

На правах рукописи

БАРЫШЕВ Сергей Владимирович

ВЛИЯНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ ПЛЕНОК  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  НА ИХ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ СВЧ СВОЙСТВА

Специальность 01.04.07

физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2007

Работа выполнена в Физико-Техническом Институте им. А.Ф. Иоффе РАН  
(лаб. Конникова)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Бобыль А.В.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Вендик И.Б.  
Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет

доктор физико-математических наук, профессор  
Цендин К.Д.  
Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе  
РАН, Санкт-Петербург

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный  
политехнический университет

Защита состоится «4» октября 2007 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета  
К 002.205.01 Физико-Технического Института им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-  
Петербург, ул. Политехническая, 26

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Физико-Технического Института им.  
А.Ф. Иоффе РАН

Автореферат разослан «4» сентября 2007 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета К 002.205.01  
кандидат физико-математических наук

Бахолдин С.И.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Открытие купратных высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) привело к развитию технологий создания эпитаксиальных пленок, а также керамических и монокристаллических образцов на их основе и проведению интенсивных исследований их свойств в широком спектре фундаментальных и прикладных задач. Особый интерес к изучению свойств пленочных ВТСП структур вызван, прежде всего, возможностью их приборного приложения в СВЧ электронике [1] (фильтры, линии задержки, линии передач, резонаторы и т.д.) и радиометрии [2] (пленочные болометры и калориметры, работающие в широком спектральном диапазоне: от микроволнового до рентгеновского). Оба указанных направления предъявляют ВТСП материалу следующие требования: высокие значения критических параметров (критической плотности тока,  $j_c$ , и критической температуры сверхпроводящего перехода,  $T_c$ ); низкий уровень нелинейных эффектов на частотах 1–100 ГГц и низкий уровень интенсивности шума (в частности, ВТСП пленки должны характеризоваться малым значением параметра Хоуге,  $\alpha_H$ ) в температурном диапазоне  $77 \text{ К} < T < T_c$ . Эти требования приводят к необходимости ориентироваться на использование высококачественных эпитаксиальных пленок ВТСП, близких к монокристаллическим.

На сегодняшний день существует целый ряд многокомпонентных ВТСП оксидов с  $T_c \sim 40\text{--}140 \text{ К}$ . Однако, высокая критическая температура  $T_c \sim 90 \text{ К}$ , много выше азотной; относительно “простые” химический состав и кристаллическая решетка, позволяющие получать как качественные монокристаллы, так и эпитаксиальные пленки и керамические образцы, позволили соединению  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  стать наиболее изученным с точки зрения фундаментальных свойств и широко используемым в прикладной области ВТСП материалом.

По окончании технологических этапов роста основным термодинамическим процессом, протекающим в объеме пленок, является релаксация упругой энергии [3,4]. Этот процесс неизбежно должен сказываться на стехиометрии пленок и равновесном распределении дефектов в них. По этой причине особенности структуры эпитаксиальных ВТСП пленок и свойства сверхпроводящей и нормальной фаз этих пленок оказываются тесно взаимосвязанными. Действительно, исследования транспортных [5], магнитных [6], высокочастотных [7] и шумовых [4] свойств высококачественных пленочных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  свидетельствуют о влиянии микроструктуры пленок на эти свойства. Однако, не смотря на то, что технология производства эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок находится на

достаточно высоком уровне, вопросы об их структурном совершенстве и о том, каким образом особенности строения пленок воздействует на свойства сверхпроводящей и нормальной фаз остаются одними из центральных аспектов физики сверхпроводников. Как правило, в многочисленных работах, посвященных прикладным вопросам сверхпроводимости, описание структурных особенностей исследуемых пленок ограничивается фотографиями просвечивающей или атомно-силовой микроскопии. Однако в обоих случаях эта качественная информация не может быть использована для количественных корреляционных исследований, поскольку в первом случае отсутствует возможность получения статистически усредненных структурных параметров пленки. Кроме того, процедура приготовления образцов вносит дополнительную дефектность, не всегда идентифицируемую на изображениях. Во втором случае, микроскопические изображения поверхности пленки не отражают ситуаций, возникающих в объеме пленки, где непосредственно происходит протекание тока и взаимодействие с падающей электромагнитной волной в случае электрофизических или СВЧ исследований. Таким образом, открытым остается вопрос о том, использование какого параметра (параметров) позволит

- наиболее полно и эффективно характеризовать структурное совершенство эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок;
- аналитически связать структурные особенности эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок с широким спектром их физических свойств.

Вышесказанное определяет **актуальность темы** настоящей работы, **целью** которой было исследование влияния микроструктуры эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на их электрофизические и нелинейные СВЧ свойства путем:

- проведения комплексных исследований структурных, электрофизических и СВЧ свойств нормальной и сверхпроводящей фаз;
- разработки теоретических моделей, описывающих корреляции между структурными, электрофизическими и нелинейными СВЧ свойствами.

Для достижения этой цели в **задачи работы** входило изучение следующих вопросов:

- определение и выбор структурных параметров эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , наиболее полно и эффективно характеризующих структурное совершенство эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок;

- исследование нелинейных СВЧ свойств эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  вблизи критической температуры сверхпроводящего перехода;
- исследование электрофизических свойств эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в нормальной фазе и в окрестности  $T_c$ ;
- исследование шумовых характеристик эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  вблизи  $T_c$ ;
- построение модели двухфазного сверхпроводника, позволяющей аналитически связать структурные особенности эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок с их нелинейными СВЧ и электрофизическими свойствами при температурах, близких к  $T_c$ ;
- применение концепции U-минус центров, позволяющей аналитически связать структурные особенности эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок с их нормальными электрофизическими свойствами;
- разработка болометра для регистрации синхротронного излучения мягкого рентгеновского диапазона на основе эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ , проведение расчетного моделирования характеристик этого болометра и определение его предельных рабочих параметров.

**Научная новизна работы** определяется положениями, которые выносятся на защиту:

1. обнаружена корреляция между ширинами пиков 1) температурной зависимости мощности третьей гармоники, 2) напряжения, индуцированного электронным зондом, и средним размером области когерентного рассеяния (блока);
2. в рамках разработанной модели двухфазного сверхпроводника выявлена физическая природа этой корреляции:
  - в эпитаксиальных пленках  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  с большими блоками ( $> 0.5$  мкм) нелинейный СВЧ отклик определяется внутривзлочным пиннингом вихрей, а с малыми – пиннингом на межвзлочных границах
  - трёхкратное увеличение размера блока приводит к уменьшению ширины сверхпроводящего перехода с 3.6 К до 0.15 К и 100-кратному уменьшению коэффициента нелинейности  $\beta$ ;
3. экспериментально обнаружена зависимость величины параметра  $c$  кристаллической решетки и крутизны  $T$ -зависимости сопротивления нормальной

фазы оптимально легированных эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок от среднего размера блока. Анализ этих зависимостей в рамках модели U-минус центров позволяет:

- описать линейную температурную зависимость сопротивления  $\rho(T)$  оптимально легированных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в нормальной фазе
  - для серии эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок описать зависимость крутизны сопротивления нормальной фазы  $d\rho(T)/dT$  от среднего размера блока  $a$  и объяснить эту зависимость постростовой релаксацией кислорода;
4. создан болометр для абсолютной радиометрии синхротронного излучения на основе эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Технология включает контроль и оптимизацию структурных параметров исходных пленок, проектирование и разработку конструкции болометра. Болометр обладает высокой чувствительностью (от 1 мкВт), высокой точностью измерения ( $\leq 1\%$ ), обладает возможностью работы на модулированном потоке излучения (до 1 кГц) в широком спектральном диапазоне (150-3000 эВ).

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается высоким уровнем проводимых экспериментов, использованием разнообразных методик, таких как сканирующая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, ближнепольная СВЧ микроскопия, низкотемпературная сканирующая микроскопия, исследование шумовых характеристик пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  при низких температурах, а также их соответствием с имеющимися в литературе экспериментальными и теоретическими данными по изучению пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .

**Научная и практическая значимость** работы определяется проведенными исследованиями влияния структуры эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на их электрофизические и СВЧ свойства вблизи температуры сверхпроводящего перехода; исследованиями влияния структуры эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на их электрофизические свойства в нормальной фазе; использованием полученных результатов исследований при создании болометра на основе эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  для абсолютной радиометрии синхротронного излучения в диапазоне 150–3000 эВ.

**Апробация результатов работы.** Полученные в работе результаты докладывались и обсуждались на следующих отечественных и международных конференциях и семинарах: IEEE international students seminar on MW applications of novel physical phenomena (St. Petersburg – 2002); XXXIII и XXXV Неделя науки СПбГПУ: Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов (Санкт-Петербург – 2005, 2007); EUCAS'05 (Vienna, Austria – 2005); BIAMS'06 (St. Petersburg – 2006); XXXIV Совещание

по физике низких температур (НТ-34) (Ростов-на-Дону – 2006), 2-ая Международная конференция “Фундаментальные проблемы высокотемпературной сверхпроводимости” (Звенигород – 2006); Прикладная оптика (Санкт-Петербург – 2006); на семинарах лаборатории “Диагностики материалов и структур твердотельной электроники” ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (Санкт-Петербург); на семинарах сектора сверхпроводимости Института физики микроструктур РАН (Нижний Новгород).

**Публикации.** По результатам исследований, изложенных в диссертации, имеется 7 публикаций. Список публикаций приведен в конце диссертации.

**Структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** определяется актуальность темы диссертационной работы, перечислены основные новые результаты, обосновывается их научная и практическая значимость, представлена структура диссертации, приведены цель и задачи диссертационной работы и положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященный рассмотрению электрофизических и микроволновых свойств купратных ВТСП в окрестности температуры сверхпроводящего перехода и электрофизических свойств нормальной фазы. Причем, основное внимание уделяется вопросам, касающимся того, каким образом структурные особенности ВТСП материалов в целом и эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  (YBCO) пленок в частности учитываются при интерпретации их нормальных и сверхпроводящих свойств. Обзор посвящен также положению дел в современной радиометрии, базирующейся как на традиционных, так и на высокотемпературных сверхпроводниках; проанализированы современные типы используемых конструкций болометров.

Параграф 1.1. разбит на две основные части. Первая часть посвящена описанию свойств системы  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в области сверхпроводящего перехода. Рассматриваются вопросы микроволновых потерь ВТСП и приборных структур на их основе, связанные с частотной и температурной зависимостью поверхностного импеданса. Затронуты проблемы интермодуляционных искажений, генерации высших гармоник. Кроме того, поскольку для объяснения СВЧ потерь и сложного спектра отражения пленочных ВТСП с самого начала стали привлекаться модели, учитывающие реальную микроструктуру образцов, рассмотрены наиболее вероятные сценарии воздействия структуры пленок на их СВЧ отклик и поверхностный импеданс. Проведен анализ особенностей микроволнового

отклика в присутствии постоянного и переменного магнитного поля, позволяющих на основе экспериментальных результатов установить превалирующий механизм нелинейности; рассмотрены тепловые механизмы нелинейности. Во второй части описаны особенности уширения сверхпроводящего перехода ВТСП, проявляющиеся в измерениях  $T$ -зависимости сопротивления  $\rho(T)$  на постоянном токе (в том числе и в присутствии постоянного магнитного поля), и проанализированы привлекаемые для описания этих особенностей основные подходы и концепции, основанные на структурном несовершенстве исследуемых пленок и монокристаллов. Также в параграфе 1.1. введено понятие “гранулярности” для  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  образцов, важное при дальнейшем рассмотрении, и показано, как данное понятие используется различными авторами при описании экспериментальных результатов.

Параграф 1.2. посвящен описанию особенностей нормальных транспортных свойств купратов и  $YBCO$  в частности. Рассмотрены наиболее распространенные подходы, используемые для физической интерпретации оптических свойств нормальной фазы и совокупности фундаментальных особенностей сверхпроводящего и нормального состояния ВТСП: псевдощелевое состояние, температурные и концентрационные зависимости кинетических коэффициентов и т.д. Рассмотрены различные модификации модели узкой зоны; поляронная модель; основные типы модели Хаббарда ( $t$ - $J$  модель, расширенная модель Хаббарда с отрицательной корреляционной энергией) и пр.

Параграф 1.3. содержит информацию, касающуюся существующих современных типов болометров на основе эпитаксиальных пленок ВТСП. Приведены формулы для расчета предельных рабочих параметров болометров, используемых для их характеристики, перечислены основные физические и технологические аспекты, ограничивающие чувствительность и быстродействие приборов данного класса. Указано конструктивное решение – метод электротепловой обратной связи – позволяющее дополнительно улучшить предельные характеристики сверхпроводниковых болометров.

В конце главы формулируются цель и задачи диссертации.

**Вторая глава** посвящена описанию методик получения и исследования свойств эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ .

Параграф 2.1. содержит описание двух задействованных в работе методов получения эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на подложках алюмината лантана ( $LaAlO_3$ ) и сапфировых подложках ( $Al_2O_3$ ) с буферным подслоем оксида церия ( $CeO_2$ ): метода магнетронного  $dc$ -распыления и метода лазерного напыления соответственно. Приведены параметры использованных установок.

В параграфе 2.2. описана методика рентгеновской дифрактометрии. Приведены формулы и корреляционные зависимости, позволяющие в рамках блочной модели определить значения широкой совокупности структурных параметров и выбрать те из них, которые наиболее эффективно характеризуют структуру эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок. В частности, приведен алгоритм расчета величины области когерентного рассеяния (ОКР), характеризующей степень монокристалличности эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и использованной в дальнейшем при построении модели двухфазного сверхпроводника (**глава III**) и анализе свойств нормальной фазы исследованных пленок в рамках модели U-минус центров (**глава IV**).

Параграф 2.3. посвящен описанию зондовых методик, которые были применены для комплексного исследования электрофизических и СВЧ свойств эпитаксиальных пленок  $YBCO$  в нормальной и сверхпроводящей фазах. Приведены описания 1) ближнепольной СВЧ микроскопии, дающей возможность в широком диапазоне температур исследовать спектр микроволнового отклика сверхпроводников, 2) низкотемпературной сканирующей микроскопии (НТСМ), предназначенной для исследования как интегральных, так и локальных электрофизических параметров сверхпроводниковых пленок в широком диапазоне температур.

В параграфе 2.4. представлена методика исследования шумовых свойств сверхпроводниковых болометров, предназначенная для определения ряда экспериментальных параметров (спектральной плотности шума, значения параметра Хоуге,  $\alpha_H$ , и т.д.), необходимых для расчета рабочих характеристик болометров.

В **третьей главе** приведены результаты исследования свойств эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в области сверхпроводящего перехода.

В параграфе 3.1., разделенном на две части, приведены экспериментальные результаты – зависимость сверхпроводящих параметров от микроструктуры пленок. Описана впервые обнаруженная корреляция величины области когерентного рассеяния (блока, гранулы)  $a$  с шириной температурной зависимости напряжения, индуцированного электронным зондом – с шириной  $EBIV$  (electron beam induced voltage) сигнала –  $W_{EBIV}$ , шириной температурной зависимости мощности третьей гармоники  $W_{TH}$  и током пиннинга  $j_p$ . Эта корреляция заключается в том, что трехкратное увеличение среднего размера блока приводит к десятикратному уменьшению ширины сверхпроводящего перехода, ширины температурной зависимости мощности третьей гармоники и величины тока пиннинга (рис.1). Во второй части данного параграфа описана специальная процедура свертки, учитывающая  $T_c$ -неоднородности образцов, применяемая для

корректного сравнения экспериментальных параметров, полученных методами ближнепольной СВЧ микроскопии и НТСМ, поскольку разрешение первой составляет 50 мкм, тогда как второй – < 4 мкм.

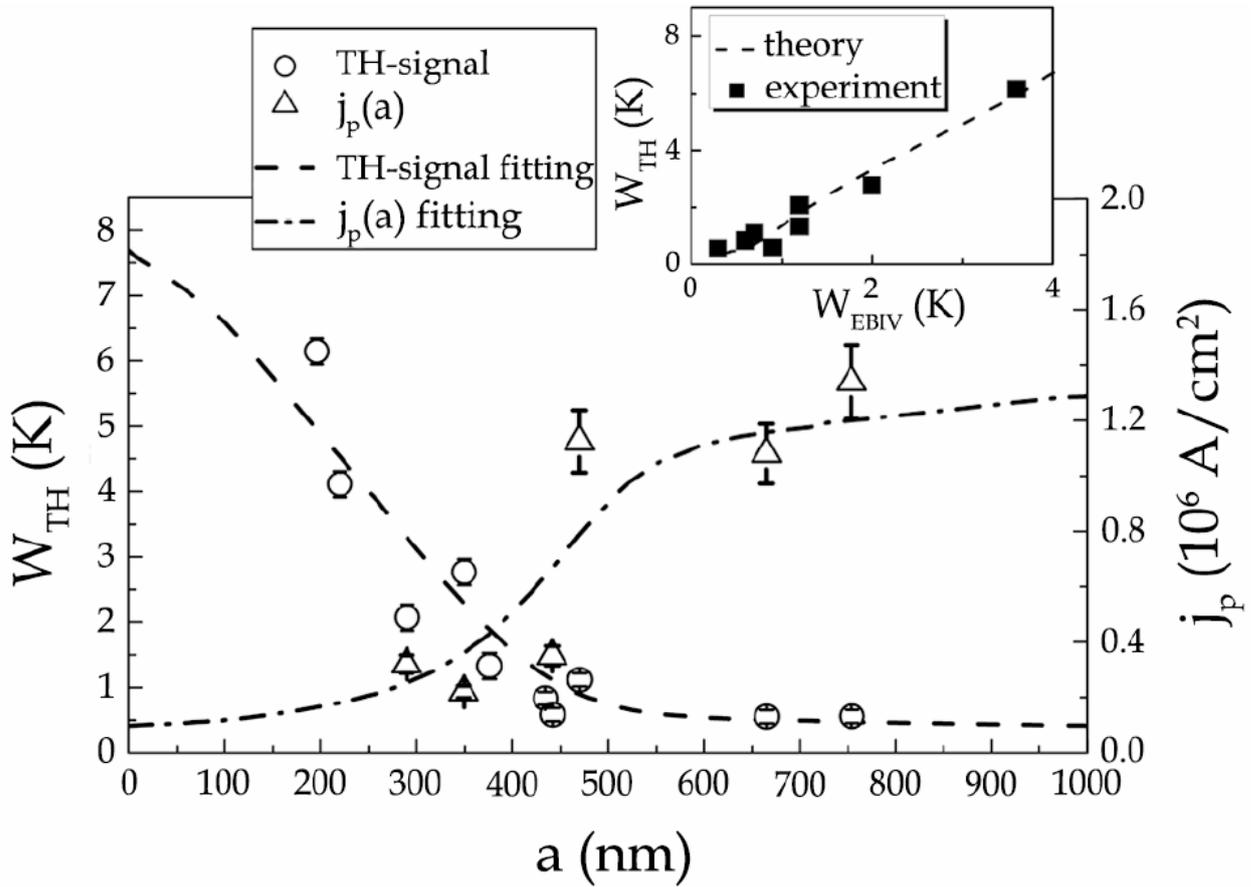


Рис.1. Зависимости ширины сигнала третьей гармоники  $W_{TH}$  (открытые кружки) и тока пиннинга  $j_p$  (открытые треугольники) от среднего размера блока  $a$ . Пунктирные линии – расчетные зависимости  $W(a)$  и  $j_p(a)$ , полученные в рамках модели двухфазного сверхпроводника для нелинейного отклика, сигнала  $EBIV$  и тока пиннинга. На вставке показаны экспериментальные и теоретические корреляционные функции между параметрами  $W_{TH}$  и  $W_{EBIV}$ , полученными при одних и тех же значениях  $a$ . Измерения СВЧ отклика и  $EBIV$ -сигнала проведены в температурном диапазоне 77–95 К; тока пиннинга при 77 К

Параграф 3.2. представляет собой описание модели двухфазного сверхпроводника, в рамках которой далее проанализированы все экспериментально полученные результаты. Первая часть параграфа посвящена формулировке общих положений, составляющих основу модели двухфазного сверхпроводника. А именно, сделано предположение о том, что сверхпроводник состоит из фазы цилиндрических включений радиуса  $a$  и объемной

концентрацией  $p$ , помещенных во вторую среду, матрицу. Предположено также, что поскольку вольт-амперная характеристика (ВАХ) безгистерезисного джозефсоновского контакта позволяет описать основные особенности резистивного состояния сверхпроводника, то для описания особенностей ВАХ исследуемой серии эпитаксиальных пленок  $YBCO$  связь напряженности электрического поля  $\vec{E}$  с плотностью тока  $\vec{j}$  следует записывать как [8]:

$$\vec{E}(j, T) = \rho_n \text{sign}(j) \sqrt{j^2 - j_c^2(T)} \frac{\vec{j}}{j}, \quad (1)$$

где  $j_c(T)$  и  $\rho_n$  – критическая плотность тока и удельное сопротивление соответственно.

Во второй части параграфа на основе теоретического расчета эффективной вольт-амперной характеристики  $\langle E \rangle (\langle j \rangle)$  двухфазного сверхпроводника, температурных зависимостей напряженности сигнала третьей гармоники  $E_{3\omega}(T)$  и удельного сопротивления  $\rho(T)$  от концентрации  $p$ , сделан вывод о том, что экспериментальная корреляция, изображенная на рис.1, возможна лишь в том случае, когда критический ток первой фазы превышает критический ток матрицы,  $j_{c1}(T) > j_{c2}(T)$ , т.е. когда среда состоит из монокристаллов (блоков, гранул), помещенных в сверхпроводящую матрицу с подавленными критическими параметрами. На основе системы уравнений, соответствующей положениям сформулированной в первой части параграфа модели, и предположении о том, что в двумерном случае зависимость  $p$  от  $a$  должна описываться соотношением [9]:

$$p(a) = \left( \frac{a}{a+d} \right)^2, \quad (2)$$

где параметр  $d$  связан с величиной межблочного пространства исследуемых пленок, численно экстраполированы зависимости параметров  $W_{EBIV}$ ,  $W_{TH}$  и  $j_p$  от среднего размера блока  $a$  (рис.1, пунктирные линии). В рамках разработанной модели двухфазного сверхпроводника показано, что при больших размерах блоков нелинейный СВЧ отклик эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок определяется внутриблочным пиннингом вихрей, а при малых – пиннингом на межблочных границах.

В третьей части рассмотрен вариант возможной модификации развитой модели при учете дисперсии локальных значений критических температур в образце, поскольку существование значительной величины такой дисперсии должно заметно сказываться на экспериментальных результатах, особенно в случае электрофизических измерений. Кроме того, с помощью локальной методики  $T_c$ -картографирования показано, что в представленной серии экспериментов влияние этого механизма незначительно.

Четвертая часть представляет собой расчет предельных параметров модели – расчет значений критических токов и ширин мощности сигналов третьей гармоники и сигнала  $EBIV$  в двух предельных случаях, при  $p \rightarrow 0$  и  $p \rightarrow \infty$ , т.е. когда сверхпроводник полностью состоит лишь из одной фазы. На основе проведенных расчетов сделан вывод о том, что первая фаза (среда с высокими СП параметрами) представляет собой среду типа Гинзбурга-Ландау, тогда как вторая – среду джозефсоновского типа.

Концепция метастабильных центров, обладающих отрицательной корреляционной энергией, предсказываемая на ее основе зонная диаграмма купратных ВТСП и анализ экспериментальных данных в рамках модели U-минус центров представлены в четвертой главе.

В параграфе 4.1. приведены результаты структурных и электрических исследований для серии оптимально легированных эпитаксиальных пленок  $YBCO$ , т.е. пленок с  $T_c \neq 0$  и  $(7-x) > 6.45$ , в нормальной фазе (при температурах выше  $T_c$ ). А именно, приведены экспериментальные зависимости величины параметра кристаллической решетки  $c$  и соответствующего ей уровня кислородного дефицита (пересчет производился в соответствии с работой [10]) от среднего размера блока  $a$  (рис.2, вставка) и зависимости крутизны сопротивления нормальной фазы  $d\rho(T)/dT$  от среднего размера блока  $a$  (рис.2).

В параграфе 4.2., разделенном на три части, представлены основные положения модели U-минус центров и предсказываемая этой моделью зонная диаграмма купратных ВТСП, а также последовательное теоретическое описание транспортных свойств (температурные зависимости коэффициента Холла и сопротивления) для серии пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  в нормальной фазе.

В первой части параграфа представлены основные положения используемой модели. А именно, указывается, что в кристаллической решетке материала существуют центры, обладающие особым свойством. Сильное электрон-решеточное взаимодействие приводит к тому, что энергия связи двух электронов превосходит энергию их кулоновского отталкивания. Причем, этот эффект должен наблюдаться и в нормальных условиях, то есть электроны, связанные в пару, могут существовать и при комнатной температуре и что для возникновения сверхпроводимости достаточно, чтобы невырожденный газ бозе-частиц стал вырожденным. В соответствии с [11] представлена предсказываемая моделью U-минус центров зонная диаграмма купратных ВТСП. Указывается, что 1) уровень Ферми запиннирован между уровнями  $D^+$  (уровнем без электрона) и  $D^-$  (уровнем с двумя спаренными электронами), возникающими вследствие реакции диспропорционирования и 2) его положение зависит от степени заселенности

этих уровней, в случае  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  от уровня кислородного легирования. В представлении вторичного квантования приведен гамильтониан, описывающий такую систему и представляющий собой гамильтониан Хаббарда с отрицательной корреляционной энергией.

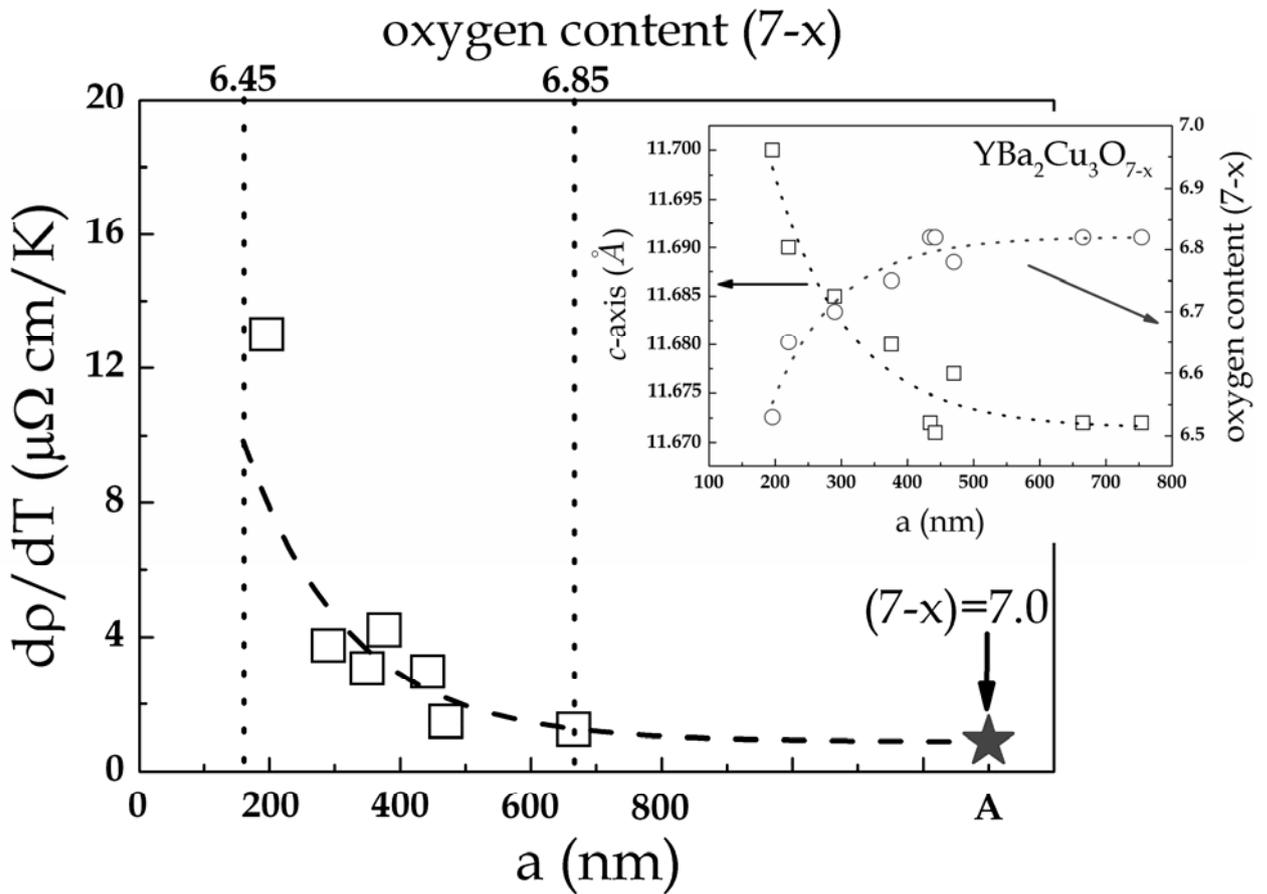


Рис.2. Зависимость крутизны  $T$ -зависимости сопротивления нормальной фазы  $d\rho(T)/dT$  для серии эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  от среднего размера блока  $a$ . Пунктирная линия – расчетная зависимость  $d\rho(T)/dT(a)$ , полученная путем анализа экспериментальных данных в рамках модели U-минус центров; звездочкой отмечено теоретическое не достигнутое в эксперименте значение размера блока  $A$ , при котором степень легирования по кислороду равна 7. Вставка: экспериментальная зависимость величины параметра кристаллической решетки  $c$  и соответствующего ей уровня содержания кислорода от среднего размера блока  $a$ ; точками проведены указательные линии для глаз

Предваряя анализ данных по измерению температурных зависимостей сопротивления  $\rho(T)$  и зависимости крутизны  $d\rho(T)/dT$  от размера блока  $a$ , во второй части параграфа представлены результаты численного расчета температурных зависимостей холловской концентрации носителей заряда при разных уровнях легирования,  $(7-x)$ , в

рамках модели U-минус центров. Приведены полученные путем аппроксимации экспериментальных данных значения подгоночных параметров модели: эффективной массы носителей  $m^*$ , концентрации U-минус центров  $D$ , величины  $\Delta$  – расстояния между верхом валентной зоны и уровнем Ферми и вид температурной зависимости химического потенциала  $\mu(T)$ . Для расчета были использованы результаты работы [12].

В третьей части параграфа проведен теоретический анализ экспериментально полученных зависимостей (рис.2). Для проведения расчетов использовалась стандартная формула для тока:

$$j = -E \frac{\sqrt{2m^*} e^2}{3\pi^2 \hbar^3} \int_{-\infty}^0 \left( 1 + e^{\frac{\mu(T) - \varepsilon}{T}} \right)^{-1} \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left( \tau (-\varepsilon)^{\frac{3}{2}} \right) d\varepsilon, \quad (3)$$

где  $m^*$  – эффективная масса электрона;  $\mu(T)$  – химический потенциал, зависящий от температуры;  $\tau$  – время релаксации носителей заряда. Параметр  $\tau$  описывает характер взаимодействия системы носителей заряда с кристаллической решеткой сверхпроводника и не зависит от типа используемой для расчета модели. Сделано предположение о том, что характер рассеяния должен определяться взаимодействием носителей заряда с акустическими фононами решетки;  $\tau$  приписана зависимость от температуры и энергии, соответствующая этому предположению. Сделанные предположения и предварительный расчет температурной зависимости холловской концентрации носителей при разных уровнях легирования позволяют:

- описать линейную температурную зависимость сопротивления  $\rho(T)$  оптимально легированных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ;
- описать зависимость крутизны сопротивления  $d\rho(T)/dT$  нормальной фазы оптимально легированных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  от среднего размера блока  $a$  (рис.2, пунктирная линия),

используя экспериментально полученные структурные параметры.

В **пятой главе** описывается новый тип болометра, предназначенный для абсолютной радиометрии синхротронного излучения мягкого рентгеновского диапазона. Приведены результаты структурных, шумовых и электрофизических исследований эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ; приведены результаты расчетного моделирования характеристик болометров на основе этих пленок.

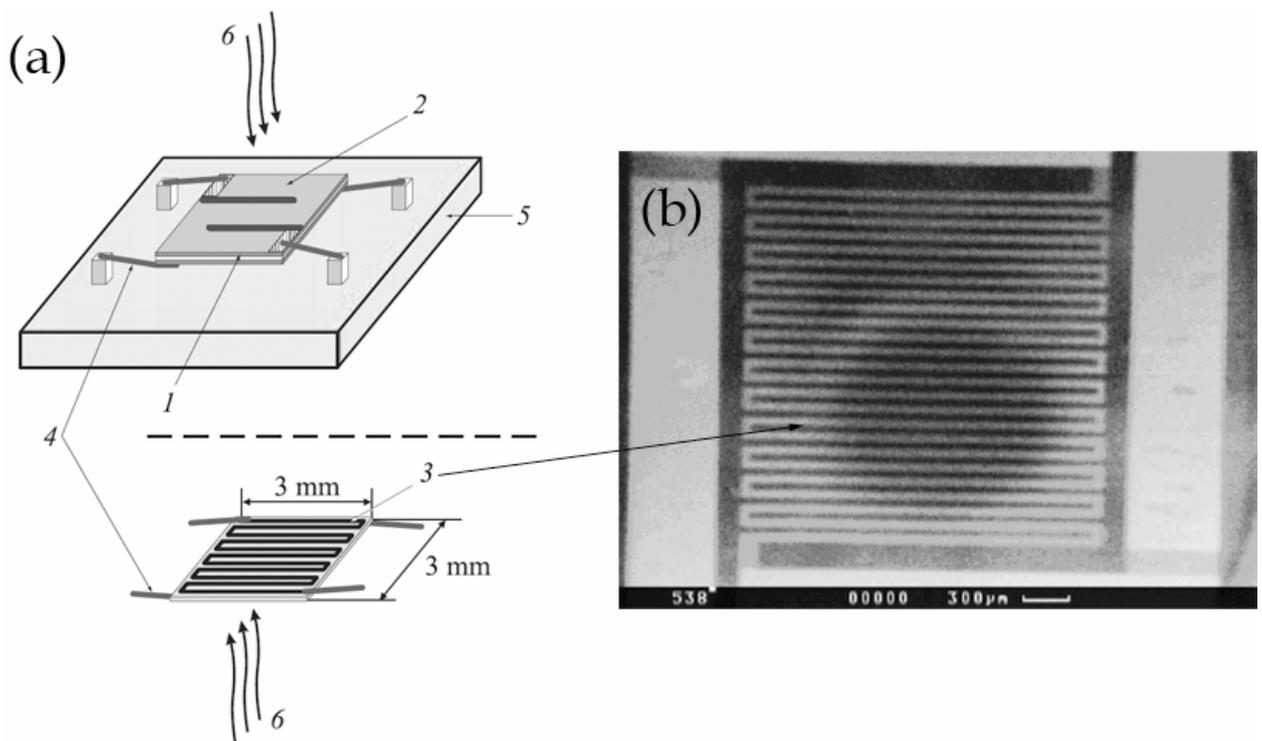


Рис.3. Устройство чувствительного элемента  $YBCO$  болометра с электрическим замещением для радиометра синхротронного излучения (СИ радиометра)

В параграфе 5.1. приведено описание устройства чувствительного элемента  $YBCO$  болометра с электрическим замещением (рис.3а), который представляет собой подложку из сапфира,  $Al_2O_3$ , коэффициент поглощения которой в спектральном диапазоне 150–3000 эВ равен единице, толщиной 50 мкм (1). На лицевую сторону подложки напылён  $NiCr$  – пленочный нагреватель (2), а на обратную – ВТСП термометр ( $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленка в виде меандра) (3) (рис.3б). Энергия рентгеновского излучения поглощается подложкой, а затем передается ВТСП пленке в виде тепловой мощности. Чувствительный элемент подвешен на  $Au$  или  $W$  нитях (4). Такая конструкция позволяет уменьшить тепловую связь с основанием (базой) (5), а кроме этого обеспечивает электрический контакт с электронной схемой.

В параграфе 5.2. описана теория высокотемпературного сверхпроводникового болометра с учетом электротепловой обратной связи (ЭОС). Приведены формулы для расчета основных рабочих характеристик болометра и его предельных параметров (чувствительности и быстродействия). Проведен сравнительный анализ двух основных режимов электротепловой обратной связи: режима работы болометра с постоянным током смещения и режима работы с постоянным напряжением смещения. Проанализировано воздействие ЭОС на шумовые характеристики болометра и описаны особенности выбора параметров рабочей точки болометра (тока, температуры и т.д.) для обоих режимов ЭОС.

В параграфе 5.3. приведены результаты структурных, шумовых и электрофизических исследований эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Результаты этих измерений позволяют определить значения ряда параметров (толщину используемой для создания болометра ВТСП пленки, крутизну сверхпроводящего перехода, значение параметра Хоуге в области сверхпроводящего перехода и т.д.), используемых для расчетного моделирования рабочих характеристик ВТСП болометров.

В параграфе 5.4. представлены результаты численного расчета рабочих характеристик и предельных рабочих параметров болометров на основе эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . В конце параграфа сформулированы основные результаты заключительной главы. В частности, указывается, что оценка прогнозируемой величины эквивалентной мощности шума  $NEP_{\Sigma} = 8 \times 10^{-11} - 1.3 \times 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>0.5</sup> демонстрирует возможность использования полученной серии меандров для создания высокоточного абсолютного СИ радиометра, способного регистрировать сигналы мягкого рентгеновского синхротронного излучения в широком диапазоне частот (150–3000 эВ) мощностью около 1 мкВт с точностью измерения не хуже 1 %.

**В заключении** представлены основные результаты работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Методом рентгеноструктурного анализа изучена структура эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Обработка полученных данных в рамках блочно-мозаичной модели позволила определить структурные параметры, наиболее полно и эффективно характеризующие структурное совершенство этих пленок, а также использовать их для физической интерпретации экспериментально обнаруженных корреляций в качестве модельных параметров;
2. Комплексные исследования структурных свойств эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и их электрофизических, магнитных и нелинейных СВЧ свойств при различных температурах вблизи критической температуры сверхпроводящего перехода позволили установить, что механизм уширения сверхпроводящего перехода и температурной зависимости мощности третьей гармоники связан со структурным несовершенством этих пленок (со средним размером блока);
3. Анализ экспериментально полученных данных в рамках построенной модели двухфазного сверхпроводника позволил установить, что при больших размерах блоков нелинейный СВЧ отклик эпитаксиальных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  пленок

определяется внутривзлочным пиннингом вихрей, а при малых – пиннингом на межвзлочных границах;

4. Комплексные исследования структурных свойств серии эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и их электрофизических свойств в нормальной фазе позволили обнаружить корреляцию между величиной параметра  $c$  кристаллической решетки (уровнем содержания кислорода), крутизной  $T$ -зависимости сопротивления и средним размером блока;
5. В рамках модели U-минус центров описана линейная температурная зависимость сопротивления  $\rho(T)$  оптимально легированных  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и зависимость  $d\rho(T)/dT$  от среднего размера блока, которая объясняется постростовой релаксацией кислорода в объеме пленок;
6. Создан болометр с электрическим замещением для абсолютной радиометрии синхротронного излучения на основе эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ ;
7. Результаты комплексных исследований структурных, шумовых и электрофизических свойств эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  и расчетного моделирования характеристик болометра на их основе позволяют заключить, что болометр обладает высокой чувствительностью (от 1 мкВт), высокой точностью измерения ( $\leq 1\%$ ) и возможностью работы на модулированном потоке излучения (до 1 кГц) в широком спектральном диапазоне (150-3000 эВ).

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Черпак Н.Т., Величко А.В. Высокотемпературные сверхпроводники в микроволновой технике. Успехи современной радиоэлектроники № 4, 3 (2000).
- [2] Kraus H. Superconductive bolometers and calorimeters. *Supercond. Sci. Technol.* **9**, 827 (1996).
- [3] Gurevich A., Pashitski E.A. Enhancement of superconductivity at structural defects in high-temperature superconductors. *Phys. Rev. B* **56**, 6213 (1997).
- [4] Bobyl A.V., Gaevski M.E., Karmanenko S.F., Kutt R.N., Suris R.A., Khrebtov I.A., Tkachenko A.D., Morosov A.I. Intrinsic microstrains and normal-phase flicker noise in  $YBa_2Cu_3O_7$  epitaxial films grown on various substrates. *J. Appl. Phys.* **82**, 1274 (1997).
- [5] Hilgenkamp H., Mannhart J. Grain boundaries in high- $T_c$  superconductors. *Reviews of Modern Physics* **74**, 485 (2002).
- [6] Polyanskii A.A., Gurevich A., Pashitski E.A., Heinig N.F., Redwing R.D., Nordman J.E., and Larbalestier D.C. Magneto-optical study of flux penetration and critical current densities in [001] tilt  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  thin-film bicrystals. *Phys. Rev. B* **53**, 8687 (1996).
- [7] Zhuravel A.P., Anlage S.M., Ustinov A.V. Measurement of local reactive and resistive photoresponse of a superconducting microwave device. *Appl. Phys. Lett.* **88**, 212503 (2006).
- [8] Лихарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. Наука, М. (1985). 320 с.
- [9] Nguyen P.P., Oates D.E., Dresselhaus G., and Dresselhaus M.S. Nonlinear surface impedance for  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  thin films: Measurements and a coupled-grain model. *Phys. Rev. B* **48**, 6400 (1993).
- [10] Cava R.J., Hewat A.W., Hewat E.A., Batlogg B., Marezio M., Rabe K.M., Krajewski J.J., Peck Jr. W.F., Rupp Jr. L.W. Structural anomalies, oxygen ordering and superconductivity in oxygen deficient  $Ba_2YCu_3O_x$ . *Physica C* **165**, 419 (1990).
- [11] Tsendin K.D., Denisov D.V. Semiconducting conduction in underdoped  $YBaCuO$  systems – the problem of the “pseudo-gap”. *Supercond. Sci. Technol.* **16**, 80 (2003).
- [12] Jones E.C., Christen D.K., Thompson J.R., Feenstra R., Zhu S., Lowndes D.H., Phillips J.M., Siegal M.P., Budai J.D. Correlations between the Hall coefficient and the superconducting transport properties of oxygen-deficient  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  epitaxial thin films. *Phys. Rev. B* **47**, 8986 (1993).

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- I. Барышев С.В., Бобыль А.В., Ноздрин Ю.Н., Пестов Е.Е., Саксеев Д.А. Нелинейный СВЧ отклик гранулированных пленок  $YBa_2Cu_3O_x$ . XXXIII Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. VI, Изд-во Политехн. ун-та, СПб (2005). С. 131.
- II. Ноздрин Ю.Н., Пестов Е.Е., Курин В.В., Барышев С.В., Бобыль А.В., Карманенко С.Ф., Саксеев Д.А., Сурис Р.А. Влияние микроструктуры эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на их электрофизические и нелинейные СВЧ свойства. ФТТ **48** (12), 2136 (2006).
- III. Baryshev S.V., Bobyl A.V., and Kostyleva O.P. Application of *EBIV* technique for investigation of electrophysical parameters of devices based on HTSC. Semiconductors **41** (5), 502 (2007).
- IV. Хохлов Д.А., Хребтов И.А., Барышев С.В., Бобыль А.В., Иванов А.А., Николаев Д.А. Шумовые и структурные свойства высокотемпературных сверхпроводниковых пленок и расчетное моделирование характеристик болометров на их основе. Письма в ЖТФ **33** (13), 15 (2007).
- V. Baryshev S.V., Bobyl' A.V., Kurin V.V., Nozdrin Yu.N., Pestov E.E., and Suris R.A. Nonlinear microwave properties of  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  block epitaxial films near the superconducting transition temperature. JETP **105**, 241 (2007).
- VI. Барышев С.В., Капустин А.И., Хохлов Д.А. Создание высокотемпературного сверхпроводникового болометра для абсолютного измерения мощности рентгеновского синхротронного излучения. XXXV Неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. Ч. VI, Изд-во Политехн. ун-та, СПб (2007). С. 194.
- VII. Baryshev S.V., Pestov E.E., Bobyl A.V., Nozdrin Yu.N., and Kurin V.V. Size of x-ray coherent region and nonlinear microwave response of epitaxial  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  films. Phys. Rev. B **76**, 054520 (2007).