



На правах рукописи

Никонов Сергей Александрович

Динамика волны зарядовой плотности в NbS_3 в ВЧ диапазоне

1.3.8 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН).

Научный руководитель: **Покровский Вадим Ярославович** доктор физико-математических, главный научный сотрудник ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Официальные оппоненты: **Хохлов Дмитрий Ремович** доктор физико-математических, заведующий кафедрой общей физики и физики конденсированного состояния физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Кулик Леонид Викторович доктор физико-математических, ведущий научный сотрудник лаборатории неравновесных электронных процессов ИФТТ РАН

Ведущая организация: Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт»

Защита диссертации состоится «16» февраля 2024 г., в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.1.111.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова и на сайте <http://cplire.ru/rus/dissertations/Nikonov/index.html>

Автореферат разослан « » 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.1.111.01 (Д002.231.01)

доктор физико-математических наук, доцент



Кузнецова

Ирен Евгеньевна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

При понижении температуры во многих металлах происходит фазовый переход в состояние с иным типом порядка. В таких металлах как титан или ниобий при низких температурах возникают куперовские пары, что приводит к нулевому электрическому сопротивлению, а сами материалы переходят в сверхпроводящее состояние. Железо и никель изменяют свое состояние на ферромагнитное при температурах ниже нескольких сотен градусов по Цельсию.

В 1950-х годах Пайерлс показал, что кристаллическая решётка одномерных металлических цепочек может быть нестабильна. При понижении температуры в результате так называемого пайерлсовского перехода возникает искажение кристаллической решетки, и на уровне Ферми появляется щель 2Δ в электронном спектре. Такое самосогласованное периодическое смещение узлов кристаллической решётки и модуляция электронной плотности называется волной зарядовой (ВЗП).

С середины 1970-х годов было открыто множество низкоразмерных материалов, которые претерпевают фазовый переход в состояние с ВЗП. Среди наиболее интересных оказалось семейство трихалькогенидов, к которому относятся кристаллы типа MX_3 , синтезированные из атомов металлов V группы ($M = Nb, Ta$) и атомов халькогена ($X = S, Se$). Такие соединения синтезируются в виде нитевидных кристаллов, называемых также вискерами. В нормальном состоянии (без ВЗП) они являются металлами. При этом они обладают высокой анизотропией, поэтому их называют квазиодномерными проводниками.

Изучение электронных систем с сильными электронными корреляциями представляет собой весьма актуальную задачу современной физики конденсированных сред. Переход в состояние с ВЗП можно формально описать в терминах теории Бардина-Купера-Шриффера (БКШ). Однако эта задача решена точно только для одномерных цепочек в приближении сильной связи, причём только для случая наполовину заполненной зоны проводимости (что соответствует удвоению периода цепочки при образовании ВЗП). В этом

случае температурная зависимость пайерлсовской щели точно описывается теорией БКШ. В реальных квазиодномерных металлах такое описание может быть неприменимо даже качественно, в первую очередь, – из-за одномерных флуктуаций. Так, теория БКШ предсказывает температуру перехода T_P гораздо более высокую, чем мы наблюдаем на практике. Соответственно, отношение $2\Delta/T_P$ оказывается в несколько раз выше, чем 3.52, как предсказывает БКШ. Сильные фазовые флуктуации могут приводить к пространственно неоднородным колебаниям фазы и амплитуды ВЗП и к спонтанному локальному подавлению пайерлсовской щели, 2Δ . Универсальное микроскопическое описание перехода Пайерлса, учитывающее флуктуации, пока не предложено. В связи с этим актуальными остаются эмпирические и полуэмпирические модели, описывающие образование ВЗП (или её разрушение, если идти вверх по температуре).

Важнейшим свойством ВЗП является её скольжение в полях выше порогового. Реализуется так называемая фрëлиховская мода коллективной проводимости, в которой участвуют электроны, сконденсированные под пайерлсовской щелью. Характерным свойством скользящей ВЗП является эффект синхронизации частоты преодоления барьеров периодического потенциала пиннинга (её называют фундаментальной частотой скольжения ВЗП) с частотой внешнего электрического поля ВЧ или СВЧ диапазона. В случае совпадения частоты внешнего поля с фундаментальной частотой скольжения ВЗП на ВАХ возникают области постоянного тока ВЗП, называемые ступеньками Шапиро (СШ). Для краткости будем называть явление «синхронизацией скольжения ВЗП с ВЧ полем». В материалах, обладающих высокой когерентностью, степень синхронизации может достигать 100%. При этом в области СШ дифференциальная проводимость падает до уровня проводимости квазичастиц. Также, наблюдаются многократные квазипериодические осцилляции порогового поля E_t и ширины ступенек Шапиро в зависимости от амплитуды ВЧ напряжения на образце.

Несмотря на то, что с момента экспериментального обнаружения скольжения ВЗП прошло немало времени, до сих пор нет универсальной

модели, описывающей динамику ВЗП и, в частности, осцилляции. Ранее осцилляции пытались описать функцией Бесселя, но описание было лишь качественным. Попыток описать осцилляции как функцию перемещения ВЗП за время, сравнимое с периодом ВЧ сигнала, не предпринималось.

В диссертации исследуется динамика ВЗП в квазиодномерном проводнике NbS_3 при воздействии ВЧ поля. Расскажем об особенностях этого соединения. В зависимости от условий роста можно получить, как минимум, две фазы NbS_3 . На первой, триклинной фазе, пайерлсовского перехода не наблюдается. Она имеет высокое сопротивление и проявляет полупроводниковые свойства. Фаза II, моноклинная. Уникальность этой фазы в том, что в ней происходит три пайерлсовских перехода, при каждом из которых образуется ВЗП. Температуры переходов: $T_{P0} = 450-470\text{K}$ (ВЗП-0), $T_{P1} \approx 365\text{ K}$ (ВЗП-1) и $T_{P2} = 150\text{K}$ (ВЗП-2).

Цель и задачи диссертационной работы

Выяснение физических механизмов, определяющих динамику ВЗП при синхронизации скольжения ВЗП-1 с внешним переменным электрическим полем ВЧ диапазона. В рамках этой цели были поставлены следующие задачи:

1. Отбор наиболее совершенных образцов NbS_3 моноклинной фазы, синхронизация ВЗП с внешнем ВЧ полем в которых, достигает 100% или приближается к этому значению.
2. Получение экспериментальных данных, таких как ВАХ при одновременном приложении постоянного и переменного напряжения ВЧ диапазона (от 20 до 800 МГц) для разных амплитуд ВЧ сигнала и температур, а также температурные зависимости сопротивления в диапазоне температур от 77 до 380 К.
3. Выяснение природы осцилляций порогового поля и ширин ступенек Шапиро в зависимости от амплитуды ВЧ поля. Поиск параметра, характеризующего воздействие ВЧ поля на ВЗП, определяющего период осцилляций.

4. Поиск универсального, не зависящего от модели движения ВЗП, описания синхронизации скольжения ВЗП в периодическом потенциале пиннинга.
5. Исследование динамики ВЗП при высоких температурах, вплоть до температуры пайерлсовского перехода, то есть, в области сильных флуктуаций. Использование эффекта синхронизации для выяснения механизма разрушения ВЗП при приближении температуры к T_{PI} .
6. Исследование ВАХ в режиме скольжения ВЗП при одновременном приложении ВЧ напряжения на двух частотах.

Научная новизна диссертационной работы

Научная новизна определяется выбором в качестве объекта исследования уникального соединения NbS_3 . Для выполнения задач, поставленных в диссертации, ключевым моментом оказались свойства ВЗП (ВЗП-1), которая существует при комнатной температуре и обладает высокой когерентностью скольжения. Актуальность результатов работы связана с тем, что ВЗП-1, при исключительно высокой когерентности, обладает и свойствами, характерными для ВЗП в разных материалах. Это делает соединение NbS_3 очень удобным для исследования общих свойств ВЗП и универсального описания её динамики, не зависящего от механизма пиннинга.

Научная новизна диссертационной работы заключается также в том, что:

1. Показано, что в единицах перемещения ВЗП за полупериод ВЧ поля осцилляции порогового поля и ступенек Шапиро строго периодичны, причем, с периодом равным периоду ВЗП.
2. Предложено и обосновано универсальное описание синхронизации скольжения ВЗП в периодическом потенциале. Предложенный подход объясняет природу осцилляций порогового поля и ширин ступенек Шапиро.
3. Исследована система ступенек Шапиро, возникающих при одновременном приложении ВЧ напряжения на двух частотах F и f . Для случая $F \gg f$ показано, что вокруг каждой из «основных»

ступенек Шапиро, соответствующих частоте F , возникают ступеньки-«сателлиты», токи которых соответствуют частотам $nF \pm mf$, где m и n – целые. Структуру ступенек-сателлитов можно описать в подвижной системе отсчёта, привязанной к ВЗП в режиме синхронизации с частотой F .

4. Наблюдалась синхронизация скольжения ВЗП при повышении температуры вплоть до T_{P1} (и даже выше). Анализ наблюдавшихся ступенек Шапиро позволил определить характерное время жизни флуктуаций ВЗП и его температурную зависимость в области пайерлсовского перехода.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы определяется тем, что в ней исследуются фундаментальные свойства ВЗП, проявляющиеся при синхронизации её скольжения с внешним переменным полем ВЧ диапазона. Многократные осцилляции порогового поля и ширины ступенек Шапиро в зависимости от ВЧ напряжения оказались строго периодическими по перемещению ВЗП за полупериод ВЧ сигнала. Данный подход позволил объяснить природу ступенек Шапиро и осцилляций их ширины.

Синхронизация скольжения ВЗП-1 при предельно высоких температурах позволяет выяснить механизмы разрушения ВЗП при приближении T к T_{P1} снизу, а также механизмы флуктуационной проводимости ВЗП в области T_{P1} . Полученный результат показал, что, при приближении к T_{P1} , время жизни доменов когерентной ВЗП уменьшается. При этом, синхронизация скольжения ВЗП возможна при условии, что частота ВЧ поля превышает обратное время жизни доменов. Таким образом, продемонстрирована возможность синхронизации ВЗП в области флуктуаций, определено характерное время жизни флуктуаций ВЗП, показано, что разрушение ВЗП при $T \rightarrow T_{P1}$ снизу можно описать моделью спонтанного проскальзывания фазы (СПФ) ВЗП.

Полученные результаты имеют прикладное значение. Показано, что образцы NbS_3 могут быть использованы как наноразмерные детекторы-

процессоры ВЧ-СВЧ излучения со спектральным разрешением, работающие при температурах вплоть до 360 К. При этом предложена универсальная (не зависящая от температуры) калибровка, позволяющая пересчитать ток ВЗП в частоту. Предельную рабочую частоту таких детекторов можно оценить значением 200 ГГц. Полученные в данной работе условия минимумов ширины ступенек Шапиро могут быть использованы – и использовалось в наших работах – для калибровки ВЧ или СВЧ напряжения непосредственно на образце.

Методология и методы исследования

Для проведения эксперимента были отобраны совершенные образцы NbS_3 -II. Были измерены их ВАХ при комнатной температуре. Критерием высокого качества образцов был резкий рост проводимости в полях выше порогового и полная синхронизация скольжения ВЗП в ВЧ поле.

Для исследования ВАХ образец, находящийся на подложке SiO_2 с атомарно гладкой поверхностью, монтировался в измерительную ячейку. Дифференциальная проводимость измерялась в режиме постоянного напряжения на переменном токе усилителем с синхронным детектором Stanford SR830. ВЧ сигнал подавался на образец с генератора Актаком AWG-4082. Обработка экспериментальных данных проводилась в математическом пакете Matlab. Для измерения температурных зависимостей образец монтировался в криостат. При этом образец помещался внутрь медной бомбы, обмотанной нагревателем. Там же находился датчик температуры. Криостат опускался в жидкий азот при низкотемпературных измерениях. Температура образца регулировалась глубиной опускания криостата, а при измерениях выше комнатной температуры – током нагревателя.

Для исследования перемещения ВЗП на микроскопических масштабах расстояний необходимо было точно знать величину ВЧ напряжения на образце. Для этого с помощью специального щупа, входящего в комплект ВЧ осциллографа, переменное напряжение было откалибровано непосредственно на образце на частотах до 300 МГц. Далее осцилляции ширины СШ, δV_i^* , были

исследованы при разных значениях ВЧ напряжения. В приближении безынерционного движения ВЗП, на основании ВАХ, измеренных в постоянном поле, были определены мгновенные значения скорости ВЗП в смешанном $V_{ac} + V_{dc}$ поле как функция времени. Затем было определено перемещение ВЗП за каждый полупериод ВЧ поля, и ширины СШ были построены как функция перемещения ВЗП за каждый полупериод.

Для исследования флуктуаций вблизи пайерлсовского перехода были исследованы температурно-частотные зависимости плотности заряда, переносимого ВЗП. С этой целью на наиболее совершенных образцах NbS_3 -II были измерены зависимости электропроводности от напряжения. Благодаря исключительно высокой когерентности ВЗП-1 удалось синхронизировать ее скольжение с ВЧ полем вплоть до $T_{PI} \approx 365$ К, температуры пайерлсовского перехода, и даже выше, примерно на 10 К. По отношению тока ВЗП к частоте ВЧ поля в режиме синхронизации была определена плотность заряда, переносимого ВЗП, как функция частоты и температуры.

Положения выносимы на защиту

1. Осцилляции порогового поля и ширин ступенек Шапиро в зависимости от амплитуды высокочастотного поля строго периодичны по величине перемещения волны зарядовой плотности за полупериод высокочастотного поля, причём период осцилляций равен периоду волны зарядовой плотности. Результат получен на монокристаллах (вискерах) NbS_3 с характерными размерами $(20-30) \text{ мкм} \times 10^{-2} \text{ мкм}^2$ в диапазоне частот 20-400 МГц и проверен на вискерах TaS_3 (10 МГц) и $NbSe_3$ (50 МГц).
2. Условия минимумов ширины ступенек Шапиро по амплитуде высокочастотного поля можно описать в рамках модели вынужденных колебаний частицы в периодическом потенциале.
3. Вид вольтамперных характеристик квазиодномерного проводника с волной зарядовой плотности в высокочастотном поле можно восстановить на основании вольтамперной характеристики,

измеренной без воздействия высокочастотного поля. При этом используются следующие условия: напряжения, при которых возникают ступеньки Шапиро, определяются суммой перемещений волны зарядовой плотности за первый и второй полупериод высокочастотного сигнала, а ширины ступенек Шапиро – разностью этих перемещений. Результат продемонстрирован на соединении NbS_3 на частоте 75 МГц.

4. При смещении частот в режиме скольжения волны зарядовой плотности на вольт-амперной характеристике рядом с каждой ступенькой Шапиро, определяемой более высокой частотой, возникает серия ступенек-сателлитов, расстояние между которыми определяется более низкой частотой. В подвижной системе отсчёта, привязанной к волне зарядовой плотности, поведение ступенек-сателлитов оказывается идентичным поведению обычных ступенек Шапиро, возникающих под действием напряжения на одной частоте. Результат подтверждён на соединении NbS_3 на паре частот $F=400$ МГц и $f=50$ МГц; аналогичные результаты получены на парах частот $F=3.2$ ГГц и $f=400$ МГц, а также $F=2.5$ ГГц и $f=400$ МГц.
5. Вблизи температуры пайерлсовского перехода возможна синхронизация скольжения волны зарядовой плотности с высокочастотным напряжением при условии, что его частота превышает обратное время жизни флуктуационно возникающих доменов волны зарядовой плотности. В NbS_3 при повышении температуры и приближении к пайерлсовскому переходу ($T_p \approx 365$ К) время жизни флуктуаций уменьшается по активационному закону, с энергией активации ~ 10000 К, в согласии с моделью спонтанного проскальзывания фазы.

Степень достоверности результатов и апробация результатов

Достоверность результатов подтверждается их согласованностью друг с другом и с известными ранее моделями, а также признанием научной общественностью при обсуждениях на семинарах, конференциях, конкурсах, положительными рецензиями статей при публикациях результатов в научных журналах. Центральный результат работы – периодичность осцилляций ширины ступенек Шапиро по перемещению ВЗП за полупериод ВЧ поля – получен на трёх разных соединениях. Аналогичный результат, в терминах фазы сверхпроводящего конденсата, проверен для джозефсоновского перехода.

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. XXXVIII Совещания по физике низких температур (Шепси 2018)
2. XVI Конференция «СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И КВАНТОВЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ» (Троицк 2018)
3. XXIII Международный симпозиум «НАНОФИЗИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА» (Нижний Новгород 2019)
4. XIV Российская конференция по физике полупроводников (Новосибирск 2019)
5. 62-й Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва 2019)
6. XVI Конференция «СИЛЬНО КОРРЕЛИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И КВАНТОВЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ» (Троицк 2019)
7. The 9th International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (Zhenjiang 2019)
8. 16-й молодежный конкурс им. Ивана Анисимкина (Москва 2019)
9. 17-й молодежный конкурс им. Ивана Анисимкина (Москва 2020)
10. 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ (Москва 2020)
11. 2-я Конференция Физика конденсированных состояний (Черноголовка 2021)
12. International School and Workshop on Electronic Crystals ECRYS-2022

Публикации

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 11 работах. Из них семь трудов опубликованы в виде статей в ведущих российских и зарубежных периодических научных изданиях; четыре – в виде тезисов докладов, озвученных на российских и международных конференциях. Все семь статей были опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, из них четыре статьи – в журналах, индексируемых в базах Web Of Science и Scopus. Сборники, в которых были опубликованы тезисы докладов, индексируются в РИНЦ.

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в диссертации Никонова С.А., получены автором лично или при его определяющем вкладе. В тексте диссертации отсутствует заимствованный материал без ссылки на авторов или источники заимствования. Также отсутствуют результаты научных работ, выполненных соискателем ученой степени в соавторстве, но без приведения ссылок на соавторов.

Основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Общий объем работы 78 страниц, включая 31 рисунок. Список литературы содержит 51 источник.

Во введении представлена цель работы и продемонстрирована её актуальность, а также определены задачи, обоснована научная новизна, изложены положения, выносимые на защиту, показана научная и практическая значимость результатов, полученных в ходе выполнения диссертации.

В главе 1 экспериментально исследованы многократные апериодические (квазипериодические) осцилляции ширин ступенек Шапиро (СШ), δV_i^* , и порогового напряжения («0-й СШ»), $2V_i^*$, в зависимости от ВЧ напряжения, V_{rf} . **В разделе 1.1** приводится описание эффекта синхронизации скольжения ВЗП с внешним высокочастотным полем. **В разделе 1.2** представлены наборы ВАХ, полученных при приложении внешнего ВЧ напряжения разной амплитуды.

Описана методика определения ширин ступенек Шапиро (СШ) и порогового напряжения («0-й» СШ). Продемонстрирован алгоритм, преобразующий колебания, приближённо описываемые функцией Бесселя, в периодические. Для этого из ВАХ необлученного образца необходимо получить зависимость $I_{CDW}(V_{dc})$. Затем для каждой СШ нужно проинтегрировать $I_{CDW}(V(t))$ по времени, для каждого полупериода ВЧ сигнала, то есть, найти заряд, перенесённый ВЗП. Разделив результат на отношение тока ВЗП к фундаментальной частоте, I_{CDW}/f_f , получим перемещение ВЗП в единицах λ , где λ – период ВЗП. Если ширины СШ построить как функцию этих перемещений (рисунок 1), их осцилляции окажутся строго периодическими с периодом λ . Данный подход позволяет описать осцилляции СШ и порогового поля без привязки к какой-либо определённой модели пиннинга или движения ВЗП.

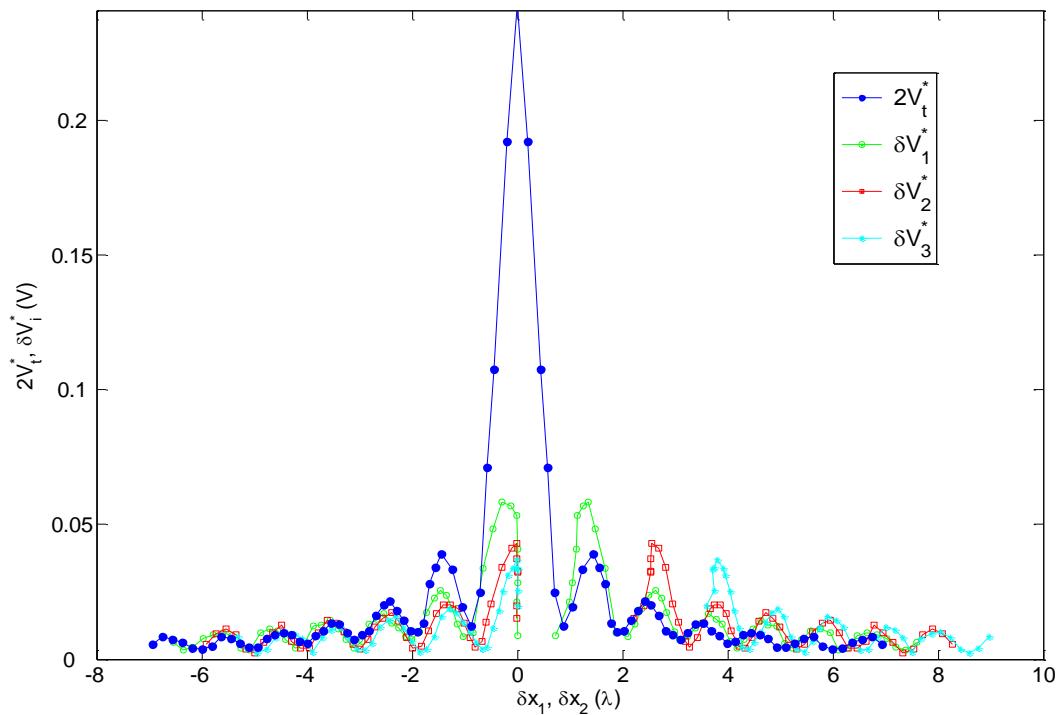


Рисунок 1. Зависимость $2V_t^*$ и δV_i^* от перемещение ВЗП за отрицательный и положительный полупериоды ВЧ напряжения (75МГц).

В разделе 1.3 полученные периодические осцилляции проанализированы исходя из общих представлений о движении ВЗП в периодическом потенциале пиннинга. Установлена природа минимумов и максимумов ширин СШ и порогового напряжения.

В разделе 1.4 продемонстрирована возможность предсказать положение СШ на ВАХ по напряжению для любого значения V_{rf} , зная только фундаментальное отношение и имея в распоряжении ВАХ без приложения ВЧ поля. Можно также вычислить значения V_{rf} , при которых будут наблюдаться максимумы и минимумы ширин СШ. Также продемонстрирована возможность восстановления формы ВАХ.

Во второй главе представлено исследование ВАХ в режиме скольжения ВЗП при одновременном приложении ВЧ напряжения к образцу NbS_3 на двух частотах. Частоты ВЧ поля отличались примерно на порядок. Мы обнаружили, что систему СШ при этом можно охарактеризовать как набор основных СШ и их спутников: СШ, обусловленные более высокой частотой F , окружены ступеньками Шапиро, положение которых определяется более низкой частотой f . Спутники расположены относительно основной СШ подобно тому, как расположены обычные СШ относительно области $|V| < V_t$, то есть относительно 0-й СШ: токи спутников соответствуют частотам $nF \pm mf$, где m и n – целые.

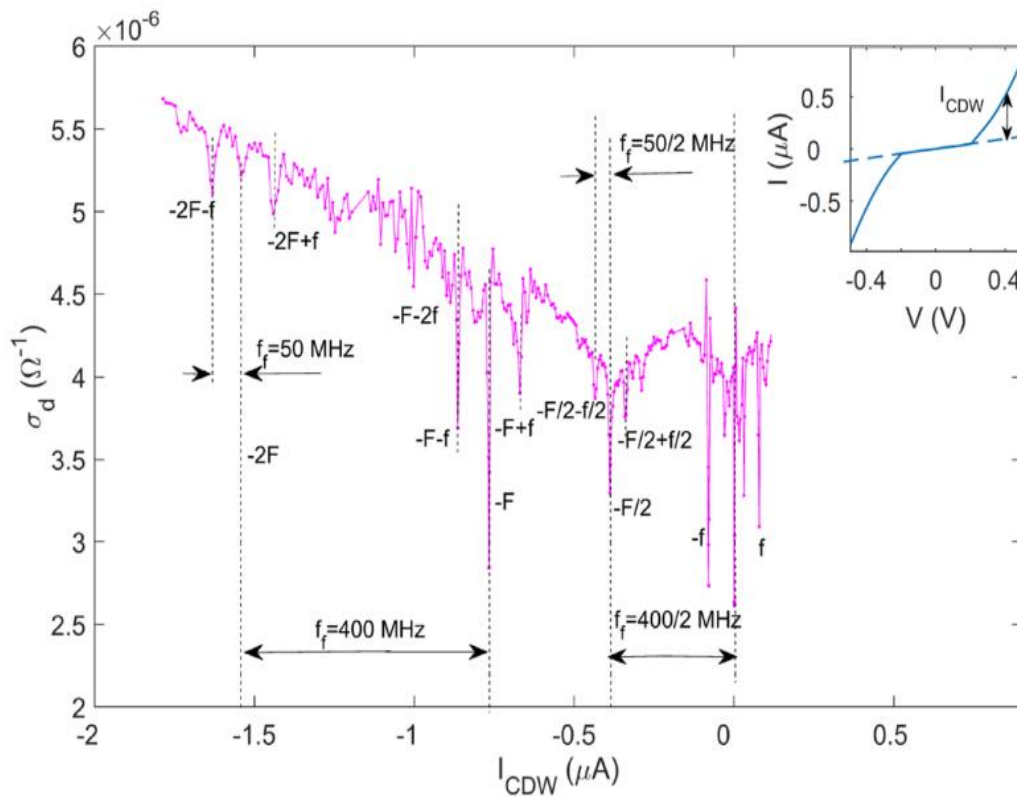


Рисунок 2. Зависимость σ_d от тока ВЗП I_{cdw} при одновременном облучении образца ВЧ полем с частотой $f = 50$ МГц, и ВЧ полем с частотой $F = 400$ МГц. На вставке показана зависимость $I(V)$ без облучения.

Поведение сателлитов, включая осцилляции их ширин в зависимости от мощности ВЧ сигнала, идентично поведению обычных СШ. Осцилляции ширин сателлитов можно описать так же, как осцилляции обычных СШ, если перейти в подвижную систему отсчета, связанную с движущейся ВЗП. Для этого за точку отсчёта скорости ВЗП ($V, I = 0$) следует взять середину основной СШ. Таким образом, основная СШ рассматривается как 0-я. Это позволяет моделировать образцы с регулируемыми значениями V_t , в частности, – с чрезвычайно низкими пороговыми полями и высокой когерентностью скольжения. Эквивалентность основных СШ и нулевой СШ можно понять, если рассматривать синхронизацию ВЗП как вынужденные колебания в периодическом потенциале пиннинга.

В третьей главе исследуется синхронизация скольжения ВЗП-1 с ВЧ полями в квазиодномерном проводнике NbS_3 -II в диапазоне температур 300–373 К. Максимальные температуры, при которых наблюдались СШ, превышают температуру перехода T_{P1} примерно на 10 К. Чем выше частота, тем более выражены ступеньки Шапиро при фиксированной температуре и тем выше максимальная температура их наблюдения. Это позволило сделать следующий качественный вывод: когерентное скольжение флуктуаций ВЗП возможно при достаточно высоких напряжениях, а его синхронизация возможна с переменным напряжением достаточно высокой частоты.

Далее отмечается, что вблизи температуры T_{P1} пайерлсовского перехода происходит спонтанное проскальзывание фазы (СПФ) ВЗП. Анализ экспериментальных результатов позволил прийти к заключению, что коллективный вклад в избыточную проводимость вблизи T_{P1} , $\sigma_{ex}(0)$, связанный с индуцированным СПФ движением ВЗП, можно не учитывать.

Из частотных зависимостей отношения I_{cdw}/f_f , характеризующего плотность заряда ВЗП в области СШ, определена характерная частота f_0 , при которой рост I_{cdw}/f_f насыщается. Сделан вывод, что $1/f_0$ является оценкой времени жизни

флуктуаций ВЗП. Показано, что f_0 растёт с температурой с энергией активации $W \approx 10^4$ К (рис. 3). Такие же значения W описывают рост избыточной проводимости $\sigma_{ex}(0)$ вблизи T_{PI} . Этот результат свидетельствует о том, что f_0 – это средняя частота СПФ, f_{sps} . Если частота облучения значительно выше f_{sps} , скольжение флуктуаций ВЗП может быть полностью синхронизировано.

В то же время, СШ можно различить при температурах примерно на 10 К выше T_{PI} , и даже при воздействии относительно низкочастотного (30 МГц) ВЧ напряжения. Этот результат свидетельствует о том, что долгоживущие домены ВЗП могут формироваться значительно выше T_{PI} .

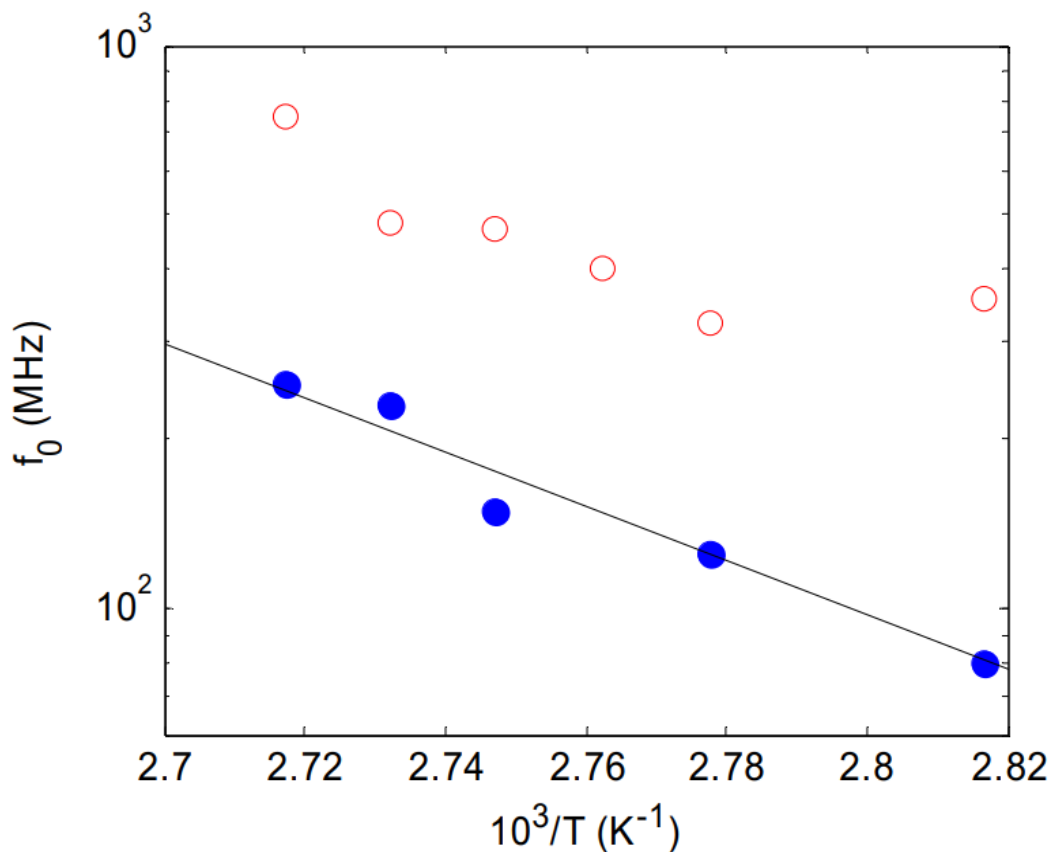


Рисунок 3. Температурная зависимость частоты f_0 , определённой двумя способами: из приближения $I_{CDW}(T)$ арктангенсом (синие закрашенные кружки) и «на глаз», как частота перехода от линейного роста $I_{CDW}(f)$ при низких f к $I_{CDW} = \text{const}$ при высоких f . Наклон прямой соответствует энергии активации $W = 11000$ К.

Отношение I_{CDW}/f_f , то есть, плотность заряда ВЗП, падает при $T \rightarrow T_{P1}$. Однако если к I_{CDW} добавить ток избыточных квазичастиц $V\sigma_{ex}(0)$, отношение этой величины к f_f остается постоянным вплоть до T_{P1} . Этот неожиданный результат объясняется совпадением подвижности ВЗП в высоких полях и подвижности квазичастиц, образующих ВЗП. Он отражает «закон сохранения заряда»: с ростом температуры заряд, переносимый ВЗП, уменьшается за счет заряда, переносимого квазичастицами.

Поскольку модель СПФ вблизи T_{P1} имеет универсальный характер, аналогичные эффекты можно ожидать в разных квазиодномерных проводниках в области температур и полей, при которых фундаментальная частота скольжения ВЗП близка к частоте СПФ.

Заключение

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Экспериментально показано, что осцилляции порогового поля и ширины ступенек Шапиро в NbS_3 -II являются строго периодической функцией перемещения ВЗП за полупериод ВЧ поля. Аналогичные результаты получены на соединениях с ВЗП $NbSe_3$ и TaS_3 . Во всех случаях период осцилляций оказался равным периоду ВЗП λ . Показана возможность описания движения ВЗП, считая, что её мгновенная скорость определяется мгновенным значением ВЧ поля, то есть, в безынерционном приближении. Сделан вывод, что перемещение ВЗП за полупериод ВЧ поля является ключевым параметром, характеризующим динамику ВЗП в режиме синхронизации.

2. Установлено, что минимумы ширины порогового поля и ступенек Шапиро достигаются при условии, что ВЗП за каждый полупериод ВЧ поля перемещается на целое число λ .

3. Приближение безынерционного отклика ВЗП на ВЧ поле позволяет восстановить вид ВАХ для любого значения приложенного ВЧ напряжения на основании ВАХ, измеренной без облучения. При этом можно предсказать положение СШ на ВАХ и их относительную ширину.

4. Анализ ВАХ, измеренных при смещении двух частот, $F \gg f$, показал, что возникающую при этом систему СШ можно описать как набор «основных» СШ, определяемых частотой F , каждая из которых окружена «спутниками», расстояние до которых (разность токов ВЗП) определяется частотой f . Поведение «спутников», включая осцилляции их ширин в зависимости от ВЧ напряжения, идентично поведению обычных СШ, если описывать их в подвижной системе отсчёта, привязанной к движущейся ВЗП в области основной СШ.

5. В области температуры пайерлсовского перехода возможна синхронизация скольжения флуктуаций ВЗП при условии, что время жизни флуктуаций больше, чем период ВЧ напряжения. Время жизни флуктуаций при приближении к T_p снизу спадает по активационному закону (для NbS_3 энергия активации ~ 10000 К), что согласуется с моделью спонтанного ПФ.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Никонов С.А., Зыбцев С.Г., Покровский В.Я. Влияние флуктуаций на эффекты синхронизации волны зарядовой плотности вблизи пайерлсовского перехода в квазиодномерном соединении NbS_3 II фазы //Нелинейный мир. – 2018. – Т. 16. – №. 2. – С. 31-33.
2. Покровский В.Я., Зыбцев С.Г., Никонов С.А. Периодические осцилляции порогового поля и ступенек Шапиро в зависимости от перемещения волны зарядовой плотности //Нелинейный мир. – 2020. – Т. 18. – №. 1. – С. 45-47.
3. Зыбцев С.Г., Покровский В.Я., Никонов С.А., Майзлах А.А. и Зайцев-Зотов С.В. Плотность заряда и подвижность волн зарядовой плотности в квазиодномерном проводнике NbS_3 //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 117. – №. 2. – С. 158-164.
4. Zybtev S.G., Nikonov S.A., Pokrovskii V.Y., Pavlovskiy V.V. and Starešinić D. Step-by-step advancement of the charge density wave in the rf-synchronized modes and oscillations of the width of Shapiro steps with respect to the rf power applied //Physical Review B. – 2020. – V. 101. – №. 11. – P. 115425.
5. Nikonov S.A. et al. Prediction of the effects of rf irradiation on the I–V curves of a CDW compound //Applied Physics Letters. – 2021. – V. 118. – №. 21. – P. 213106.

6. Zybtssev S.G., Nikonov S.A., Pokrovskii V.Y. Spontaneous phase slippage and charge density wave synchronization near the Peierls transition //Physical Review B. – 2020. – V. 102. – №. 23. – P. 235415.
7. Nikonov S.A., Zybtssev S.G., Pokrovskii V.Y. RF wave mixing with sliding charge-density waves //Applied Physics Letters. – 2021. – V. 118. – №. 25. – P. 253108.
8. Nikonov S.A. et al. Shapiro Steps in NbS₃-II at the Temperatures of the Charge-density Wave Transition //2019 IEEE International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). – IEEE, 2019. – P. 82-85.
9. Zybtssev S.G., Nikonov S.A., Pokrovskij V.Y. Contact phenomena in a quasi-one-dimensional NbS₃ conductor with a charge density wave //II International conference «Physics of condensed states» dedicated to the 90th anniversary of the birth of Academician Yu.A. Osipyan (1931-2008). Collection of abstracts. – 2021.
10. Зыбцев С. Г., Никонов С.А. и др. Особенности волн зарядовой плотности в квазиодномерном проводнике NbS₃-II, обнаруженные при изучении ступенек Шапиро //Сильно коррелированные электронные системы и квантовые критические явления. – 2020. – С. 63-64.
11. Покровский В. Я., Никонов С.А. и др. волны зарядовой плотности в моноклинной фазе NbS₃ и их связь с дефектной структурой кристалла //Физика конденсированных состояний. – 2021. – С. 24-24.