводников. В частности, теоретически было показано, что возрастание нелинейности в области низких температур может свидетельствовать о d -симметрии параметра порядка ВТСП [2]. На основе измерений нелинейного отклика изучались вихревые состояния на фазовой диаграмме ВТСП [3]. Кроме этого, из температурной зависимости мощности сигнала на частоте третьей гармоники было определено время релаксации параметра порядка в низкотемпературном сверхпроводнике [4]. Таким образом, экспериментальное изучение нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников представляют интерес с точки зрения фундаментальной физики.

Для объяснения нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников было предложено большое количество моделей нелинейности: нелинейность, связанная с подавлением модуля параметра порядка сверхтоком [5]; с наличием джозефсоновских связей между гранулами в исследуемых образцах [6]; с движением вихрей в непараболическом потенциале пиннинга [7]; с тепловой нелинейностью [8] и др. Однако при температурах близких к T_c все величины критических токов, характеризующих различные механизмы нелинейности, стремятся к нулю, и многие механизмы могут давать вклад в полный отклик. Поэтому вопрос о том, как экспериментально выделить различные вклады в нелинейном СВЧ отклике сверхпроводника в области температур близких к T_c , остается до сих пор актуальным.

Экспериментальные исследования показали, что нелинейный СВЧ отклик сверхпроводников может определяться не только фундаментальными свойствами сверхпроводника, но и влиянием краев образца или дефектами структуры. Поэтому для исключения источников нелинейности технологического происхождения необходимо использовать локальные методы для исследования нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников. Для исследований линейных локальных

СВЧ свойств сверхпроводников 1990-х годах такие методы были развиты на основе ближнепольной СВЧ микроскопии [9, 10]. В то же время, для исследований нелинейного СВЧ отклика сверхпроводников эти методы практически не применялись. Поэтому экспериментальные исследования нелинейных СВЧ свойств с помощью метода ближнепольной СВЧ микроскопии являются важной задачей для изучения механизмов нелинейности в сверхпроводниках.

Исследования механизмов нелинейности сверхпроводников интересны также с прикладной точки зрения. В настоящее время ВТСП широко используются в фильтрах, мультиплексорах, линиях задержки, резонаторах и т.д. [11, 12]. Однако, при увеличении мощности СВЧ сигнала нелинейность СВЧ отклика сверхпроводников приводит к возрастанию потерь в фильтрах и резонаторах или искажению сигнала в линиях передач, что ограничивает их применимость. Поэтому результаты, полученные в диссертации, могут быть использованы для минимизации этих эффектов в пассивных сверхпроводящих СВЧ устройствах.

Исследования нелинейных СВЧ свойств методом ближнепольной СВЧ микроскопии также важны для тестирования параметров пленок, которые используются при изготовлении сверхпроводящих СВЧ структур. Необходимым условием является сохранение качества поверхности образца в процессе диагностики, что может быть осуществимо только на основе бесконтактных неразрушающих методик. В то же время, при изготовлении сверхпроводящих структур важна их однородность. Поэтому для локальной бесконтактной диагностики были предложены различные методы ближнепольной СВЧ микроскопии, которые позволяют исследовать СВЧ свойства сверхпроводников и сверхпроводящих структур с достаточно высоким разрешением [9, 10]. Однако, методы тестирования основных сверхпроводящих параметров с помощью этих методик были не достаточно развиты. Поэтому развитие методов бесконтактной локальной диагностики сверхпроводящих параметров на основе изучения локальных нелинейных СВЧ свойств является важной задачей.

Цель работы

Целями настоящей диссертации являются:

- проведение экспериментальных исследований нелинейных СВЧ свойств с помощью метода ближнепольной СВЧ микроскопии для определения механизмов, ответственных за нелинейный

СВЧ отклик в высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводниках;

- развитие методов локальной бесконтактной диагностики качества сверхпроводников и определение локальных сверхпроводящих параметров на основе изучения транспортных и нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников.

Научная новизна

1. Впервые ближнепольный СВЧ зонд с индуктивной связью использован для изучения локальных нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников и сверхпроводящих структур.
2. Установлена корреляция между температурной зависимостью нелинейного СВЧ отклика и температурной зависимостью удельного сопротивления сверхпроводника для высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводников.
3. Исследовано влияние микроструктуры пленок $YBCO$ на их нелинейные СВЧ свойства при температурах близких к T_c .
4. Предложена феноменологическая модель, основанная на модели эффективной среды для анализа нелинейного СВЧ отклика гранулированных сверхпроводников.
5. Для пленок Nb при температурах близких к T_c обнаружена немонотонная зависимость амплитуды максимума температурной зависимости мощности третьей гармоники от внешнего постоянного магнитного поля.
6. Показано, что в постоянном магнитном поле менее 500 Гс при высокой СВЧ мощности нелинейные СВЧ свойства пленок Nb обусловлены нелинейной вязкостью вихрей.

Научная и практическая значимость

Научная значимость работы состоит в изучении локальных нелинейных СВЧ свойств высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводников методом ближнепольной СВЧ микроскопии с целью определения механизмов нелинейного СВЧ отклика в них.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их использования для:

- бесконтактной диагностики локальных параметров высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводников и сверхпроводящих структур, выполненных на их основе с помощью метода нелинейной ближнепольной СВЧ микроскопии;
- уменьшения нелинейных СВЧ эффектов в пленках $YBCO$ за счет увеличения среднего размера кристаллита;
- уменьшения нелинейных СВЧ потерь в ниобиевых СВЧ резонаторах.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Метод ближнепольной СВЧ микроскопии, основанный на использовании зонда с индуктивной связью, может быть применен для исследований нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников.
2. Критической температура, измеренная с помощью метода ближнепольной СВЧ микроскопии, коррелирует с критической температурой, определенной из резистивных измерений, для различных сверхпроводников.
3. Полуширина температурной зависимости мощности третьей гармоники коррелирует со средним размером кристаллита и критическим током пиннинга для пленок $YBCO$.
4. В пленках $YBCO$ при больших размерах микрокристаллитов нелинейный СВЧ отклик определяется внутрикристаллитным пиннингом вихрей, а при уменьшении их размеров появляется дополнительный вклад в отклике, связанный с пиннингом магнитного потока на джозефсоновской сетке межкристаллитных границ.
5. При температурах близких к T_c амплитуда максимума температурной зависимости мощности третьей гармоники пленок Nb немонотонно зависит от внешнего постоянного магнитного поля.

Личный вклад автора в получение результатов

- равнозначный вклад (совместно с Ю.Н. Ноздриным и В.В. Куринным) в разработку метода ближнепольной СВЧ микроскопии, основанного на использовании зонда с индуктивной связью [A2, A4, A5, A7];

- равнозначный вклад (совместно с Ю.Н. Ноздриным) в экспериментальное исследование нелинейного СВЧ отклика различных сверхпроводников в зависимости от температуры, магнитного поля и пространственных распределений мощности третьей гармоники для пленок ВТСП и основной вклад в анализ экспериментальных данных [A1–A20];
- основной вклад в измерение температурных зависимостей мощности третьей гармоники и величины тока пиннинга для пленок $YBaCuO$ с различным размером кристаллита и равнозначный вклад (совместно с В.В. Куриным) в проведение анализа экспериментальных данных в рамках феноменологической модели двухфазной среды [A21–A25];
- основной вклад в измерения нелинейного СВЧ отклика и вольт-амперных характеристик пленок Nb во внешнем постоянном магнитном поле и обработку экспериментальных данных на основе моделей нелинейной вязкости вихрей, джоулева нагрева сверхпроводника и крипа магнитного потока [A4, A7, A11, A12, A14, A26, A27].

Апробация работы и публикации

Диссертация выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте физики микроструктур РАН в период с 1997 по 2012 год.

Основные результаты были представлены на Всероссийских собраниях по физике низких температур (Казань — 2000 г., Екатеринбург — 2003 г., Ростов-на-Дону—2006 г.); 2–4-ая, Международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости” (Звенигород – 2006, Звенигород –2008, Звенигород –2011); на международной конференции по прикладной сверхпроводимости (Virginia Beach—2000 г.), на международной конференции по сверхпроводящей электронике (Osaka—2001 г.), на 11 международном студенческом семинаре по СВЧ приложениям (Санкт-Петербург—2004 г.), международной конференции по современным проблемам сверхпроводимости (Ялта—2002 г.), 9-ой международной микроволновой конференции (Севастополь—1999 г.) и опубликованы в работах [A1–A27]. Основные результаты диссертационной работы также обсуждались на семинарах в ИФМ РАН и ФТИ РАН.

По теме диссертации опубликована 31 работа (10 статей в реферируемых журналах, 10 докладов на международных конферен-

циях, 7 докладов на всероссийских конференциях и совещаниях, 4 доклада на нижегородских сессиях молодых ученых).

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка работ автора по теме диссертации из 31 наименования, списка цитированной литературы из 170 работ. Общий объем диссертации 154 страницы, включая 50 рисунков и 1 таблицу.

Основное содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы, сформулированы цели диссертационной работы, показана ее новизна и практическая значимость, указаны сведения о личном вкладе диссертанта, апробации работы и публикациях, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения о структуре и содержании диссертации.

Первая глава посвящена современному состоянию проблемы нелинейного СВЧ отклика сверхпроводников.

В разделе 1.1 сделаны вводные замечания о нелинейных эффектах, которые наблюдаются в сверхпроводниках, механизмах нелинейного СВЧ отклика и методиках исследования нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников.

В разделе 1.2 рассмотрены основные нелинейные эффекты, которые наблюдаются в сверхпроводящих СВЧ устройствах: зависимость величины поверхностного импеданса сверхпроводника от мощности СВЧ сигнала, генерация гармоник основной частоты и интермодуляционные искажения СВЧ сигнала.

В разделе 1.3 сделан обзор основных экспериментальных методов исследования нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников. Показано, что методики, основанные на использовании, например, объемных или планарных резонаторов наряду с их преимуществами обладают рядом недостатков. Во-первых, при исследованиях с помощью этих методик делается предположение об однородности материала. Во-вторых, также известно, что в случае планарных резонаторов края образца вследствие концентрации токов могут существенно влиять на измерения нелинейного СВЧ отклика. Поэтому для изучения нелинейных СВЧ свойств необходимо использовать локальные методы, которые позволяют избавиться от влияния краев образцов и учитывать

их неоднородность. Для исследования локальных свойств сверхпроводников в 1990-х годах были предложены методы ближнепольной СВЧ микроскопии, которые позволяют создавать поле вблизи зонда на масштабах много меньших длины волны. Во второй части раздела 1.3 рассмотрены методы ближнепольной СВЧ микроскопии, которые используются в настоящее время для изучения линейных и нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников.

Раздел 1.4 посвящен обзору основных механизмов нелинейности сверхпроводников. В этом разделе рассмотрены теоретические модели нелинейности, связанной с подавлением модуля параметра порядка сверхтоком, наличием джозефсоновских связей между гранулами в образцах, тепловой нелинейности и вихревой нелинейности. Также проведен обзор экспериментальных данных по наблюдению нелинейного СВЧ отклика в высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводниках в рамках этих моделей. Кроме этого показано, что каждый механизм нелинейности характеризуется определенной величиной характерного критического тока или поля нелинейности.

В разделе 1.5 сделаны заключительные замечания о природе нелинейного СВЧ отклика сверхпроводников и методах его исследования.

Вторая глава посвящена описанию метода ближнепольной СВЧ микроскопии, который был использован в работе для исследования локальных нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников. Результаты этой главы опубликованы в работах [A2, A4, A5, A7].

В разделе 2.1 сделаны вводные замечания о достоинствах и недостатках существующих на сегодняшний день методов исследования нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников.

В разделе 2.2 описана блок-схема экспериментальной установки для наблюдения нелинейных локальных свойств сверхпроводников с помощью ближнепольного СВЧ зонда с индуктивной связью (рис. 1). Исследования нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников проводились при фиксированной частоте СВЧ сигнала $\nu = 472$ МГц. Зонд представляет собой медную проволочку длиной $l = 2$ мм и диаметром до $D \simeq 50$ мкм, соединяющую внешний и внутренние проводники коаксиального кабеля. Импеданс зонда был выбран много меньшим импеданса коаксиального кабеля. В этом случае, при отражении СВЧ сигнала от такого зонда, в закорачивающей проволочке течет ток высокой плотности, который создает квазистатическое магнитное поле, локализованное на масштабах порядка размеров зонда. При взаимодействии сильного высокочастотного поля вблизи проволочки с исследуемым образцом из-за нелинейных свойств сверхпроводника в спектре отраженного сигнала возникают высшие гармоники основ-

ной частоты, которые принимаются тем же зондом. Далее мощность сигнала на частоте третьей гармоники регистрируется приемником. Для предотвращения электрического контакта зонда с исследуемым образцом, приводящего к генерации паразитного сигнала на частоте третьей гармоники, на образец помещается тефлоновая пленка с толщиной 10 мкм.

Раздел 2.3 посвящен описанию криогенных систем для проведения температурных измерений нелинейности высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводников во внешнем магнитном поле в температурном диапазоне от 4,2 К до 300 К.

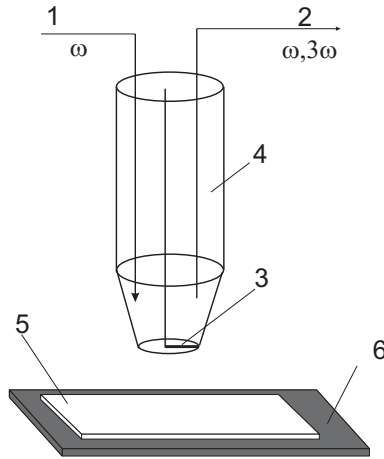


Рис. 1. Конструкция ближнепольного СВЧ зонда. 1 – падающий СВЧ сигнал; 2 – отраженный СВЧ сигнал; 3 – ближнепольный СВЧ зонд; 4 – коаксиальный кабель; 5 – тефлоновая пленка; 6 – сверхпроводящая пленка.

В разделе 2.4 сначала показано, что величина импеданса ближнепольного СВЧ зонда с индуктивной связью много меньше волнового импеданса коаксиального кабеля. Далее в приближении слабой нелинейности рассчитан линейный и нелинейный отклик, возникающий при облучении сверхпроводящей пленки ближнепольным СВЧ зондом с индуктивной связью. В заключении раздела показано, что на основе экспериментальных зависимостей мощности третьей гармоники от мощности первой гармоники может быть сделана оценка величины характерного критического тока нелинейности. Эта величина может давать информацию о механизме отклика в сверхпроводниках.

В разделе 2.5 сделаны заключительные выводы о методе ближнеполюсной микроскопии, основанного на использовании зонда с индуктивной связью.

Третья глава посвящена применениям метода ближнеполюсной СВЧ микроскопии для изучения характеристик сверхпроводника. Результаты этой главы опубликованы в работах [A1–A20].

В разделе 3.1 сделаны вводные замечания о существующих в настоящее время методах измерения параметров сверхпроводников.

В разделе 3.2 проводится описание экспериментальных методик измерения удельного сопротивления, критической плотности тока пиннинга и эффективной плотностью тока распаривания и приводятся параметры сверхпроводящих образцов.

В разделе 3.3 экспериментально установлена корреляция между критической температурой $T_c^{3\omega}$, измеренной с помощью метода ближнеполюсной СВЧ микроскопии, и критической температурой T_{c0} , определенной из резистивных измерений, для пленок, монокристаллов и поликристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, пленок Nb , слоистых структур Mo/Si , а также для многослойной сверхпроводящей структуры $PbSe/PbTe$ (рис. 2). Продемонстрировано, что эта корреляция дает возможность проводить бесконтактные измерения критической температуры методом ближнеполюсной СВЧ микроскопии различных сверхпроводников и сверхпроводящих структур.

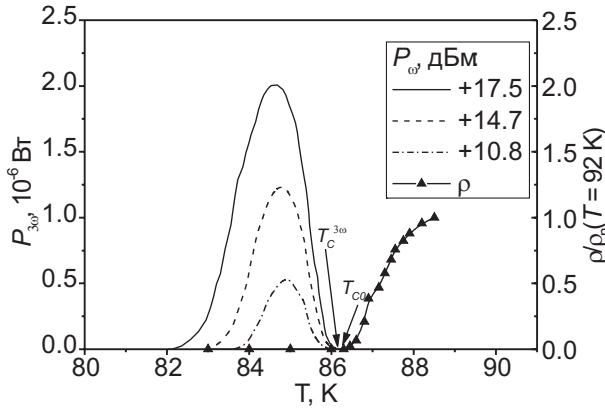


Рис. 2. Температурные зависимости мощности третьей гармоники $P_{3\omega}(T)$ при различных уровнях падающей мощности P_ω и удельного сопротивления $\rho(T)$ (треугольники) для пленки $YBCO$ при температурах близких к T_c .

В разделе 3.4 при температуре 79 К на основе экспериментальной зависимости мощности третьей гармоники от мощности первой гармоники сделаны оценки характерной плотности критического тока нелинейности j_c^{nl} пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Величина j_c^{nl} сопоставлена с величинами характерной плотности критического тока нелинейности для основных механизмов нелинейности, а также с эффективной плотностью тока распаривания и критического тока пиннинга в этих пленках. На основе анализа этих величин установлено, что нелинейный СВЧ отклик в пленках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при температурах порядка 79 К определяется джозефсоновской нелинейностью или локальным нагревом в слабых связях.

В разделе 3.5 экспериментально показано, что при низких температурах на температурной зависимости мощности третьей гармоники в монокристаллах и некоторых пленках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ могут наблюдаться дополнительные максимумы нелинейности. Наличие этих особенностей связано, по-видимому, с существованием низкотемпературных сверхпроводящих фаз, имеющих различное содержание кислорода или катионный состав в высокотемпературных сверхпроводниках $YBCO$. Таким образом, данный метод позволяет также локально тестировать наличие дополнительных сверхпроводящих фаз в сверхпроводниках.

В разделе 3.6 с помощью метода ближнеполюсной СВЧ микроскопии исследованы пространственные распределения мощности третьей гармоники при различных температурах для пленки $YBCO$ и ВТСП микрополоскового СВЧ фильтра. Продемонстрировано, что используя корреляцию между $T_c^{3\omega}$ и T_{c0} (рис. 2) и производя сканирование пространственного распределения нелинейного отклика пленки $YBCO$ при различных температурах, представляется возможным бесконтактно определить распределение критических температур T_c в пленках ВТСП и сверхпроводящих структурах, выполненных на их основе.

В разделе 3.7 исследованы пространственные распределения нелинейного СВЧ отклика поликристаллов $YBCO$ в различных магнитных полях при фиксированной температуре образца. Показано, что с помощью метода нелинейной ближнеполюсной микроскопии возможно локально диагностировать намагниченность поликристаллических образцов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В разделе 3.8 сделаны заключительные замечания о возможных применениях метода ближнеполюсной СВЧ микроскопии для диагностики сверхпроводников и сверхпроводящих структур.

Четвертая глава посвящена исследованию влияния микроструктуры пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ на нелинейный СВЧ отклик. Результаты этой главы опубликованы в работах [A21–A25].

В разделе 4.1 сделаны вводные замечания о влиянии микроструктуры на электрофизические и нелинейные свойства пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В разделе 4.2 приводятся условия роста, а также и сверхпроводящие характеристики пленок, такие как критический ток, величина критической температуры и полуширина перехода эпитаксиальных пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В разделе 4.3 с помощью туннельной и электронной просвечивающей микроскопии продемонстрировано, что эпитаксиальные пленки $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ имеют кристаллитную структуру. Также методом рентгеноструктурного анализа были определены средние размеры кристаллитов a (средний размер области когерентного рассеяния) для различных пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В разделе 4.4 приведено описание локального метода, основанного на регистрации напряжения, индуцированного электронным пучком (Electron Beam Induced Voltage - EBIV). В этой методике термический нагрев пучком электронов некоторой области сверхпроводящего полосока приводит к изменению локального сопротивления и величины регистрируемого напряжения. Этот метод позволяет определять из кривых EBIV-сигнала локальное сопротивление и пространственные распределения критической температуры в мостиках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В разделе 4.5 установлена корреляция полуширины максимума температурной зависимости мощности третьей гармоники W_{TH} , полуширины кривой напряжения, индуцируемого электронным пучком, W_{EBIV} со средним размером кристаллита (рис. 3). Также приведены измерения критического тока пиннинга для различных пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

В разделе 4.6 для описания экспериментальных результатов предложена модель двухфазной среды, учитывающая нелинейную вольт-амперную характеристику сверхпроводника. Эксперименты показали хорошее качественное и количественное согласие с моделью двухфазной среды. А именно, полуширина максимума сигнала третьей гармоники W_{TH} и полуширина кривой $EBIV$ – сигнала W_{EBIV} уменьшаются из-за возрастания тока пиннинга j_p (рис. 3). На основе этой модели установлено, что при больших размерах кристаллитов нелинейный СВЧ отклик определяется внутрикристаллитным пиннингом вихрей, а при уменьшении их размеров появляется дополнительный вклад в отклике, связанный с пиннингом магнитного потока на джозефсонов-

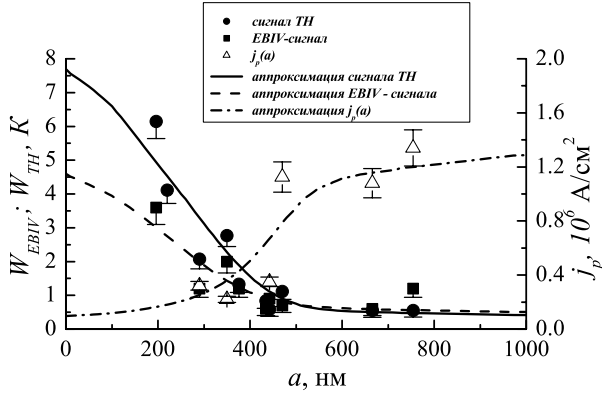


Рис. 3. Зависимость полуширины пика сигнала третьей гармоники W_{TH} (кружки), полуширины кривой $EBIV$ – сигнала W_{EBIV} (квадраты) и плотности критического тока пиннинга $j_p(77 K)$ (треугольники) от среднего размера кристаллита a для $YBa_2Cu_3O_7$. Сплошной, пунктирной и штрихпунктирной линией показана аппроксимация зависимости $W(a)$ с помощью модели эффективной среды для нелинейного отклика, сигнала $EBIV$ и тока пиннинга $j_p(a)$, соответственно.

ской сетке межкристаллитных границ. В заключении раздела продемонстрирована возможность уменьшения нелинейных эффектов в пленках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ за счет увеличения размера кристаллита.

В разделе 4.7 сделаны заключительные замечания о влиянии микроструктуры на нелинейные СВЧ свойства и электрофизические параметры эпитаксиальных пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

Пятая глава посвящена исследованию нелинейных СВЧ свойств пленок Nb во внешнем магнитном поле. Результаты этой главы опубликованы в работах [A4, A7, A11, A12, A14, A26, A27].

В разделе 5.1 делаются вводные замечания о нелинейных СВЧ свойствах низкотемпературных сверхпроводников во внешнем магнитном поле.

В разделе 5.2 приведены значения плотности тока пиннинга, удельного сопротивления в нормальном состоянии и критической температуры образцов.

В разделе 5.3 экспериментально установлено, что температурная зависимость мощности третьей гармоники пленок Nb во внешнем постоянном магнитном поле демонстрирует две особенности при температурах близких к T_c (рис. 4). Как видно из рис. 4, при мощности

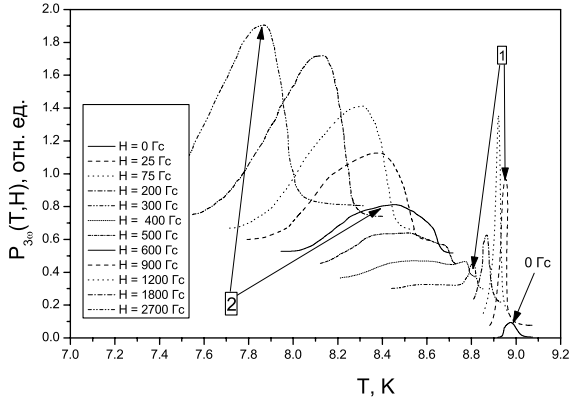


Рис. 4. Температурные зависимости мощности третьей гармоники $P_{3\omega}(T, H)$ при различном внешнем постоянном магнитном поле H_{dc} для пленки Nb при уровне СВЧ сигнала $P_{\omega} = 18$ дБм. Кривые построены со смещением: $\Delta P = n \cdot 0,07$, $\Delta T = -n \cdot 0,037$ К (n - номер кривой).

СВЧ сигнала $P_{\omega} = 18$ дБм в магнитных полях меньше 100 Гс амплитуда первого максимума $P_{3\omega}^{max}$ сначала возрастает, а потом подавляется магнитным полем. Затем, в области промежуточных магнитных полей 450 Гс наблюдаются одновременно оба максимума нелинейности на температурной зависимости мощности третьей гармоники. И наконец, при дальнейшем увеличении магнитного поля величина амплитуды второго максимума нелинейности $P_{3\omega}^{max}$ монотонно возрастает и насыщается в магнитных полях порядка 3 кГс. При мощности СВЧ сигнала $P_{\omega} = 10$ дБм при увеличении постоянного магнитного поля величина амплитуды первого максимума $P_{3\omega}^{max}$ уменьшается сразу, а затем амплитуда второго максимума возрастает до насыщения. Также в магнитных полях меньше 500 Гс обнаружена корреляция между нелинейным СВЧ откликом и вольт-амперной характеристикой Nb пленок.

В разделе 5.4 в рамках модели нелинейной вязкости вихрей, джоулева нагрева сверхпроводника и крипа магнитного потока проанализировано поведение максимума температурной зависимости мощности третьей гармоники. Теоретический анализ экспериментальных дан-

ных, проведенный в рамках этих моделей, показал, что в пленках Nb в постоянном магнитном поле менее 500 Гс при максимальной мощности СВЧ сигнала доминирует отклик, обусловленный вязкостью вихрей, а при уменьшении СВЧ мощности появляется вклад в отклик из-за джоулева нагрева сверхпроводника. Также установлено, что в постоянном магнитном поле более 500 Гс нелинейный СВЧ отклик Nb пленок обусловлен крипом магнитного потока. На основе экспериментальных данных построены фазовые диаграммы пленок Nb при различных мощностях СВЧ сигнала.

В разделе 5.5 сделаны заключительные замечания о механизмах нелинейного СВЧ отклика Nb пленок во внешнем магнитном поле.

В **Заключении** приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Впервые ближнепольный зонд с индуктивной связью использован для исследований нелинейных СВЧ свойств сверхпроводников. Зонд представляет собой тонкий провод, закорачивающий внешний и внутренний проводники коаксиального кабеля. Показано, что данная методика позволяет бесконтактно исследовать локальные нелинейные СВЧ свойства высокотемпературных и низкотемпературных сверхпроводников в широком диапазоне мощности СВЧ сигнала и магнитного поля при температурах ниже критической T_c .
2. Обнаружена корреляция между критической температурой $T_c^{3\omega}$, измеренной с помощью метода ближнепольной СВЧ микроскопии, и критической температурой T_{c0} , определенной из резистивных измерений, для пленок, монокристаллов и поликристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, пленок Nb , слоистых структур Mo/Si и $PbSe/PbTe$. Показано, что эта корреляция позволяет проводить бесконтактную экспресс-диагностику критической температуры T_c для различных сверхпроводников и сверхпроводящих структур.
3. Получены пространственные распределения мощности третьей гармоники $P_{3\omega}(x, y)$ для пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ при различных температурах с разрешением $0,2 \times 1$ мм² в плоскости образца. Показано, что метод ближнепольной СВЧ микроскопии позволяет исследовать пространственное распределение критической температуры в ВТСП пленках и СВЧ фильтрах, выполненных на их основе.

4. Экспериментально обнаружена корреляция полуширины температурной зависимости мощности третьей гармоники со средним размером кристаллита для пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. На основе модели композитной среды, учитывающей нелинейную вольт-амперную характеристику сверхпроводника, установлено, что при больших размерах микрокристаллитов нелинейный СВЧ отклик определяется внутрикристаллитным пиннингом вихрей, а при уменьшении их размеров появляется дополнительный вклад в отклик, связанный с пиннингом магнитного потока на джозефсоновской сетке межкристаллитных границ. Продемонстрирована возможность уменьшения нелинейных эффектов в пленках $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ за счет увеличения среднего размера кристаллита.
5. Обнаружена немонотонная зависимость амплитуды максимума температурной зависимости мощности третьей гармоники от внешнего постоянного магнитного поля для пленок Nb при температурах близких к T_c . Установлена корреляция между вольт-амперной характеристикой и мощностью третьей гармоники для пленок Nb в магнитных полях меньше 500 Гс при температурах близких к T_c .
7. Показано, что в пленках Nb в постоянном магнитном поле меньше 500 Гс при высокой СВЧ мощности доминирует отклик, обусловленный вязкостью вихрей, а при низкой СВЧ мощности появляется вклад в отклик, связанный с джоулевым нагревом сверхпроводника. Установлено, что в постоянном магнитном поле более 500 Гс нелинейный СВЧ отклик Nb пленок обусловлен крипом магнитного потока.

- [1] Плакида, Н. М. Высокотемпературные сверхпроводники. – Международная программа образования. – М.: 1996. – 288 С.
- [2] Dahm, T. Theory of Intermodulation in a Superconducting Microstrip Resonator / T. Dahm and D. J. Scalapino // J. Appl. Phys. – 1997. – V. 81. – P. 2002-2009.
- [3] van der Beek, C. J. Vortex Line Pinning and Bose-Glass Dynamics in Heavy-Ion Irradiated BiSrCaCuO Single Crystals van der Beek / C. J. van der Beek, M. Konczykowski, V. M. Vinokur, T. W. Li, P.

- H. Kes, and G. W. Crabtree // Phys. Rev. Lett. – 1995. – V. 74. – P. 1214–1217.
- [4] Amato, J. C. Measurement of the Superconducting Order-Parameter Relaxation Time from Harmonic Generation / J. C. Amato, W. L. McLean // Phys. Rev. Lett. – 1976. – V. 37 – P. 930 – 933.
- [5] Горьков, Л. П. Обобщение уравнений теории Гинзбурга-Ландау для нестационарных задач в случае сплавов с парамагнитными примесями / Л. П. Горьков, Г. М. Элиашберг // ЖЭТФ. – 1968. – Т. 54. – Вып. 2. - С. 612-626.
- [6] Nguyen, P. P. Nonlinear surface impedance for $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ thin films: Measurements and a coupled-grain model / P. P. Nguyen, D. E. Oates, G. Dresselhaus, and M. S. Dresselhaus // Phys. Rev. B. – V. 48. – P. 6400-6412.
- [7] Beek, C. J. Linear and nonlinear ac response in the superconducting mixed state / C. J. van der Beek, V. B. Geshkenbein, and V. M. Vinokur // Phys. Rev. B. – 1993. – V. 48. – P. 3393-3403.
- [8] Жаров, А. А. Тепловой S-N переход в тонкой сверхпроводниковой пленке, стимулированный падающим электромагнитным излучением / А. А. Жаров, А. Л. Коротков, А. Н. Резник // СФХТ. – 1992. – Т. 5. – 419-422.
- [9] Takeuchi, I. Low temperature scanning-tip microwave near-field microscopy of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ films / I. Takeuchi, T. Wei, Fred Duewer, Y. K. Yoo, X.-D. Xiang, V. Talyansky, S. P. Pai, G. J. Chen, and T. Venkatesan // Appl. Phys. Lett. – 1997. – V. 71. – P. 2026-2028.
- [10] Wensheng, Hu. Imaging of microwave intermodulation fields in a superconducting microstrip resonator / Wensheng Hu, A. S. Thanawalla, B. J. Feenstra, F. C. Wellstood, and Steven M. Anlage // Appl. Phys. Lett. – 1999. – V. 75. – P. 2824-2826.
- [11] Clarke, J. Wired for the future / J. Clarke and D. C. Larbalestier // Nature Phys. – 2006. – V. 2. – P. 794-796.
- [12] Wilker, C. Nonlinear effects in high temperature superconductors: 3rd order intercept from harmonic generation / C. Wilker, Z.-Y. Shen, P. Pang, W. L. Holstein, and D. W. Face // IEEE Trans. Appl. Supercond. – 1995. – V. 5. – P. 1665-1670.

- [A1] Курин, В. В. Исследование локального нелинейного СВЧ отклика ВТСП керамики / Курин В. В., Ноздрин Ю. Н., Пестов Е. Е., Ржавин М. Г. // 9-я Международная Конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные системы": Севастополь, тезисы докладов, 1999. – С. 272-273.
- [A2] Pestov, E. E. Third-order local nonlinear microwave response of YBCO and Nb thin films / E. E. Pestov, V. V.Kurin, Yu. N. Nozdrin // Applied Superconductivity Conference: USA, Virginia Beach, abstract book, 2000. – P. 60.
- [A3] Курин, В.В. Нелинейный локальный микроволновый отклик сверхпроводящих пленок / Курин В. В., Ноздрин Ю. Н., Пестов Е. Е. // 32 всероссийское совещание по физике низких температур: тезисы докладов, Казань, 2000. – С. 54.
- [A4] Pestov, E. E. Third-order local nonlinear microwave response of superconductors / E. E. Pestov, V. V.Kurin, Yu. N. Nozdrin, A. A. Andronov, A. M. Cucolo, R. Monaco, M. Boffa // 8th International Superconductive Electronics Conference (ISEC 01): Osaka, Japan, Extended Abstracts, 2001. – P. 499-500.
- [A5] Pestov, E. E. Third-order local nonlinear microwave response of YBCO and Nb thin films / E. E. Pestov, V. V.Kurin, Yu. N. Nozdrin // IEEE Tran. on Appl. Supercond. – 2001. – V. 11. – P. 131-134.
- [A6] Klimov, A. Yu. Peculiarities of the resistive state in Mo/Si superlattices in a magnetic field / A. Yu. Klimov, M. A. Kucherenko, E. E. Pestov, V. V. Kurin, Yu. N. Nozdrin, V. L. Mironov, A. Yu. Aladyshkin // International conference "Modern Problem of superconductivity": Yalta, Ukraine, book of abstract, 2002. – P. 24.
- [A7] Аладышкин, А. Ю. Исследование нелинейного СВЧ отклика сверхпроводников с помощью локальной методики / А. Ю. Аладышкин, А. А. Андронов, Е. Е. Пестов, Ю. Н.Ноздрин, В. В. Курин, А. М.Сucolo, R. Monaco, M. Boffa // Изв. Вузов. Радиофизика. - 2003. – Т. 46. – Вып. 2. – С. 123-143.
- [A8] Востоков Н. В. Влияние катионного состава на сверхпроводящие и микроструктурные свойства пленок YBCO / Н. В. Востоков, С. В. Гапонов, Б. А. Грибков, Ю. Н. Дроздов, Д. В. Мастеров,

В.Л. Миронов, Ю.Н. Ноздрин, Е.Е. Пестов // ФТТ. – 2003. – Т. 45. – Вып. 11. – С. 1923-1928.

- [A9] Aladyshkin, A. Yu. Peculiarities of the resistive state in Mo/Si superlattices in a magnetic field Yu. Aladyshkin, A. Yu. Klimov, M. A. Kucherenko, E. E. Pestov, V. V. Kurin, Yu. N. Nozdrin, V. L. Mironov // Mod. Phys. Lett. B. – 2003. – V. 17. – N. 10-12. – P. 627-634.
- [A10] Аладышкин, А. Ю. Сверхпроводящие свойства многослойных наноструктур на основе молибдена / А. Ю. Аладышкин, А. Ю. Климов, В. В. Курин, М. А. Кучеренко, В. Л. Миронов, Ю. Н. Ноздрин, Е. Е. Пестов, С. А. Тресков // XXXIII Собрание по физике низких температур: Екатеринбург, 2003. – С. 128.
- [A11] Курин, В.В. Нелинейный микроволновый отклик Nb пленок / В. В. Курин, Ю. Н. Ноздрин, Е. Е. Пестов, А. А. Андронов // XXXIII Собрание по физике низких температур: Екатеринбург, 2003. – С. 130.
- [A12] Аладышкин, А. Ю. Транспортные и нелинейные СВЧ свойства сверхтонких пленок молибдена и ниобия / А. Ю. Аладышкин, А. Ю. Климов, В. В. Курин, М. А. Кучеренко, Ю. Н. Ноздрин, Е. Е. Пестов // XXXIII Собрание по физике низких температур: Екатеринбург, 2003. – С. 119.
- [A13] Kucherenko, M. A. Near-field Nonlinear Microwave Microscope For Study of Superconductor Properties / M. A. Kucherenko, V.V. Kurin, Yu. N. Nozdrin, E. E. Pestov // 11th International Student Seminar on Microwave Application of Novel Physical Phenomena: St. Petersburg, 2004. – P. 98.
- [A14] Pestov, E. E. Near-field Nonlinear Microwave Microscope For Study of Superconductor Properties / E. E. Pestov, V.V. Kurin, Yu. N. Nozdrin, A. A. Andronov // 11th International Student Seminar on Microwave Application of Novel Physical Phenomena: St. Petersburg, 2004. – P. 101.
- [A15] Andreeva, M. A. Investigation of a thin ⁵⁷Fe layer inside a superconducting structure Nb/⁵⁷Fe/[Mo/Si]45/Si with standing waves at the nuclear resonant scattering beamline at ESRF / M. A. Andreeva, S. N. Vdovichev, Yu. N. Nozdrin, E. E. Pestov, N. N. Salashchenko, V. G. Semenov, B. Lindgren, L. Haggstrum, P.

- Nordblad, B. Kalska, O. Leupold, R. Rueffer // Материалы совещания "Рентгеновская оптика-2003: Нижний Новгород, 2003. – С. 214.
- [A16] Andreeva, M. A. Investigation of a thin ^{57}Fe layer inside a superconducting structure Nb(70nm)/ ^{57}Fe /[Mo/Si]45/Si with standing waves at the nuclear resonant scattering beamline at ESRF / M. A. Andreeva, S. N. Vdovichev, Yu. N. Nozdrin, E. E. Pestov, N. N. Salashchenko, V. G. Semenov, B. Lindgren, L. Hagstrom, P. Nordblad, B. Kalska, O. Leupold, R. Rueffer // Изв. Акад. Наук Сер. Физ. – 2004. –Т.68. – Вып. 4. – С. 489-494.
- [A17] Andreeva, M. A. Investigation of thin magnetic ^{57}Fe layer being in contact with superconducting Nb layer by means of the nuclear resonant reflectivity / M. A. Andreeva, N. G. Monina, L. Haggstram, B. Lindgren, B. Kalska, P. Nordblad, S. Kamali-M, S. N. Vdovichev, Yu. N. Nozdrin, E. E. Pestov, N. N. Salashchenko, V. G. Semenov, O. Leupold and R. Ruffer // Proceedings of the Third Moscow International Symposium on Magnetism: Moscow, 2005. – P. 100.
- [A18] Андреева, М. А. Исследование тонкого магнитного слоя ^{57}Fe , находящегося в контакте со сверхпроводящим слоем Nb, методом ядерно-резонансного отражения / Андреева М. А., Мони́на Н. Г., Хаггстрем Л., Линдгрэн Б., Кальска Б., Нордبلاد П., Камали М. С., Вдовичев С. Н., Ноздрин Ю. Н., Пестов Е. Е. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – 2006. – Т. 6. – С. 96-101.
- [A19] Михайлов, М. Ю. Сверхпроводимость межфазной границы двухслойных гетероструктур на основе полупроводниковых монокристаллов / М. Ю. Михайлов, О. И. Юзефович, Н. Я. Фогель, Ю. В. Бомзе, Е. И. Бухштаб, А. Ю. Аладышкин, Е. Е. Пестов, Ю. Н. Ноздрин, А. Ю. Сипатов, В. В. Валуйев // Материалы Симпозиума "Нанозлектроника и нанозлектроника": Н. Новгород, 2005. – С. 381.
- [A20] Юзефович, О. И. Сверхпроводимость границ раздела полупроводниковых слоев в двухслойных и многослойных гетероструктурах типа $A^IV B^VI$ / О. И. Юзефович, М. Ю. Михайлов, Н. Я. Фогель, Ю. В. Бомзе, Е. И. Бухштаб, А. Ю. Аладышкин, Е. Е. Пестов, Ю. Н. Ноздрин, А. Ю. Сипатов, В. В. Волобуев // ФНТ. – 2008. – Т. 34. – Вып. 12. – С. 1249-1258.

- [A21] Baryshev, S. V. Size of X-ray coherent region and nonlinear microwave response of epitaxial YBCO films/ S. V. Baryshev, E. E. Pestov, A. V. Bobyl, Yu. N. Nozdrin, and V. V. Kurin // *Phys. Rev. B.* – 2007. – Vol.76. – N. 1. – P. 054520-1-054520-5.
- [A22] Барышев, С. В. Нелинейные СВЧ свойства блочных эпитаксиальных пленок YBCO вблизи сверхпроводящего перехода/ С. В. Барышев, А. В. Бобыль, В. В. Курин, Ю. Н. Ноздрин, Е. Е. Пестов, Р. А. Сурис // *ЖЭТФ.* – 2007. – Т. 132. – Вып. 1. – С. 278-282.
- [A23] Ноздрин, Ю. Н. Влияние микроструктуры на электрофизические и нелинейные СВЧ свойства эпитаксиальных пленок YBCO / Ю. Н. Ноздрин, Е. Е. Пестов, В. В. Курин, С. В. Барышев, А. В. Бобыль, С. Ф. Карманенко, Д. А. Саксеев, Р. А. Сурис // *ФТТ.* – 2006. – Т. 48 – Вып. 12. – С. 2136-2145.
- [A24] Ноздрин, Ю. Н. Влияние микроструктуры на электрофизические и нелинейные СВЧ свойства эпитаксиальных пленок YBCO / Ю. Н. Ноздрин, Е. Е. Пестов, В. В. Курин, С. В. Барышев, А. В. Бобыль, С. Ф. Карманенко, Д. А. Саксеев, Р. А. Сурис // *Труды Второй международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости ФПС-06"*: г. Звенигород, 9-13 октября 2006. – С. 150.
- [A25] Барышев, С. В. СВЧ свойства эпитаксиальных кристаллитных пленок YBCO вблизи порога протекания / С. В. Барышев, А. В. Бобыль, В. В. Курин, Ю. Н. Ноздрин, Е. Е. Пестов, Р. А. Сурис // *XXXIV Собрание по физике низких температур: Ростов-на-Дону, 2006.* – С. 246.
- [A26] Пестов, Е. Е. Особенности нелинейного СВЧ отклика Nb пленок / Е. Е. Пестов, Ю. Н. Ноздрин, В. В. Курин // *Труды третьей международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости ФПС-08"*: г. Звенигород, 13-17 октября 2008. – С. 338.
- [A27] Пестов, Е. Е. Особенности транспортных и нелинейных СВЧ свойств Nb пленок во внешнем магнитном поле / Е. Е. Пестов, Ю. Н. Ноздрин, В. В. Курин // *Труды четвертой международной конференции "Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости ФПС-11"*: г. Звенигород, 3-7 октября 2011. – С. 118.

Пестов Евгений Евгеньевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО СВЧ ОТКЛИКА
СВЕРХПРОВОДНИКОВ МЕТОДОМ
БЛИЖНЕПОЛЬНОЙ СВЧ МИКРОСКОПИИ**

Автореферат

Подписано к печати 26 января 2012 г.

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института физики микроструктур
Российской академии наук, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105