

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

14-96-178

На правах рукописи

УДК 538.945; 539.125.5; 538.975

539.216.2; 539.23

У-491
ЧЕРНЕНКО

Леонид Прокопьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОНИКНОВЕНИЯ
ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В ПЛЕНКИ СВЕРХПРОВОДНИКОВ
МЕТОДОМ НЕЙТРОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Специальность: 01.04.07 — физика твердого тела

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1996

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка Объединенного института ядерных исследований.

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
профессор АКСЕНОВ Виктор Лазаревич

Официальные оппоненты:
доктор физико-математических наук ЗУБОВ
Виктор Евгеньевич
кандидат физико-математических наук МИКЕРОВ
Виталий Иванович

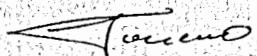
Ведущее научно-исследовательское учреждение:
Институт кристаллографии им. А.В.Шубникова РАН, г. Москва

Защита состоится "___" _____ 1996 г. в ___ час.
на заседании Специализированного совета Д.047.01.05 при
Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка и Лаборатории
ядерных реакций им. Г.Н.Флерова, Объединенного института ядерных
исследований, Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1996 г.

Ученый секретарь Специализированного совета
кандидат физико-математических наук



А.Г.Попеко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

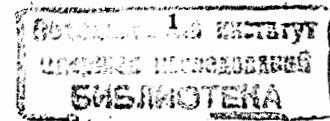
Актуальность проблемы. Прошедшее десятилетие для физики твердого тела явилось знаменательным периодом. Беднорц и Мюллер своими открытиями нового класса сверхпроводников стимулировали исследования высокотемпературной сверхпроводимости. Пристальное внимание к новым материалам объяснимо их очевидным значением не только для науки, но и техники. Интенсивное развитие, в это же десятилетие, метода нейтронной рефлектометрии установило уникальное его положение в ряду ядерно-физических методов изучения твердого тела. Знание нейтронных длин рассеяния с относительно высокой точностью обеспечило возможность абсолютных измерений в физике магнитных явлений. Точность, с которой известны длины рассеяния, позволяет их использовать для извлечения абсолютных магнитных величин с недоступной до сих пор прецизионностью. К таким величинам, в частности, относится глубина проникновения постоянного магнитного поля в тонкие пленки сверхпроводников. В этом появляется смысл и метрологическое значение абсолютных измерений методом нейтронной рефлектометрии.

Диссертация посвящена экспериментальному и теоретическому изучению проникновения стационарного магнитного поля в мейснеровской фазе в пленках высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (Y-Ba-Cu-O), а также классических сверхпроводников ниобия и ванадия методом зеркального отражения тепловых поляризованных нейтронов (общее название метода - нейтронная рефлектометрия). Численные расчеты показали, что имеется уникальная перспектива повышения прецизионности в измерении глубины проникновения для ванадия.

Экспериментальные исследования пленок ниобия и Y-Ba-Cu-O выполнено на пульсирующем реакторе ИБР-2 в Дубне, на спектрометре поляризованных нейтронов СПН.

Цели работы:

Ко времени начала наших исследований имелись противоречивые данные о глубине проникновения в соединении $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. Нами был указан путь увеличения точности и достоверности измерения этой фундаментальной постоянной с применением тонких эпитаксиальных пленок. Проведенный эксперимент показал правильность поставленной



задачи, однако новизна использованного метода (нейтронной рефлектометрии) создавала неуверенность в надежности экспериментов выполненных нейтронным методом.

Было принято решение проверить метод, взяв для измерения глубины проникновения классический сверхпроводник (ниобий). На тонкой пленке ниобия было обнаружено несоответствие величины измеряемой константы при сравнении со многими методами ее измерения, кроме одного, относящегося к применению метода измерения прямого тока в джозефсоновских туннельных переходах. Данные нейтронной рефлектометрии на ниобии, полученные в 1984 году группой физиков из Аргонской национальной лаборатории, отмечали это несоответствие оценок глубины проникновения. Ко времени наших измерений для ниобия стало ясно, что процедура учета микрошероховатости другими авторами была не вполне корректной.

Мы взяли специально приготовленную толстую пленку, имевшую микрошероховатость, для проверки своего алгоритма численного анализа измерений в нейтронной рефлектометрии. Суть учета микрошероховатости в нашем математическом аппарате сводится к использованию плавного нарастающего оптического потенциала для расчета коэффициентов отражения нейтронов. Фактически повторение эксперимента 1984 года на пленке с микрошероховатостью позволило обнаружить аномалию проникновения постоянного магнитного поля на границе с вакуумом.

Повышение интереса к нейтронной рефлектометрии стимулировало поиски новых модификаций нейтронной рефлектометрии, каким оказывается рефлектометрия с применением совершенных кристаллов в двухкристальном рефлектометре высокого углового разрешения. Предложение использовать туннелирование нейтронов в ванадиевом резонаторе, в котором рефлекторы могут быть изготовлены из изотопа ванадий-50, позволило численным анализом показать перспективность соответствующей модификации метода нейтронной рефлектометрии. Оказалось, что точность метода может быть существенно увеличена для целей измерения параметров диамагнетизма ванадия. Вместе с тем для развития метода и увеличения светосилы в методе двухкристальной рефлектометрии был предложен позиционно-чувствительный детектор нейтронов.

Новизна работы. Развита оригинальная методика решения прямой задачи для зеркального отражения нейтронов. Для одномерной структуры произвольного наперед заданного состава ядер с использованием

квазипотенциала Ферми развита процедура расчета коэффициента отражения нейтронов. Данная процедура обеспечила корректное описание отражения нейтронов от образцов с микрошероховатостью, что привело к обнаружению аномалии, связанной с подавлением параметра порядка сверхпроводимости у границы с вакуумом.

Впервые проведен эксперимент на сверхпроводящей пленке ниобия, который показал аномальное проникновение магнитного поля.

Поставлен эксперимент на высокотемпературном сверхпроводнике состава Y-Ba-Cu-O, позволивший оценить глубину проникновения магнитного поля в этом соединении, когда по условиям прикладывается поле в мейснеровской фазе. Данная оценка устраняет противоречие констант при сравнении с измерениями плазменной частоты.

Проведен численный анализ возможного эксперимента на многослойной структуре из изотопа ванадий-50, естественный ванадий, ванадий-50 (нейтронный резонатор), который позволил найти условия принципиального увеличения чувствительности метода нейтронной рефлектометрии для изучения сверхпроводимости ванадия. Полученный результат выводит нейтронный метод в разряд высокочувствительных наряду с методом прецессии спина мюона и метода измерения прямого тока в джозефсоновском туннелировании.

Предложен позиционно-чувствительный детектор нейтронов с высоким координатным разрешением и эффективностью регистрации нейтронов, адекватный задаче регистрации малоуглового рассеяния в геометрии плоского образца.

Практическая и научная ценность работы:

Получены данные метрологической ценности, что позволяет снять противоречия в традиционных схемах измерения фундаментальных констант: глубины проникновения и плазменной частоты. Расчетами показаны практически значимые новые направления развития метода нейтронной рефлектометрии в изучении сверхпроводников.

Апробация результатов и публикации:

Результаты, изложенные в диссертации, докладывались на научных семинарах, рабочих совещаниях в Лаборатории нейтронной физики им. И.М.Франка, на международных научных конференциях в Дубне в 1989 году, в Бад-Хоннефе (Германия) в 1991 году, в Сан-Диего (США) в 1992 году, на рабочих совещаниях в г. Заречном, Свердловской обл., на международной конференции "Кауровка-94", на Российско-Французском семинаре по исследованию конденсированных сред ядерно-физическими методами г. Гатчина в 1993 году, на научном семинаре в г. Гатчина в 1992

году, на XXX совещании по физике низких температур в г. Дубна в 1994 году. Основные результаты представлены в семи публикациях [1-7].

Объем диссертации:

Диссертация изложена на 119 страницах и состоит из 5 глав и заключения. В ней содержится 29 рисунков, 5 таблиц и список литературы в 95 наименований.

Автор защищает:

1. Разработку нового способа численного анализа процесса отражения нейтронов используя квазипотенциал Ферми.
2. Усовершенствование детектора тепловых нейтронов.
3. Экспериментальное изучение проникновения постоянного магнитного поля в тонкопленочном ниобиевом сверхпроводнике.
4. Численный анализ условий оптимального изучения явления проникновения постоянного магнитного поля в тонкие пленки сверхпроводника Y-Ba-Cu-O.
5. Экспериментальное изучение проникновения постоянного магнитного поля в толстой пленке ниобиевого сверхпроводника с шероховатой поверхностью и обнаружение аномального проникновения поля на границе с вакуумом.
6. Экспериментальное определение глубины проникновения магнитного поля в высокотемпературный сверхпроводник состава Y-Ba-Cu-O.
7. Численную оценку возможностей туннелирования нейтронов для достижения новых прецизионных условий изучения проникновения магнитного поля в ванадиевую тонкопленочную структуру (резонатор на основе изотопного контрастирования).

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Глава I. Введение

В данной главе рассматриваются основные элементарные предпосылки, позволившие сформулировать тему диссертации.

Введены понятия критических магнитных полей в сверхпроводниках, дается определение понятия глубина проникновения магнитного поля и связь ее с фундаментальными величинами характеризующими состояние сверхпроводимости в материале. Описываются методы измерения глубины проникновения.

Кратко описывается метод нейтронной рефлектометрии, становление которого начиналось с ранних попыток измерения глубины проникновения в ниобии и изучения поверхностной сверхпроводимости в соединении $Pb_{0.992}Bi_{0.008}$. Поясняется физический механизм, за счет которого оказывается возможным изучать сверхпроводимость и диамагнетизм, используя понятие показателя преломления нейтронов. Дается характеристика экспериментальных исследований сверхпроводников методом нейтронной рефлектометрии.

Обсуждается принципиальная схема нейтронного рефлектометрического эксперимента.

Рассматривается вынесенный на защиту оригинальный результат, суть которого состоит в предложении нового детектора тепловых нейтронов, адекватного задаче измерения малоуглового рассеяния нейтронов. Детектор имеет одномерное позиционное разрешение не хуже 100 микрон и высокую эффективность близкую к 100% для тепловых нейтронов. Авторские права на позиционно-чувствительный детектор защищены патентом Российской Федерации [1]. Упрощенный вариант детектора создается в ОИЯИ в г. Дубна.

Глава II. Особенности отражения поляризованных нейтронов от реальной поверхности

В данной главе рассматриваются основные вопросы связанные с математическими проблемами количественного описания процесса отражения в рамках метода нейтронной рефлектометрии.

Формулируется квантово-механическая постановка задачи и определяется прямая и обратная задачи рефлектометрии.

Описан метод рекуррентных соотношений, как наиболее часто применяемый.

Приводится оригинальный метод расчета коэффициента отражения, защищаемый в диссертации, как один из основных результатов. Он использует квазипотенциал Ферми [2]. В последнее время принято считать метод квазипотенциала наиболее последовательным для целей решения общих задач теории рассеяния нейтронов. Его полезная черта состоит в том, что он позволяет наглядно изучать малоугловую задачу рассеяния и дифракцию не меняя параметры, относящиеся к структуре рассеивателя, а только определяя интервал волновых векторов.

Дается анализ геометрического подхода. Показано, что в ряде работ при использовании этого подхода некорректно учитывался фактор микрошероховатости отражающей поверхности.

Предложена схема корректного учета микрошероховатости [3].

Характеризуется явление шероховатости поверхности и акцентируются его фундаментальные и прикладные аспекты. Корректные расчеты с учетом микрошероховатости позволили получить основные экспериментальные результаты измерения глубины проникновения в сверхпроводник и аномалию профиля проникновения магнитного поля, защищаемые в диссертации.

Глава III. Измерение глубины проникновения в тонких пленках

Впервые теоретическое рассмотрение условий для применения метода нейтронной рефлектометрии при изучении проникновения магнитного поля в сверхпроводники в виде тонких пленок было предпринято в работе [3]. В данной работе были выявлены определенные, достаточно оптимистические, ожидания преимуществ тонкопленочных образцов по сравнению с предельно толстыми (много толще 3000 ангстрем) пластинами (пленками). Ожидания и в настоящее время представляются актуальными.

В данной главе рассматриваются в несколько обновленном виде условия, в которых наиболее явно поляризационная нейтронная рефлектометрия проявляет картину проникновения постоянного магнитного поля в тонких пленках. Как предполагается, это могло бы быть достигнуто для тонкопленочных структур с толщиной сверхпроводящих пленок порядка 3000 ангстрем или менее. Именно в этом случае чувствительность поляризационной нейтронной рефлектометрии в широком интервале измеряемых векторов рассеяния нейтронов увеличивается.

Рассматривалась тонкая пленка высокотемпературного сверхпроводника $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. В отличие от работы [3], в которой рассчитывалось отношение коэффициентов отражения для противоположных ориентаций спина нейтронов (флип-отношение) для узкого интервала векторов рассеяния нейтронов, здесь показано, что в широком, доступном на современных рефлектометрах, интервале существуют условия для наблюдения многочисленных осцилляций флип-отношения. Это повышает чувствительность метода ко многим важным

параметрам пленок, влияющим на оценку лондоновской глубины проникновения. Таким образом, точность метода выигрывает при оптимизации, которая не рассматривалась в [3], но возможна. Предложение измерять глубину проникновения в тонкие пленки [3] рассматривается, как один из результатов представленных к защите в рукописи диссертации. Другой результат защищаемый здесь является оценка глубины проникновения в пленку ВТСП, позволившая снять противоречие в нейтронных данных [4]. Одним из основных результатов является измерение диамагнитного профиля в тонкой ниобиевой пленке, проявивших осциллирующее поведение флип-отношения и позволившего получить оценку глубины проникновения противоречащую старым нейтронным данным [5]. Данный результат помог в последовавших измерениях обнаружить аномальное проникновение магнитного поля на границе сверхпроводника с вакуумом [6].

Глава IV. Измерение проникновения магнитного поля в толстой пленке с шероховатой поверхностью

В данной главе представлен основной результат, вынесенный на защиту по наблюдению аномалии проникновения постоянного магнитного поля в пленке ниобиевого сверхпроводника [6]. Аномалия была зарегистрирована нами впервые и недавно результатом американской группы повторено ее проявление не только в ниобии, но и в высокотемпературном пленочном образце.

Ниобиевая толстая пленка на ситалловой подложке, полученная наклонным напылением с целью увеличения степени шероховатости, имела среднеквадратичный параметр высот микрошероховатости 81 ангстрем, согласно нейтронным рефлектометрическим данным. Ее толщина, определенная методом резерфордского обратного рассеяния, равна 7000 ангстрем. Критическая температура сверхпроводящего перехода равна 8.95 К. Исследование состава исходного материала для напыления ниобия, а также самой пленки, методом нейтрон-активационного анализ не показало, кроме 0.3% тантала, присутствие других примесей в пленке концентрацией более 10 ppm. Дополнительные сведения о составе пленки получены методом обратного резонансного рассеяния ионов гелия-4 на кислороде-16. Обнаружен естественный окисел, по-видимому, NbO толщиной около 30 ангстрем. По условиям применения метода резонансного рассеяния, измерения выполнены на пределе чувствительности для толстых пленок.

На Рис. 1 приведен фрагмент спектра рассеяния, который иллюстрирует качество оценки наличия окисла. Основной трудностью снижающей чувствительность метода является малая толщина окисла и наличие микрошероховатости поверхности, а также наложение парциальных спектров рассеяния ионов гелия на ниобии и кислороде. Последнее обстоятельство отличается от условий на тонкой пленке, в которой глубинный профиль кислорода удастся измерить, так как парциальные спектры рассеяния на ниобии и кислороде не перекрываются. Пленки ниобия, получаемые использованным методом напыления, как правило, обладают сверхпроводящими свойствами при толщинах начиная с 400 ангстрем, при гелиевой температуре (4.2 К).

На Рис. 2 представлено флип-отношение и результаты расчетов для проверки различных гипотез о диамагнитном профиле данной пленки, помещавшейся в магнитное поле 500 Э. Спектральной переменной является нормальная к плоскости пленки компонента длины волны нейтрона. Точки отражают экспериментальный результат, линия 1 рассчитана по лондонской модели с параметром глубины проникновения 900 ангстрем, а линия 2 для модели с мертвым слоем (см. Рис. 3).

Анализ данных в рамках лондонской модели мог бы, на первый взгляд, подтверждать результат по оценке глубины проникновения, полученный в работе группы физиков из Аргонской национальной лаборатории в США. Однако ситуация на самом деле требует более пристального внимания. Следует заметить, что экспериментальные значения спектральной функции флип-отношения при длинах волн менее 850 ангстрем систематически лежат ниже расчетной кривой 1, указывая на то, что в среднем флип-отношение меньше единицы в данном интервале.

В первой работе аналогичное свойство флип-отношения так же проявилось на краю спектрального интервала в одной экспериментальной точке и было оставлено авторами без должного внимания. Аналогичное проявление поведения флип-отношения обнаружено для другого сверхпроводника при исследовании, посвященном поверхностной сверхпроводимости. Таким образом, обсуждаемое свойство флип-отношения носит более общий характер и свойственно не только ниобиевому сверхпроводнику.

Вывод, который следует из анализа данного свойства, заключается в том, что имеет место аномалия диамагнитного профиля, заключающаяся в сильном отклонении профиля от предсказаний лондонской модели. Так как введение мертвого слоя значительно улучшило меру правдоподобия при описании экспериментальной функции флип-отношения, следует

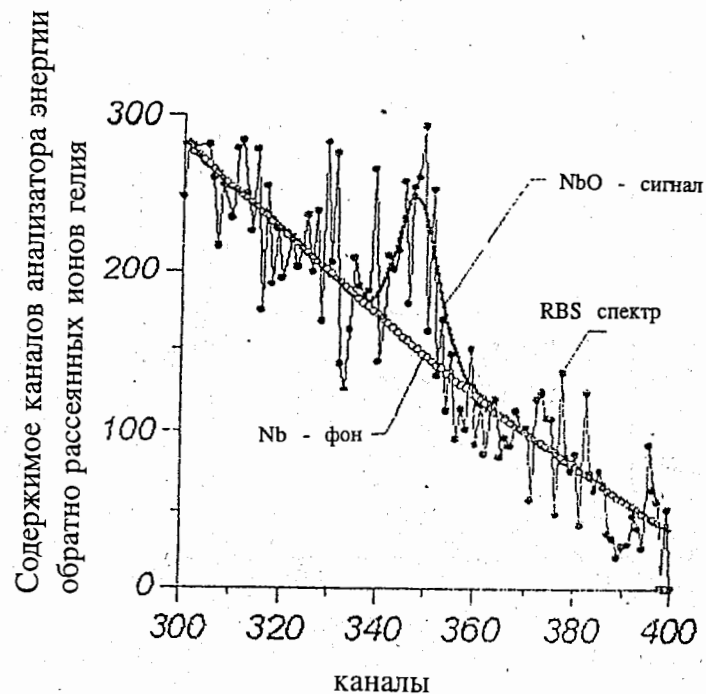


Рис. 1

Спектр обратного рассеяния ионов гелия для толстой ниобиевой пленки, в котором вычтена постоянная в 1000 отсчетов на канал. Рассеяние на ниобии (Nb - фон) затрудняет анализ рассеяния гелия на кислороде (Nb+O). Однако удастся провести оценку на наличие естественного окисла на поверхности пленки, толщиной около 30 ангстрем и в предположении стехиометрии NbO, как и для тонкой пленки

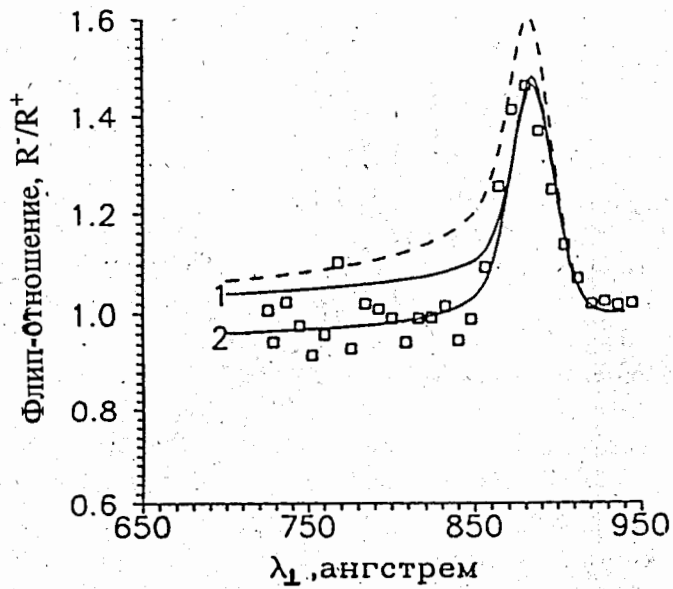


Рис. 2

Экспериментальное флип-отношение, R/R^+ , для толстой ниобиевой пленки (символами). Непрерывные линии: 1 - для лондоновской модели с глубиной проникновения 950 ангстрем, 2 - с включением мертвого слоя 280 ангстрем на поверхности и глубиной проникновения 450 ангстрем (см. рис. 3). Пунктир соответствует лондоновской модели с глубиной проникновения 430 ангстрем

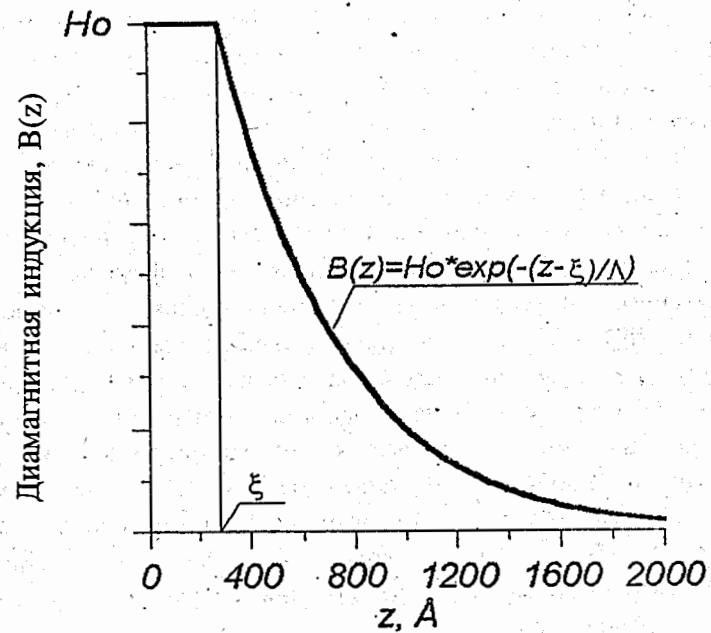


Рис. 3

Двухпараметрическая форма функции проникновения магнитного поля в сверхпроводник на границе с вакуумом

сделать заключение о наличии подавления параметра порядка сверхпроводника у границы с вакуумом.

Измерение состояния поверхности пленки (окисел, микрошероховатость) дали информацию о том, что микроскопическими причинами подавления параметра порядка могут быть по меньшей мере три. Микрошероховатость может приводить к пиннингу вихрей на поверхности, которая находится в условиях сильной неустойчивости к проникновению магнитного поля. В литературе известны случаи проявления данной неустойчивости, которая объясняла проявление гистерезисных свойств при магнитных полях, прикладываемых в плоскости образца или переменных с низкой частотой колебаний. Удалось объяснить механизм диссипативных явлений в медленно меняющихся полях, когда проникновение поля и закрепление вихрей привлекали в качестве основной причины проявления эффекта.

Естественный окисел обладает металлическими свойствами в стехиометрии NbO_x , что способствует проявлению эффекта близости, который допускает подавление параметра порядка на некоторую глубину. Из расчетов следует, что глубина подавления равна 280 ангстрем. Эта величина не на много отличается от корреляционной длины сверхпроводящего ниобия (390 ангстрем). Кроме всего механизм подавления может заключаться в том, что из-за зернограничной диффузии кислорода вглубь ниобия, он у поверхности пленки имеет критическую температуру сверхпроводящего перехода сниженную по сравнению с табличным значением для ниобия.

Таким образом, на данной стадии исследований, нельзя утверждать определенно, что найден механизм в проявлении аномалии. Требуются нетривиальные подходы к изучению аномалии, одним из которых может быть изучение полевой зависимости эффекта. Другим - измерения с вариацией толщины окисла. Вполне приемлемым может быть также изучение зависимости эффекта от вариации толщины пленки или параметра шероховатости.

Наблюдаемая аномалия по предварительным данным независимой группы из национального института стандартов и технологии с США имеет место не только в ниобии, но и в высокотемпературных сверхпроводниках. Сообщение об экспериментах на тонких пленках появилось в начале 1995 года. Данные дубненской группы вызвали появление упомянутой работы, которая выполнена на достаточно высоком уровне искусства нейтронной рефлектометрии. Сводная таблица 1 результатов приведена на следующей странице. На рис. 4 приведен

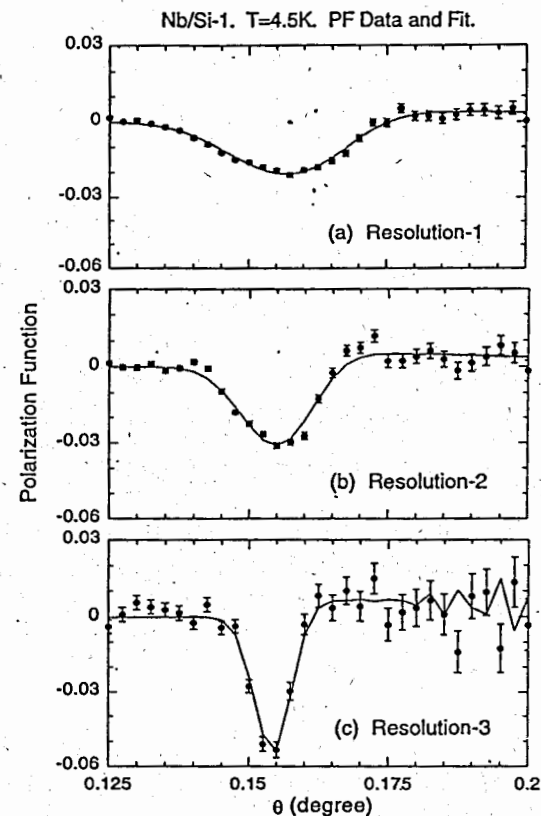


Рис. 4

Функция поляризации, как измерено в работе американской группы (обсуждается в тексте).

Таблица 1 Опубликованные величины λ и λ_L в Nb

$\lambda(T)(nm)$	$\lambda_L(T)(nm)$	T(K)	Авторы(ссылки)	Методы
47±5	39±5	0	Maxfield и др. ²³	индуктивность
41±1	35.0	0	Finnemore и др. ²⁴	намагниченность
	31.5	0	Auer и др. ²⁵	намагниченность
	31.5±1.5	0	Varmazis и др. ²⁶	индуктивность
90		4.1	Broom и др. ²⁷	тун. переход
92±2		4.2	Cucolo и др. ²⁸	тун. переход
	32.3±0.4	0	Blaschke и др. ²⁹	расчёт зонн. стр.
43±4	43±4	4.6	Felcher и др. ³	ПНР
	28.9±0.1	0	Weber и др. ²⁰	намагниченность
82.5		0	Anlage и др. ³⁰	полоск. резонатор
90±10;	45±10;	4.9	Chernenko и др. ⁹	ПНР
145±15	145±15			
61±2;		4.2	Kim и др. ^{31,32}	тун. переход
84±2				
110±2;	43±8	4.5	Zhang и др.	ПНР
55±2				

ПНР - поляризационная нейтронная рефлектометрия

экспериментальный результат измерения поляризации, полученный этой же группой. Флип-отношение F связано с коэффициентами отражения и поляризацией P, приведенной на рис. 4, следующими соотношениями

$$F = R^+ / R^-$$

$$P = (1 - F) / (1 + F)$$

Простой анализ показывает, что изменение знака поляризации, наблюдавшееся группой из США, аналогично переходу флип-отношения из режима величины большей единицы к режиму - меньше единицы, т.е. количественно наблюдается такая же аномалия, как и в наших измерениях на толстой пленке.

В интерпретации механизма аномалии группа американских ученых склонна считать основной причиной ее появления наличие шероховатости поверхности. Мы же пока оставляем выяснение механизма для задач будущих исследований, предлагая несколько возможных причин, отмеченных выше: пиннинг вихрей, эффект близости из-за наличия окисла, обладающего металлическими свойствами и, наконец, зернограничная диффузия кислорода на достаточно большую глубину. Для выяснения механизма требуется проводить более детальную проверку

каждой из гипотез, которые по-видимому должны по разному проявлять себя в полевой зависимости параметров аномального проникновения.

Глава V. Предложение эксперимента на ванадиевом нейтронном резонаторе

Было показано [7], что туннелирование поляризованных нейтронов обеспечивает новые возможности для исследования диамагнетизма сверхпроводников. В качестве примера, рассматривался резонатор Фабри-Перо. Он состоит из тонкой пленки из естественной смеси изотопов, приготовленной напылением, в слоистой структуре окруженной тонкими слоями из изотопа ванадия-50. В сверхпроводящем состоянии в мейснеровской фазе такой резонатор позволяет измерять отражение нейтронов в диапазоне волновых векторов, попадающих в режим полного отражения нейтронов, за исключением резонансной зоны. Резонансная зона для коэффициентов отражения противоположно поляризованных нейтронов находится при значительно отличающихся волновых векторах так, что спектральное отношение коэффициентов отражения достигает огромных величин. Этот метод допускает возможность измерения очень большой глубины проникновения магнитного поля до 45000 ангстрем. Соответствующие оценки дают чувствительность к глубине проникновения $\Delta\lambda / \lambda$ и внешнему магнитному полю менее 1% и 1-2 Э, соответственно.

Заключение

Проведенные исследования относятся к изучению сверхпроводящих пленок ниобия, ванадия и пленок высокотемпературных сверхпроводников состава Y-Ba-Cu-O. Каждый из объектов исследования изготавливался и может быть изготовлен самыми современными методами приготовления, что является стимулирующим фактором в продолжение изучения данных объектов.

Примененные измерительные методики позволили определить микроскопические характеристики пленок: микрошероховатость поверхности, толщины пленок, толщины и профили окислов на поверхности, фундаментальные константы: лондоновскую глубину проникновения постоянного магнитного поля и глубину "мертвого слоя". Это значит, что методы адекватны задаче исследования проникновения поля в сверхпроводники.

Уникальность метода нейтронной рефлектометрии в применении к изучению сверхпроводников не является препятствием для более широких систематических исследований в данном направлении, так как метод развивается в связи с многочисленными исследованиями ферромагнетизма пленок..

Математический анализ в методах обработки данных показал, что учет микрошероховатости является важнейшим фактором, позволяющим правильно интерпретировать спектральные функции метода нейтронной рефлектометрии. Можно ожидать, что расчет коэффициента отражения пленок с микрошероховатой границей, используя плавно нарастающий потенциал параболического типа, позволит избежать принципиальных неточностей в извлечении параметров потенциала не только для сверхпроводников, но и для ферромагнетиков. Последнее является принципиальным в возможностях применения нейтронной рефлектометрии.

Основные результаты и выводы представленные на защиту состоят в следующем:

- 1) Разработан общий подход моделирования коэффициента отражения нейтронов, позволивший провести широкий спектр расчетов в новых задачах нейтронной поляризационной рефлектометрии. Реализация метода квазипотенциала Ферми открывает возможность изучить принципиальные вопросы отличия метода классического потенциала и квазипотенциала.
- 2) Предложен новый однокоординатный позиционно-чувствительный детектор тепловых нейтронов с эффективностью близкой к единице и рекордным разрешением не хуже 100 микрон, расширяющий экспериментальные возможности нейтронных рефлектометров и, в особенности, двухкристалльных рефлектометров высокого углового разрешения.
- 3) Изучены оптимальные для классической нейтронной рефлектометрии условия измерения лондонской глубины проникновения магнитного поля в тонкопленочных сверхпроводниках. Исследован высокотемпературный сверхпроводник Y-Ba-Cu-O, для которого получено непротиворечивое значение лондонской глубины проникновения. Оптимальные условия измерения характеризуются выбором интервала волновых векторов рассеяния нейтронов, для которого коэффициенты отражения являются измеримыми, т.е. не снижаются ниже пороговой величины в 10^{-6} .
- 4) Экспериментально показано, что имеется чувствительность нейтронов к диамагнетизму в пленках порядка 2000 ангстрем толщиной. Это может

дать новые результаты в измерении размерных эффектов в сверхпроводимости, когда толщина пленки варьируется. Измерения на тонкой пленке ниобия обнаружили противоречие с ранними данными.

5) Обнаружено аномальное проникновение магнитного поля в толстой ниобиевой пленке. Аномалия подтверждена в дальнейших экспериментах группы американских исследователей из Национального института стандартов и технологии. Найдена корректная процедура учета микрошероховатости поверхности пленок, что в измерении фундаментальных констант сверхпроводимости является ключевым моментом.

6) Для тонкой пленки высокотемпературного сверхпроводника итриевого состава получена новая оценка параметра лондонской глубины проникновения, которая позволила снять противоречия с ранним экспериментом на керамике нейтронным методом. Вывод о расхождении констант: плазменной частоты и лондонской глубины проникновения - снят, так как абсолютные данные нейтронной рефлектометрии позволяют объяснить обсуждавшееся разногласие. По-видимому оценка лондонской глубины проникновения, равная 1400 ангстрем по данным метода мюонной прецессии спина для мейснеровской фазы, не верна. Данные нейтронной рефлектометрии ($\lambda = 970_{-250}^{+600}$ ангстрем) ближе к согласию с оценками по плазменной частоте, которые требуют, чтобы лондонская глубина проникновения была около 700 ангстрем.

7) Предложен метод повышения чувствительности нейтронной рефлектометрии к диамагнетизму сверхпроводников; обещающий достижение принципиально новых возможностей. Моделирование условий применения резонатора на ванадии и явления туннелирования нейтрона показало, что имеется чувствительность к магнитному полю в 1.2 Э. Последнее позволяет измерять очень большие по абсолютной величине глубины проникновения, а это важно при приближении температуры образца в измерениях к критической температуре сверхпроводника.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Л.П.Черненко, "Позиционно-чувствительный детектор нейтронов"
Российский Патент, Авторское свидетельство N 1742757 от 25 мая 1993 г. по изобретению а.с. 4822500/25 от 03.05.90, бюл. N 23 от 23.06.92

2. Д.А.Корнеев, Л.П.Черненко, Сообщение ОИЯИ, Р4-87-460 (1987)
3. Д.А.Корнеев, Л.П.Черненко, Поверхность 9 (1990) 61
4. С.В.Гапонов, Е.Б.Докукин, Д.А.Корнеев, Е.Б.Клюенков, В.Лебнер, В.В.Пасюк, А.В.Петренко, Х.Ржаны, Л.П.Черненко, Письма в ЖЭТФ, 49 вып.5 (1989) 277-280
5. L.P.Chernenko, D.A.Korneev, A.V.Petrenko, N.I.Balalykin, A.V.Skripnik, in Surface X-Ray and Neutron Scattering, ed. by H.Zabel and I.K.Robinson (Springer Verlag, Berlin, 1992), p. 209
6. Д.А.Корнеев, Л.П.Черненко, А.В.Петренко, Н.И.Балалыкин, А.В.Скрыпник, Письма в ЖЭТФ 55 (1992) 683
7. M.Maaza, L.P.Chernenko, D.A.Korneev, B.Pardo, C.Sella, F.Bridou, Phys.Lett A 195 (1994) 9-17

Рукопись поступила в издательский отдел
27 мая 1996 года.