

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
Физтех-школа Фундаментальной и Прикладной Физики
Образовательная программа «Фундаментальные проблемы физики квантовых
технологий»

Направление подготовки / специальность: 03.03.01 Прикладные математика и физика
(бакалавриат)

Направленность (профиль) подготовки: Фундаментальная и прикладная физика

**Исследование сверхпроводимости двумерных систем на
основе диселенида ниобия**

(бакалаврская работа)

Студент:

Чуйкин Никита Сергеевич

(подпись студента)

Научный руководитель:

Дрёмов Вячеслав Всеволодович,
канд. физ.-мат. наук

(подпись научного руководителя)

Консультант (при наличии):

(подпись консультанта)

Москва 2023

Аннотация

В данной работе экспериментально изучается сверхпроводимость двумерных систем на основе селенида ниобия, в частности появление аномальных пиков в температурной зависимости поперечной разности потенциалов и гистерезис вольт-амперных характеристик. Данные эффекты свойственны сверхпроводникам второго рода, что указывает на важность наличия смешанного состояния. Однако существующая модель, опирающаяся на движение вихрей, не может в полной мере описать проводимые эксперименты. Обнаружение проявления и отсутствия исследуемых эффектов не только на различных образцах, но и на одном и том же, позволяет указать на влияние неоднородности и дефектов. Предлагается другое описание происходящих процессов, опирающихся не на движение вихрей, а на их статику, приводящую, в предположении, к перераспределению зарядов в образце и проявлению этих эффектов. Более того, обнаруженные ранее в других работах двойные аномальные пики в температурной зависимости поперечной разности потенциалов также могут быть описаны на основе предложенной модели.

Оглавление

1. Введение	4
1.1. Литературный обзор	
1.2. Постановка задачи	
2. Создание образцов	8
2.1. Изготовление	
2.2. Подготовка	
3. Методики измерений	11
3.1. Описание оборудования	
3.2. Схемы измерений	
3.3. Проблемы и их решения	
4. Результаты измерений	15
4.1. Прямоугольный образец	
4.2. Округлый образец	
4.3. Обсуждение	
5. Выводы	25
5.1. Полученные результаты	
5.2. Цели дальнейшей работы	
5.3. Благодарности	

Введение

Литературный обзор

В 1911 году Камерлинг-Оннесом было открыто явление сверхпроводимости, заключающееся в падении электрического сопротивления ртути до нуля при понижении температуры ниже критической, составляющей около 4К [1]. Считалось, что сверхпроводник – это просто идеальный проводник. Однако позже, в 1933 году, В.Мейснер и Р.Оксенфельд обнаружили полное вытеснение магнитного поля в сверхпроводниках, названное в дальнейшем эффектом Мейснера-Оксенфельда [2]. Научные группы со всего мира обратили внимание на проведенные эксперименты, которые являлись новым шагом в изучении свойств проводимости материалов, поскольку не существовало теорий, которые могли бы описать или даже предсказать это явление.

После открытия сверхпроводимости стали разрабатываться теории, позволяющие описать данное явление. Первые были феноменологические – двухжидкостная модель, которая связала сверхтекучесть и сверхпроводимость, и модель Гинзбурга-Ландау, использующая свободную энергию и параметр порядка при описании фазового перехода. Среди микроскопических теорий распространенной является Бардина-Купера-Шиффера (БКШ), вводящая концепцию связанных между собой электронов – куперовских пар. Конечно, данные теории позволяют описать большое количество экспериментов, но только в рамках сделанных предположений, например, работая в области около фазового перехода или находясь в определенном диапазоне частот электромагнитных полей. Они являются не полными, не завершенными, поэтому важным является постановка новых экспериментов в данной области, которые позволят скорректировать существующие теории.

Большинство экспериментов по исследованию сверхпроводимости было проведено с трехмерными объектами в зависимости от различных параметров. Одним из таких параметров был сам материал. Так, в 1986 году, Карл Мюллер и Георг Бернорц нашли соединение, которое обладало критической температурой 35 К [3], за что они получили Нобелевскую премию в 1987 году. В дальнейшем были найдены другие материалы, обладающие более высокой критической температурой. Стали изменять другой параметр в системе – давление, что позволило в 2018 году приблизить критическую температуру до комнатной [4]. Эти эксперименты дали новый толчок в исследовании этого явления. Стала разрабатываться теория высокотемпературной сверхпроводимости ВТСП.

Другой параметр, который мы можем изменить в системе, это размерность. Двумерные материалы, получающиеся из трехмерных путем уменьшения толщины в одном из измерений до значений ниже корреляционной длины, могут служить новым источником знаний. Дело в том, что уменьшается количество степеней свободы и происходит квантование в одном из направлений, растет роль беспорядков и флуктуаций, что позволяет сильно изменять свойства материала, например, критическую температуру. Кроме того, описание многих явлений в трехмерных материалах не может быть продолжено на двумерные, поскольку перестают выполняться предположения теорий.

Материалы, в которых обнаружено явление сверхпроводимости, можно

разделить на два класса – сверхпроводники первого и второго рода. Важное отличие каждого типа связано с вытеснением магнитного поля, то есть с существованием фазы вещества, когда проявляется частичный эффект Мейснера. Как известно, в трехмерных объектах описание проводимости в данной фазе можно провести с использованием абрикосовских вихрей. Одним из главных условий будет достаточно большая по сравнению с корреляционной длиной длина этого вихря. В двумерных материалах это не выполняется в связи малой толщиной слоя. Это может сильно влиять на свойства исследуемых структур.

Диселенид ниобия, который будет использоваться в данной работе, является сверхпроводником II рода, критические температуры которого находятся в диапазоне 2-10К, что технически может быть нами измерено. Более того, мы будем работать с тонкими слоями диселенида ниобия, когда систему можно считать двумерной. Селенид ниобия слоистый, хорошо щепится, что удобно для изготовления структур. Критическая температура образцов зависит от количества слоев, от его толщины [5]. Также в двумерных системах на основе нецентросимметричных сверхпроводников, коим является селенид ниобия, наблюдается много интересных явлений, например, магнитохиральная анизотропия, которая сказывается на поведении второй гармоники [6-7], что послужило основой для создания новых устройств, таких как антенны и 2D сверхпроводящие диоды.

Среди явлений, которые уже хорошо изучены, является эффект Холла в металлах, то есть появление поперечной разности потенциалов, нечетно зависящей от магнитного поля. Интересным является исследование этого эффекта в сверхпроводниках II рода, особенно в области фазового перехода. В работах [8-9] наблюдается характерный пик в зависимости поперечной разности потенциалов от магнитного поля, который четным образом зависит от этого поля, что не согласуется с чистым влиянием только этого эффекта.

В работах [10-12] исследовалось появление поперечной разности потенциалов в нулевом магнитном поле. По температурным зависимостям обнаружены аномальные пики в области перехода для различных материалов. Причем эти пики появляются для поперечной компоненты, когда как для продольной температурная зависимость монотонная. Однако в нескольких исследованиях были обнаружены пики в температурной зависимости продольной разности потенциалов. В работах [13] предположили, что это явление может быть связано с геометрической асимметрией образца. Также в рассмотрение принималось или вихревое движение [14-16], или неоднородность распределения сверхпроводимости [9,17-20], или самопроизвольная намагниченность в отсутствии внешнего поля [21-22]. Добавление примесей и замена атомов материала приводила к усилению данного эффекта, увеличению высоты аномальных пиков [23]. До сих пор отсутствует четкое понимание механизма возникновения поперечной разности потенциалов при изучении температурной зависимости в области перехода.

Единственным более полным описанием является поведение поперечной вольт-амперной характеристики (ВАХ) в двумерных системах на основе сверхпроводника II рода. Так, в работах [14] теоретически рассмотрен механизм появления пика в поперечной ВАХ. Теория, связанная с этим описанием, опирается на вихревое движение, когда на противоположных и боковых по отношению к току краях образца зарождаются вихри и антивихри, которые под действием силы

Лоренца притягиваются друг к другу и аннигилируют в центре образца, что благодаря эффекту Джозефсона вызывает поперечную разность потенциалов, которая поддается нашему измерению. Однако данная теория не позволяет описать появление, например, двойного аномального пика [23]. Кроме того, в работе [23] на основе проведенных экспериментов, связанных с изменением направления магнитного поля, предполагают, что эти эффекты связаны не с вихревым движением, а с нематическим состоянием.

В теоретической работе [14] также предсказано появление гистерезиса поперечной ВАХ, связанной с движением вновь образующихся вихрей по траекториям предыдущих. Обнаружение данного эффекта важно для реализации механизмов памяти, что в дальнейшем может быть использовано для создания систем, частично реализующих функции сознания.

Изменение температуры, магнитного поля, токов и напряжений – это не весь спектр параметров, которые поддаются нашему изменению. Пользуясь только ими, мы не сможем предложить новых способов описания или принять/отвергнуть существующие. Поэтому необходимо менять, например, форму образца или расположение контактов. Так, образец может быть как прямоугольной формы, так и округлой. Округлый образец позволяет циклически менять конфигурацию схемы измерений, проследить влияние дефектов и неоднородностей на результаты измерений.

При проверке качества моделей важно соблюдать, чтобы образцы отличались лишь одним признаком. Иначе мы не сможем безошибочно определить влияние именно одного изменения параметра. Так, дизайн образцов, способ и качество напыления контактов, их расположение, сильно отличаются в описанных выше работах. Мы можем допускать ошибку в правильной интерпретации результатов, вызванной не идеальностью изготовления образцов.

Постановка задачи

В данной работе мы исследуем форму описанных выше температурных переходов и гистерезис вольт-амперных характеристик. На основе полученных результатов попробуем проанализировать влияние неоднородностей на появления данных эффектов в различных образцах и конфигурациях системы. Вначале мы продолжительное время посвятим настройке криостата и определению методик проведения транспортных измерений. Затем обсудим этапы создания образцов, поскольку это важный шаг в работе. Действительно, от качества образцов (расположение контактов, количество слоев, размеры и форма) зависит успешность проведения дальнейших измерений. Далее мы перейдем к подготовке образцов, включающей в себя несколько подготовительных этапов. Следующий блок – самый большой, и связан с постановкой и проведением транспортных измерений. Заключительная часть - анализ и интерпретация результатов, включающие поиск способов описания на основе существующих моделей и проведенных другими научными группами экспериментов.

Создание образцов

Этапы изготовления

Образцы, используемые в данной работе, изготавливались примерно одинаковой структуры (рис.1). На кремниевой подложке Si/SiO_2 располагается слой $NbSe_2$, затем система инкапсулируется нитридом бора hBN .

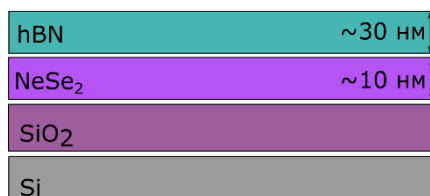


Рисунок 1. Характерная структура образцов

Процесс изготовления образцов можно разделить на несколько этапов. В первую очередь, необходимо найти слои селенида ниобия и нитрида бора. Для этого мы щепим кристаллы $NbSe_2$ и hBN и с помощью скотча переносим на кремниевые подложки. Далее проводим поиск необходимых слоев с использованием оптического микроскопа. С помощью метода сухого трансфера переносим найденный слой нитрида бора на слой селенида ниобия при 60°C. Предварительно необходимо осуществить перенос hBN с кремниевой подложки на пленку поликарбоната при 80°C, используя специальный полимер полидиметилсилоксан. Этот процесс проводится при оптимально подобранных температурах, что позволяет контролировать величину адгезии. Для присоединения контактов верхний hBN травится плазмой SF_6 . Проводится литография контактов. Для двух рабочих образцов последовательность выполнения изображена на рис.2 и рис.3.

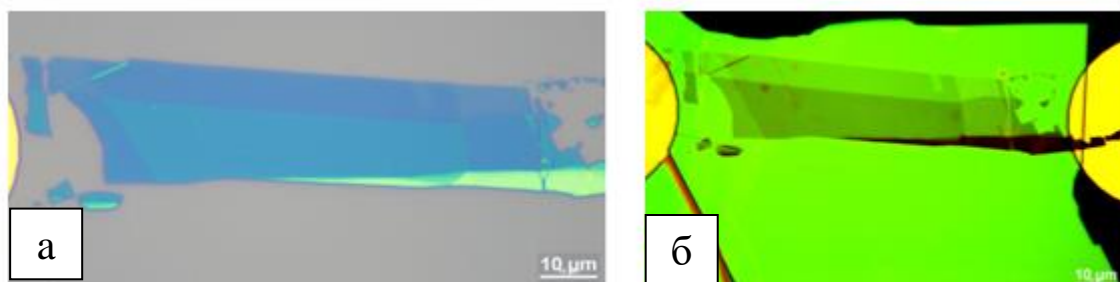


Рисунок 2. Последовательность изготовления образца №1. а) $NbSe_2$ на подложке б) $NbSe_2/hBN$

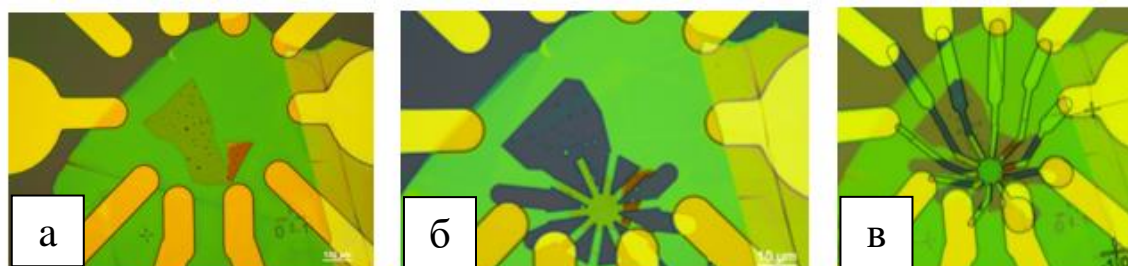


Рисунок 3. Последовательность изготовления образца №2. а) $NbSe_2/hBN$, до травления б) после травления плазмой в) литография контактов

Самым первым образцом, который использовался для обнаружения изучаемых нами эффектов, был образец №1. Это образец прямоугольной формы, имеющий переменную толщину, неоднородности, связанные с наложением нескольких слоев $NbSe_2$ друг на друга. Как будет обнаружено далее, такая многослойность структуры может влиять на поведение температурного перехода из нормального состояния в сверхпроводящее, поскольку слои разной толщины обладают различающейся критической температурой [5]. Это станет одной из причин, по которой для исследования появления аномальных пиков нужно создать образец правильной формы и структуры. Кроме того, контакты, расположившиеся в пределах области образца, могут влиять на поведение измеряемых зависимостей, например, быть источником дефектов в образце.

После проведения измерений с образцом №1 и обнаружения технических недостатков изготовления мы решили создать другой образец. Образец №2 имеет округлую форму, что позволяет использовать каждую пару противоположных контактов как токовую. Более того, исправлена ошибка, связанная с неоднородностью структуры, и теперь контакты расположены на радиальных выступах к образцу. Толщина слоя $NbSe_2$ составляет около 10 нм.

Также создавались другие образцы, но они не приводятся в данной работе, поскольку хороших измерений с ними не было осуществлено. Причины, по которым они стали нерабочими, могут быть различны, одной из которых является электростатическая. Дело в том, что при первоначальной настройке методик проведения транспортных измерений, мы столкнулись с множеством проблем (шумы, заземление), что могло испортить наш образец до проведения измерений или во время них.

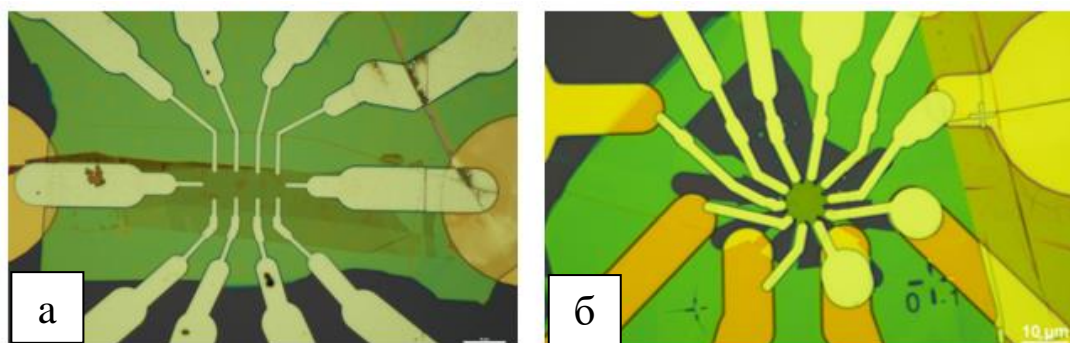


Рисунок 4. Итоговые образцы. а) прямоугольный б) округлый

Подготовка

Данный пункт включает проведение крепления образца (bonding), то есть процесса, когда контакты исследуемого образца соединяются с соответствующими выходами специальной платформы-держателя с помощью проводников. Эта платформа в дальнейшем загружается в криостат.

Данный процесс может быть также разбит на несколько шагов. Подложка с образцом имеет размер немного больший, чем место на держателе, поэтому необходимо провести механическое удаление лишних частей подложки, не касаясь образца. Платформа должна быть чистой, выходы на ней не соединены друг с другом. Затем мы смешиваем компоненты проводящих клеев, которые используются для крепления. Далее аккуратно соединяем соответствующие контакты образца и держателя, используя золотые проволоочки (рис.5).

Во время подготовки могут возникнуть проблемы, которые испортят все достижения при изготовлении образца. Например, случайное касание образца при механическом удалении лишних частей подложки или импульсивное движение пинцетом, которое из-за легкости подложки может привести к ее падению на пол и дальнейшему запылению. Более того, гораздо более опасным является не использование заземления, которое может привести к сгоранию образца до проведения измерений.

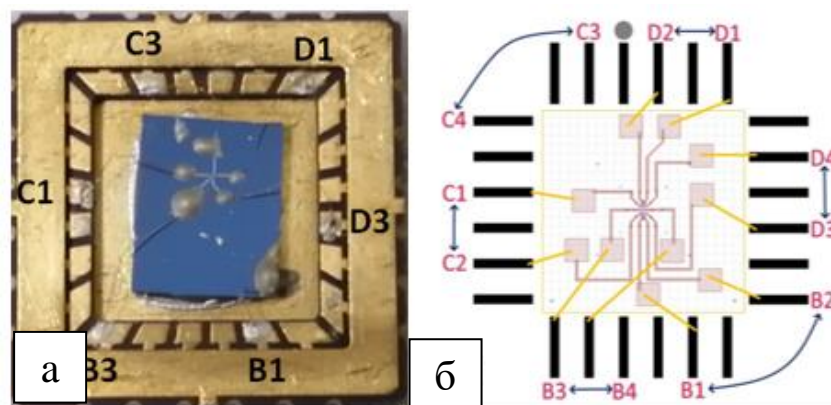


Рисунок 5. Подготовка образцов.

а) пример крепления образца на держателе б) схема подключения

Методики измерений

Описание оборудования

Перед выполнением работы необходимо настроить оборудование для проведения транспортных измерений. Это криостат, источники переменного и постоянного напряжения, вольтметры и другие измерительные устройства.

Криостат – это система измерения физических свойств (Physical Property Measurement System, PPMS, рис.6б), которую мы используем для создания внешних условий для образца. Основными параметрами являются температура и магнитное поле. Криостат отличается тем, что позволяет работать в достаточно большом диапазоне температур 1.8-400К и постоянных магнитных полей до 9 Тл. Другими характеристиками данной системы являются прецизионная стабилизация температуры в зоне исследуемого образца, встроенный высоковакуумный криогенный насос и отсутствие необходимости использования криогенных жидкостей.

Другим важным элементом оборудования является lock-in – синхронный детектор. Это устройство, позволяющее, в первую очередь, выделять нужную нам гармонику исследуемого сигнала. Кроме того, мы можем контролировать амплитуду и частоту подаваемого сигнала на образец. Принцип работы lock-in основан на синхронном детектировании. Когда у нас есть только два сигнала – опорный и исследуемый, то при их перемножении мы получим сумму двух независимых сигналов. Один из которых имеет частоту, равную сумме частот умножаемых сигналов, а другой – разность. Далее данный сигнал проходит через фильтр нижних частот, где высокочастотная компонента экспоненциально затухает. Подбор такой опорной частоты, чтобы конечный низкочастотный сигнал стал постоянным – задача, решение которой определяет амплитуду исследуемого сигнала и его фазу относительно опорного. Если же мы будем исследовать сигнал не синусоидальной формы, то с помощью преобразования фурье мы можем свести задачу к предыдущей, рассматривая каждую компоненту спектра. Более того, синхронное детектирование обладает высокой частотной избирательностью, что, несомненно, важно для выделения сигнала из шума. В данной работе lock-in будет использоваться на частотах первой и второй гармоник исследуемого сигнала, а также как источник переменного напряжения в системе (рис.6в).

Схема измерений

В зависимости от того, что мы хотим измерить, мы будем использовать или постоянный (DC), или переменный (AC) сигналы. В определенных ситуациях может даже понадобиться их совмещение, например, чтобы найти производную сопротивления по напряжению. Это можно сделать, если подавать некоторое напряжение DC и одновременно небольшой AC сигнал, влиянием которого на систему можно пренебречь. После считывания данных остается амплитуду колебаний сопротивления разделить на амплитуду AC сигнала.

Принципиально схемы измерений не будут отличаться (рис.6а). В обоих случаях есть источник напряжения с управляемой частотой (lock-in или SourceMeter), резистор, являющийся нормировочным (100кОм-1МОм) для тока, измерительные устройства (lock-in или вольтметры) и исследуемый образец. При проведении измерений также важно провести синхронизацию двух lock-in, чтобы измерять необходимую гармонику.

RC-фильтр низких частот, изображенный на рисунке, был добавлен лишь после неудачных измерений, когда один из образцов сгорел. Дело в случайных шумах, колебаниях тока в цепи. RC-фильтр собран для каждого контакта и представляет собой схему из резистора и конденсатора. Параметры фильтра подобраны таким образом, чтобы обеспечить частоту среза около 3-30 кГц (использовали несколько фильтров). Влияние высокочастотных сигналов, таким образом, ослабевает.

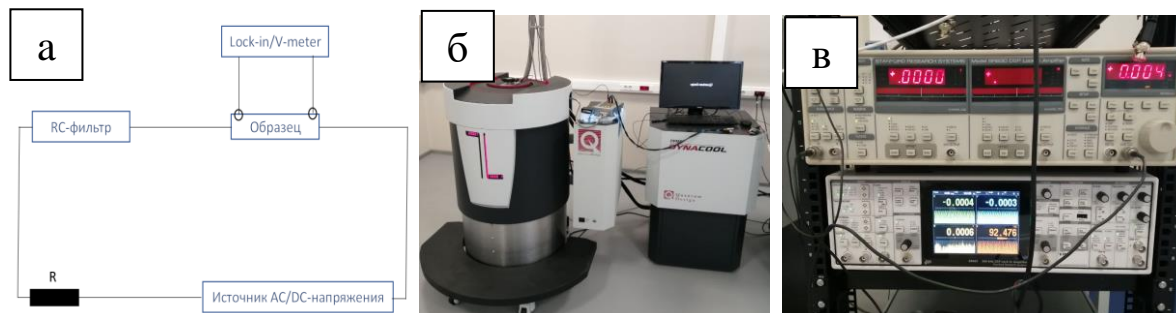


Рисунок 6. Схема измерений (а). Криостат (б). Lock-in (в).

Данные электронных приборов необходимо считывать. Это не маленькие таблички признаков, а по-настоящему большие массивы точек, размеры которых доходят до 100 тысяч строк и до примерно 10 столбцов признаков. Понятно, что размеры будут зависеть от шага измерений и времени эксперимента. Обработать и тем более считывать вручную эти данные практически невозможно, поэтому нужно автоматизировать этот процесс. В этой связи, использование системы управления для сбора данных – Labview – выглядит разумным решением. Полученные мной знания в области программирования на этом языке позволили написать необходимый графический код как для считывания, так и для управления измерительными приборами. Кроме того, управление устройствами может проводиться вне лаборатории, используя сеть интернет, что предоставляет хорошую возможность для проведения долгих и подробных измерений.

При измерениях также нужно правильно использовать имеющиеся контакты. Например, подавать напряжение на одну пару контактов, а измерять на других парах. Это четырехточечный метод измерения сопротивлений, позволяющий избежать влияние токовых контактов на считываемые данные. Это является очень важным, поскольку сопротивления контактов могут вносить значительную добавку при изучении явления сверхпроводимости, когда мы работаем в области нулевых сопротивлений.

Проблемы и их решения.

В данном пункте опишем с какими проблемами удалось столкнуться на начальном этапе измерений. Речь пойдет о нескольких сгоревших образцах.

Загрузка образцов селенида ниобия проводилась способом, описанным выше. После построения матрицы сопротивлений (между всеми парами контактов) один из образцов стал нерабочим, что означает непроводимость необходимых для эксперимента контактов. Другой образец сгорел после того, как через него пускали ток порядка нескольких микроампер в течение 10 часов. Данный ток для исследуемых нами систем не является большим, дело даже не в величине заданного тока, а в шумах, которые могут приводить к скачкам тока.

Поскольку создание образцов – это достаточно долгая и аккуратная работа, то необходимо было найти причину гибели образцов. По снимкам образцов, полученных после их гибели, было определено, что причина связана с электростатикой. Чтобы проверить это, вместо образца был подсоединен резистор, через который измерялось напряжение с помощью осциллографа (рис.7а). Были обнаружены 10-ти кратные всплески напряжений, которые могли возникнуть по различным внешним факторам.

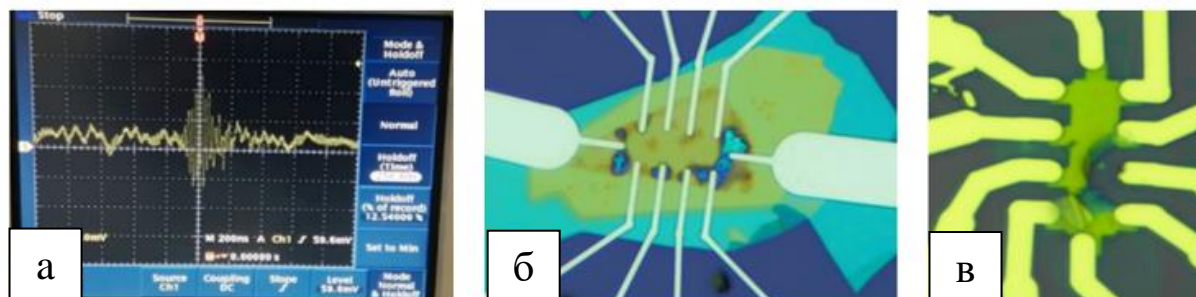


Рисунок 7. (а) импульсы, детектируемые осциллографом.
(б-в) нерабочие образцы

Всплеск – это кратковременный импульс электрического поля. Вероятно, причина гибели образцов кроется именно в этой проблеме. Чтобы ее устранить, можно спаять фильтр нижних частот (ФНЧ) для каждого контакта. ФНЧ – это RC-цепочка, которая вводится в схему измерений для добавления инерции в цепи, она позволяет экспоненциально заглушать входные высокочастотные сигналы. Для первого образца применялся ФНЧ с частотой отсечения около 3 кГц. Для следующих был переделан фильтр, путем добавления резистора большего сопротивления, что позволило увеличить эту частоту среза до 30 кГц. Частота среза подбиралась в соответствии с рабочими частотами (работаем в диапазоне до 1кГц), чтобы не допустить искажения в исследуемых сигналах.

Также необходимо поработать с последовательностью измерений. Для этого необходимо при каждом переключении контактов заранее заземлять все контакты, и только после этого проводить переключения. Это связано с тем, что при любом нашем касании проводника, являющимся элементом цепи, возможен кратковременный импульс тока, способный уничтожить наш образец. Заземление нужно использовать и при проведении крепления – одного из этапов подготовки образцов к измерениям, который мы обсудили выше.

Реализация вышеуказанных шагов позволила устранить проблемы гибели образцов.

Другие проблемы, с которыми удалось столкнуться, были связаны с работой технических систем. Так, образец может неправильно застрять в криостате, что блокирует дальнейшее проведение экспериментов, поскольку нет сопоставления контактов образца и платформы в криостате. Или проблемы, связанные с считыванием данных, когда не получается подключиться к устройству или с указанного порта получить информацию. Эти и другие проблемы, не связанные с гибелью образцов, также успешно разрешены.

Результаты измерений

Прямоугольный образец

Температурные зависимости

Перед проведением транспортных измерений образец проходит стадии изготовления и подготовки. После загрузки первого образца необходимо убедиться в работоспособности всех пар контактов. Для этого мы составляем матрицу, в которую записываем характерные значения сопротивлений между всеми контактами. Если сопротивление более сотен кОм, то один из контактов считается нерабочим. Обычные значения для данных образцов селенида ниобия составляли до нескольких сотен Ом при комнатной температуре. Лишь после проверки работоспособности контактов можно приступить к охлаждению для измерения температурных зависимостей.

Процесс охлаждения происходит достаточно медленно. Измеряя поперечную и продольную разность потенциалов от температуры, которая уменьшается с 300К до 10К, мы ничего интересного не обнаруживаем, поскольку образец до сих пор находится в нормальном состоянии. Диапазон температур, в котором мы будем работать, это 1.8-10К, где нижняя граница – техническое ограничение криостата. Охлаждение происходит со скоростью 0,25К/мин, что является достаточно медленным изменением, но даже при такой скорости наблюдается запаздывание в установлении температуры вдоль всего образца.

Для измерения температуры и записи данных мы используем подготовленную программу на Labview, в которой можно установить необходимые нам параметры охлаждения. При первоначальном изучении температурных зависимостей мы используем АС сигнал, задавая определенную амплитуду тока и его частоту.

Результаты измерений температурных зависимостей приведены на рис. 8. На рис.8а изображен образец №1 с используемыми контактами. Через В3-В4 задается ток определенной амплитуды (в данном случае $I=500\text{нА}$) и измеряется разность потенциалов первой гармоники между С1-С2 и С1-Д4. Далее путем деления измеренных напряжений на амплитуду задаваемого тока мы переводим результаты в поперечное и продольное сопротивление соответственно. Сначала мы работаем в нулевом магнитном поле $B=0$ и изучаем характерные зависимости.

На рис.8а приведены зависимости для R_{xx4} и R_{xy4} от температуры при охлаждении. Синяя линия отображает продольную компоненту, красная – поперечную. Обе кривые при температуре ниже 5,5К выходят на плато нулевого сопротивления, фаза которого не может быть определена на lock-in. Это связано с осуществленным переходом в сверхпроводящее состояние, в котором электроны постоянно участвуют в образовании куперовских пар, имеющих минимальный уровень энергии, что не приводит к рассеянию, то есть сопротивлению. При температуре выше 7К обе компоненты выходят на характерные плато. Для R_{xy4} это около 2 Ом, для R_{xx4} – 60 Ом. В нормальном состоянии выход на плато возникает естественным образом из-за геометрии, которая определяет сопротивление, например, в модели Друде. В поперечной компоненте это сопротивление более чем в 30 раз меньше продольного, что, в целом, можно аргументировать несимметричностью контактов для измерения R_{xy4} . Самое интересно это поведение

кривых в момент перехода из сверхпроводящего состояния в нормальное. Компонента R_{xx4} имеет монотонный вид, что можно объяснить монотонным ростом отношения концентраций куперовских пар и свободных электронов в зависимости от температуры. Температура перехода T_c может быть определена, когда сопротивление в продольной компоненте составляет половину от сопротивления плато. Она составляет около 6,3К, что, в целом, согласуется с температурами перехода для образцов селенида ниобия данной толщины. Одна из особенностей экспериментальной зависимости – это наличие ступеньки в момент перехода, которая находится между 6,2К и 6,6К. Эта ступенька так же имеет наклон, но в несколько раз меньший в сравнении с наклоном “до” и “после”. У нас возникло несколько гипотез объяснения данной особенности. Одна из них связана с неоднородностью нашего образца, о которой было сказано в первых частях работы. Дело в том, что образец состоит из нескольких флейков разной толщины. Согласно статье [5] их критические температуры могут отличаться. Это может вызывать неоднородный переход образца к сверхпроводящему состоянию при повышении температуры. В нашем случае условно образец можно представить как двойной образец, критические температуры которых 6 и 6,8К. При повышении температуры переход будет осуществлен одной части, а потом – другой. Далее обратим внимание на поведение R_{xy4} . В момент перехода возникает аномальный пик, более чем в три раза превышающий сопротивление плато. Этот пик состоит из выраженного роста сопротивления до температуры 6,4К и дальнейшего снижения до плато. Изучение этого пика, причин его появления – одна из целей данной работы.

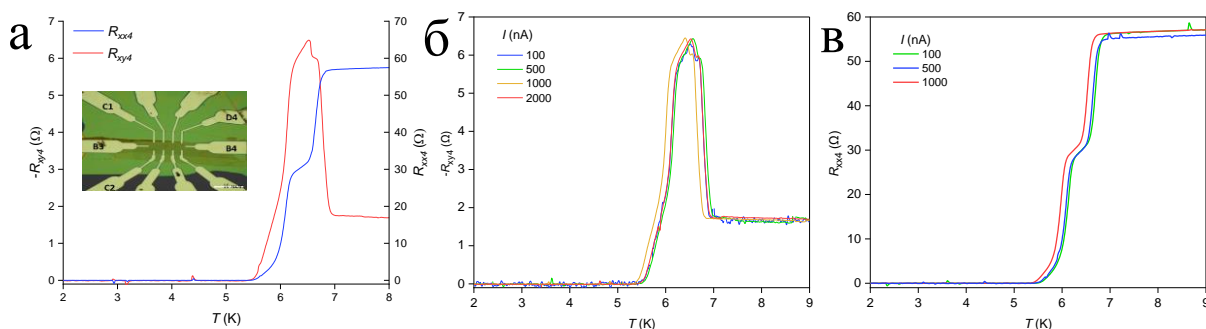


Рисунок 8. Температурные зависимости.

а) поперечного(красная) и продольного(синяя) сопротивлений. Выноска образца с используемыми контактами. б-в) поперечного и продольного сопротивлений при фиксированных амплитудах тока.

Теперь рассмотрим поведение двух компонент при других фиксированных амплитудах тока (рис.8 б-в). Изменение тока в диапазоне 100-2000нА не меняет поведения монотонного R_{xx4} и поперечного R_{xy4} . Кривые лишь сдвигаются вдоль оси температур, что можно обосновать смещением границы перехода, поскольку переход может быть осуществлен не только температурой, но и током и магнитным полем.

Приведем результаты температурной зависимости при разных фиксированных магнитных полях (рис.9). Будем работать в диапазоне от -3 до 3 Тл (далее обозначаем единицу измерения Т). Как и предполагалось,

кривые смещаются при добавлении магнитного поля. Так, температура перехода при 3Т составляет около 2,5К, в то время как при нулевом магнитном поле - 6,3К. Зависимости R_{xx4} остаются монотонными, но ступенька, которая была в нулевом магнитном поле, исчезает. Первоначально заметив вид R_{xy4} , можно было предположить, что ступенька в продольном сопротивлении является результатом перемешивания сигнала двух компонент. Если это так, то она должна была бы сохраниться, поскольку сами кривые лишь смещаются по оси температур. Поэтому это предположение не совсем реалистично, тем более, учитывая, что продольное сопротивление на порядки выше поперечного, а значит, к такому сильному изменению углового коэффициента привести не могло. Кривые разного цвета, соответствующие разным магнитным полям, расположены не равноудаленно при постоянном шаге изменения магнитного поля. Мы ставили эксперимент следующим образом. Фиксируем магнитное поле, охлаждаем, увеличиваем поле на 0,5Т, нагреваем. В итоге пучность графиков связана со способностью температуры релаксировать к равновесной. Данный процесс происходит достаточно медленно в отличие от установления электрического тока. Плато нормального сопротивления для зависимостей совпадает. Также заметим, что зависимости при положительном и отрицательном магнитных полях совпадают, что приводит к симметричному поведению от магнитного поля в отличие, например, от эффекта Холла в металлах. Да и возникновение поперечной разности потенциалов в нулевом магнитном поле является отличительной особенностью.

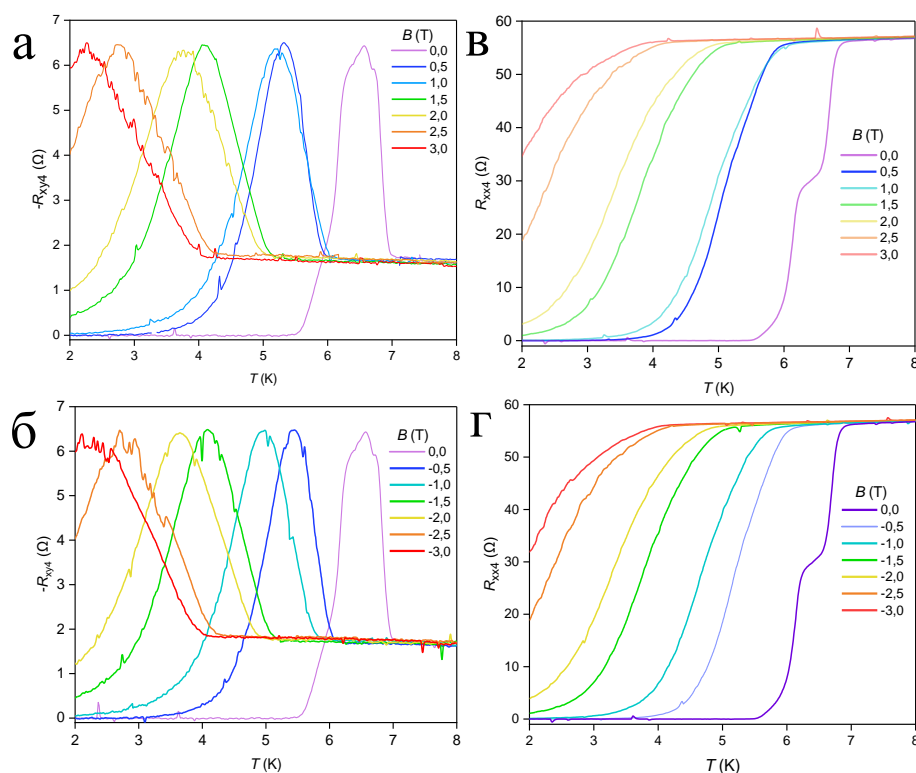


Рисунок 9. Температурные зависимости при фиксированных магнитных полях. а-б) поперечного, в-г) продольного сопротивления

Вольт-амперные характеристики

Следующим шагом будет изучение ВАХ образца. Дело в том, что обнаружение гистерезиса ВАХ по току может стать подтверждением модели, теоретически предложенной в статье [14].

Результаты измерений изображены на рис.10. Для измерения ВАХ мы использовали DC сигнал sourcemeter, а с помощью нановольтметров измеряли напряжения между теми же контактами, что использовались в предыдущей части. Вид зависимостей а и б согласуется с измерениями температурных зависимостей. Действительно, при 2К угловой коэффициент нулевой, а при 7К он достигает постоянного значения, равного нормальному сопротивлению между контактами. В ВАХ продольной компоненты каждая кривая, соответствующая более высокой температуре, находится выше, что связано с монотонной зависимостью R_{xx4} от температуры, в то время как ВАХ поперечной компоненты пересекаются при разных температурах из-за аномального пика в температурной зависимости.

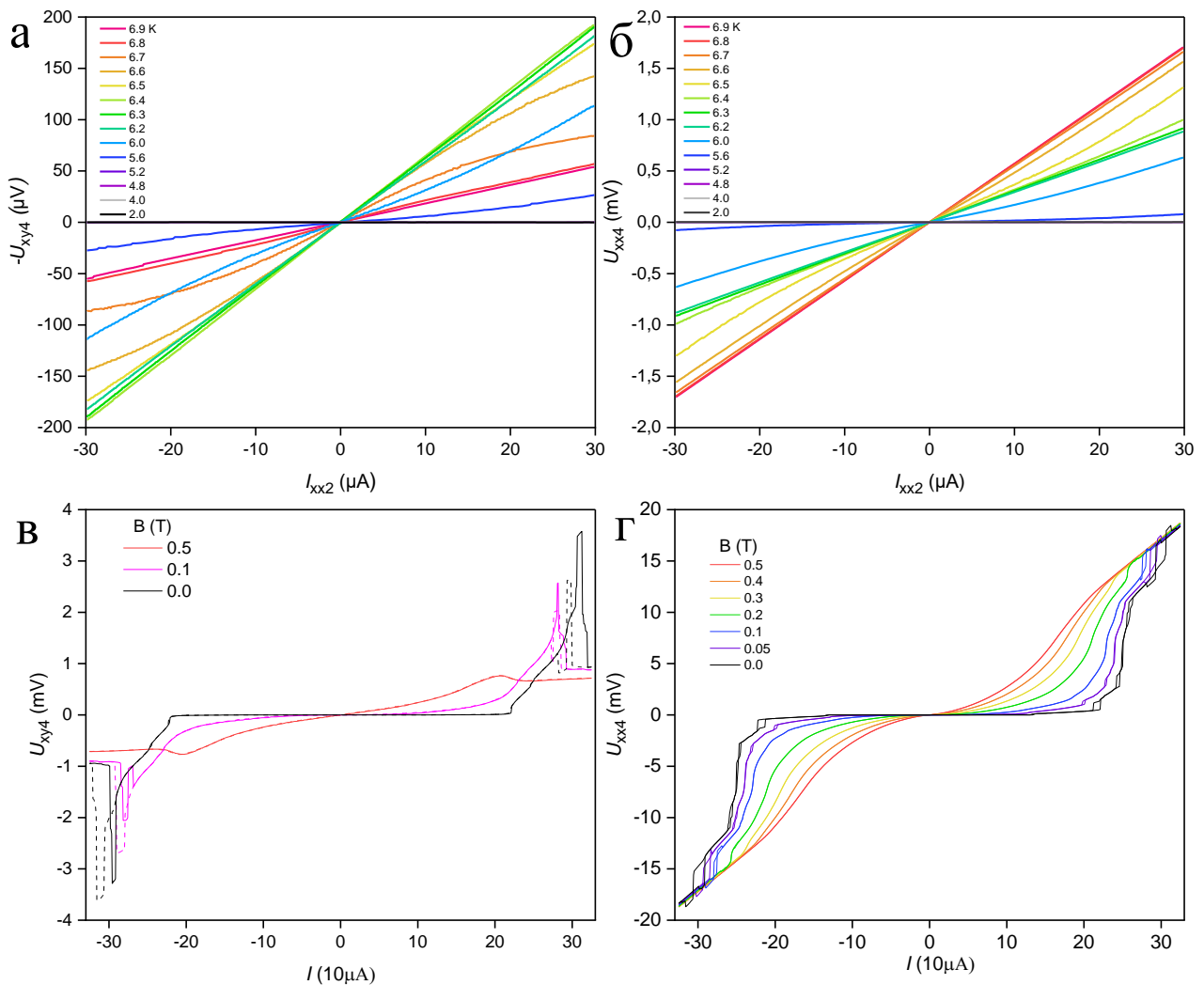


Рисунок 10. ВАХ. а-б) R_{xx4} и R_{xy4} при фиксированных температурах и небольших токах в-г) при фиксированных магнитных полях и больших токах, влияющих на переход

Рассмотрим поведение ВАХ при повышении и понижении тока при фиксированных магнитных полях (рис.10 в-г). Не соответствие кривых при разном направлении тока указывает на наличие некоторой памяти в системе, называемой

гистерезисом. Он обнаруживается лишь для R_{xy4} компоненты и может быть описан исходя из предложенной модели в статье [14]. При пропускании через образец электрического тока, вокруг этого тока создается магнитное поле, которое достигает максимальных значений на краях образца. При увеличении этого тока растет магнитное поле, достигая критического значения, при котором в сверхпроводнике второго рода начинают образовываться вихри и антивихри на противоположных краях образца. Взаимодействие между ними приводит к притяжению друг к другу, что влияет на траектории их движения. Появляется компонента скорости, параллельная линии тока, приводящая к возникновению поперечной разности потенциалов из-за эффекта Джозефсона. С увеличением тока процесс генерации вихрей становится интенсивнее, каждый следующий новый вихрь пытается продолжить движение по траектории предыдущего вихря, что может привести к гистерезису ВАХ в поперечной компоненте. При дальнейшем увеличении тока концентрация вихрей становится настолько большой, что происходит фазовый переход к нормальному состоянию.

Данная модель описания позволяет предсказать обнаруженный нами гистерезис, но не отвечает на вопрос появления аномального пика в температурной зависимости поперечной разности потенциалов. Казалось бы, ток и температура связаны между собой, оба параметра могут приближать материал к смешанному состоянию, влиять на образование вихрей одинаковым образом.

Другая схема измерений

Проведенные измерения по первой схеме с данным образцом позволили обнаружить аномальные пики и гистерезис поперечной ВАХ. Но измерения на этом не заканчиваются, ведь мы можем задействовать другие рабочие контакты (рис. 11). При прежнем пропускании тока оказалось, что вид аномального пика остается идентичным даже для других контактов. Чтобы обнаружить различие в пиках, мы можем повернуть нашу систему. Например, пропускать ток через D2-B1, а измерять разность потенциалов на C1-D1 и C1-C2. Дело в том, что это может привести к изменению конфигурации нашей системы, эффект от влияния которой можно проследить.

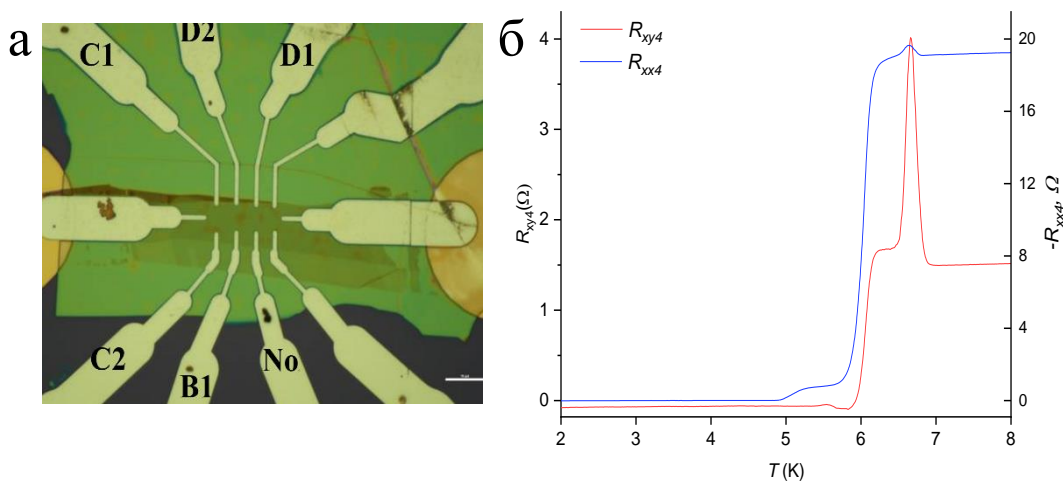


Рисунок 11. Схема измерений №2 с первым образцом.

- а) образец и используемые контакты б) температурные зависимости в нулевом магнитном поле

Изменение конфигурации – хороший способ исследования влияния дефектов, центров пиннинга. Любая неоднородность образца может привести к другой кривой зависимостей. На рис приведены температурные зависимости для продольной и поперечной компонент. Вид R_{xx4} претерпел изменения. Так, теперь ступенька стала значительно ниже, но не исчезла. Изменился диапазон температуры ее наблюдения. Кроме того, на синей кривой появился небольшой выступ при 6,5К, что может быть частью перемешивания сигналов двух компонент. Более того, изменилось поведение R_{xy4} , теперь аномальный пик появляется после некоторой ступеньки. До нее происходит быстрый переход к какому-то нормальному состоянию.

Округлый образец

Транспортные измерения

Образец №2 – это образец округлой формы, однородный по толщине, контакты которого находятся за пределами эффективной области распространения тока. Данный образец отличается от первого, в первую очередь, своей однородностью, что может привести к отсутствию ступеньки в температурной зависимости продольного сопротивления. Измерения с этим образцом начинаем по той же самой методике – строим матрицу сопротивлений, измеряя сопротивления между всеми парами контактов. Это позволяет нам определить, что несколько контактов по некоторым причинам нерабочие, а значит, количество возможных конфигураций измерений уменьшается. Большинство пар контактов имеют сопротивление около 2 кОм. Конечно, чтобы не допустить влияние токовых контактов на измерения, мы используем метод четырехточечных измерений.

Для начала соберем одну из симметричных конфигураций (рис.12). Будем пропускать синусоидальный ток через контакты B2-D2 и измерять разность потенциалов на D3-D1 и C2-B4. Ток установим $I=250$ нА, магнитное поле $B=0$ Т. Температурные зависимости изображены на рис. В поведении продольного сопротивления наблюдаются отличия в сравнении с первым образцом. Так, отсутствует ступенька, переход очень быстрый, на небольшом изменении температуры в 0,2 К. На первом образце это уширение составляло около 1 К. Возможно, это связано с тем, что наш новый округлый образец более однороден по толщине, а значит, отсутствует двойной переход с разными критическими температурами. Кроме того, в зависимости R_{xy4} не наблюдается ярко выраженного аномального пика, который встречался несколько раз на прямоугольном образце. Если приглядеться, то можно заметить небольшое проявление пика. И его направление – вниз, в отрицательную зону относительно знака нормального сопротивления между этими контактами.

Обнаружение отсутствия аномального пика на втором образце и его появление на первом может позволить нам догадываться о причинах его возникновения. Согласно теории [14] описания гистерезиса ВАХ аномальный пик должен проявляться, поскольку происходит вихревое движение, должна возникать джозефсоновская разность потенциалов. Кроме того, гистерезис ВАХ по току в этом случае не проявляется. С чем это может быть связано? С неоднородностью, геометрией? Мы работаем со сверхпроводниками второго рода, а значит,

обнаруженные эффекты, вероятно, зависят как от неоднородностей, так и от концентрации вихрей. Чтобы лучше понять происходящие процессы,

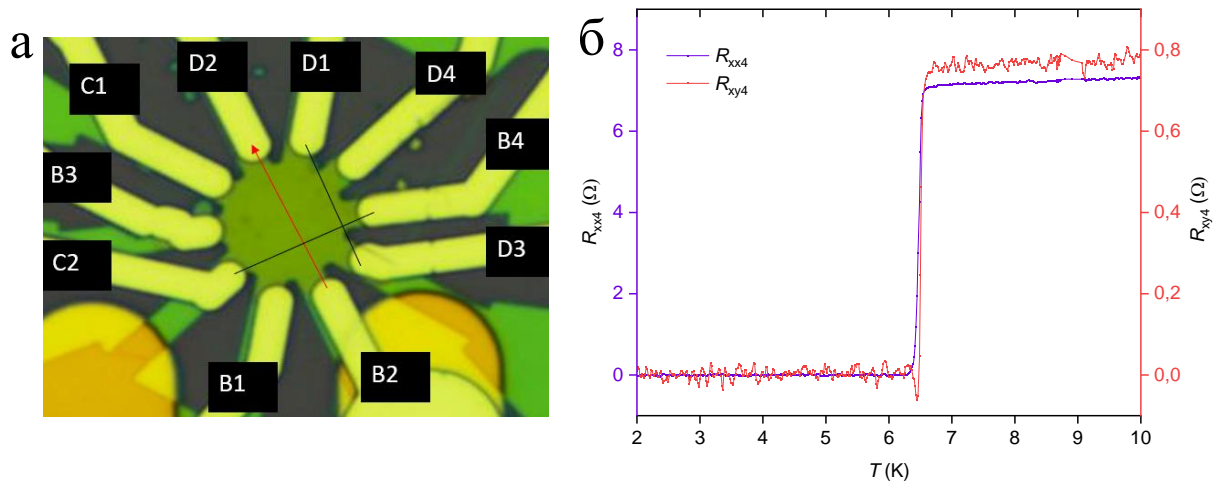
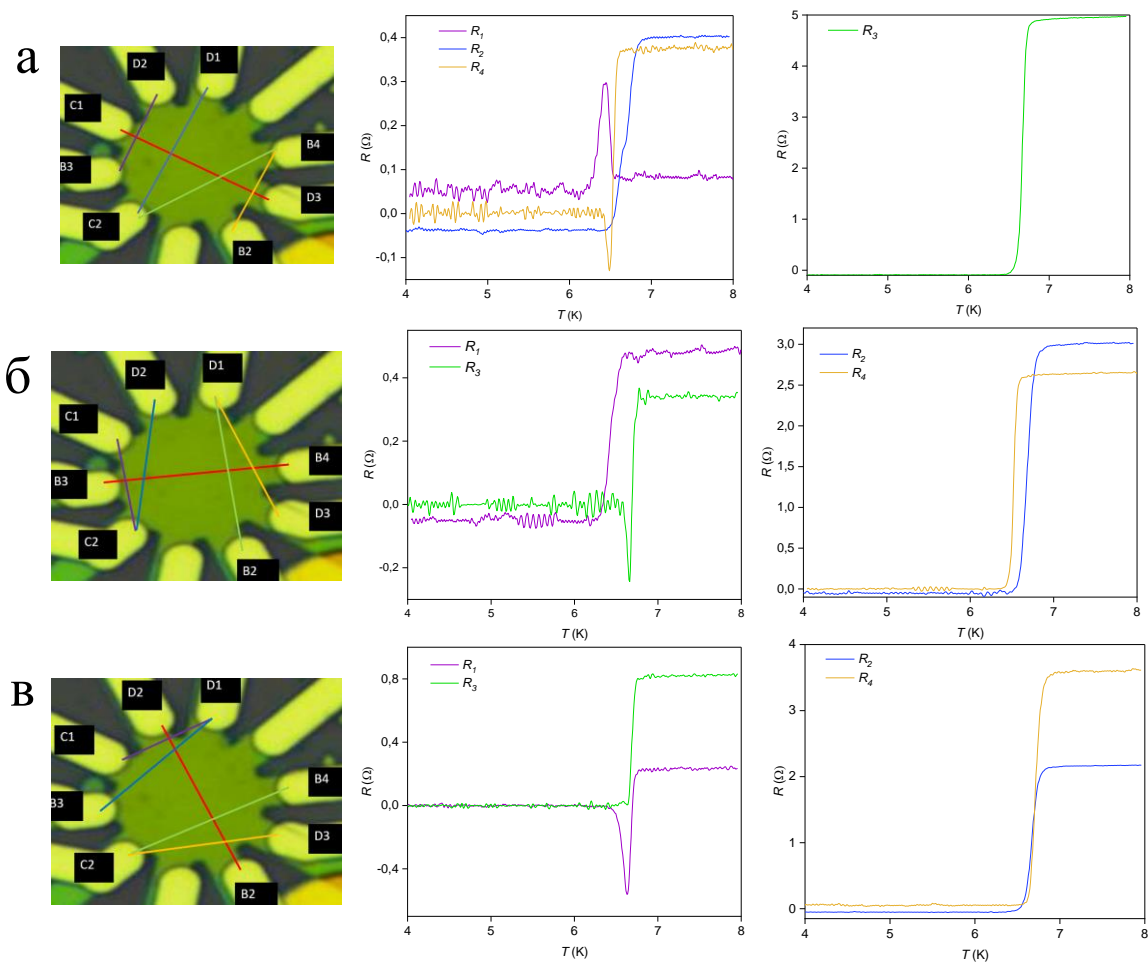


Рисунок 12. Измерения с округлым образцом. а) образец и схема измерений б) температурные зависимости при нулевом поле.

воспользуемся преимуществом данного образца – возможностью менять конфигурацию, осуществляя поворот токовых контактов.

Для каждой конфигурации контактов будем проводить измерения поперечной разности потенциалов (рис.13).



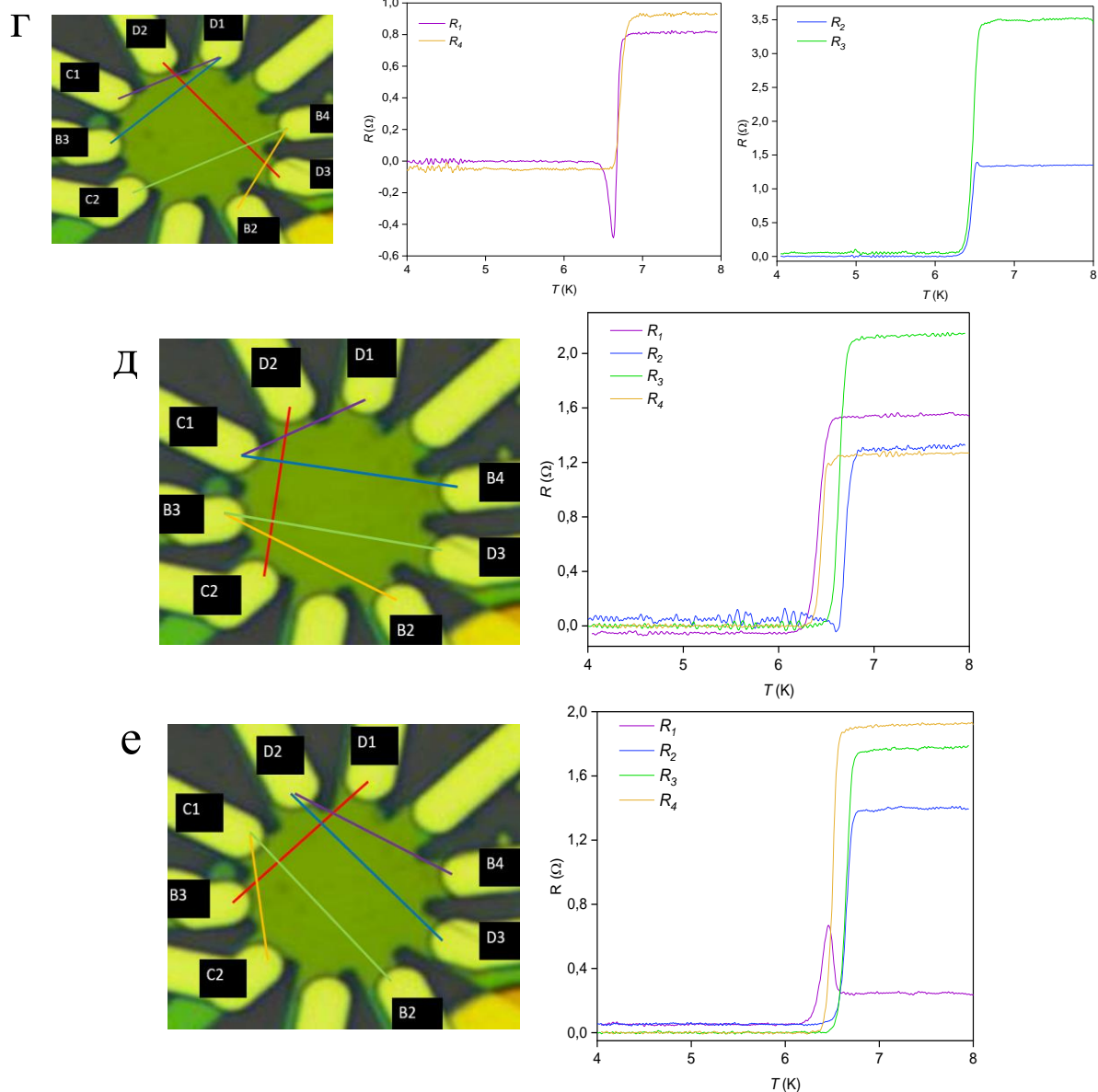


Рисунок 13. Различные конфигурации измерений. Красная линия соединяет токовые контакты.

Согласно рисунку рис.13 в некоторых конфигурациях обнаружены аномальные пики, а в других – их нет, сохраняется монотонный вид зависимости, как в продольной составляющей. Красная линия соединяет токовые контакты, цвет каждой кривой соответствует линии, соединяющей измерительные контакты. На рис.13а аномальный пик наблюдается на фиолетовой и оранжевой кривой. Причем эти пики противоположно направлены. На зеленой и синей наблюдается монотонная зависимость. Поведение зеленой кривой можно обосновать, обратив внимание на величину сопротивления, которое на порядок больше сопротивления на других контактах. Это связано с перемешиванием сигнала продольной и поперечных компонент, что наглядно видно по фотографии образца. Измерения, проведенные в третьем столбце, содержат относительно большие сопротивления, поэтому дальше их можно не рассматривать, поскольку это обычное поведение продольной компоненты. Однако на синей кривой величины сопротивлений не

позволяют говорить о перемешивании. То же касается каждой следующей конфигурации. Наблюдается как проявление, так и отсутствие этого эффекта. Более того, это может наблюдаться на одних и тех же контактах. Например, контакты С1-D1 на рис в и г имеют характерный пик около 0,4 Ом, направленный вниз. А на рис д имеют монотонный пик с небольшой примесью продольной компоненты. Но влияние пика было бы заметно. Другая пара контактов – В4-В2 – на рис.13а имеет ярко выраженный пик, а на рис.13г его не имеет. Хотя сопротивления остаются такой же величины без перемешивания продольных компонент.

Конфигурации отличаются выбранной парой токовых контактов, а следовательно, распределением тока в образце. Условно существует выделенное направление, которое влияет на наши измерения. Оно может быть связано с неоднородностью, дефектами, свойства которых зависят от этого направления.

Обсуждение

После проведения транспортных измерений с двумя рабочими образцами мы приходим к некоторым результатам. Поскольку образцы отличались формой, расположением контактов и однородностью, то обнаружение различий в измерениях указывает на связь исследуемых нами эффектов с неоднородностью и асимметрией. Кроме того, наблюдение и отсутствие аномальных пиков в температурной зависимости поперечной разности потенциалов наблюдалось не только при различных конфигурациях системы, но и на одних и тех контактах в зависимости от направления линии тока. Все это указывает на существенное влияние дефектов и беспорядка.

Изучением появления поперечной разности потенциалов в смешанном состоянии занимались много научных групп. Но до сих пор нет единого понимания происходящих процессов на физическом уровне, объясняющих данные эффекты. Вихревое движение [14-16], геометрия контактов [13], неоднородная сверхпроводимость [9, 17-19], нематическое состояние [23], связанное с нарушением симметрии – одни из них. Причем каждое из объяснений может описать часть процессов на физическом уровне. Так, вихревое движение предсказывает гистерезис ВАХ, а также указывает на диапазон токов, в пределах которого наблюдается аномальный пик [14]. Но этот аномальный пик, согласно теории, должен быть один. Но в наших экспериментах обнаружено его отсутствие и присутствие. Более того, в работе [23] сообщают о двух аномальных пиках и считают, что вихревое движение не может описать процессы исследуемых эффектов. В наших экспериментах изменение магнитного поля не приводило к изменению высоты и ширины аномальных пиков.

Поскольку мы работаем со сверхпроводниками второго рода и эффекты проявляются в области перехода, логично заключить важность смешанного состояния для описания данных эффектов. Учитывая зависимость от неоднородности и асимметрии, можно прийти к тому, что существенен пиннинг вихрей, их сцепление с дефектами. Причем, если предположить, что с появлением вихрей связано образование некоторой плотности заряда, зависящей от направления потока вихря, то это также позволит описать проведенные нами измерения, а также объяснить появление двойного пика в температурной зависимости поперечной разности потенциалов, обнаруженные в других работах. Пусть с направлением вихря связано положительная плотность заряда. С противоположным – отрицательная. При увеличении тока в асимметричном образце с одного из краев (левого или правого) начнет происходить образование вихрей, которые из-за наличия дефектов и беспорядка будут накапливаться. Возникает увеличивающаяся поперечная разность потенциалов, вызванная перераспределением заряда в системе. Это происходит до тех пор, пока не произойдет отрыв вихрей от дефекта или переход в сверхпроводящее состояние. При реализации отрыва мы получаем падение напряжения, что формирует аномальный пик.

Также мы можем показать, что возможно появление двойного аномального пика. Для этого нужно рассмотреть не один край образца, а два. Так, из-за асимметричности образца на одном из краев будет раньше происходить накопление вихрей и связанного с ними заряда (в нашем предположении). Далее при

увеличении температуры происходит отрыв вихрей от дефектов, что формирует первый аномальный пик. Аналогичное последующее описание эффектов для другого края образца, что объясняет наличие второго аномального пика. А гистерезис объясняется различием коэффициентов сцепления вихрей с дефектами, как пример – не идеальной пружинкой. Другими словами, сцепление вихрей с дефектами происходит интенсивнее, чем их отрыв. Поэтому при увеличении тока концентрация вихрей (связанная с ними плотность заряда и измеряемое нами напряжение) достигает фиксированного значения раньше, чем при уменьшении тока в системе.

Предложенное мной описание на качественном уровне позволяет описать наблюдаемые нами эффекты, а также объяснить появление двойных аномальных пиков, обнаруженных в других работах. Основное предположение теории – с образованием каждого вихря связана плотность заряда, зависящая от направления вихря (вихрь или антивихрь). В отличие от теории вихревого движения, предсказывающей наблюдение гистерезиса, данная модель связана со статикой вихрей. Неоднородная сверхпроводимость, геометрии, асимметрии, нематичность – это одни из существующих сегодня предположений, с чем может быть связано образование аномального пика. Наша модель также включает влияние неоднородности, как частный случай наличия дефектов в системе, где может происходить сцепление вихрей.

В чем физика связи вихря и плотности заряда? Поскольку для знака плотности заряда важно направление вихря, то связь может быть установлена с нарушением симметрии в системах. В работе [6] исследовалось явление магнитохиральной анизотропии в двумерных образцах селенида ниобия. Дело в том, что в двумерных тонких образцах на основе нецентросимметричных сверхпроводников происходит нарушение инверсионной симметрии, что влияет на поведение второй гармоники. Возможно, перераспределение заряда, связанное с образованием вихрей, есть проявление специфических свойств 2D селенида ниобия. Более подробное описание процессов на физическом уровне представляется сложным, необходимы дополнительные эксперименты в этой области.

Выводы

Полученные результаты

- Проведена настройка криостата и определены методики проведения транспортных измерений
- Обнаружено появление и отсутствие аномальных пиков в поперечной разности потенциалов не только для различных конфигураций, но и для одних и тех же контактов
- Обнаружен гистерезис поперечной ВАХ
- Выяснено, что проявление исследуемых эффектов связано с неоднородностью и наличием дефектов и беспорядков
- Рассмотрены теории, предсказывающие данные эффекты, выявлены их недостатки полноценного описания
- Предложена качественная модель описания, основывающаяся на появлении плотности заряда при образовании вихрей и антивихрей, что может быть связано с нарушениями симметрий в системе

Цели дальнейшей работы

В данной работе мы исследовали причины возникновения аномальных пиков в поперечной разности потенциалов и гистерезиса ВАХ, а также предложили модель описания. Однако для ее подтверждения необходимо:

- Создать симметричный и однородный образец, без дефектов, контакты которого будут находиться за пределами образца
- Создать образец асимметричный, с контактными дефектами
- Обнаружить отсутствие исследуемых эффектов на правильном образце, двойной аномальный пик на неправильном.
- Придумать дизайн эксперимента по детектированию плотности заряда, который может возникать при осуществлении перехода

Благодарности

В заключение выражаю глубокую благодарность своему научному руководителю Дрёмову Вячеславу Всеволодовичу за приобретенные ценные знания и постоянные консультации, сотрудников лаборатории программируемых функциональных материалов Жаркову Екатерину и Морозова Александра за обучение навыкам изготовления образцов и проведения транспортных измерений.

Литература

1. H. Kamerling Onnes// Leiden Comm. – 1911. – Т. 122. – С. 124
2. Meissner W., Ochsenfeld R. Ein neuer effekt bei eintritt der supraleitfähigkeit //Naturwissenschaften. – 1933. – Т. 21. – №. 44. – С. 787-788.
3. Bednorz J. G., Müller K. A. Possible high T_c superconductivity in the Ba– La– Cu– O system //Zeitschrift für Physik B Condensed Matter. – 1986. – Т. 64. – №. 2. – С. 189-193.
4. Somayazulu M. et al. Evidence for superconductivity above 260 K in lanthanum superhydride at megabar pressures //Physical review letters. – 2019. – Т. 122. – №. 2. – С. 027001.
5. Khestanova E. et al. Unusual suppression of the superconducting energy gap and critical temperature in atomically thin NbSe₂ //Nano letters. – 2018. – Т. 18. – №. 4. – С. 2623-2629.
6. Zhang E. et al. Nonreciprocal superconducting NbSe₂ antenna //Nature communications. – 2020. – Т. 11. – №. 1. – С. 5634.
7. Wakatsuki R. et al. Nonreciprocal charge transport in noncentrosymmetric superconductors //Science advances. – 2017. – Т. 3. – №. 4. – С. e1602390.
8. Zhao D. et al. Transverse Magnetoresistance Induced by the Nonuniformity of Superconductor //Nanomaterials. – 2022. – Т. 12. – №. 8. – С. 1313.
9. Zhao D. et al. Transverse Magnetoresistance Induced by the Nonuniformity of Superconductor //Nanomaterials. – 2022. – Т. 12. – №. 8. – С. 1313.
10. Da Luz M. S. et al. Transverse voltage in superconductors at zero applied magnetic field //Physica C: Superconductivity. – 2009. – Т. 469. – №. 1. – С. 60-63.
11. Francavilla T. L., Hein R. A. The observation of a transverse voltage at the superconducting transition of thin films //IEEE transactions on magnetics. – 1991. – Т. 27. – №. 2. – С. 1039-1042.
12. Santhanam P. et al. Resistance anomaly near the superconducting transition temperature in short aluminum wires //Physical review letters. – 1991. – Т. 66. – №. 17. – С. 2254.
13. Park M., Isaacson M. S., Parpia J. M. Resistance anomaly and excess voltage near superconducting interfaces //Physical review letters. – 1995. – Т. 75. – №. 20. – С. 3740.

14. L. Glazman, Sov. J. Low Temp. Phys., 12, 389, 1986
15. Hagen S. J. et al. Flux-flow Hall effect in superconducting $Tl_2Ba_2CaCu_2O_8$ films //Physical Review B. – 1991. – T. 43. – №. 7. – C. 6246.
16. van Otterlo A. et al. Vortex dynamics and the Hall anomaly: A microscopic analysis //Physical review letters. – 1995. – T. 75. – №. 20. – C. 3736.
17. Vaglio R. et al. Explanation of the resistance-peak anomaly in nonhomogeneous superconductors //Physical Review B. – 1993. – T. 47. – №. 22. – C. 15302.
18. Segal A., Karpovski M., Gerber A. Inhomogeneity and transverse voltage in superconductors //Physical Review B. – 2011. – T. 83. – №. 9. – C. 094531.
19. Vašek P., Shimakage H., Wang Z. Transverse voltage in zero external magnetic fields, its scaling and violation of the time-reversal symmetry in MgB_2 //Physica C: Superconductivity and its applications. – 2004. – T. 411. – №. 3-4. – C. 164-169.
20. Villegas J. E. et al. Anomalous, hysteretic, transverse magnetoresistance in superconducting thin films with magnetic vortex arrays //Applied Physics Letters. – 2009. – T. 94. – №. 25. – C. 252507.
21. Nagaosa N. et al. Anomalous hall effect //Reviews of modern physics. – 2010. – T. 82. – №. 2. – C. 1539.
22. Dutta O., Przysiężna A., Zakrzewski J. Spontaneous magnetization and anomalous Hall effect in an emergent Dice lattice //Scientific Reports. – 2015. – T. 5. – №. 1. – C. 11060.
23. Lv Y. et al. Anomalous transverse resistance in 122-type iron-based superconductors //Scientific Reports. – 2019. – T. 9. – №. 1. – C. 664.