

СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ

(под редакцией чл.-корр. НАН Украины А.Н. ОМЕЛЬЯНЧУКА)

Развитие исследований в области физики сверхпроводимости и сверхпроводниковой электроники в Физико-техническом институте низких температур неразрывно связано с именем одного из основателей института — академика Игоря Михайловича Дмитренко. С самого начала образования института И.М. Дмитренко возглавил отдел низкотемпературной электроники. Широчайшая научная эрудиция, тонкое понимание экспериментальной техники и энергичный стиль руководства позволил И.М. Дмитренко и его сотрудникам всегда быть на мировом уровне, правильно определяя приоритетные направления исследований. Мировой научной общественности И.М. Дмитренко стал известен еще в 60-х годах благодаря блестящему эксперименту по непосредственному измерению излучения из сверхпроводящего туннельного контакта, подтверждающему знаменитое теоретическое предсказание Б. Джозефсона. Связанные с именем И.М. Дмитренко пионерские исследования структуры резистивного состояния тонких пленок, квантовой интерференции, квантования магнитного потока в сверхпроводниках и нормальных металлах давно стали классическими.

Ниже приводятся наиболее важные результаты, полученные в институте в области экспериментальной физики сверхпроводимости и сверхпроводниковой электроники.

Исследования слабосвязанных сверхпроводников

Туннельные контакты Джозефсона. В 1962 г. во ФТИНТе были начаты исследования одночастичного туннелирования между сверхпроводниками, а в 1963 г. — исследования туннелирования куперовских пар. Успехи в технологии изготовления туннельных контактов дали возможность в начале 1964 г. наблюдать все характерные признаки стационарного эффекта Джозефсона и обнаружить ступенчатую структуру вольт-амперных характеристик (ВАХ) и так называемую структуру субгармоник щели.

Правильная физическая интерпретация гармонических ступеней тока на ВАХ туннельных контактов как проявление нестационарного эффекта Джозефсона на собственных частотах микрополоскового резонатора (которым является туннельный контакт) позволила к концу 1964 г. в прямом эксперименте с использованием чувствительного приемника трехсантимет-



рового диапазона обнаружить электромагнитное излучение, генерируемое туннельным контактом Джозефсона (И.М. Дмитренко, И.К. Янсон, В.М. Свистунов). Позднее результат был подтвержден в США.

В последующем цикле работ (1964—1967 гг.) был установлен и детально исследован механизм генерации электромагнитного излучения в туннельных контактах, приводящий к появлению ступеней на ВАХ, выяснены зависимости параметров ступенчатой структуры ВАХ от размеров контакта, внешнего постоянного магнитного поля и температуры. Согласованность экспериментальных данных с теорией, по существу, означала создание электродинамики нестационарного эффекта Джозефсона в туннельных контактах. Были проведены детальные исследования особенностей генерации, зависящих от свойств и геометрии контакта, изучены процессы старения туннельных контактов и спектральный состав излучения. Мощность, генерируемая одиночным контактом, зарегистрированная первоначально на уровне 10^{-14} Вт, в дальнейших экспериментах была увеличена до 10^{-12} Вт (И.К. Янсон, В.М. Свистунов, И.М. Дмитренко, 1965). Известно, что Б. Джозефсон в своей нобелевской лекции особо выделил результат харьковских физиков по обнаружению электромагнитного излучения в микроконтактах.

Разработка и свойства нетуннельных слабых связей джозефсоновского типа. Вскоре после создания туннельных контактов Джозефсона из экспериментов стало ясно, что джозефсоновские свойства (ступени Шапиро на вольт-амперных характеристиках при воздействии СВЧ облучения, осциллирующая зависимость критического тока от магнитного поля) проявляют и слабые металлические связи типа мостика Дайема.

В отличие от известных в тот период (1963—1970 гг.) туннельных контактов эти мостики обладали высокой стабильностью параметров после хранения при комнатной температуре. На основе существующей тогда технологии было трудно изготовить такие мостики с необходимыми малыми размерами (вдоль направления тока размеры сопоставимы с длиной когерентности 300—600 Å). С целью преодоления этой трудности в отделе № 16 под руководством тогда еще канд. физ.-мат. наук (позже академика) Игоря Михайловича Дмитренко были проведены первые исследования по разработке и изучению “коротких” сверхпроводящих слабых связей с металлической проводимостью, не имеющих аналогов за рубежом. Были созданы так называемые фриттинговые контакты, а также контакты, получаемые по методу микропроколов тонкого (300—500 Å) слоя изолятора на одном из контактирующих сверхпроводников (С.И. Бондаренко, Е.И. Баланов, Л.Е. Колинко, 1970). Фриттинговый контакт представляет собой металлический мостик, получаемый при точечном электрическом пробое тонкого (200—300 Å) слоя изолятора между двумя сверхпроводниками. С помощью указанных контактов были изучены свойства пленочных S—N—S контактов (С.И. Бондаренко, И.М. Дмитренко, Е.И. Баланов, 1970) и созданы первые в СССР пленочные ПТ-СКВИДы на постоянном токе (С.И. Бондаренко, В.В. Кравченко, Н.М. Лемешко, 1972). В дальнейшем разработки

“коротких” слабых связей были продолжены с целью создания на их основе пленочных ПТ- и ВЧ- СКВИДов, обладающих высокой чувствительностью и стабильностью параметров. Методом фрезеровки пленки “мягкого” сверхпроводника (сплав индий—олово) были созданы короткие (500—1000 Å) мостики переменной толщины (В.В. Кравченко, С.И. Бондаренко, А.С. Шульман, Е.А. Голованев, 1978), а методом обработки мостика Дайема из “жесткого” сверхпроводника (ниобий) импульсами тока высокой плотности внутри него были созданы короткие слабые связи (А.В. Лукашенко, А.А. Шабло, С.И. Бондаренко, 1986), удовлетворяющие требованиям теории коротких мостиков, разработанной К.К. Лихаревым. Импульсная методика “ослабления” мостикового контакта была усовершенствована в 80-е годы. В итоге удалось создать первые в мире джозефсоновские слабые связи в виде мостиков между высокотемпературными сверхпроводниками $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, длина которых была соизмерима с ультрамалой длиной когерентности 10—15 Å в этом сверхпроводнике (С.И. Бондаренко, А.А. Шабло, А.В. Лукашенко, 1989).

Высокочастотные свойства слабых сверхпроводящих контактов. Теоретическое открытие Джозефсоном для туннельного резистивного контакта с барьером малой длины (10—20 Å) фундаментального соотношения $2eV = h\nu$ (V — напряжение на контакте, e — заряд электрона, ν — частота тока через барьер, h — постоянная Планка) не только было впервые экспериментально подтверждено во ФТИНТе (И.К. Янсон, В.М. Свистунов, И.М. Дмитренко, 1965), но и послужило мощным толчком к изучению нестационарных высокочастотных явлений в других типах сверхпроводящих слабых связей. Для прижимных сверхпроводящих контактов в СВЧ поле удалось обнаружить отклонение от классической фазовой зависимости, характерной для туннельного контакта Джозефсона (И.М. Дмитренко, В.И. Карамушко, Л.К. Снегирева, 1972). На точечных контактах был исследован обратный эффект Джозефсона, ранее наблюдавшийся только на туннельных контактах (И.М. Дмитренко, Ю.Г. Бевза, В.А. Михайлов, 1973). Туннельный контакт Джозефсона представляет собой миниатюрный пленочный СВЧ резонатор, через все сечение которого в резистивном состоянии течет переменный ток. Один или несколько сверхпроводящих точечных контактов в пленочном резонаторе с зазором, много большим величины 200—600 Å, являются генераторами джозефсоновского излучения, распространяющегося внутри резонатора. Условия возникновения стоячих волн в таком резонаторе и возможность управления фазовыми характеристиками с помощью слабого магнитного поля были изучены С.И. Бондаренко, И.М. Дмитренко и Е.И. Балановым (1970).

На основе полученных результатов с различными типами контактов в конструкторском бюро института были созданы сверхпроводящие геофизические и магнитометрические приборы высокой чувствительности. В частности, они использовались в экспедициях в Якутии для поиска магнитных аномалий, связанных с наличием алмазных месторождений (С.И. Бондаренко, П.П. Павлов, К.Б. Лобанов, В.В. Рябовол).



Квантовая интерференция и квантование магнитного потока

Сверхпроводящие квантовые интерферометры (СКВИДы). Наблюдение и изучение квантовой интерференции (КИ), одного из замечательных проявлений квантовых явлений в макроскопическом масштабе, было начато в отделе № 16 в 1966 году под руководством И.М. Дмитренко. Как известно, КИ реализуется в двухсвязных сверхпроводниках в виде контура с одним или двумя контактами Джозефсона, который был назван сверхпроводящим квантовым интерферометром, или СКВИДом (по аббревиатуре английского названия интерферометра — SQUID). Проявлением КИ является периодическая зависимость критического тока или напряжения СКВИДа от величины внешнего магнитного поля. СКВИД с двумя контактами Джозефсона называется ПТ-СКВИДом, так как он возбуждается с помощью постоянного тока. В течение 1967—1969 годов были выяснены основные закономерности работы интерферометра, а также установлены расчетные соотношения для ПТ-СКВИДов с точечными контактами (И.М. Дмитренко, С.И. Бондаренко, Т.П. Нарбут, 1969). В эти же годы был обнаружен новый тип интерференционной зависимости постоянного напряжения на ПТ-СКВИДе, возникающий в отсутствие постоянного транспортного тока через него (И.М. Дмитренко, С.И. Бондаренко, 1968). Было показано, что причиной эффекта является отклик ПТ-СКВИДа на внешнее переменное электромагнитное поле при одновременном воздействии слабого постоянного магнитного поля. В этом случае коэффициент преобразования переменного поля в постоянное напряжение меняется от нуля до некоторого максимального значения (периодически при изменении внешнего магнитного поля). В 1970 г. теми же авторами была продемонстрирована КИ в ПТ-СКВИДе с двумя контактами: сверхпроводник—нормальный металл—сверхпроводник. На базе ПТ-СКВИДа во ФТИНТе был разработан первый в стране СКВИД-магнитометр с чувствительностью $\approx 10^{-11}$ Тл/Гц^{0,5} (И.М. Дмитренко, С.И. Бондаренко, 1969). Полученные результаты позволили перейти в 70—80-е годы к созданию в СКТБ ФТИНТ магнитометров с рекордными параметрами для решения прикладных задач геолого-магнитной разведки.

С 1971 года в отделе были также начаты физические исследования квантовой интерференции в ВЧ-СКВИДах и обнаружены новые режимы работы СКВИДа (И.М. Дмитренко, Г.М. Цой, В.И. Шнырков, В.В. Карцовник, 1982). Так, была установлена квантовая интерференция между макроскопическими состояниями СКВИДа, распад которых происходит за счет макроскопического квантового туннелирования (И.М. Дмитренко, Г.М. Цой, В.И. Шнырков, 1982). Впервые были обнаружены и исследованы стохастические процессы в ВЧ-СКВИДе (И.М. Дмитренко, Д.А. Коноп, Г.М. Цой, В.И. Шнырков, 1983).

Квантование магнитного потока. Помимо исследований квантовой интерференции, в 60—70-е годы развернулись работы по изучению квантования магнитного потока в микроскопических цилиндрических образцах сверхпроводников. Была экспериментально обнаружена новая разновидность квантования флюксоида (А.А. Шабло, И.М. Дмитренко, 1968). Дополнительно к известным вихрям Абрикосова, вихрям в тонких пленках сверхпроводников в перпендикулярных полях, вихревым структурам в контактах Джозефсона, двумерным вихревым структурам в наклонных полях и квантованию флюксоида в тонкостенных полых цилиндрах (эффект Паркса—Литтла) было обнаружено и исследовано квантование магнитного потока в односвязных (сплошных) сверхпроводниках токами поверхностной сверхпроводимости. Эффект проявляется в осциллирующей зависимости сопротивления микроцилиндров в продольном магнитном поле. Особенностью данного вида квантования является температурная зависимость периода осцилляций, поскольку с температурой меняется толщина сверхпроводящего слоя и, соответственно, размер квантующего сечения.

Долгое время считалось, что осциллирующая зависимость свойств многосвязного проводника от магнитного поля может возникать либо в идеально чистом случае нормального металла, либо в сверхпроводниках. В несверхпроводящем неупорядоченном проводнике такая зависимость представлялась абсолютно невозможной вплоть до экспериментов, выполненных в 1974 году (А.А. Шабло, Т.П. Нарбут, С.А. Тюрин, И.М. Дмитренко). Удалось показать, что в полых алюминиевых тонкостенных микроцилиндрах осциллирующая зависимость проводимости сохраняется в нормальном состоянии вплоть до температур, превышающих температуру сверхпроводящего перехода в 5 раз. Понимание данного явления стало возможным только в 1981 году, когда ленинградскими учеными (Б.Л. Альтшулер, А.Г. Аронов, Б.З. Спивак) была осознана роль квантовой интерференции в кинетике неупорядоченных проводников. Эффект связан с интерференцией электронных волн, огибающих полость, в которой сосредоточено магнитное поле. Период осцилляций соответствует кванту магнитного потока ($hc/2e$). Вместе с последующими работами москвичей (Ю.В. Шарвин, Л.Ю. Шарвин) этот фундаментальный результат получил международное признание, что закрепило приоритетность ФТИНТа в его экспериментальном обнаружении.

Резистивные состояния сверхпроводников. Сверхрешетки и сверхструктуры

Резистивные состояния сверхпроводников. Важными для понимания природы резистивного состояния сверхпроводников явились эксперименты по изучению вязкого течения вихрей в широких сверхпроводящих пленках (Л.Е. Мусиенко, И.М. Дмитренко, В.Г. Волоцкая, 1980). Экспериментально была обнаружена нелинейность Ларкина—Овчинникова в динами-



ческом смешанном состоянии, связанная с неравновесными процессами в ядрах движущихся вихрей. Дальнейшие эксперименты с широкими пленками обнаружили новое неравновесное резистивное состояние, аналогичное центрам проскальзывания фазы в одномерных каналах, что позволило впервые ввести понятие линии проскальзывания фазы (ЛПФ) для двумерных сверхпроводников (В.Г. Волоцкая, И.М. Дмитренко, А.Г. Сиваков, 1984).

Принципиально новым шагом в исследовании резистивного состояния пленочных сверхпроводников стало применение метода низкотемпературной лазерной сканирующей микроскопии для визуализации пространственных характеристик резистивных структур и пространственного распределения сверхтоков в образцах. Был изучен процесс потери устойчивости мейсснеровского состояния по отношению к вхождению вихрей в широкую пленку, качественно подтверждающий теорию Асламазова—Лемпицкого. Визуализация ЛПФ в широких пленках показала, что в однородных образцах вхождение ЛПФ с увеличением тока сопровождается глобальной пространственной перестройкой всей структуры так, что ЛПФ стремятся равномерно заполнить всю площадь образца, максимально понижая величину среднего сверхпроводящего тока (А.Г. Сиваков, А.Г. Журавель, О.Г. Турутанов, И.М. Дмитренко, 1996). Обнаружение осцилляций критического тока от магнитного поля в многосвязных пленочных структурах с ЛПФ сразу открыло возможности создания нового типа магнитометров, не требующих искусственных джозефсоновских слабых связей (А.Г. Сиваков, А.Г. Глухов, А.Н. Омелянчук, 2003).

Особенности структуры вихревой решетки искусственных сверхпроводящих сверхрешеток. Сверхпроводимость интерфейса полупроводниковых гетероструктур $A^{IV}B^{VI}$. После открытия ВТСП структура вихревой решетки (ВР) в слоистых сверхпроводниках стала объектом пристального и неослабевающего внимания исследователей, так как большинство новых сверхпроводников (органические сверхпроводники, дибориды и др.) обладают слоистой анизотропной структурой. В этом контексте особое значение, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения, приобрело изучение искусственных многослойных систем — сверхрешеток (СР), которые являются хорошими модельными объектами слоистых сверхпроводников. Институт сразу включился в разработку данного направления. Группой Н.Я. Фогель (О.И. Юзефович, М.Ю. Михайлов, Е.И. Бухштаб, Ю.В. Бомзе, 1991—2005) были проведены первые магнитотранспортные исследования сверхрешеток Mo/Si, W/Si, V/Si и пленок ванадия; изучены эффекты соизмеримости периодов слоистой структуры и ВР в магнитном поле H_{\parallel} вдоль слоев. Для СР были получены подробные количественные результаты явлений внутреннего пиннинга и эффекта выстраивания ВР вдоль слоев в наклонных полях. Наиболее ярким свидетельством периодической зависимости внутреннего пиннинга от величины H_{\parallel} явилось обнаружение возвратной сверхпроводимости, наблюдаемой в соизмеримых полях при

токах ниже критического. Следующим новым шагом в исследовании эффектов соизмеримости стало обнаружение фазовых переходов между различными соизмеримыми ВР.

С 2000 г. стал разрабатываться метод создания *сверхпроводящих* упорядоченных наноструктур путем их *самоорганизации* в полупроводниковых гетероструктурах $A^{IV}B^{VI}$. Именно во ФТИНТе впервые обнаружена интерфейсная сверхпроводимость с критической температурой в интервале 2,5—6 К в пяти системах PbSe/EuS, PbSe/PbS, PbTe/PbSe, PbS/YbS, PbTe/YbS (О.И. Юзефович, М.Ю. Михайлов, Ю.В. Бомзе, 2001). Эти системы уникальны тем, что отдельные полупроводниковые слои, входящие в их состав, не являются сверхпроводящими. Экспериментально установлено, что сверхпроводящие слои расположены вблизи интерфейсов, содержащих периодические сетки краевых дислокаций несоответствия, что подтвердилось экспериментами на двухслойных гетероструктурах с единичным интерфейсом. Металлизация интерфейса связана с инверсией зон в узкозонных полупроводниках, вызванной влиянием упругих неоднородных напряжений, созданных сеткой дислокаций несоответствия. Таким образом, разработан новый подход к созданию периодических сверхпроводящих наносетей с заданными размерами (3—25 нм) путем варьирования типа полупроводниковых слоев, входящих в состав гетероструктур. Эти наноструктуры в настоящее время интенсивно изучаются как во ФТИНТе, так и в других исследовательских центрах и демонстрируют необычные эффекты, например индуцированный магнитным полем переход сверхпроводник—изолятор (О.И. Юзефович, С.В. Бенгус, М.Ю. Михайлов, 2008).

Неравновесные и нелинейные явления в сверхпроводниках

Стимулирование сверхпроводимости внешним электромагнитным излучением. В 1966 году В.М. Дмитриевым с английскими коллегами было экспериментально обнаружено, что под воздействием внешнего излучения с частотой 10 ГГц критический ток сверхпроводящего тонкого оловянного мостика вблизи его критической температуры возрастает в несколько раз. С понижением температуры эффект ослабевал. Это явление противоречило имевшимся представлениям и стало предметом исследований в ведущих лабораториях мира на протяжении около 20 лет. Было установлено, что под воздействием излучения возрастают критическая температура и критическое магнитное поле (В.М. Дмитриев, Е.В. Христенко, О.В. Трубицын, Ф.Ф. Менде, 1973). Описание механизма явления было предложено Г.М. Элиашбергом и состояло в том, что излучение с частотой меньше энергетической щели поглощается нормальными возбуждениями, функция их распределения по энергиям становится неравновесной, что и влечет за собой возрастание самой энергетической щели, т. е. всех критических параметров сверхпроводника. В дальнейшем впервые была теоретически рассчитана и измерена неравновесная кривая распаривания (В.М. Дмитриев, Е.В. Хри-



стенко, 1978), из которой стало понятно, что при наличии внешнего излучения энергетическая щель при критической температуре возникает скачком, а критический ток по-прежнему плавно нарастает от нуля по мере понижения температуры.

В 2001 году была обнаружена стимуляция сверхпроводимости внешним электромагнитным полем и в широких $w \gg \xi(T), \lambda_{\perp}(T)$ сверхпроводящих пленках (А.Б. Агафонов, В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, 2001). Было показано, что под воздействием внешнего микроволнового поля возрастает не только критический ток, но и максимальный ток существования вихревого резистивного состояния пленки.

Полученные фтинтовцами результаты еще в 60-е годы заложили основы обширного направления, разрабатываемого вплоть до наших дней во многих научных центрах и связанного с фундаментальной проблемой физики неравновесной сверхпроводимости.

Центры и линии проскальзывания фазы. В конце 60-х годов в ряде исследований узкой сверхпроводящей пленки в области между сверхпроводящим и нормальным токовыми состояниями было обнаружено промежуточное резистивное токовое состояние. В теории Гинзбурга—Ландау такое состояние отсутствовало. В это же время появилось сообщение (Г.Е. Чурилов, В.М. Дмитриев, А.П. Бескорсый, 1969) о новом явлении — неджоуловской генерации электромагнитных колебаний узкими сверхпроводящими пленками в этом резистивном токовом состоянии. Начались интенсивные теоретические и экспериментальные исследования богатой физическими явлениями новой области неравновесной сверхпроводимости. В работах В.П. Галайко, В.М. Дмитриева, Г.Е. Чурилова и Е.В. Христенко (1973—1974) была предложена концепция динамического фазового расслоения сверхпроводящей пленки, нагруженной током, на квазинормальные и сверхпроводящие области, чередующиеся вдоль пленки. Так были заложены основы создания микроскопической теории токового резистивного состояния узких сверхпроводящих пленок. В работе В.П. Галайко (1974) впервые были высказаны общие теоретические соображения по природе резистивного состояния узких сверхпроводящих каналов. С помощью кинетических уравнений была исследована структура токового состояния, представляющая собой микроскопическое фазовое расслоение с чередованием сверхпроводящих и квазинормальных областей (В.П. Галайко, 1975). Квазинормальными оказались центры проскальзывания фазы параметра порядка (ЦПФ). Исследованиями их внутренней структуры и свойств занялись в отд. № 27 (Г.Е. Чурилов, Д.А. Дикин, В.М. Дмитриев, В.Н. Светлов, А.Б. Агафонов, 1991—1998).

В 1977 г. В.М. Дмитриевым и Е.В. Христенко впервые была обнаружена температурная зависимость глубины проникновения продольного электрического поля в сверхпроводник. Эксперимент уже в том же году нашел свое отражение в теории В.П. Галайко, учитывающей как упругие, так и неупругие процессы релаксации возбуждений.

В 80-е годы большой цикл работ был выполнен по изучению влияния на ЦПФ электромагнитных полей. Было показано, что начиная с некоторого порогового уровня мощности электромагнитное излучение играет определяющую роль в механизмах образования ЦПФ (В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, 1986), а величина сопротивления ЦПФ зависит от частоты внешнего электромагнитного излучения. Исследована зависимость тока отсечки ЦПФ от частоты и мощности электромагнитного поля. Оказалось, что с увеличением мощности и частоты микроволнового облучения резистивное состояние сверхпроводящего канала становится более устойчивым к увеличению постоянного тока. ЦПФ были также обнаружены в ВТСП и исследованы их основные параметры (В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, 1986—1993).

В 1979 г. было обнаружено, что под действием СВЧ излучения с мощностью больше критической в сверхпроводящем канале возникает N—S-расслоение (В.М. Дмитриев, Е.В. Христенко), физическая природа которого определенное время оставалась невыясненной. Это расслоение, как показали измерения шумовых характеристик канала, существует даже в отсутствие транспортного тока (В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, В.П. Складов, Е.В. Христенко, 1988). В результате всестороннего исследования удалось идентифицировать такое расслоение в узкой сверхпроводящей пленке с высокочастотными (ВЧ) ЦПФ. Показано, что при мощности облучения больше критической сопротивление сверхпроводящего канала с изменением мощности электромагнитного излучения меняется дискретно и кратно (В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, 1979—1984). Сопротивление ВЧ ЦПФ при этом немонотонным образом зависит от частоты внешнего электромагнитного поля (В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Христенко, 1986). Ниспадающая ветвь зависимости хорошо согласуется с теоретическими предсказаниями И.О. Кулика и Г.А. Гогадзе для частотной зависимости глубины проникновения продольного электрического поля I_E в сверхпроводник. Однако полная экспериментальная зависимость сопротивления ЦПФ принципиально отличается от предсказаний теории своей немонотонностью, определяемой механизмами, пока еще не учтенными в имеющихся теориях.

Накопленный опыт по изучению ЦПФ в узких каналах способствовал постановке экспериментов по выяснению физики резистивного состояния в широких пленках с линиями проскальзывания фазы (ЛПФ).

Еще в 1972 г. на ВАХ широких пленок при больших транспортных токах наблюдалась ступенчатая по напряжению структура, не получившая тогда физического объяснения. С годами, по мере появления новых знаний о процессах проскальзывания фазы, ступени напряжения на ВАХ и осцилляции ее первой производной стали связывать с возникновением в широких пленках ЛПФ (Л.Е. Мусиенко, В.И. Шнырков, В.Г. Волоцкая, И.М. Дмитриенко, А.Г. Сиваков, 1975—1981), а не динамического смешанного состояния или тепловых эффектов. Дальнейшие экспериментальные исследования резистивного токового состояния подтвердили это предположение.



Так, исследования распределения напряжения вдоль широкой пленки (И.М. Дмитренко, А.Г. Сиваков, В.Г. Волоцкая, 1983) показали, что неравновесная область длиной $2l_E$ образуется по всей ширине пленки, что позволяет назвать ее ЛПФ — двумерным аналогом ЦПФ. Оказалось, что зависимость $2l_E$ от длины свободного пробега в широкой пленке (В.Г. Волоцкая, И.М. Дмитренко, А.Г. Сиваков, 1984) соответствует процессам проскальзывания фазы. Динамическую природу процессов проскальзывания фазы подтвердили эксперименты по смешению джозефсоновского излучения ЛПФ с внешним микроволновым полем (А.Г. Сиваков, А.М. Глухов, А.Н. Омельянчук, В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, Е.В. Безуглый, Д.С. Кондрашев, 2003—2007). Было также доказано (В.М. Дмитриев, И.В. Золочевский, 2006), что при возникновении ЛПФ вихревой механизм резистивности отсутствует. Следует отметить, что одним из доказательств этой концепции явился важный эксперимент А.Г. Сивакова (1986) по наблюдению ступенчатой структуры ВАХ широкой пленки олова, экранированной сверхпроводящим свинцовым экраном.

Сверхпроводники во внешних СВЧ полях. В окрестности критической температуры основную роль при взаимодействии сверхпроводника с излучением играет эффект нелинейности, обусловленный влиянием неравновесного распределения квазичастиц на параметр порядка. При определенных ограничениях на частоту нелинейная динамика сверхпроводящих пар и квазичастиц описывается уравнениями гидродинамического типа, имеющими форму нестационарных уравнений Гинзбурга—Ландау. Теоретический анализ устойчивости решений этих уравнений при заданном токе (Е.В. Безуглый, А.Ю. Азовский, В.М. Дмитриев, В.Н. Светлов, Г.Е. Чурилов, 1987) или напряжении (Е.В. Безуглый, Е.Н. Братусь, 1994) позволил решить вопрос о частотной и амплитудной зависимостях критического тока пленки, находящейся под воздействием микроволновой накачки. На основе этих работ был разработан новый метод определения времен релаксации параметра порядка и энергии квазичастиц, использованный в экспериментах по резистивному переходу в сверхпроводящих пленках.

Неджозефсоновская генерация. В 1969 году при исследовании вольт-амперных характеристик безвихревых сверхпроводящих оловянных каналов при токах больше критического было обнаружено электромагнитное излучение в области частот 10^6 — 10^8 Гц (Г.Е. Чурилов, В.М. Дмитриев, А.П. Бескорсый, 1969). Так как эти частоты гораздо ниже 10^{10} Гц, характерных для джозефсоновского излучения в аналогичных условиях, то обнаруженная генерация была названа неджозефсоновской (НДГ). В последующие годы НДГ интенсивно и детально изучалась экспериментально. С помощью метода лазерного сканирующего микроскопа было показано, что источником НДГ являются ЦПФ (В.Н. Светлов, Г.Е. Чурилов, В.М. Дмитриев, А.П. Журавель, В.А. Коноводченко, 1986). Предложенная модель эффекта (Г.А. Гогодзе, В.М. Дмитриев, В.М. Светлов, Г.Е. Чурилов, 1986) подвергалась весьма тщательной экспериментальной проверке (Г.Е. Чурилов, А.Б. Агафонов, Д.А. Дикин, В.М. Дмитриев, 1994—1998) и оказалась правильной.

Суть явления состоит в следующем. За счет процессов многократного андреевского отражения электроны при прохождении через ЦПФ оказываются на некотором уровне энергии, который возникает за счет интерференции квазичастиц, рассеиваемых на фазовых границах ЦПФ. Релаксация неравновесных квазичастиц с этого специфического уровня энергии на край щели и приводит к эффекту излучения энергии, что является аналогом торозного излучения.

Блокировка состояний в сверхпроводниках под лазерным облучением. Если энергия падающих фотонов существенно превосходит величину энергетической щели, то неравновесные квазичастицы, возникшие при разрыве куперовских пар, после лавинообразной релаксации накапливаются у края щели. В экспериментах И.К. Янсона, О.П. Балкашина, А.Ю. Красногорова (1976) впервые было не только обнаружено уменьшение проводимости туннельных контактов, обусловленное неравновесным заполнением состояний у верхнего края энергетической щели сверхпроводников при лазерном облучении, но и восстановлена неравновесная функция распределения квазичастиц.

Квантово-интерференционные явления в нормальных и ферромагнитных металлах, находящихся в контакте со сверхпроводником. Необычным нелинейным явлением в сверхпроводниках является эффект Бернулли, приводящий к появлению электрического потенциала при неоднородном распределении скорости сверхтока. Впервые этот эффект наблюдали и изучали в сверхпроводящем индии в условиях сверхмалого уровня паразитных сигналов (Ю.Н. Цзян, О.Г. Шевченко, 1986). Были получены нелинейные поправки к потенциалу Бернулли, рассчитанные А.Н. Омелянчуком и С.И. Белобородько (1983).

В цикле работ (Ю.Н. Цзян, О.Г. Шевченко, 1988—2007) исследованы квантовые интерференционные явления в металлических структурах, обусловленные андреевским отражением. Впервые наблюдали эффект увеличения сопротивления слоя металла вблизи контакта металл—сверхпроводник, теоретически предсказанный сотрудником ФТИНТа А.М. Кадигробовым (1988). В андреевских интерферометрах с сегментами нормальных и ферромагнитных металлов длиной, превышающей тепловую длину когерентности, наблюдали и изучали эффект Ааронова—Бома. На образцах с параметрами, исключаяющими вклад шунтирующих эффектов, доказано существование эффекта аккумуляции спина на интерфейсах ферромагнетик—сверхпроводник.

В итоге этих работ был установлен истинный масштаб длин когерентности в металлах, граничащих со сверхпроводником.

Сверхпроводящие джозефсоновские кубиты

В настоящее время во всем мире развивается направление в физике, целью которого является создание принципиально новых, так называемых квантовых суперкомпьютеров. Квантовые компьютеры, квантовые процессо-



ры для криптографии и частично когерентные детекторы можно рассматривать как новейший этап развития техники XXI века, требующий решения принципиально новых вопросов в области физики низких температур, наноэлектроники и разработки революционных технологий с атомарным разрешением. По сути, речь идет о создании квантовой когерентной сверхпроводниковой электроники, базисным элементом которой является “искусственный атом” макроскопических размеров, подчиняющийся законам квантовой физики. Такой базисный элемент квантового компьютера носит специальное название “квантовый бит” или “кубит”. Поскольку законы классической и квантовой физики имеют принципиальные различия, можно ожидать, что новые свойства кубитов могут помочь преодолеть некоторые принципиальные ограничения, существующие в классических устройствах.

В 1985—1991 годах во ФТИНТе в отделе И.М. Дмитренко были получены основополагающие результаты по наблюдению макроскопического туннелирования и квантовых резонансных явлений в системах джозефсоновских контактов. Эти явления лежат в основе сверхпроводящих джозефсоновских кубитов — перспективных твердотельных элементов квантового компьютера. В настоящее время различные типы джозефсоновских кубитов активно исследуются теоретически и экспериментально (А.Н. Омелянчук, В.И. Шнырков, С.Н. Шевченко, А.С. Кийко). Совместно с немецкими коллегами изучаются трехконтактный потоковый кубит и управляемый магнитным потоком зарядовый кубит. Оба типа кубитов были созданы на основе Al-тонкопленочной технологии. Было детально исследовано возбуждение кубитов с основного на возбужденный уровень в режимах слабой и сильной накачки, что важно для контроля состояния кубита, записи информации, выполнения логических операций. Считывание информации о состоянии кубита производилось с помощью слабо связанного с ним классического резонансного контура. Получены приоритетные результаты по однофотонным и многофотонным Раби-осцилляциям в зарядовом кубите, которые составляют основу для построения частично когерентных детекторов на эффектах нелинейности, связанной с суперпозицией зарядовых состояний. В частности, при исследовании сигнальных характеристик было показано, что при возбуждении пятифотонного резонанса чувствительность частично когерентного электрометра на основе зарядового кубита резко улучшается из-за увеличения эффективной добротности резонанса, приводящего к фильтрации шумовых фотонов.

Исследованные сотрудниками ФТИНТа джозефсоновские кубиты удовлетворяют четырем из пяти основных требований, которые должны быть выполнены при создании действующих квантовых суперкомпьютеров: 1) они масштабируемы, 2) могут находиться в перепутанном квантовом состоянии, 3) позволяют записывать и 4) считывать информацию. Более того, есть обоснованная надежда, что существующая проблема — увеличение времени декогеренции (пятое требование) с достигнутых нескольких микросекунд до миллисекунд, будет решена в близком будущем.

Высокотемпературная сверхпроводимость. Новые сверхпроводники

Высокотемпературная сверхпроводимость. Исследования высокотемпературной сверхпроводимости во ФТИНТе имеют свою интересную историю. Весной 1987 года в Киеве проходила очередная сессия Академии Наук Украины. После очередного заседания вечером Борис Иеремиевич Веркин и Виталий Михайлович Дмитриев поднимались лифтом в гостинице “Украина” в свои номера. Веркин спросил у Дмитриева, знает ли он что-нибудь о ВТСП, и получил отрицательный ответ. Веркин, естественно, обружал Дмитриева за то, что, занимаясь профессионально сверхпроводимостью, Виталий Михайлович ничего об этом не знает, а Яков Борисович Файнберг знает. После выяснения отношений договорились о немедленном начале соответствующих исследований в Харькове. В.М. Дмитриев и его отдел приступили к работе. Начинать, естественно, нужно было с приготовления образцов, к чему ФТИНТ не был готов. В то время Владимир Петрович Семиноженко уже был директором Института монокристаллов (ИМ), и с ним договорились о совместных работах. Группа сотрудников ИМ во главе с Л.А. Коток, активно поддерживаемая М.Б. Космыной и В.М. Пузиковым, начала приготавливать порошки лантановых и иттриевых керамик. Для их отжига В.М. Дмитриеву в недрах ИМ была выделена высокотемпературная печь с круглосуточным доступом. Это было важно, так как после 6—8 часов непрерывного отжига керамику надо было снова размолоть в порошок, снова спрессовать и отжечь. Процедуру требовалось повторить несколько раз, что служило залогом однородности образцов. Их измельчение, прессование и собственно измерения проводились в отделе В.М. Дмитриева. Было установлено круглосуточное дежурство. Любая из необходимых процедур могла попасть на 11 часов вечера, 3 часа ночи или 6 часов утра. Энтузиазм был неописуем. Наконец, около 6-ти часов утра 26-го марта 1987 года была зафиксирована критическая температура сверхпроводящего перехода 81 К.

Тематика ВТСП в журнале “Физика низких температур” была открыта в 5-м номере совместной работой ФТИНТа, Харьковского и Московского Университетов (И.К. Янсон, Л.Ф. Рыбальченко, В.В. Фисун, Н.Л. Бобров, М.А. Оболенский, Н.Б. Брандт, В.В. Мошалков, Ю.Д. Третьяков, А.Р. Кауль, И.Э. Грабой, 1987), в которой на университетских образцах лантановой серии методом микроконтактной спектроскопии была измерена величина и температурная зависимость энергетической щели. Но уже в 6-м номере ФНТ вышла первая фтинтовская работа (Б.И. Веркин, И.М. Дмитриренко, В.М. Дмитриев, А.Г. Козырь, Г.М. Цой, В.И. Шнырков, 1987), в которой была обнаружена макроскопическая квантовая интерференция в соединении $YBaCuO$. С каждым номером число публикаций нарастало. Например, в № 8 уже 21 работа из 24 были посвящены проблеме ВТСП. К концу 1987 года усилиями практически всех отделов института были



измерены и описаны многие базовые свойства лантановых и иттриевых соединений. Энтузиазм фтинтовцев нашел отражение в статье, опубликованной в ФНТ и подписанной 38 (!) соавторами (Б.И. Веркин и др., 1987).

Сотрудникам ФТИНТа в 1987 году первыми удалось экспериментально подтвердить наличие спаривания и дальний порядок в керамике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Наличие спаривания было продемонстрировано на точечном прижимном контакте керамической иглы и плоского образца керамики $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (Б.И. Веркин, С.И. Бондаренко, В.М. Дмитриев, А.В. Лукашенко, В.П. Семиноженко, А.А. Шабло, 1987). При облучении контакта СВЧ электромагнитным полем с частотой ν на его вольт-амперной характеристике была зарегистрирована ступень тока при напряжении V , точно соответствующем известному джозефсоновскому соотношению $h\nu = 2eV$. В экспериментах, выполненных в 1987 году (Б.И. Веркин, С.И. Бондаренко, А.В. Лукашенко, А.А. Шабло, И.В. Свечкарев, В.П. Семиноженко, Г.И. Чурилов, В.А. Комашко, 1987), был получен положительный ответ на вопрос о существовании дальнего порядка в керамике $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, а не просто высокой проводимости. Критерием наличия дальнего порядка явилось существование квантовой интерференции в составном двухконтактном СКВИДе, контур которого частично состоял из обычного, а частично из высокотемпературного сверхпроводников.

Сразу же начались работы, направленные на практическое использование ВТСП. Выполненные В.В. Борзенцом, В.Н. Глянцевым, А.Г. Козырем, Г.М. Цоем и В.И. Шнырковым под руководством И.М. Дмитренко и при участии В.М. Дмитриева эксперименты привели к тому, что в 1998 году был разработан первый образец портативного магнитометра на базе высокочастотного ВТСП-СКВИДа, который по сей день используется для изучения характеристик ВТСП-образцов и слабомагнитных соединений. Исследования особенностей магнитных характеристик различных ВТСП-материалов в слабых полях и при температурах близких к критическим, где термоактивированная динамика вихрей максимальна, были продолжены В.П. Тимофеевым и С.С. Хвостовым.

Большое внимание уделялось исследованиям плотности критических токов в монокристаллических, тонкопленочных и керамических ВТСП-образцах в импульсном режиме в широком интервале магнитных полей. Впервые показано, что в тонких пленках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ плотность критического тока при азотной температуре достигает значения 10^6 А/см² (В.М. Дмитриев, О.Р. Приходько, Е.В. Христенко, 1989). Установлено, что улучшения сверхпроводящих характеристик $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ пленок с $x = 0,4$ — $0,7$ можно достичь не только путем обычного допирования кислородом, но и путем их фотооблучения (В.М. Дмитриев, В.В. Еременко, В.Г. Пирятинская, И.С. Качур, В.В. Шапиро, О.Р. Приходько, Е.В. Христенко, 1993).

В последние годы с помощью методов магнитной микроскопии начаты исследования другого замечательного свойства сверхпроводников — способности замораживать магнитное поле. В отличие от ранее известного

подхода, связанного с замораживанием поля с помощью однородного в пределах образца поля возбуждения, теперь предметом изучения является локально замораживаемое магнитное поле в небольшой области $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, соизмеримой с глубиной проникновения поля. Параметры такого поля оказались отличными от замороженного, традиционно формируемого внешним однородным полем. В частности, с помощью электромагнитной силы Лоренца локальную область (диаметром от 0,5 мм до 3 мм) с замороженным полем можно управляемым образом перемещать по образцу, что позволяет прямым способом оценить локальное значение силы пиннинга и вязкость движения такой области в сверхпроводнике (С.И. Бондаренко, А.А. Шабло, В.П. Коверя, 2006). Методика замороженного магнитного поля в цилиндрах из высокотемпературной керамики на основе иттрия и висмута была успешно использована для изучения релаксации магнитного потока и природы магнитного шума в этих сверхпроводниках. В результате установлена зависимость указанных явлений от типа сверхпроводника и дано объяснение шума в терминах флуктуационных процессов в сверхпроводнике (Н.И. Богатина, С.И. Бондаренко, 1994).

Флуктуационные явления. Псевдощель. Среди исследований свойств сверхпроводников в нормальном состоянии существенное место занимает изучение флуктуационной проводимости (ФП), которая непосредственно рассматривает возможность возникновения спаренных фермионов при температурах, превышающих T_c , и механизмы их образования. Появление флуктуационных куперовских пар при температурах вблизи, но выше T_c , объясняется теориями Асламазова—Ларкина и Маки—Томпсона. Начиная с середины семидесятых годов, во ФТИНТе проводятся целенаправленные исследования ФП в сложных, главным образом, гранулированных сверхпроводящих системах (В.М. Дмитриев, А.Л. Соловьев, А.И. Дмитренко, А.М. Глухов). Опыт, накопленный при проведении этих измерений, был использован при исследовании ФП в высокотемпературных сверхпроводниках. В ВТСП такие исследования приобретают особую актуальность, поскольку в области температур $T_c < T < T^*$ система переходит в новое необычное состояние, которое характеризуется пониженной плотностью состояний и называется псевдощелью (ПЩ). Первые исследования ФП в ВТСП были проведены на поликристаллических образцах (керамика Тl-2212) (А.Л. Соловьев, А.И. Дмитренко, О.Р. Приходько, А.Б. Агафонов, 1990) и сверхрешетках $\text{YBCO}-\text{PrBCO}$ (А.Л. Соловьев, В.М. Дмитриев, 1997). Однако наиболее существенные результаты, дающие связь ФП с электронной структурой ВТСП систем, получены на хорошо структурированных пленках YBCO (А.Л. Соловьев, В.М. Дмитриев, В.Н. Светлов, В.Б. Степанов, 2002) и YPrBCO (А.Л. Соловьев, В.М. Дмитриев, 2006—2007). Показано, что флуктуационные теории хорошо описывают измеряемую в эксперименте избыточную проводимость $\sigma'(T)$ вплоть до ~ 120 К. Анализ совокупности полученных результатов позволил получить зависимость псевдощели от температуры для разных уровней допирования. Пола-



гая, что $\sigma'(T)$ формируется в результате образования в ВТСП парных состояний в виде невзаимодействующих сильно связанных бозонов, подчиняющихся теории бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК), было предложено уравнение для описания $\sigma'(T)$ во всем интервале температур от T_c до T^* , последняя при изменении содержания кислорода меняется от 130 К до 250 К. Анализ поведения $\sigma'(T)$ позволил найти зависимости псевдощели $\Delta^*(T)$ для пленок YBCO и YPrBCO с различным содержанием кислорода и обнаружить переход от режима сильно связанных бозонов, подчиняющихся БЭК, к режиму флуктуационных куперовских пар, подчиняющихся теории БКШ (А.Л. Соловьев, В.М. Дмитриев, 2006). Другой аспект псевдощелевого состояния, связанный с эффектом фазового расслоения на диэлектрические (антиферромагнитные) и металлические страйпы, исследовали методом оптического поглощения тонких пленок YBCO разного уровня допирования (В.Н. Самоваров, В.Л. Вакула, М.Ю. Либин, 2000—2005).

Оптика высокотемпературных сверхпроводников. Для низкотемпературных сверхпроводников спектральный диапазон, наиболее информативный для анализа их свойств, лежит в области энергий сверхпроводящей щели $2\Delta_s \sim 10^{-3}$ эВ. Это соответствует частотам микроволнового и дальнего ИК диапазонов. Именно на этих частотах в полном соответствии с БКШ-теорией в свое время был обнаружен “провал” в спектрах поглощения тонких пленок, обусловленный существованием энергетической щели $2\Delta_s$. На частотах, в несколько раз превышающих $2\Delta_s$, никаких особенностей в спектрах отражения и поглощения (пропускания) не наблюдалось. В 1948 году, еще до разработки БКШ-концепции, Б.И. Веркин и Б.Г. Лазарев в Харькове пытались зафиксировать чувствительность спектров отражения видимого диапазона с энергией квантов света ~ 2 эВ к возникновению сверхпроводимости в монокристаллах ртути и олова. Они провели тщательные измерения и показали, что для квантов $\hbar\omega \gg 2\Delta_s$ чувствительность отсутствует. Это был важный результат, который свидетельствовал, что для сверхпроводников концепция “идеального проводника” неправомерна.

Новый этап в исследовании оптических свойств сверхпроводников связан с обнаружением высокотемпературной сверхпроводимости в купратах. В 1987 г. вышла работа по ИК поглощению пленок ВТСП, посвященная роли оптических фононов в механизме высокотемпературной сверхпроводимости (Б.И. Веркин, В.М. Дмитриев). В 1990 г. в отделе конденсированных молекулярных систем (№ 13) был обнаружен необычный и яркий эффект чувствительности спектров поглощения квантов видимого диапазона к возникновению сверхпроводимости в $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ (И.Я. Фуголь, В.Н. Самоваров, В.М. Журавлев). В последующих работах, выполненных в целом ряде лабораторий мира, эффект был подтвержден по спектрам поглощения и отражения для разных купратных ВТСП-материалов в широком диапазоне частот от 0,1 до 3 эВ. Оказалось, что при переходе в сверхпроводящее состояние производная интенсивности оптического сигнала по температу-

ре испытывает сильный излом. Теоретиками различных научных центров были выполнены исследования, которые показали, что эффект связан с наличием сильных зарядовых корреляций в квазидвумерных ВТСП и отражает необычное поведение кинетической энергии проводящей подсистемы при изменении температуры. Оптический отклик на сверхпроводимость в купратах был также обнаружен и в спектрах люминесценции (И.Я. Фуголь, В.Н. Самоваров, А.М. Ратнер, В.М. Журавлев, 1994). Последующие эксперименты, выполненные в этом же отделе, продемонстрировали, что спектроскопия оптического поглощения ВТСП пленок дает также возможность получать ценную информацию о развитии антиферромагнитных корреляций ближнего порядка как в псевдощелевом состоянии нормальной фазы, так и в сверхпроводящей фазе металлооксидов (В.Н. Самоваров, В.Л. Вакула, М.Ю. Либин, 1998—2005).

Самостоятельное место в изучении проблемы ВТСП заняли работы по фотоиндуцированным явлениям. Так, на пленках исследовалось влияние фотооблучения на критические параметры сверхпроводимости, на перераспределение зарядовых носителей между решеточными подсистемами, на процессы ортоупорядочения кислорода и развития магнитных корреляций (В.В. Еременко, В.М. Дмитриев, В.Н. Самоваров, И.Я. Фуголь, А.М. Ратнер, И.С. Качур, В.Г. Пирятинская, В.И. Фомин, В.П. Гнездилов).

Новые магнитные сверхпроводники. В последние годы интенсивно исследовались сложные соединения, такие как Mo_3Sb_7 , ReFe_4Al_8 и $\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x\text{Rh}_4\text{B}_4$, которые оказались магнитными сверхпроводниками с нестандартными механизмами сверхпроводящего спаривания. Так, в Mo_3Sb_7 обнаружена сильная анизотропия параметра порядка Δ , величина которого изменяется более чем в 40 раз (В.М. Дмитриев, Л.Ф. Рыбальченко, Е.В. Христенко, Л.А. Ищенко, 2007). В образцах ReFe_4Al_8 обнаружена нетрадиционная сверхпроводимость с наибольшей температурой T_c около 25 К, когда $\text{Re} = \text{Lu}$ (А.М. Гуревич, В.М. Дмитриев, В.Н. Еропкин, Л.А. Ищенко, Н.Н. Пренцлау, Л.В. Шлык, 1999). Выяснилось, что соединения $\text{Dy}_{1-x}\text{Y}_x\text{Rh}_4\text{B}_4$ с переменным допированием, будучи парамагнетиками при высоких температурах, обладают уникальным набором фазовых превращений при низких температурах. Так, ниже 40 К они являются ферримагнетиками (в том числе неколлинеарными), ниже 10 К они являются ферримагнитными сверхпроводниками, но при температурах около 3 К испытывают антиферромагнитное превращение, оставаясь в сверхпроводящем состоянии вплоть до 0,3 К, а возможно, и ниже (В.М. Дмитриев, Л.Ф. Рыбальченко, Е.В. Христенко, Л.А. Ищенко, А.В. Терехов, 2007).

Многозонная сверхпроводимость. Соединение MgB_2 демонстрирует наиболее характерные черты многозонного сверхпроводника, что было показано методом микроконтактной спектроскопии (Ю.Г. Найдюк, И.К. Янсон, Н.Л. Бобров, П.Н. Чубов, 2002) вскоре после обнаружения в нем сверхпроводимости в 2001 г. Были получены микроконтактные спектры электрон-



фононного взаимодействия в MgB_2 (Ю.Г. Найдюк, И.К. Янсон, О.Е. Квинтицкая, 2003), впервые свидетельствующие об особой роли колебательных мод бора в достижении высокой критической температуры.

Существование многозонной сверхпроводимости в семействе никель-борокарбидных соединений $\text{RNi}_2\text{B}_2\text{C}$ (R — редкоземельный элемент) было также подтверждено интенсивными микроконтактными исследованиями (Ю.Г. Найдюк, И.К. Янсон, О.Е. Квинтицкая, Д.Л. Башлаков, Н.Л. Бобров, В.Н. Чернобай, 2007). Интересные особенности токовых состояний в двухзонных сверхпроводниках найдены в рамках теории Гинзбурга—Ландау Ю.С. Ериным и А.Н. Омелянчуком (2007).

Квантовые когерентные явления в гранулированных и неупорядоченных системах

Сверхпроводимость и локализация электронов в неупорядоченных двумерных металлических системах. Известно, что усиление беспорядка кристаллической решетки приводит к пространственному ограничению свободного движения электронов. Достаточно сильный беспорядок всегда подавляет сверхпроводимость. По этой проблеме в отделе кинетических и квантовых свойств нормальных металлов, созданном в 1971 г. (рук. отд. Ю.Ф. Комник), проводились широкие эксперименты на аморфных пленках висмута и поликристаллических пленках индия, олова, свинца, полученных осаждением на охлажденную жидким гелием подложку. Были экспериментально изучены закономерности изменения их сверхпроводящих свойств по мере усиления беспорядка и получен ряд важных результатов (Б.И. Белевцев, Ю.Ф. Комник, А.В. Фомин, 1985—1990). Впервые найдены экспериментальные свидетельства (теоретические наработки существовали) распаривающего воздействия процессов фазовой или неупругой релаксации электронов. Показано, что эти процессы в существенной степени определяют понижение критической температуры сверхпроводящего перехода в металлических системах при усилении в них решеточного беспорядка. Кроме того, эти процессы оказывают значительное влияние на флуктуационную проводимость выше перехода. Обнаружено изменение размерности сверхпроводящих флуктуаций при изменении температуры и магнитного поля для гранулированных пленок индия. Размерность системы определяется соотношением длины когерентности и размера гранул. Было, например, показано, что в мелкозернистом индии при удалении от температуры перехода к более высоким значениям происходит изменение размерности флуктуаций от двумерных к нульмерным. Для нульмерных систем с большой длиной когерентности впервые обнаружено воздействие спинорбитального рассеяния электронов на распаривание в магнитном поле.

Исследования электропроводности неупорядоченных пленок индия вблизи перехода металл—изолятор позволили обнаружить эффект измене-

ния характера прыжковой проводимости гранулированной системы после перехода гранул в сверхпроводящее состояние. В этом случае, что достаточно неожиданно, поведение прыжковой проводимости определяется сверхпроводящей щелью, выступающей в роли диэлектрической щели. Оказалось, что такое состояние характеризуется аномально большим отрицательным магнитосопротивлением, что обусловлено подавлением сверхпроводимости гранул магнитным полем за счет уменьшения щели.

Для аморфного висмута и поликристаллического индия изучена природа и установлены механизмы возвратных эффектов в сверхпроводящей фазе вблизи перехода металл—изолятор. Впервые показано, что эти эффекты проявляются не только на температурных зависимостях сопротивления, но и на зависимостях сопротивления от электрического и магнитного поля. Более того, возвратные эффекты оказались сильно зависящими также от транспортного тока.

Сверхпроводящая квантовая интерференция, “1/f-шум” и стохастический резонанс на фрактальных гранулированных тонких пленках. Интересной областью фазовых переходов сверхпроводник—изолятор, где проявляются яркие эффекты, является пограничная область перехода — так называемый порог перколяции. Исследования сверхпроводящей квантовой интерференции на перколяционных тонкопленочных композитах системы Sn—Ge обнаружили наличие значительного 1/f-шума напряжения при пропускании постоянного тока, эффект выпрямления переменного тока и явление стохастического резонанса.

Происхождение шума типа 1/f может быть непосредственно связано с фрактальной геометрией перколяционной джозефсоновской среды (А.М. Глухов, А.С. Похла, И.М. Дмитренко, А.Е. Колянько, 1997). Была предложена и проверена модель пассивного преобразования изменений внешнего магнитного поля во флуктуации напряжения с использованием фрактальной переходной функции. Формирование переходной функции с фрактальной симметрией является типичным для обширного класса перколяционных систем, например, для объектов вблизи фазового перехода второго рода. В связи с этим предложенный подход может рассматриваться в виде универсальной модели генерации “1/f-шума” для многих физических и даже биофизических процессов.

Обнаруженный в 90-х годах на сверхпроводящих перколяционных пленках Sn—Ge эффект стохастического резонанса (А.М. Глухов, А.Г. Сиваков) представляется довольно парадоксальным явлением, при котором отклик системы на слабый сигнал усиливается при добавлении шума. Его механизм обычно объясняется в терминах движения частицы (системы) в двухъямном потенциале. Наличие шума приводит к увеличению вероятности переходов между двумя минимумами на частоте слабого подпорогового гармонического сигнала. Эксперимент показал, что добавление шума к внешнему магнитному полю, содержащему слабую периодическую компоненту, увеличивает электрический отклик образца на этот слабый сигнал.



При этом коэффициент усиления, достигающий 40, демонстрирует максимум сигнала при оптимальном значении уровня шума. Природа стохастического резонанса в джозефсоновской среде может быть связана как с поведением набора бистабильных осцилляторов — квантовых магнитный поток сверхпроводящих контуров, так и с сосуществованием в фазовом пространстве в условиях динамического хаоса множества аттракторов с синхронизацией переходов между ними.

Численное моделирование стохастического резонанса во взаимодействующих джозефсоновских контурах показало, что связывание даже двух одиночных колец СКВИДа приводит к увеличению коэффициента усиления и отношения сигнал—шум приблизительно в 1,5 раза (А.М. Глухов, О.Г. Турутанов, В.И. Шнырков, А.Н. Омелянчук, 2006). Можно ожидать, что значения этих параметров будут расти по квадратичному закону с увеличением числа связанных контуров. Такие системы могут быть использованы при создании новых стохастических антенн на основе СКВИДов с целью измерения очень слабых гармонических и квазигармонических сигналов.

Лазерная сканирующая микроскопия. Инициатором развития методов лазерной сканирующей микроскопии (ЛСМ) электронных состояний сверхпроводников был Б.И. Веркин (1976). Суть идеи состоит в использовании эффектов взаимодействия световых квантов со сверхпроводником для неконтактного зондирования фото- и термочувствительных параметров сверхпроводников, в частности, для разрабатываемых в то время в отделе сверхпроводниковой болометрии СКТБ детекторов ИК излучения (рук. отд. В.А. Коноводченко). Уже к 1978 году сотрудниками отдела А.П. Журавлем и В.Г. Ефременко был создан первый лабораторный макет низкотемпературного варианта ЛСМ, послужившего впоследствии основой нового метода для неразрушающей диагностики сверхпроводниковых микроэлектронных схем. В то время подобных экспериментальных установок в мире не существовало. Первая публикация по использованию данного метода появилась в печати в 1982 году (Б.Б. Бандурян, А.П. Журавель, В.Г. Ефременко).

В настоящее время показана высокая эффективность применения низкотемпературного ЛСМ для зондирования пространственных характеристик микроэлектронных приборов, таких как одноэлементные и матричные приемники электромагнитного излучения, высокочастотные фильтры и кабели на основе высокотемпературных сверхпроводников, криоэлектронные структуры на основе эффекта Джозефсона и многие другие. В качестве научного инструмента ЛСМ используется для решения вопросов, связанных с природой сверхпроводимости, для исследования электронных нелинейных и неравновесных эффектов в резистивном состоянии, квантовых когерентных эффектов. Эти работы проводились в отделах И.М. Дмитренко и В.М. Дмитриева, где впервые для сверхпроводящих пленок олова были изучены механизмы пространственной динамики локализованных ре-

зистивных доменов (В.А. Коноводченко, А.Г. Сиваков, А.П. Журавель, В.Г. Ефременко, Б.Б. Бандурян, 1986) и областей неджоозефсоновской генерации центрами проскальзывания фазы (В.Н. Светлов, Г.Е. Чурилов, В.М. Дмитриев, А.П. Журавель, 1988). Применение этих эффектов служит основой для создания микроэлектронных схем и приборов нового поколения, в том числе на основе ВТСП материалов. К ним относятся коммуникационные системы для беспроводной спутниковой, сотовой и мобильной связи, сверхчувствительные болометрические детекторы электромагнитного излучения, а также элементы компьютерной техники, включая микросхемы логики и памяти обычных и квантовых компьютеров.

ИК приемники излучения. Тепловизоры. В 70-е годы в институте были начаты пионерские исследования теплового механизма нелинейности тонких сверхпроводящих пленок с целью создания неселективных приемников излучения — сверхпроводящих болометров (СПБ). Была построена теория неизотермического болометра (В.А. Коноводченко, В.М. Дмитриев, 1968) и создан сам болометр на основе гибридных оловянно-свинцовых пленок. Потребовалось также разработать оригинальную аппаратуру, обеспечивающую работу болометра при гелиевой температуре. Интегральная чувствительность приемника составила 10^6 В/Вт с постоянной времени 10^{-5} с (на то время эти параметры являлись рекордными) (В.А. Коноводченко, В.М. Дмитриев, С.К. Комаревский, И.М. Дмитренко, Н.Ф. Локтионов, 1971). Болометры нашли применение при дистанционной геологической разведке в Якутии (1977).

Дальнейшее развитие СПБ состояло в создании детекторов пространственного распределения интенсивности излучения. На базе Sn/Pb пленочных структур были разработаны линейки приемников 1×16 с пороговой чувствительностью 10^{-12} Вт/Гц^{0,5} при гелиевой температуре. Увеличение формата детекторов потребовало новых подходов к организации считывания сигналов. Для получения информации о локальной температуре был предложен метод измерения критического тока (Б.Б. Бандурян, В.Е. Бутовский, В.Г. Ефременко), что в сочетании с криотронным коммутатором позволило реализовать электронное сканирование и увеличить формат приемников до 2×64 . Исследование детектирующих свойств СПБ при воздействии внешних тепловых и магнитных полей показало возможность управления их пространственной чувствительностью. Эти результаты легли в основу новых методов преобразования изображений в широком спектральном диапазоне (В.А. Коноводченко, Б.Б. Бандурян, В.Г. Ефременко, Г.В. Шустаква). Был разработан и экспериментально продемонстрирован аналог матричного приемника 32×32 с оптическим сканированием сигнала. С помощью локального лазерного воздействия в пленке высокотемпературного сверхпроводника создавался участок размером около 50 мкм и с отличным от нуля температурным коэффициентом сопротивления, который использовался, как одиночный датчик. Движение лазерного зонда вдоль пленки приводило к пространственному перемещению чувствительного



ГЛАВА II. ГОДЫ ФТИНТа

элемента и, соответственно, позволяло считывать пространственное распределение интенсивности излучения. Была достигнута высокая пороговая чувствительность 10^{-13} Вт/Гц^{1/2}, что в 80-е годы находилось на уровне мировых достижений.

В дальнейшем встал вопрос о необходимости визуализации ИК изображений. Впервые в Украине был разработан и изготовлен опытный образец тепловизионного аппаратурно-программного комплекса — тепловизор, предназначенный для использования во многих областях народного хозяйства, в том числе в медицине, экологии, криминалистике. Разработанные во ФТИНТе и изготовленные В.Г. Ефременко, Г.В. Шустаковой, Э.Ю. Гордиенко, Ю.В. Фоменко тепловизоры моделей “Крионик” и “ТК-1” и сейчас успешно работают на предприятиях электроэнергетического комплекса Украины.