

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

На правах рукописи

Ломакин Андрей Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ
РЕЛАКСАЦИИ В НЕУПОРЯДОЧЕННЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЁНКАХ**

Резюме

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
д.ф.-м.н., профессор
Гольцман Григорий Наумович

Москва — 2024

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Физические механизмы, определяющие сверхпроводящие и электронные свойства сверхтонких пленок, широко изучались, чтобы понять влияние беспорядка и квантовых эффектов на транспорт электронов в материалах такого типа [1]. Несмотря на свою фундаментальную важность, эти исследования также мотивированы широким использованием тонких неупорядоченных пленок в наноразмерных сверхпроводниковых устройствах, таких как детекторы фотонов [2–5], болометры на горячих электронах, микроволновые наноиндукторы и резонаторы, квантовые устройства проскальзывания фазы и других. Для оптимизации работы этих тонкопленочных устройств необходимо знать параметры, от которых напрямую зависит отклик на излучение, например, скорости неупругих электрон-электронного ($e-e$) и электронов-фононного ($e-ph$) рассеяний, электронную и фононную теплоемкости, диффузию электронов. Многочисленные исследования электронного транспорта в неупорядоченных металлах показывают существенное влияние беспорядка на механизмы неупругого рассеяния. Например, ожидается увеличение скорости $e-e$ -рассеяния за счет сильного упругого рассеяния квазичастиц в тонких неупорядоченных пленках или за счет присутствия некоторого количества магнитных примесей. Также допускается, что сильный беспорядок может модифицировать $e-ph$ -рассеяние и можно ожидать ослабления или усиления $e-ph$ -взаимодействия в зависимости от конкретных свойств неупорядоченных систем или появления дополнительных каналов релаксации привести к еще большему разнообразию эффектов неупругой релаксации. Таким образом, понимание роли беспорядка в неупругом рассеянии в тонкопленочных устройствах может прийти главным образом на основе эмпирического исследования конкретного материала.

Тонкие плёнки из таких материалов, как Nb, NbN, TiN широко используются в современной электронике. Они являются чувствительными элементами таких устройств как болометры на горячих электронах, микроволновые наноиндукторы и резонаторы, сверхпроводниковые нанопроволочные однофотонные детекторы, квантовые устройства проскальзывания фазы и других. Для некоторых приложений бывает выгодно увеличить уровень беспорядка в сверхпроводящей плёнке, например, это может повысить квантовую

эффективность однофотонного детектора. Однако стоит учитывать влияние беспорядка на другие параметры устройства.

Целью диссертационного исследования является получение данных о неупругой релаксации в тонких плёнках Nb, NbN и TiN, определение доминирующих механизмов релаксации, температурных зависимостей этих механизмов, влияния магнитного и немагнитного беспорядков для повышения показателей качества сверхпроводниковых однофотонных детекторов.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Провести исследования неупругого рассеяния электронов в серии плёнок NbN с контролируемым увеличением беспорядка, характеризуемого параметром Йоффе-Регеля $k_F l$ в пределах от 6.3 до 1.6, в наборе плёнок TiN с низким уровнем немагнитного беспорядка, в двух сериях плёнок Nb с защитным поверхностным слоем и без него. Для каждой серии провести измерения сопротивления от температуры в интервале от 1.7 К до 300 К, зависимости второго критического магнитного поля от температуры, зависимости сопротивления от магнитного поля при различных температурах от критической температуры сверхпроводника T_c до приблизительно $3T_c$, а также измерения коэффициента Холла при температуре ~ 25 К.
2. Провести обработку экспериментальных данных с целью определения основных транспортных параметров плёнок, таких как критическая температура, концентрация носителей заряда, коэффициент диффузии, температура Дебая, длина свободного пробега и других.
3. Проанализировать данные магнитосопротивления и получить зависимость времени сбоя фазы волновой функции электронов от температуры. Путём расчёта степени влияния различных механизмов рассеяния выделить основной фактор в каждом наборе плёнок и его температурную зависимость.
4. Изучить влияние магнитного и немагнитного беспорядков на частоту рассеяния электронов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Время сбоя фазы электронов при низких температурах в тонких плёнках NbN не изменяется с ростом разупорядоченности плёнок,

основной вклад в процесс вносит неупругое электрон - фононное рассеяние, время которого обратно пропорционально второй степени температуры при $T < 10$ К и плавно переходит к пропорциональности третьей степени температуры при $T > 10$ К.

2. Неупругое рассеяние электронов в ультратонких ($k_F l \approx 150$) плёнках TiN при температурах в диапазоне от критической температуры сверхпроводящего перехода T_c до $3-4 T_c$ характеризуется высокими (по сравнению со скоростями e-e, e-ph рассеяний и рассеяния на сверхпроводящих флуктуациях) скоростями со слабой температурной зависимостью, что связано с образованием оксидного слоя на поверхности плёнок, инициирующего неупругое рассеяние электронов на поверхностных магнитных моментах с расчётными характерными временами 2-8 пс, что практически совпадает с экспериментальными данными.
3. Критическая температура тонких Nb плёнок без защитного слоя снижается при уменьшении толщины, что определяется наличием поверхностного магнитного беспорядка с плотностью магнитных моментов $(8.6 \pm 0.8) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Наличие магнитного беспорядка также подтверждается тем, что в плёнках без защитного слоя время сбоя фазы - $\tau_\phi = 4.0$ пс при $T \approx 10$ К для 3 нм образца - меньше, чем время в плёнках с защитным слоем - $\tau_\phi = 9.0$ пс при $T \approx 10$ К для 3 нм образца, что обусловлено вкладом рассеяния на магнитных моментах.

Научная новизна:

1. Впервые было осуществлено изучение неупругого рассеяния в ультратонких сверхпроводящих плёнках с контролируемым изменением беспорядка. Обнаружено, что время неупругого рассеяния электронов при низких температурах в тонких плёнках NbN не зависит от параметра Йозефсона-Регеля $k_F l$.
2. Обнаружено подавление сверхпроводимости в тонких плёнках Nb с уменьшением толщины, что объясняется магнитным беспорядком на поверхности плёнок. Время сбоя фазы в плёнках Nb без защитного слоя характеризуется высокими скоростями по сравнению с

τ_ϕ плёнок, закрытых слоем кремния. Эти скорости не имеют явной зависимости от температуры.

3. Было выполнено оригинальное исследование поверхностного магнитного беспорядка TiN плёнок в отсутствие немагнитного беспорядка. Обнаружено подавляющее влияние рассеяния на магнитных моментах на общее время сбоя фазы при низких температурах.

Теоретическая значимость работы заключается в получении информации о роли различных процессов релаксации энергии электронов в сверхпроводящих плёнках и влияния на них беспорядка. Полученные результаты могут стимулировать теоретические работы в данном направлении.

Практическая значимость. Были исследованы тонкие плёнки нитрида ниобия, ниобия и нитрида титана, которые используются при разработке и изготовлении современных устройств нанoeлектроники. Были получены зависимости различных времен релаксации этих плёнок от условий их осаждения и наличия защитного слоя. Эти данные необходимы и были напрямую использованы для улучшения квантовой эффективности и временного разрешения сверхпроводниковых однофотонных детекторов, производимых компанией ООО «Сконтел».

Достоверность полученных результатов подтверждается их соответствием результатам научных работ, опубликованным после выхода в печать работ автора.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях:

XXVII международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника» (Н. Новгород, март 2023), доклад "Экспериментальное наблюдение независимого от беспорядка времени электрон-фононного рассеяния в тонких пленках NbN"

XXVIII Международный симпозиум «Нанофизика и нанoeлектроника», (Н. Новгород, март 2024), доклад "Обнаружение поверхностного магнитного беспорядка в магнитосопротивлении эпитаксиальных плёнок нитрида титана"

Сверхпроводимость в наноструктурах (Сколково, сентябрь 2023), доклад "Evidence of the disorder-independent electron-phonon scattering time in thin NbN films"

III Международная конференция «Физика конденсированных состояний» (Черноголовка, май-июнь 2023), доклад "SIGNATURE OF DEPHASING BY SURFACE MAGNETIC DISORDER IN MAGNETORESISTANCE IN EPITAXIAL TIN FILMS"

Saint Petersburg OPEN 2022 (Санкт-Петербург, 2022), доклад "ELECTRON PHASE-BREAKING TIME IN ULTRA-THIN NB FILMS".

Личный вклад заключается в участии в обсуждении и постановке задач, проведении всех приведенных в данной работе экспериментальных измерений при низких температурах. Автор обработал все полученные результаты экспериментов и принимал активное участие в их интерпретации. Указанные работы проводились автором в лаборатории квантовых детекторов МПГУ.

Публикации по теме диссертации:

A. I. Lomakin, E. M. Baeva, Triznova A. D., Titova N. A., P. I. Zolotov, Semenov A. V., Sunegin D. E., Lubenchenko A. V., A. I. Kolbatova, G. N. Goltsman "Evidence of the disorder-independent electron-phonon scattering time in thin NbN films" (Наблюдение независимого от беспорядка электрон-фононного взаимодействия в тонких плёнках нитрида ниобия) // Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics. 2023. Vol. 107. No. 5. Article 054205. DOI: 10.1103/PhysRevB.107.054205

A. I. Lomakin, E. M. Baeva, Titova N., P. I. Zolotov, A. I. Kolbatova, G. N. Goltsman "Electron phase-breaking time in ultra-thin Nb films" (Время сбоя фазы электрона в ультра-тонких плёнках ниобия) // St. Petersburg Polytechnical University Journal: Physics and Mathematics. 2022. Vol. 15. No. 3.3. P. 64-69. DOI: 10.18721/JPM.153.312

Samsonova A. S., Zolotov P. I., Baeva E., Lomakin A., Titova N. A., Kardakova A., Goltsman G. "Signatures of Surface Magnetic Disorder in Niobium Films" (Признаки поверхностного магнитного беспорядка в пленках ниобия) // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 2021. Vol. 31. No. 5. Article 7000205. DOI: 10.1109/TASC.2021.3065281

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи

работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена обзору литературы по теме диссертации. Здесь приводится физическая интерпретация поправок к проводимости, используемых для описания сопротивления вблизи критической температуры и моделирования процесса изменения сопротивления материала при этих температурах. Кроме того, приведено описание современных электронных устройств, для конструирования которых будут полезны исследования, приведённые в диссертации.

Вторая глава посвящена описанию исследуемых образцов, схем измерения и начальной обработки результатов. В исследовании были использованы три материала. Высококачественные пленки Nb были выращены на подложке толщиной 400 мкм методом магнетронного распыления. В процессе осаждения подложка нагревается до 400°C. Были изготовлены плёнки различной толщины, от 2.5 до 62 нм. Самые тонкие образцы покрыты *in situ* слоем Ti толщиной 1 нм. В атмосферных условиях слой Ti превращается в оксид TiO_x и предотвращает быстрое окисление ультратонкой пленки Nb на воздухе. Высококачественные эпитаксиальные пленки TiN выращиваются на подложке из с-сапфира ⟨111⟩ при температуре 800°C методом реактивного магнетронного распыления на постоянном токе из мишени из Ti с чистотой 99,999%. Толщины плёнок от 4 до 20 нм. Структурная характеристика, проведенная методами рентгеновской дифракции и атомно-силовой микроскопии для номинально идентичных пленок, показала монокристаллический порядок и атомно-гладкую поверхность исследованных образцов. Химические свойства эпитаксиальных гетероструктур TiN/сапфир исследованы с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Количественный анализ относительных концентраций компонентов выявил наличие различных фаз в пленках TiN: TiO₂, TiO_x, Ti(NO)_x, TiN_x, TiN. Ультратонкие пленки NbN наносились с помощью системы магнетронного распыления на подложки сапфира г-среза. Все пленки имели одинаковую толщину $d = 2.5$ нм, но различный уровень беспорядка. Уровень беспорядка в пяти пленках NbN (s1–s5) варьируется путем изменения температуры подложки в каждом процессе осаждения T_{dep} : 500°C, 400°C, 300°C, 150°C и 25°C (без дополнительного нагрева), соответственно. Пленки s1–s5 также выращиваются при

фиксированной концентрации азота 22% и поддержании постоянного рабочего давления 3.6 мТорр. Наиболее неупорядоченные образцы выращиваются при следующих условиях: $T_{dep} = 500^\circ\text{C}$; 27% азота при 6.5 мторр для s6 и 23% азота при 6.8 мторр для s7. Чтобы предотвратить непреднамеренное окисление NbN в атмосфере, пленки на месте покрываются пассивирующим кремниевым слоем толщиной 5 нм.

Основная часть упомянутых в работе исследований была выполнена в гелиевом сосуде Дьюара СТГ-40 в нержавеющей чехле, либо в нержавеющей откачной вставке для достижения более низких температур. На конце откачной вставки находится дроссель для откачки паров гелия ^4He , что позволяет достигать температуры 1.7 К. Образцы устанавливались на конце измерительного макета. Для проведения исследований все плёнки были предварительно структурированы в мостики Холла длиной 1000 мкм и шириной 500 мкм. Измерение сопротивления производилось по четырёхточечной схеме. Для создания магнитного поля использовался соленоид из высокотемпературного сверхпроводника и источник питания постоянного тока. На катушку подавался ток силой до 60 А, что соответствует магнитной индукции в центральной части соленоида до 4 Тл. Максимальная величина магнитного поля варьировалась в зависимости от набора образцов. Для всех образцов были выполнены измерения сопротивления от температуры, второго критического магнитного поля от температуры, сопротивления от магнитного поля при нескольких фиксированных значениях температуры (магнетосопротивление), а также определение коэффициента Холла для вычисления концентрации носителей заряда и их знака.

Также в этой главе приведены расчётные формулы для обработки результатов магнетосопротивления с целью получения времени сбоя фазы электрона.

Третья глава посвящена исследованию набора образцов TiN. Высокое качество плёнок, до сих пор недоступное для низкотемпературных исследований, позволяет сосредоточиться на анализе магнитного поверхностного беспорядка, пренебрегая влиянием немагнитного. Основным результатом обработки измерений магнетосопротивления является набор значений времени сбоя фазы электрона для значений температуры от T_c до примерно $3T_c$ для всех образцов. Механизмы фазового сбоя, типичные для тонких сверхпрово-

дящих пленок выше T_c , вызваны процессами неупругого и магнитного рассеяния. Неупругое рассеяние обычно представлено электрон-электронным (e-e) рассеянием, рассеянием на сверхпроводящих флуктуациях (e-fl) и e-ph рассеянием. Совместный эффект скоростей неупругого рассеяния, τ_{e-e}^{-1} , τ_{e-fl}^{-1} , τ_{e-ph}^{-1} , и скорости магнитного рассеяния τ_s^{-1} можно описать с помощью следующего выражения [6]:

$$\tau_\phi^{-1} = \tau_{e-e}^{-1} + \tau_{e-fl}^{-1} + \tau_{e-ph}^{-1} + 2\tau_s^{-1}. \quad (1)$$

Предыдущие исследования неупорядоченных пленок TiN [7–9] показывают, что скорости сбоя фазы количественно согласуются с ожидаемыми для тонких неупорядоченных пленок скоростями неупругого e-e рассеяния [10]: $\tau_{e-e}^{-1} = \frac{\pi g k_B T}{\hbar} \ln\left(\frac{1}{2\pi g}\right)$, где $g = e^2 R_s / (2\pi^2 \hbar)$. В случае высококачественных образцов TiN с $R_s \ll \hbar/e^2$ оценка $\tau_{e-e}^{-1}(T)$ соответствует значениям времени >60 пс при $T < 10$ К (для TiN1) и оказывается пренебрежимо малой по сравнению с наблюдаемым τ_ϕ^{-1} . Оценочное значение τ_{e-fl}^{-1} и отсутствие характерного T-поведения указывают на его незначительный вклад в τ_ϕ^{-1} в эпитаксиальных пленках TiN. Скорость e-ph рассеяния на акустических фононах зависит от T согласно степенному выражению: $\tau_{e-ph}^{-1} = 7\pi\zeta(3)\lambda_{3D}k_B T^3 / (2\hbar\theta_D^2)$. [11] При подгоночных значениях температуры Дебая θ_D и константы e-ph связи $\lambda_{3D} \approx 0.73$ [12] оцененные τ_{e-ph} находятся в диапазоне 0,1 - 10 нс при температурах 10 - 3 К соответственно. Это указывает на незначительный вклад рассеяния e-ph в дефазировку электронов в пленках TiN.

В свою очередь наличие поверхностных магнитных дефектов значительно увеличивает τ_ϕ^{-1} и приводит к независимому от температуры поведению τ_ϕ^{-1} при низких температурах [13–16]. В этом случае время рассеяния с переворотом спина τ_s можно оценить с помощью теории Абрикосова-Горькова (АГ) следующим образом [17]:

$$\ln\left(\frac{T_c^0}{T_c}\right) = \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{\hbar}{2\pi k_B T_c \tau_s}\right) - \Psi\left(\frac{1}{2}\right), \quad (2)$$

где T_c^0 — критическая температура в отсутствие магнитного беспорядка. Для сравнения экспериментальных данных для $\tau_\phi^{-1}(T)$ со скоростью рассеяния с переворотом спина мы используем модель АГ (уравнение (2)), предполагая, что критическая температура контролируется магнитным беспорядком. Оце-

ночные значения τ_s составляют 2,4 пс, 8,5 пс, 8,3 пс и 8,0 пс для TiN1, TiN2, TiN3 и TiN4 соответственно.

Откуда берется магнитный беспорядок в немагнитных структурах, всегда является интригующим вопросом. Магнитные моменты в пленках TiN могут возникать из неспаренных 3d-электронов, связанных с комплексами дефектов $Ti^{+3} - O_V$ [18], где O_V — вакансия кислорода или неспаренные локализованные спины, опосредованные вакансиями азота [19]. Поверхностный характер магнитного рассеяния указывает на важность интерфейсов пленки либо с подложкой внизу [20], либо с окисленным слоем сверху [21]. Стоит также отметить, что похожее поведение $\tau_\phi^{-1}(T)$ с тенденцией к насыщению при низких T наблюдается для сверхтонких пленок ниобия (Nb) и меди (Cu) с собственным оксидом на поверхности пленки. Таким образом, мы полагаем, что наблюдаемое увеличение скорости сбоя фазы в тонких эпитаксиальных пленках TiN с уменьшением толщины пленки может быть обусловлено влиянием поверхностного магнитного беспорядка, который может быть уменьшен нанесением защитного диэлектрического слоя.

В четвертой главе приведено описание исследований высококачественных плёнок ниобия. Для характеристики электрических свойств образцов определим удельное сопротивление ρ и коэффициент остаточного сопротивления (RRR) как $\rho = R_s d$ и $RRR = (R_s^{300K} - R_s^{10K})/R_s^{10K}$, где R_s - сопротивление на квадрат, d - толщина пленки. В процессе охлаждения удельное сопротивление линейно убывает ($\rho \propto T$) при высоких температурах в широком диапазоне от 50 К до 300 К, а затем, примерно при $T = 20$ К, достигает остаточного значения ρ_0 . При дальнейшем охлаждении $\rho(T)$ падает до нулевого сопротивления ниже критической температуры. Для более тонких пленок остаточное сопротивление ρ_0 увеличивается, а T_c уменьшается. Линейная температурная зависимость ρ при высоких температурах типична для металлов и обычно обусловлена электрон-фононным рассеянием [22]. Фононная проводимость $G_{ph} = (R_s^{300K} - R_s^{10K})^{-1}$, как и ожидалось, линейно убывает с толщиной пленки. Однако при некоторой толщине, примерно $d_{dl} \approx 2.1 \pm 0.5$ нм, она приближается к нулю. Эта толщина, называемая «мертвым» слоем, предположительно связана с собственным оксидом на поверхности пленок Nb, который в основном состоит из непроводящего оксида ниобия (Nb_2O_5) [23]. Учитывая толщину мертвого слоя, мы характеризуем

и другие электронные параметры пленок Nb, такие как плотность носителей заряда при низких температурах. Благодаря пересмотру толщины пленки мы наблюдаем, что плотность носителей существенно не меняется и остается близкой к значению $n_0 = 6,7 \cdot 10^{22} \text{см}^{-3}$, полученному для пленки Nb толщиной 60 нм. Это открытие позволяет предположить, что электронные свойства пленок Nb сохраняются при изменении толщины пленки.

Далее мы рассматривали различные возможные причины подавления T_c . Теоретическое предсказание модели слабого беспорядка [24], в которой примеси усиливают кулоновские взаимодействия, не описывает наблюдаемое подавление T_c в пленках Nb. Таким образом, влиянием немагнитного беспорядка на T_c в этих пленках можно пренебречь. Рассмотрев в качестве механизма подавления T_c в тонких пленках Nb обратный эффект близости, обусловленный наличием несверхпроводящего слоя на поверхности пленки или на границе между пленкой и подложкой, мы обнаружили, что в целом модель с толщиной нормального слоя $d_N = 0.8 \pm 0.2$ нм описывает экспериментальные данные. Однако, несмотря на очевидное согласие эксперимента и теории, мы ставим под сомнение проводимость поверхностного слоя. Прежде всего, поверхностный оксидный слой состоит в основном из Nb_2O_5 , проявляющего изолирующие свойства [23]. Также исключим изменение плотности заряда за счет наблюдаемой тенденции с уменьшением толщины. Таким образом, мы делаем вывод, что обратный эффект близости не может быть основным механизмом подавления T_c в исследованных пленках Nb.

Между тем предполагается, что оксид ниобия содержит малую плотность магнитных моментов, что может быть губительно для сверхпроводимости в тонких пленках Nb. В этом случае наблюдаемое подавление T_c с уменьшением толщины можно объяснить взаимодействием куперовских пар с локализованными спинами магнитных моментов (взаимодействия с переворотом спина) [25]. Время рассеяния с переворотом спина τ_s и критическая температура T_c связаны известным уравнением Абрикосова-Горькова (ур. (2)).

Экспериментальная зависимость времени рассеяния с переворотом спина τ_s от обратной толщины d^{-1} позволяет определить эффективную плотность магнитных моментов N_M , включая вклады поверхностных магнитных моментов N_s и магнитных моментов в объеме N_b . Анализ зависимости $\tau_s^{-1}(d^{-1})$ дает $N_s = (9.5 \pm 1.9) \cdot 10^{-3}$ и $N_b = 0$, что соответствует плотности по-

верхностных магнитных моментов $N_s a^{-2} = (8.6 \pm 0.8) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Оцененная плотность поверхностных магнитных моментов согласуется с ранее опубликованными результатами для пленок Nb ($\approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$).

Далее мы анализируем влияние защитного кремниевого слоя на плёнках ниобия на процессы неупругого рассеяния электронов. С этой целью мы выбрали из имеющихся плёнок две пары образцов с защитным слоем и без защитного слоя со схожими толщинами. Были проведены измерения магнетосопротивления образцов в диапазоне температур от T_c до $3T_c$ и получены зависимости $\tau_\phi(T)$. Прежде всего, мы наблюдаем близкую степенную зависимость τ_ϕ от T для пассивированных образцов ($\tau_\phi(T) \sim T^{-2.5}$ для A1 и $\tau_\phi(T) \sim T^{-1.5}$ для A2), в то время как τ_ϕ для непокрытых образцов не показывает выраженной зависимости от T . Наблюдаемые результаты для $\tau_{e-ph}(T)$ в пассивированных образцах также близки к ранее опубликованным данным для тонких пленок Nb. Напротив, мы наблюдаем повышенную скорость фазового сбоя τ_ϕ^{-1} для непокрытых образцов B1 и B2, что свидетельствует о дополнительном механизме сбоя фазы. Этот результат вместе с наблюдаемым уменьшением τ_ϕ и насыщением в зависимости $\tau_\phi(T)$ указывает на то, что дефазировка электронов в непокрытых образцах может быть вызвана магнитным беспорядком в слое собственного оксида [26].

В **пятой главе** приведено описание измерений неупорядоченных плёнок нитрида ниобия. Были проведены измерения магнетосопротивления образцов в диапазоне температур от T_c до $3T_c$ и получены зависимости $\tau_\phi(T)$. Прежде всего, полученные данные демонстрируют близкое сходство результатов для образцов NbN с разным уровнем беспорядка. Данные характеризуются близкими значениями τ_ϕ^{-1} , а также аналогичным степенным уменьшением τ_ϕ^{-1} с понижением температуры. Точное выражение для τ_ϕ^{-1} представляет собой сумму механизмов рассеяния за счет сверхпроводящих флуктуаций τ_{e-fl}^{-1} , скорости e-e рассеяния τ_{e-e}^{-1} , скорости рассеяния с переворотом спина τ_s^{-1} и скорости e-ph рассеяния τ_{e-ph}^{-1} (ур. (1)).

Далее из общей скорости дефазировки τ_ϕ^{-1} путем вычитания τ_{e-e}^{-1} и τ_{e-fl}^{-1} получены температурные зависимости τ_{e-ph} (РФЭС-анализ показал, что пассивирующий слой Si поверх пленок NbN предотвращает сильное окисление. Таким образом, при анализе зависимостей τ_ϕ^{-1} мы считаем влияние магнитного беспорядка незначительным.). Мы наблюдаем, что величина и тем-

пературные зависимости τ_{e-ph} для исследованных пленок NbN не зависят от беспорядка, но демонстрируют немонотонную температурную зависимость: она пропорциональна T^{-3} выше 10 К и модифицируется до T^{-2} при более низких температурах.

В заключении приведены основные результаты работы.

Список литературы

1. *Sacépé B., Feigel'man M., Klapwijk T. M.* Quantum breakdown of superconductivity in low-dimensional materials // Nature Physics. — 2020. — Т. 16, № 7. — С. 734—746. — DOI: 10.1038/s41567-020-0905-x. — URL: <https://doi.org/10.1038/s41567-020-0905-x>.
2. *Semenov A. D.* Superconducting nanostrip single-photon detectors some fundamental aspects in detection mechanism, technology and performance // Supercond. Sci. Technol. — 2021. — Апр. — Т. 34, № 5. — С. 054002. — DOI: 10.1088/1361-6668/abef7d. — URL: <https://doi.org/10.1088/1361-6668/abef7d>.
3. *Shurakov A., Lobanov Y., Goltsman G.* Superconducting hot-electron bolometer: from the discovery of hot-electron phenomena to practical applications // Supercond. Sci. Technol. — 2015. — Дек. — Т. 29, № 2. — С. 023001. — DOI: 10.1088/0953-2048/29/2/023001. — URL: <https://doi.org/10.1088/0953-2048/29/2/023001>.
4. *Zmuidzinas J.* Superconducting Microresonators: Physics and Applications // Annu. Rev. Condens. Matter Phys. — 2012. — Т. 3, № 1. — С. 169—214. — URL: <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-020911-125022>.
5. Phonon-Trapping-Enhanced Energy Resolution in Superconducting Single-Photon Detectors / P. J. de Visser [и др.] // Phys. Rev. Applied. — 2021. — Сент. — Т. 16, вып. 3. — С. 034051. — DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.034051. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevApplied.16.034051>.

6. *Varlamov A. A., Galda A., Glatz A.* Fluctuation spectroscopy: From Rayleigh-Jeans waves to Abrikosov vortex clusters // *Rev. Mod. Phys.* — 2018. — Март. — Т. 90, вып. 1. — С. 015009. — DOI: 10.1103/RevModPhys.90.015009. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.90.015009>.
7. *Mironov A.* Quantum transport in thin TiN films : дис. ... канд. / Mironov A.Y. — 2010.
8. Superconducting phase transitions in ultrathin TiN films / Т. I. Baturina [и др.] // *Europhysics Letters.* — 2012. — Янв. — Т. 97, № 1. — С. 17012. — DOI: 10.1209/0295-5075/97/17012. — URL: <https://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/97/17012>.
9. Probing electron-electron interaction along with superconducting fluctuations in disordered TiN thin films / S. Yadav [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2023. — Янв. — Т. 107, вып. 1. — С. 014511. — DOI: 10.1103/PhysRevB.107.014511. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.107.014511>.
10. *Altshuler B. L., Aronov A. G.* in *Electron-Electron Interactions in Disordered Systems.* — Elsevier Science B.V. New York, 1985.
11. *Pethick C., Smith H.* Relaxation and collective motion in superconductors: a two-fluid description // *Annals of Physics.* — 1979. — Т. 119, № 1. — С. 133–169. — DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-4916\(79\)90253-7](https://doi.org/10.1016/0003-4916(79)90253-7). — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003491679902537>.
12. Electron/phonon coupling in group-IV transition-metal and rare-earth nitrides / A. B. Mei [и др.] // *Journal of Applied Physics.* — 2013. — Ноябрь. — Т. 114, № 19. — С. 193708. — DOI: 10.1063/1.4832778. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4832778>.
13. *Lin J. J., Bird J. P.* Recent experimental studies of electron dephasing in metal and semiconductor mesoscopic structures // *Journal of Physics: Condensed Matter.* — 2002. — Апрель. — Т. 14, № 18. — R501. — DOI: 10.1088/0953-8984/14/18/201. — URL: <https://dx.doi.org/10.1088/0953-8984/14/18/201>.

14. *Vranken J., Van Haesendonck C., Bruynseraede Y.* Enhanced magnetic surface scattering of weakly localized electrons // *Phys. Rev. B.* — 1988. — Май. — Т. 37, вып. 14. — С. 8502–8505. — DOI: 10.1103/PhysRevB.37.8502. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.37.8502>.
15. Dephasing of electrons in mesoscopic metal wires / F. Pierre [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2003. — Август. — Т. 68, вып. 8. — С. 085413. — DOI: 10.1103/PhysRevB.68.085413. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.68.085413>.
16. Effect of Magnetic Impurities on Energy Exchange between Electrons / B. Huard [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2005. — Июль. — Т. 95, вып. 3. — С. 036802. — DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.036802. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.95.036802>.
17. *Abrikosov A. A.* Fundamentals of the theory of metals. — Mineola, NY : Dover Publications, 11.2017.
18. Origin of magnetic moments in defective TiO₂ single crystals / S. Zhou [и др.] // *Phys. Rev. B.* — 2009. — Март. — Т. 79, вып. 11. — С. 113201. — DOI: 10.1103/PhysRevB.79.113201. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.79.113201>.
19. Room-temperature ferromagnetism in epitaxial titanium nitride thin films / S. Gupta [и др.] // *Acta Materialia.* — 2019. — Т. 166. — С. 221–230. — DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.12.041>. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645418309923>.
20. Suppressed Superconductivity in Ultrathin Mo₂N Films due to Pair-Breaking at the Interface / M. Kuzmiak [и др.] // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.* — 2022. — Т. 35, № 7. — С. 1775–1780. — DOI: 10.1007/s10948-022-06197-6. — URL: <https://doi.org/10.1007/s10948-022-06197-6>.
21. Electron phase-breaking time in ultra-thin Nb films / A. Lomakin [и др.] // *St. Petersburg State: Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics.* — 2022. — Т. 15. — С. 64–69. — DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.153.312>.

22. *M. Z. J. Electrons and Phonons: The Theory of Transport Phenomena in Solids* // New York: Oxford Univ. Press. — 2001. — Февр. — URL: <https://global.oup.com/academic/product/electrons-and-phonons-9780198507796?cc=us&lang=en&>.
23. XPS Study of Niobium and Niobium-Nitride Nanofilms / A. V. Lubenchenko [и др.] // *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. — 2018. — Т. 12, № 4. — С. 692—700. — DOI: 10.1134/S1027451018040134. — URL: <https://doi.org/10.1134/S1027451018040134>.
24. *Finkel'stein A.* Suppression of superconductivity in homogeneously disordered systems // *Phys. B: Condens. Matter*. — 1994. — Март. — Т. 197, № 1—4. — С. 636—648. — DOI: 10.1016/0921-4526(94)90267-4.
25. *Abrikosov A., Gor'kov L.* Contribution to the theory of superconducting alloys with paramagnetic impurities // *Sov. Phys. JETP*. — 1961. — Т. 12, № 6. — С. 1243—1253.
26. Tunable superconducting nanoinductors / A. J. Annunziata [и др.] // *Nanotechnology*. — 2010. — Окт. — Т. 21, № 44. — С. 445202. — DOI: 10.1088/0957-4484/21/44/445202. — URL: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/21/44/445202>.