

На правах рукописи

Орлов Андрей Петрович

МЕЖСЛОЕВАЯ ТУННЕЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ
КВАЗИОДНОМЕРНЫХ ПРОВОДНИКОВ
С ВОЛНОЙ ЗАРЯДОВОЙ ПЛОТНОСТИ

01.04.07 – Физика конденсированного состояния

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Латышев Юрий Ильич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Кошелец Валерий Павлович

кандидат физико-математических наук,
Преображенский Владимир Борисович

Ведущая организация: Институт неорганической химии
им. А.В.Николаева СО РАН

Защита состоится «20» июня 2008 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета Д002.231.01 при 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 РАН

Автореферат разослан «16» мая 2008 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор

С.Н. Артеменко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее время исследования низкоразмерных наноматериалов и структур на их основе стало одним из определяющих направлений физики твердого тела. Это связано прежде всего с неослабевающим интересом к фундаментальным свойствам конденсированных электронных состояний с макроскопической когерентностью, реализуемых в этих материалах, таких как высокотемпературная сверхпроводимость (ВТСП), волны зарядовой и спиновой плотности (ВЗП/ВСП) [1]. Необходимо отметить большие потенциальные возможности практического использования низкоразмерных материалов в твердотельной наноэлектронике. Например, реализуемые в этих материалах естественные туннельные переходы, образуемые чередованием атомно тонких проводящих и изолирующих слоев имеют размеры порядка постоянной решетки, то есть единиц нанометров, что дает принципиальную возможность использования нелинейных туннельных явлений для создания электронных приборов. Традиционные методы туннельной спектроскопии квазиодномерных материалов чрезвычайно затруднены в силу малости поперечных геометрических размеров соединений данного типа. Проблематичным является и создание искусственных туннельных барьеров на их поверхности. Развиваемый в работе метод использует естественные туннельные барьеры, обусловленные самой кристаллической структурой этих материалов, что определяет высокое качество полученных туннельных спектров.

Первая реализация такого типа туннельных структур была сравнительно недавно продемонстрирована на слоистых высокотемпературных сверхпроводниках типа $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$ [2]. Настоящая работа продолжает развитие этого метода для спектроскопии другого класса слоистых материалов с волной зарядовой плотности (ВЗП).

Цель работы заключалась в исследовании межслоевых туннельных спектров в пайерлсовском состоянии с ВЗП в двух широко исследуемых квазиодномерных материалах NbSe_3 и TaS_3 [3], представляющих собой

реализацию полного и частичного пайерсовских переходов; исследование в широком диапазоне температур температурной зависимости энергетической щели ВЗП в обоих материалах; поиск эффектов взаимной соизмеримости двух ВЗП, сосуществующих в NbSe_3 при низких температурах; исследование влияния статических (до 28 Тл) и импульсных (до 55 Тл) магнитных полей на энергетическую щель и температуру пайерсовского перехода в NbSe_3 .

Научная новизна полученных результатов заключается в адаптации метода межслоевой туннельной спектроскопии к классу слоистых материалов с волной зарядовой плотности и получение с его помощью следующих новых фундаментальных результатов: определены и исследованы энергетические щели высокотемпературной и низкотемпературной ВЗП в NbSe_3 , а также в o-TaS_3 и установлен характер их температурной зависимости; обнаружен эффект взаимодействия двух ВЗП в NbSe_3 при низких температурах в области их сосуществования; обнаружены и исследованы особенности туннельных спектров, локализованные внутри энергетической щели ВЗП в NbSe_3 ; впервые проведена спектроскопия энергетической щели ВЗП в сильных магнитных полях до 55 Тл, показана возможность индуцирования энергетической щели магнитным полем выше температуры пайерсовского перехода; обнаружен и объяснен немонотонный характер зависимости температуры пайерсовского перехода от величины магнитного поля.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Определение энергетической щели волны зарядовой плотности (ВЗП) методом межслоевой туннельной спектроскопии в NbSe_3 и o-TaS_3 .
- Обнаружение взаимодействия двух ВЗП, сосуществующих в NbSe_3 при низких температурах.
- Обнаружение эффекта увеличения температуры пайерсовского перехода и индуцирования энергетической щели ВЗП в NbSe_3 в сильных магнитных полях.

Достоверность полученных результатов подтверждена воспроизводимостью данных на большом числе образцов и их признанием научной общественностью. Определенные в работе значения энергетической щели ВЗП согласуются с результатами измерений, полученными независимыми методами. Часть обнаруженных эффектов количественно согласуются с результатами теоретических расчетов, а также теоретических предсказаний.

Практическая значимость работы связана с разработкой нового независимого метода спектроскопии низкоразмерных материалов с ВЗП. Этот метод уже зарекомендовал себя при исследовании слоистых высокотемпературных сверхпроводников. В работе продемонстрированы высокие потенциальные возможности этого метода на другом классе материалов – квазиодномерных проводников с ВЗП.

Личный вклад автора. Автор внес личный вклад в развитие межслоевой туннельной спектроскопии квазиодномерных проводников с ВЗП, который состоял в получении экспериментального материала, опубликованного в статьях, в объяснении поведения щели и состояний внутри нее от температуры и магнитного поля. Автором создана высокочувствительная система компьютерного сбора данных для измерения межслоевых туннельных спектров, в том числе система быстрого сбора данных для измерения спектров в импульсных магнитных полях. Им проведена значительная часть измерений и большая часть обработки экспериментальных данных. Участие в выработке интерпретации полученных результатов.

Апробация работы. Результаты диссертации были доложены на российских и международных конференциях: International Workshop on Electronic Crystals (Cargese, France, 21 - 27 August 2005); 4th International conference on magnetic and superconducting materials (Agadir, Morocco, 5 - 8 September 2005); на семинаре “Сильно коррелированные системы и квантовые критические явления” (ИФВД РАН, Троицк, 15 июня 2006); International workshop on Recent Developments in Low Dimensional Charge Density wave Conductors (Skradin, Croatia, 29 June – 3 July 2006); 5th International Workshop on

the intrinsic Josephson effect in high- T_c superconductors, Plasma-2006 (London, 17 –19 July 2006); International workshop on quantum mesoscopics (Montpellier, France, 9-12 October, 2006); на семинаре “Сильно коррелированные системы и квантовые критические явления” (ИФВД РАН, Троицк, 14 июня 2007); International School “Magnetic Fields for Science” (Cargese, France, 27 August – 8 September 2007); NATO Advanced Research Workshop on electron transport in nanosystems, (Yalta, Crimea, 17 - 21 September 2007); VIII Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, 30 сентября – 5 октября 2007); EuroMagNET Conference (Nijmegen, Netherlands, 22 - 23 October 2007).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 научных статей (список приведен в конце), из них 2 статьи в ведущих российских и 3 статьи в зарубежных журналах, внесенных в список ВАК. Общий объем опубликованных работ по теме диссертации составил 33 страницы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 103 страницы, 53 рисунка, 1 таблицу и библиографию из 66 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследуемой проблемы, поставлены цели и задачи диссертационной работы, включая научную новизну и практическую значимость полученных результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

Глава 1 имеет обзорно-аналитический характер. В ней изложены основные сведения, необходимые для понимания оригинальных частей диссертации. В ней представлено описание конденсированного состояния с ВЗП (характеризующегося пространственной модуляцией коррелированной электронной плотности с волновым вектором $Q=2k_F$, где k_F - фермиевский волновой вектор и энергетической щелью 2Δ в электронном спектре), сделан обзор существующих методов спектроскопии энергетической щели ВЗП, среди

которых подробно рассмотрен метод туннельной спектроскопии. Далее в главе рассмотрен метод межслоевой туннельной спектроскопии на примере слоистых ВТСП структур, рассмотрены его преимущества, приведен краткий обзор методов получения слоистых туннельных структур. В конце главы сформулирована постановка задачи исследований: развитие метода межслоевого туннелирования для спектроскопии состояния с ВЗП в материалах с полной и частичной диэлектризацией спектра, в широкой области температур, включая флуктуационную область, в условиях взаимодействия двух сосуществующих ВЗП в NbSe_3 , а также в условиях воздействия сильных магнитных полей.

Глава 2 посвящена описанию исследуемых образцов и методики их измерений и состоит из трех разделов и выводов. В разделе 2.1 дано описание и характеристика изучаемых многослойных структур. Во многих проводниках с ВЗП цепочечного типа MX_3 (где М – металл, X- халькогенид) проводящие цепочки организованы в элементарные, хорошо проводящие слои, изолированные друг от друга, изолирующими слоями атомной толщины. В случае NbSe_3 изолирующие слои образуются двойными слоями оснований селеновых призм расположенных вокруг цепочек атомов ниобия, рис. 1а [4]. Известно, что длина свободного пробега носителей в плоскости слоев составляет несколько мкм, а анизотропия проводимости вдоль и поперек слоев достигает 10^4 при низких температурах [2]. Оценка показывает, что в этих условиях длина свободного пробега поперек слоев составляет величину, меньшую расстояния между проводящими слоями $\sim 10\text{\AA}$. Это указывает на то, что транспорт поперек слоев имеет туннельный характер. Подобная ситуация имеет место в анизотропных ВТСП материалах типа $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+x}$, в которых анизотропия проводимости вдоль и поперек слоев также составляет 10^4 , и туннельный характер поперечной проводимости доказан многочисленными экспериментами [2,5].

Слоистые структуры для исследования межслоевого туннелирования (мезы) получались методом двустороннего или латерального травления тонких

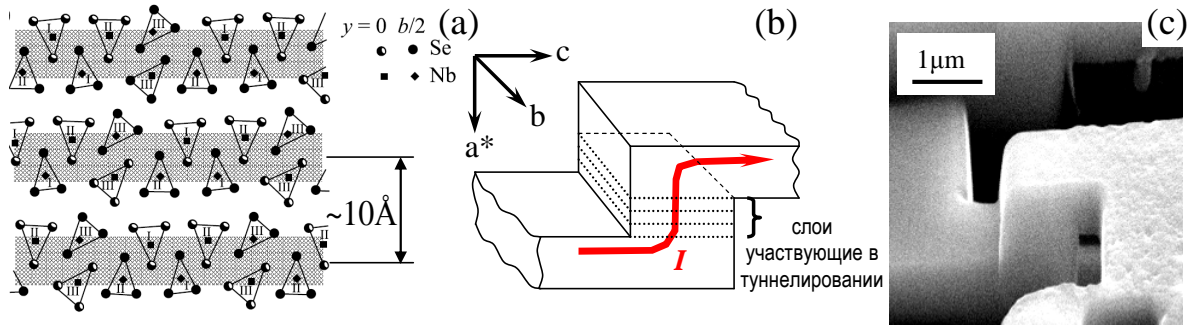


Рис. 1. (а) Слоистая структура NbSe₃ в плоскости *a c*, штриховкой выделены проводящие слои; (б) схема межслоевого туннельного перехода; (с) SEM изображение мезы с размерами 1x1x0.1 мкм, полученной двухсторонним травлением монокристалла NbSe₃ в фокусированных ионных пучках.

монокристаллов NbSe₃ и о-TaS₃ в фокусированных ионных пучках [5]. Латеральные размеры мез составляли (1 - 1.5) мкм x (1 - 1.5) мкм, а размер поперек слоев – 30 - 200 нм. Выбор малых латеральных размеров, меньших длины свободного пробега в плоскости слоя, обеспечивает когерентность туннелирования. Сопротивление мез при комнатной температуре варьировалось от 100 Ом до единиц кОм, для NbSe₃ и от 100 до 300 Ом для TaS₃. На рис. 1б показана схема протекания тока через мезу, а на рис. 1с изображена фотография мезы NbSe₃ с размерами 1 мкм x 1 мкм x 0.1 мкм полученной в сканирующем электронном микроскопе (SEM).

В разделе 2.2 изложена методика измерений межслоевых туннельных спектров. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) осуществлялись 4-х зондовым методом. Постоянный ток *I* через мезу задавался источником тока, а напряжение *V* снималось с электродов расположенных в непосредственной близости от мезы. Вследствие высокой анизотропии материала и геометрических соотношений размеров мезы к ширине (20 – 40 мкм) и толщине (1 - 2 мкм) исходного кристалла в “берегах” падает пренебрежимо малая часть от общего напряжения, составляющая меньше 0.1%. Спектры дифференциальной проводимости $dI/dV(V)$ получались численным дифференцированием исходных ВАХ.

При образовании энергетической щели ВЗП возникает резкий максимум плотности состояний вблизи края щели [1]. Поэтому туннельный ток на ВАХ должен резко возрастать при смещениях вблизи $V = \pm 2\Delta/e$, а на зависимости dI/dV от V должны появиться пики при смещениях $-2\Delta/e$ и $+2\Delta/e$. Положение этих пиков на зависимости дифференциальной проводимости от напряжения смещения и связывается с энергией щели (2Δ).

В разделе 2.3. описана экспериментальная установка для измерения туннельных спектров слоистых наноструктур. Система обеспечивает измерение ВАХ слоистых структур, как в режиме заданного постоянного тока (1 пА – 100 мА), так и в режиме заданного напряжения (1 мкВ – 40 В), с предельной точностью измерений напряжения ~ 1 нВ, а также обеспечивает автоматическую стабилизацию температуры, с точностью не хуже 0.01К.

Глава 3 посвящена спектроскопии энергетической щели ВЗП и состоит из пяти разделов и выводов. В разделе 3.1. изложены результаты измерений и изучения межслоевых туннельных спектров NbSe_3 и $o\text{-TaS}_3$ при низких температурах $T \ll T_p$, где T_p – температура пайерлсовского перехода. На рис. 2 показана измеренная зависимость дифференциальной проводимости от

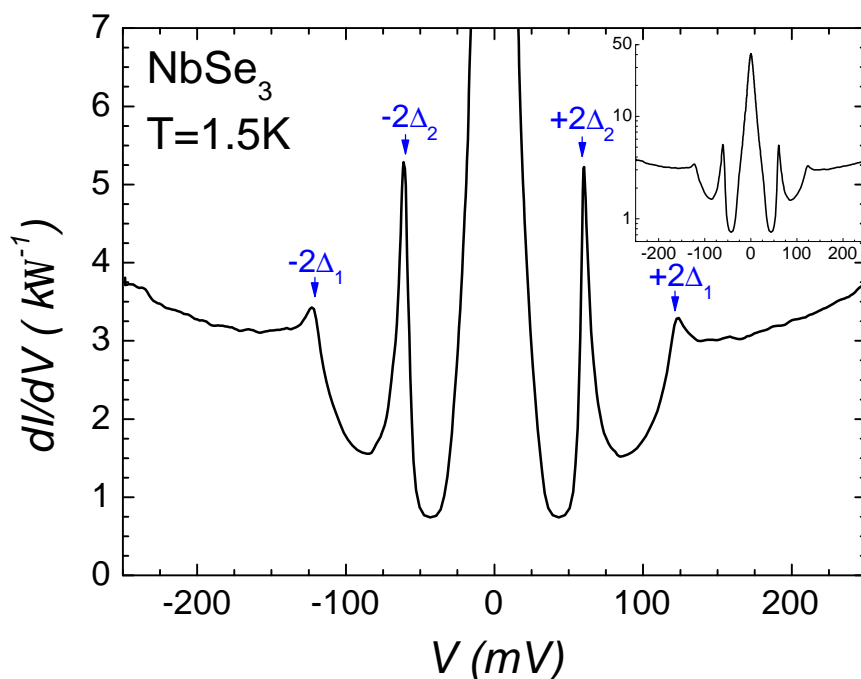


Рис. 2. Межслоевой туннельный спектр $dI/dV(V)$, измеренный на мезе NbSe_3 при $T=1.5\text{K}$.

напряжения смещения $dI/dV(V)$ мезы NbSe_3 при температуре $T = 1.5$ К. На графике видны пики, соответствующие щелям низкотемпературной ВЗП (ВЗП 2) (≈ 60 мВ) и высокотемпературной ВЗП (ВЗП 1) (≈ 130 мВ) и пик при нулевом смещении (вставка на рис. 2). Пик при нулевом смещении изучался ранее [4], где он связывался с когерентным межслоевым туннелированием носителей, несконденсированных в ВЗП. Найденные из этих измерений значения энергетической щели согласуются с результатами сканирующей туннельной микроскопии (STM) [6], фотоэмиссионной спектроскопии (ARPES) [7], оптических измерений [8], а также с результатами микроконтактной спектроскопии, полученными на контактах NbSe_3 - NbSe_3 в направлении оси a^* [4]. Спектры $dI/dV(V)$ о- TaS_3 при низких температурах ($T < T_p/2$) имеют пики при напряжениях смещения 200 мВ. Положение пиков согласуется с величиной энергетической щели, определенной из температурной зависимости холловской эдс, и фотопроводимости [9]. Это сравнение показывает, что метод межслоевой туннельной спектроскопии является независимым методом определения энергетической щели ВЗП.

В разделе 3.2. исследовано взаимодействие двух ВЗП, сосуществующих в NbSe_3 при температурах ниже второго пайерлсовского перехода. Для этого были проведены детальные измерения туннельных спектров, при фиксированных температурах при последовательном уменьшении температуры с малым шагом ≈ 2 -5 К в диапазоне от 1.5 – 170 К. Несмотря на то, что форма спектров сильно меняется с изменением температуры, интегральная характеристика $S = \int_{-V_0}^{+V_0} (dI/dV)dV$ в пределе, когда V_0 значительно превышает $2\Delta_{1,2}$ практически не зависит от температуры (рис. 3а). Этот результат подтверждает, что измеряемая зависимость $dI/dV(V)$ соответствует плотности состояний, а ее интеграл соответствует полному числу состояний, которое не зависит от температуры. Температурные зависимости щелей (рис. 3б) в целом соответствуют температурной зависимости, определяемой моделью Бардина, Купера и Шриффера (БКШ), за исключением флуктуационной области выше

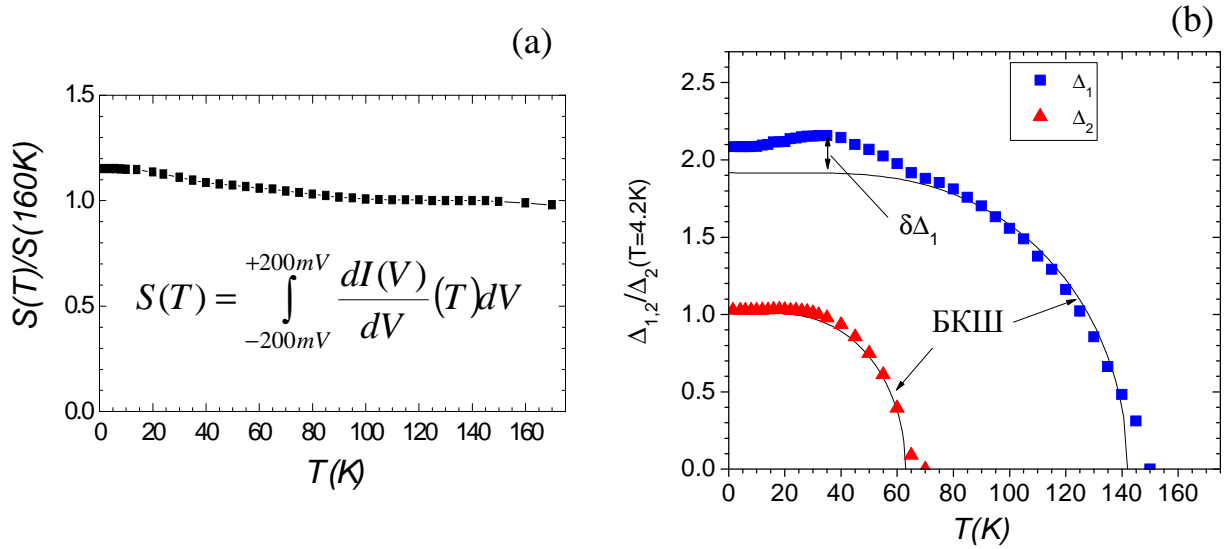


Рис. 3. Температурные зависимости: (а) интегральной характеристики спектров $S(T)$; (б) положения щелевых пиков низкотемпературной и высокотемпературной ВЗП.

T_{p1} . Из эксперимента видно, что ниже T_{p2} наблюдается дополнительное увеличение щели высокотемпературной ВЗП $\Delta\delta_1$. Это указывает на взаимодействие ВЗП 2 и ВЗП 1 в NbSe_3 . Взаимовлияние сосуществующих в NbSe_3 ВЗП было предсказано теоретически [10], где оно связывалось с эффектом взаимной соизмеримости двух ВЗП с вектором обратной решетки $2(q_1+q_2) \cong (1,1,1)$, где $q_1 = (0, 0.241, 0)$, $q_2 = (0.5, 0.260, 0.5)$ – волновые вектора высокотемпературной и низкотемпературной ВЗП.

Теоретически в [10] было показано, что подобное взаимодействие обеспечивает дополнительный член в свободной энергии Гинзбурга-Ландау, обусловленный взаимодействием фаз ВЗП j_1 и j_2

$$F_2 = F_1(\Delta_1) + A_2\Delta_2^2 + B_2\Delta_2^4 + B_+\Delta_1^2\Delta_2^2 \cos 2(j_1 + j_2)$$

Здесь $F_1(\Delta_1)$ соответствует свободной энергии, связанной с образованием Δ_1 , а A_2 и B_2 стандартные коэффициенты Гинзбурга-Ландау разложения свободной энергии по параметру порядка Δ_2 . Четвертый интерференционный член описывает взаимодействие двух ВЗП. Этот дополнительный член описывает взаимное увеличение модуля параметра порядка каждой ВЗП. В частности,

предсказывалось, что при понижении температуры ниже T_{p2} можно ожидать небольшого увеличения щели Δ_1 .

Ранее этот эффект искался с помощью структурных дифракционных методов, однако в первых работах с имевшейся в то время точностью не было обнаружено изменений ни в положении, ни в интенсивности сателлитного пика высокотемпературной ВЗП при понижении температуры ниже T_{p2} . В более поздних работах было установлено некоторое взаимодействие двух ВЗП в условиях, когда одна из них или обе переходят в состояния скольжения под действием электрического поля, однако статического эффекта фазовой соизмеримости двух ВЗП до последнего времени не наблюдалось. Высокая чувствительность метода межслоевой туннельной спектроскопии позволила его обнаружить.

В разделе 3.3. изучены особенности межслоевых туннельных спектров NbSe_3 , обнаруженные при энергиях меньше энергетической щели ВЗП 2Δ . Одни из них проявляются при энергиях $\sim \frac{2}{3}\Delta$ и могут быть идентифицированы как широкие пики на межслоевых туннельных спектрах. Другая особенность проявляется на еще меньшей шкале энергий $V = V_t \sim 0.1\Delta$. и проявляется, как порог увеличения межслоевого туннелирования при $V > V_t$. Наличие этих особенностей указывает на существование характерных низкоэнергетических возбуждений ВЗП с энергиями $\approx \frac{2}{3}\Delta$ и $\approx kT_p$ (k - константа Больцмана), оказывающих влияние на неупругое межслоевое туннелирование. Теоретически известные динамические возбуждения ВЗП - амплитудные и фазовые солитоны имеют близкую энергию $E_{as} = 2\Delta/\pi$ [11,12], $E_{ps} \approx kT_p$ [13].

В разделе 3.4. изучены межслоевые туннельные спектры в области флуктуаций ВЗП выше температур пайерлсовских переходов T_{p1} и T_{p2} в NbSe_3 . Показано, что при температуре пайерлсовского перехода щелевые пики сливаются, образуя широкий максимум при нулевом смещении. Наличие этого максимума связывается с избыточной плотностью состояний вблизи уровня Ферми вследствие сильных одномерных флуктуаций ВЗП вдоль цепочек. Этот максимум наблюдается до очень высоких температур, вдвое превышающих T_p ,

что указывает на широкую температурную область их существования. Это наблюдение подтверждается данными по рентгеновской дифракции на NbSe_3 [14]. Полученные результаты указывают на перспективность межслоевого туннелирования для изучения флуктуаций ВЗП.

В разделе 3.5. проведено сравнение характера межслоевого туннелирования в материалах ВТСП и с ВЗП. Показано, что при низких температурах в обоих материалах оно имеет когерентный характер. Отмечено также, что разрушение фазовой когерентности с ростом тока (ВТСП) или электрического поля (в случае ВЗП) поперек слоев происходит, начиная с наиболее слабого перехода, и имеет пороговый характер.

Глава 4 посвящена межслоевой туннельной спектроскопии ВЗП в NbSe_3 в магнитных полях и состоит из 3 разделов и выводов. Вопрос о возможности стимулирования энергетической щели в NbSe_3 возник более 20 лет назад [15] после обнаружения аномально большого магнетосопротивления в этом материале. В [15] было предположено, что дополнительный вклад в магнетосопротивление возникает из-за подавления магнитным полем “карманов” поверхности Ферми с несконденсированными носителями, увеличивая тем самым число носителей сконденсированных в ВЗП. Механизм подавления “карманов” был рассмотрен в работе Горькова и Лебеда [16], где он связывался с улучшением условий нестинга ВЗП в магнитном поле. Экспериментальных исследований энергетической щели в NbSe_3 в сильных магнитных полях до последнего времени не проводилось. В представленной диссертационной работе были проведены исследования туннельных спектров NbSe_3 в сильных магнитных полях с помощью метода межслоевого туннелирования.

В разделе 4.1. изложены результаты исследования влияния сильных постоянных магнитных полей (до 28 Тл) на межслоевые туннельные спектры при низких температурах. Наиболее интересным результатом здесь является подавление поперечным магнитным полем пика при нулевом смещении, рис. 4. Как видно из рисунка, с ростом поля подавляется плотность состояний при

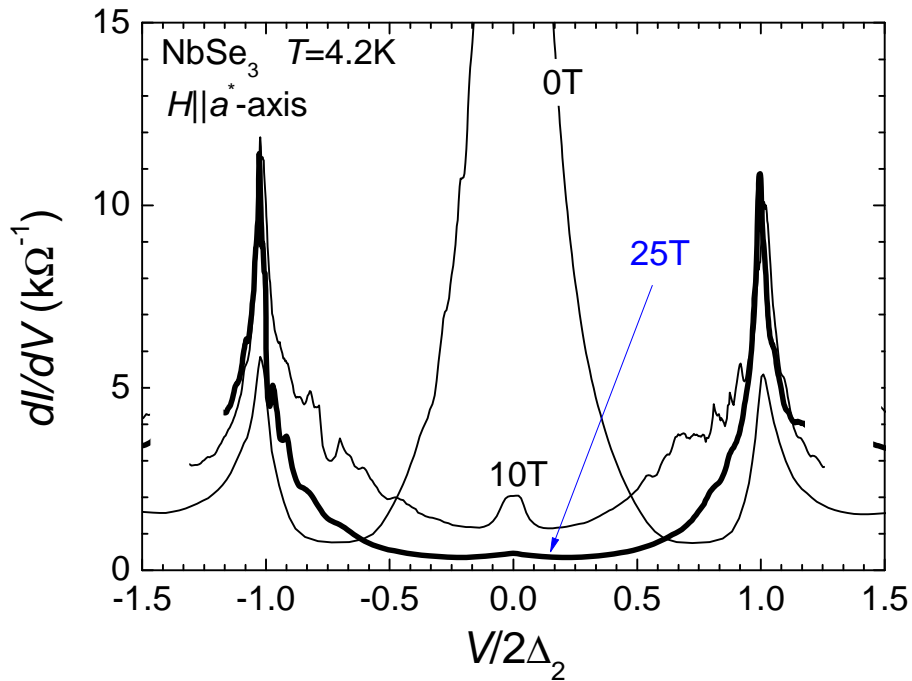


Рис. 4. Эволюция межслоевых туннельных спектров NbSe_3 в магнитном поле $H \parallel a^*$, при $T=4.2\text{K}$.

$eV < 2\Delta$, и спектр приобретает характер типичный для туннельной плотности состояний почти полного диэлектрика ВЗП. Результаты подтверждают диэлектризацию спектра в магнитном поле. При этом магнетосопротивление при малых смещениях достигает двух порядков в полях 25 Тл. Тем не менее, слабый пик проводимости при нулевом смещении сохраняется вплоть до самых больших исследованных полей.

Следующим этапом исследований явилась спектроскопия энергетической щели ВЗП при высоких температурах, вблизи температуры пайерлсовского перехода. Эти исследования потребовали использования магнитных полей существенно большей интенсивности, которая к настоящему времени достижима только в импульсном режиме.

В раздел 4.2. описана техника измерений туннельных спектров в сверхсильных (импульсных) магнитных полях до 55 Тл. Эти измерения проводились в национальной лаборатории импульсных магнитных полей (г. Тулуза, Франция). Импульсное поле получалось разрядом через катушку батареи высоковольтных конденсаторов. Временная развертка импульса

показана на рис. 5. Типичное время нарастания импульса составляло 60 мс, а время спада - ~ 350 мс. Максимальная скорость изменения поля составляла порядка 1 Тл/мс. Современные измерительные системы, на основе синхродетекторов легко позволяют вести измерения магнетосопротивления образцов на фиксированном токе в таких импульсных полях. В работе была предложена и реализована более сложная методика измерения большой серии ВАХ за время одного импульса поля.

Измерения ВАХ выполнялись по следующей методике: в течение полного времени импульса магнитного поля 500 мс, через образец пропускался пилообразный ток с периодом 0.5 мс (2 кГц), и синхронно производились измерения напряжения V , тока I и поля H ($V_{\text{поля}} \sim dH/dt$ – эдс самоиндукции в калиброванной катушке рядом с образцом) на частоте 2 МГц (рис. 5). За время одного импульса магнитного поля это позволило развернуть 1000 ВАХ (с прямым и обратным ходом) содержащих по 1000 точек каждая, при этом изменение поля на сегмент ВАХ (от $-I_{\text{max}}$ до $+I_{\text{max}}$) в худшем случае составляло

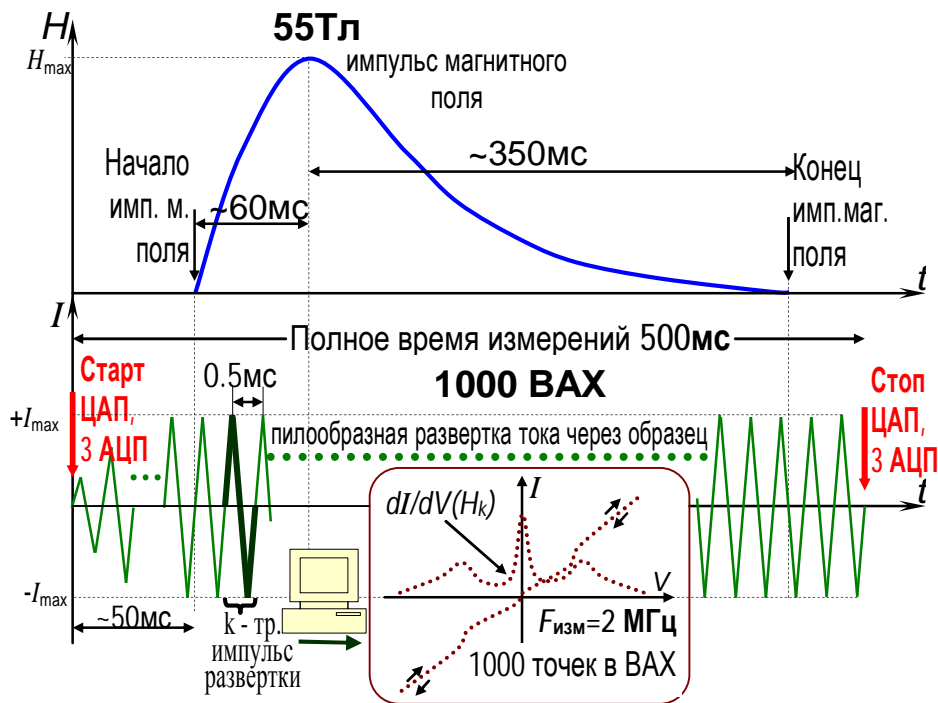


Рис. 5. Временная развертка импульса магнитного поля, совмещенная с разверткой тока через образец. На вставке ВАХ и $dI/dV(V)$ одного периода развертки.

0.5%, обеспечивая квазистатический режим измерения туннельных спектров. Формирование тока производилось с помощью цифро-аналогового преобразователя (ЦАП), а синхронные измерения параметров спектра $dI/dV(V,H)$ – независимыми аналого-цифровыми преобразователями (АЦП) со специально сконструированными малошумящими дифференциальными усилителями и фильтрами. Система в настроенном состоянии имела шум на входе предусилителей 40 мкВ и шумовой ток 200 нА, на эффективной частоте измерений 2 МГц, что позволило с приемлемой точностью измерять ВАХ образцов с типичным размахом тока в 1-2 мА и напряжения 300 мВ, обеспечивая высокое качество измеряемых спектров, рис. 6.

В разделе 4.3. изложены результаты исследования индуцирования энергетической щели магнитным полем выше температуры пайерлсовского перехода. Методом межслоевой туннельной спектроскопии было исследовано влияние магнитного поля на величину энергетической щели ВЗП в NbSe_3 вблизи температуры нижнего пайерлсовского перехода T_{p2} . Было обнаружено,

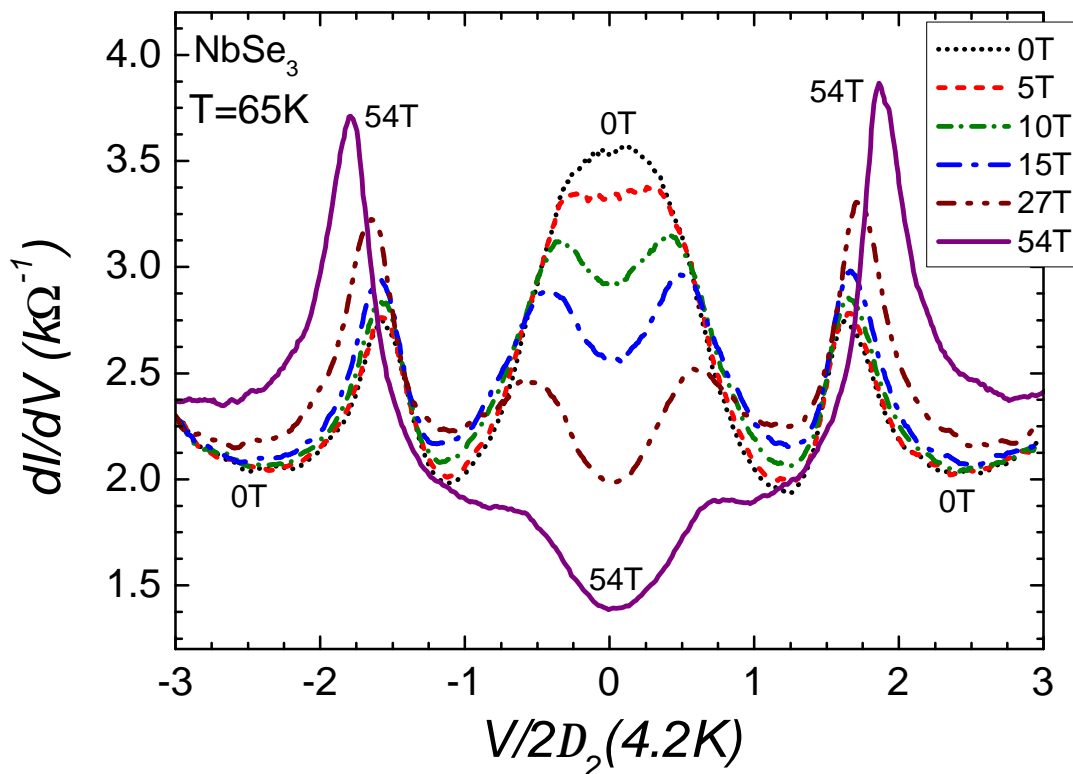


Рис. 6. Эволюция межслоевых туннельных спектров NbSe_3 в магнитном поле при температуре $T=65\text{K}$, на 5 К выше температуры пайерлсовского перехода.

что энергетическая щель значительно увеличивается под действием магнитного поля при температурах несколько ниже T_p , и что наиболее примечательно, может индуцироваться при температурах выше T_p . Этот эффект проиллюстрирован на рис. 6, где показано, как под действием поля на широком максимуме спектра $dI/dV(V)$, обусловленном флуктуациями ВЗП, появляются и развиваются два пика щелевой особенности. Видно также, что в полях больше 30 Тл амплитуда пиков начинает уменьшаться. При более высоких температурах наблюдается полное исчезновение индуцированной щели в сильных полях. Таким образом, индуцированная магнитным полем энергетическая щель ВЗП существует в конечной области магнитных полей и температур выше T_p . Детальные измерения спектров при фиксированных температурах (45 – 83К) и при изменении магнитных полей от 0 до 55 Тл позволили определить область температур и магнитных полей, в которых наводится щель ВЗП выше температуры пайерлсовского перехода. Эти наблюдения, по сути, характеризуют собой увеличение T_p под действием магнитного поля, поскольку щелевая особенность появляется при температурах выше T_p , при которых она отсутствовала без магнитного поля.

Фазовая диаграмма T - H области индуцирования щели магнитным полем показана на рис 7, где она заштрихована, а ее граница представляет собой

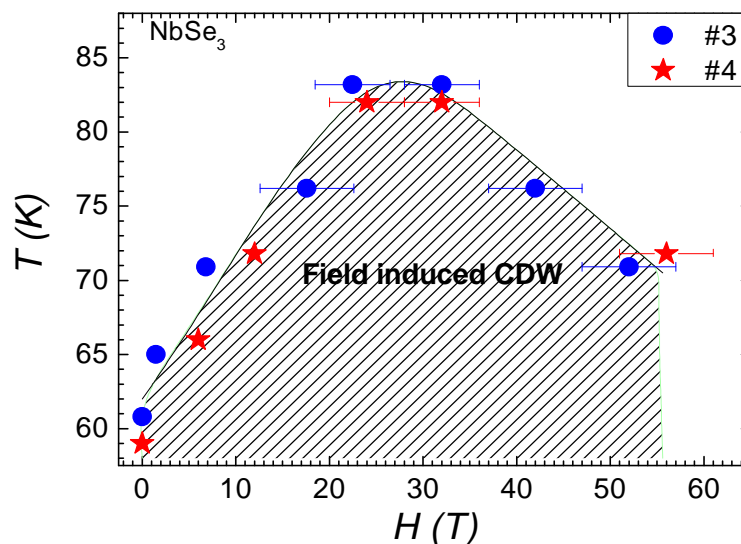


Рис. 7. Фазовая диаграмма T - H состояния ВЗП, индуцированного магнитным полем (заштрихованная область).

зависимость $T_p(H)$. Как видно, она имеет немонотонный характер: T_p сначала увеличивается с ростом H , достигает максимума при $H \sim 30$ Тл, а затем уменьшается при дальнейшем росте H . Эффект увеличения $T_p(H)$ связывается с улучшением условия нестинга ВЗП под действием поля, тогда как ее подавление в сильных полях - с разрушением основного состояния в результате его зеемановского расщепления. При $H = 0$ состояние с ВЗП вырождено относительно ориентации спинов $\uparrow\uparrow$ или $\downarrow\downarrow$. Зеемановское расщепление основного состояния ВЗП приводит к увеличению вектора $Q_{\uparrow\uparrow}$ и уменьшению $Q_{\downarrow\downarrow}$. Это приводит к ухудшению условий спаривания с исходным вектором ВЗП в нулевом поле. Эксперимент показывает, что падение $T_p(H)$ начинается с 30 Тл, в условиях когда энергия зеемановского расщепления $2\mu_B H$ (где μ_B - магнетон Бора) превышает энергию kT_p . Полученный результат качественно согласуется с теоретическим расчетом для систем с несовершенным нестингом [17].

В заключение приведены основные результаты диссертации.

Основные результаты, полученные в работе:

1. Методом межслоевой туннельной спектроскопии определены энергетические щели волны зарядовой плотности (ВЗП) в NbSe_3 равные 60 мВ для нижней и 120 мВ для верхней ВЗП и $o\text{-TaS}_3$ равной 200 мВ, при низких температурах.
2. Определена температурная зависимость положения энергетической щели NbSe_3 от температуры, согласующаяся с моделью БКШ.
3. Обнаружен эффект взаимодействия двух ВЗП, сосуществующих в NbSe_3 заключающийся в увеличении энергетической щели высокотемпературной ВЗП при образовании низкотемпературной ВЗП.
4. Обнаружены особенности туннельных спектров локализованные внутри энергетической щели. Предложена их интерпретация.

5. Установлен эффект индуцирования энергетической щели ВЗП в NbSe_3 выше температуры пайерлсовского перехода в сильном магнитном поле.
6. Показан немонотонный характер зависимости температуры пайерлсовского перехода (T_p) от магнитного поля. Рост T_p в полях до 30 Тл связывается с улучшением условия нестинга ВЗП, а уменьшение T_p с зеемновским расщеплением основного состояния, в условиях когда энергия зеемновского расщепления $2\mu_B H$ превышает энергию kT_p

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

- A1. Yu.I. Latyshev, P. Monceau, S. Brazovskii, A.P. Orlov, and T. Fournier, Observation of charge density wave solitons in overlapping tunnel junctions, Phys. Rev. Lett., 95, 266402 (2005).
- A2. Yu.I. Latyshev, P. Monceau, S.A. Brazovskii, A.P. Orlov, A.A. Sinchenko, Th. Fournier, E. Mossang, Interlayer tunneling spectroscopy of layered CDW materials, J. Physique, France IV, 131, 197-202 (2005).
- A3. Yu.I. Latyshev, P. Monceau, S. Brazovskii, A.P. Orlov and T. Fournier, Subgap collective Tunneling and Its Staircase Structure in Charge Density Waves”, Phys. Rev. Lett., 96, 116402 (2006).
- A4. Yu. I. Latyshev, P. Monceau, S.A. Brazovskii, A.P. Orlov, T. Yamashita, L.N. Bulaevskii, Method of interlayer tunneling for studies of layered high temperature superconductors and charge density wave materials, Phys. stat sol. (c), 3, 3110-3113 (2006).
- A5. A.P. Orlov, Yu.I. Latyshev, A.M. Smolovich, P. Monceau, Interaction of both charge density waves in NbSe_3 from interlayer tunneling experiments, Письма в ЖЭТФ, том 84, вып.2, с.89-92 (2006).

- A6. Yu.I. Latyshev, P. Monceau, A.P. Orlov, S.A. Brazovskii, and Th. Fournier, Interlayer tunneling spectroscopy of charge density waves, *Supercond. Sci. Technol.*, 20, S87-S92 (2007).
- A7. А.П. Орлов, Ю.И. Латышев, Д. Виньо́ль, П. Монсо. Индуцирование энергетической щели волны зарядовой плотности в NbSe_3 сильным магнитным полем выше температуры пайерлсовского перехода. Письма в ЖЭТФ, том 87, вып.8, с.502-506 (2008).

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Gruener, G. *Density Waves in Solids* / G. Gruener // Addison-Wesley, N.Y. -1994, 276 p.
2. Kleiner, R. Intrinsic Josephson effects in $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ single crystals / R. Kleiner, F. Steinmeyer, G. Kunkel, and P. Müller // *Phys. Rev. Lett.* -1992, v.68, p.2394-2397.
3. Monceau, P (Ed.) *Electronic Properties of Inorganic Quasi-One-Dimensional Compounds Pt. II* / Dordrecht: D. Reidel, -1985, 139 p.
4. Латышев, Ю.И. Когерентное туннелирование между элементарными проводящими слоями в проводнике с волной зарядовой плотности NbSe_3 / Ю.И. Латышев, А.А. Синченко, Л.Н. Булаевский, В.Н. Павленко, П. Монсо // Письма в ЖЭТФ -2002, том 75, вып.2, с.103-108.
5. Latyshev, Yu.I. Fabrication of submicron BSCCO stacked junctions by focused ion beam (FIB) / Yu.I. Latyshev, S.-J. Kim, and T. Yamashita // *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* -1999, v.9, i.2, p.4312-4315.
6. Dai, Z. Charge-density-wave modifications in NbSe_3 produced by Fe and Co doping / Zhenxi Dai, C.G. Slough, and R.V. Coleman // *Phys. Rev. B* -1992, v.45, p.9469-9472.

7. Schafer, J. Unusual Spectral Behavior of Charge-Density Waves with Imperfect Nesting in a Quasi-One-Dimensional Metal / J. Schafer, Sing M, Claessen R, Rotenberg E, Zhou X J, Thorne R E and Kevan S D. // Phys. Rev. Lett. -2003, v.91 p.066401.
8. Perucci, A. Optical investigation of the charge-density-wave phase transitions in NbSe₃ /A .Perucci, L. Degiorgi and R.E. Thorne // Phys. Rev. B -2004, v.69, p.195114
9. Zaitsev-Zotov, S.V. Evidence of Collective Charge Transport in the Ohmic Regime of o-TaS₃ in the Charge-Density-Wave State by a Photoconduction Study / S.V. Zaitsev-Zotov and V.E. Minakova // Phys. Rev. Lett. -2006, v.97, p. 266404.
10. Bruinsma, R. Phase-locked charge-density waves in NbSe₃ / R. Bruinsma, S.E. Trullinger // Phys Rev. B -1980, v.22, p.4543-4549.
11. Brazovskii, S.A. Self localized excitations in the Peierls-Fröhlich state / S.A. Brazovskii // Sov. Phys. JETP -1980, v.51, 342-345.
12. Артеменко, С.Н. Солитоны с локализованным электронным состоянием в квазиодномерных проводниках с волной зарядовой плотности // Письма в ЖЭТФ -1996, том.63, вып.1, с.49-54.
13. Brazovskii, S. Recent views on solitons in Density Waves / S. Brazovskii, Yu.I. Latyshev, S.I. Matveenko and P. Monceau // J. Phys. IV (France) - 2005, v.131, p.77-81
14. Pouget, J.P. X-ray observation of 1-D precursor effects in NbSe₃ and new diffuse scattering features in FeNb₃Se₁₀ / J.P. Pouget, R. Moret, A. Meerschaut, L. Guemas and J. Rouxel, Journal de Physique -1983, v.44, C3 - 1729 – 1731.
15. Balseiro, C.A. Density Waves in High Magnetic Fields: A Metal-Insulator Transition /C.A. Balseiro and L.M. Falicov // Phys. Rev. Lett. -1985, v.55, p.2336-2339.

16. Gor'kov, L.P. On the stability of the quasi-onedimensional metallic phase in magnetic fields against the spin density wave formation / L.P. Gor'kov and A.G. Lebed // *Journal de Physique Lettres* -1984, v.45, p.433-440.
17. Zanchi, D. Phase diagram for charge-density waves in a magnetic field / D. Zanchi, A. Bjelis, and G. Montabaux // *Phys. Rev. B.* -1996, v.53, p.1240-1250.