

*На правах рукописи*

**Семенов Александр Владимирович**

**Проскальзывание фазы, поглощение электромагнитного  
излучения и формирование отклика в детекторах на основе  
узких полосок сверхпроводников**

Специальность 01.04.03 — радиофизика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2010

Работа выполнена в Московском педагогическом государственном университете.  
на кафедре общей и экспериментальной физики факультета физики и  
информационных технологий

Научный руководитель      доктор физико-математических наук  
**Девятов Игорь Альфатович**

Официальные оппоненты    доктор физико-математических наук  
**Лукичёв Владимир Фёдорович**

доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
**Тарасов Михаил Александрович**

Ведущая организация        Институт физики микроструктур РАН

Защита состоится “21” марта 2011 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета Д 212.154.22 при Московском педагогическом государственном университете по адресу: 119435, г. Москва, ул. Малая Пироговская, д. 29, ауд. 30.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского педагогического государственного университета по адресу: 119991, Москва, Малая Пироговская ул., д. 1.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_ ” февраля 2011 года.

Учёный секретарь  
диссертационного совета

Ильин В.А.

# Общая характеристика работы

Диссертация посвящена теоретическому исследованию процессов в абсорберах детекторов электромагнитного излучения на основе сверхпроводниковых наноструктур. Работа включила в себя микроскопические расчёты неравновесных функций распределения квазичастиц и фононов в абсорбере детектора излучения на кинетической индуктивности, а также расчёт зависимости отклика этого детектора от величины тока смещения и условий теплообмена абсорбера с подложкой; микроскопическое рассмотрение задачи о флуктуационном проскальзывании фазы в диффузной сверхпроводящей нанопроволоке, смещённой током и помещённой во внешнее магнитное поле; моделирование зависимости формы отклика сверхпроводникового однофотонного детектора от параметров детектора и схемы его смещения, а также исследование возможности применения сверхпроводникового однофотонного детектора, разрешающего число фотонов, в качестве чувствительного элемента приёмных модулей современных телекоммуникационных линий.

## **Актуальность исследований**

Прогресс, достигнутый в последнее десятилетие в технологии изготовления сверхпроводящих наноструктур, ознаменовал начало нового этапа в развитии сверхпроводниковой электроники, связанного с использованием структур с характерными размерами в плане порядка 100 нм. Среди уже достигнутых практических результатов - реализация джозефсоновских кубитов и других искусственных квантовых систем, создание усилителей и смесителей с чувствительностью, ограниченной квантовым пределом, создание высокочувствительных сверхпроводниковых болометров и однофотонных детекторов с рекордными временными и шумовыми характеристиками. В то же время, переход к работе со структурами нанометровых масштабов сделал актуальными ряд фундаментальных вопросов, связанных с природой и динамикой термодинамических и квантовых флуктуаций, а также некоторых неравновесных явлений в низкоразмерных сверхпроводниках. Разработке находящихся на стыке прикладных и фундаментальных исследований вопросов о фотоиндуцированных неравновесных процессах и о флуктуациях в узких сверхпроводящих полосках и посвящена настоящая диссертационная работа.

Одним из наиболее перспективных сверхпроводниковых детекторов электромагнитного излучения является детектор на кинетической индуктивности (kinetic-inductance detector, KID) [1, 2, 3]. Базовая идея заключается в использовании в качестве величины, чувствительной к поглощённой мощности, индуктивности абсорбера вместо его активного сопротивления, что позволяет уйти от шумов Найквиста, - основной составляющей шумов

болометров, использующих отклик активного сопротивления. Согласно существующим оценкам, эквивалентная мощность шума (Noise Equivalent Power, NEP) детектора на кинетической индуктивности может в ряде случаев быть на несколько порядков меньше, чем у традиционных болометров, работающих при той же температуре. Низкий уровень собственных шумов особенно актуален при использовании детектора для увеличения точности наблюдений в дальней части ИК - диапазона, где существующие детекторы не позволяют реализовать режим ограничения флуктуациями принимаемого сигнала.

Однако многочисленные попытки реализации детектора на кинетической индуктивности до совсем недавнего времени<sup>1</sup> терпели неудачу. Одной из основных трудностей, стоящих на пути к реализации преимуществ детектора на кинетической индуктивности, связанных с его низким шумом, является малая абсолютная величина отклика кинетической индуктивности, не позволяющая эффективно считывать выходной сигнал детектора и ограничивающая чувствительность шумами схемы съёма. В силу этого, исследование вопроса о предельно достижимой величине отклика данного типа детектора весьма актуально для его практической реализации.

Другая, уже осуществлённая, возможность, возникшая в результате прогресса в технологии изготовления сверхпроводящих структур нанометровых размеров – создание сверхпроводниковых однофотонных детекторов в инфракрасном диапазоне длин волн. В 2001 г. обнаружен однофотонный отклик узких (шириной порядка 100 нм) полосок нитрида ниобия, смещённых постоянным током [6, 7]. Исследования, проведенные в последующие 10 лет, [8, 9, 10, 11] показали перспективность разработки однофотонных детекторов на основе этого эффекта. На сегодняшний день сверхпроводниковые однофотонные детекторы (Superconducting Single-Photon Detector, SSPD) стали коммерческим продуктом, круг применений которого постоянно расширяется. SSPD обладают эффективностью детектирования до 30% на длине волны 1.3 мкм и до 15% на длине волны 1.55 мкм. Демонстрированы скорость счёта более 1 ГГц, уровень ложных срабатываний ниже  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , нестабильность переднего фронта отклика (джиттер) менее 20 пс, однофотонный отклик вплоть до энергий фотонов, соответствующих длине волны 5 мкм. В то же время, ряд принципиальных вопросов, относящихся к физике работы детектора, остаются недостаточно разработанными, что, безусловно, затрудняет его дальнейшую оптимизацию, и, в частности, продвижение в сторону меньших энергий регистрируемых квантов.

Принципиальное ограничение на чувствительность сверхпроводнико-

---

<sup>1</sup>Первые пригодные для практического применения устройства появились в 2009 г. [4, 5], т.е. уже после завершения работы над соответствующим разделом настоящего диссертационного исследования.

вых детекторов, работающих ниже температуры сверхпроводящего перехода, накладывается процессами, связанными с нарушением фазовой когерентности сверхпроводящего состояния абсорбера. Такими процессами в случае однородных абсорберов являются топологические флуктуации проскальзывания фазы параметра порядка – термические или квантовые. Так, существует предположение, что ложные срабатывания однофотонных детекторов на основе узких сверхпроводящих полосок обусловлены термически активированными парами вихрь-антивихрь [12]. Ограничение чувствительности детектора на кинетической индуктивности при изготовлении его абсорбера в виде узкой полоски также должно обуславливаться флуктуациями проскальзывания фазы - одномерными или двумерными. В силу этого теоретическое исследование явления проскальзывания фазы актуально для оптимизации данных детекторов излучения.

С другой стороны, явление проскальзывания фазы в одномерных и квазиодномерных сверхпроводниках в последние годы стало объектом интенсивных фундаментальных исследований [13, 14]. Главные цели этих исследований - достоверное экспериментальное обнаружение квантовых проскальзываний фазы и теоретическое вычисление частоты, с которой они должны происходить. Проведены эксперименты на уникальных образцах, представляющих собой сверхпроводящие трубки с площадью сечения порядка  $100 \text{ нм}^2$  и менее [14]. Результаты большинства экспериментов, однако, остаются дискуссионными, в том числе из-за отсутствия микроскопической динамической теории явления проскальзывания фазы.

Наконец, недавно было выдвинуто предложение использовать квантовые проскальзывания фазы для реализации суперпозиций квантовых состояний в квантовом бите нового типа (т.н. phase-slip qubit) [15]. Продемонстрирована формальная аналогия между процессами когерентного квантового проскальзывания фазы и джозефсоновского туннелирования [16], благодаря которой предложенный кубит является полным динамическим аналогом хорошо известного джозефсоновского зарядового кубита; однако, “phase-slip” кубит должен при этом обладать преимуществом: в нём отсутствуют шумы спонтанной поляризации в туннельном барьере, ограничивающие время когерентности джозефсоновских кубитов. Реализация идеи “phase-slip” кубита также требует разработки динамической теории процесса квантового проскальзывания фазы.

Из всего вышеперечисленного можно заключить, что теоретическое исследование физических процессов в новых сверхпроводниковых детекторах излучения на основе узких полосок является, несомненно, **актуальной задачей**.

**Целью диссертационной работы** явилось исследование вопроса о предельных теоретически достижимых характеристиках детекторов из-

лучения на основе узких полосок сверхпроводника. Данное исследование включило в себя микроскопические расчёты отклика детектора на кинетической индуктивности, функционирующего в условиях низкой температуры и смещения током произвольной величины; микроскопическое рассмотрение задачи о флуктуационном проскальзывании фазы в одномерном диффузном сверхпроводнике, обуславливающим шумы детекторов; а также разработку ряда вопросов, связанных с механизмом работы и оптимизацией характеристик однофотонного сверхпроводникового детектора на основе узких полосок нитрида ниобия.

В качестве **объекта исследования** выбраны тонкоплёночные полоски сверхпроводников, для которых выполнено условие диффузного предела – длина свободного пробега электронов мала по сравнению с длиной когерентности. Именно такими объектами являются абсорберы детекторов излучения, которым посвящена настоящая работа.

**Предмет исследования** включает в себя:

- Процессы поглощения электромагнитного поля и формирования индуктивного отклика в одномерном диффузном сверхпроводнике в присутствии тока, сравнимого с током однородного распаривания
- Процесс флуктуативного проскальзывания фазы в одномерном диффузном сверхпроводнике при произвольных температуре, токе и внешнем магнитном поле.
- Эффект однофотонного детектирования в узкой токонесущей сверхпроводящей полоске.

**Задачи работы:**

- Построение модели поглощения энергии высокочастотного электромагнитного поля в диффузной сверхпроводящей плёнке, несущей ток, сравнимый с критическим током распаривания.
- Разработка алгоритма численного решения системы кинетических уравнений, описывающих поглощение электромагнитной энергии и её релаксацию в электронной и фононной подсистемах абсорбера; численные расчёты отклика детектора на кинетической индуктивности.
- Применение уравнений Узаделя для описания одномерного диффузного сверхпроводника, смещённого током и помещённого во внешнее магнитное поле, в процессе проскальзывания фазы.
- Создание схемы совместного численного решения уравнений, описывающих одномерный сверхпроводник в процессе проскальзывания

фазы, и расчёт зависимости порога свободной энергии для флуктуации проскальзывания фазы от тока, магнитного поля и температуры.

- Исследование динамики резистивного состояния, образующегося в полоске сверхпроводникового однофотонного детектора после поглощения фотона, посредством численного решения модельных уравнений теплового баланса и сравнения полученных результатов с экспериментальными данными.

**Методы исследования** включают аналитическое и численное решение квазиклассических уравнений теории сверхпроводимости в диффузном пределе (уравнений Узаделя), записанных в технике реального и мнимого времени; совместное численное решение уравнений теплового баланса и уравнений, описывающих электрическую схему смещения детектора.

В процессе работы были получены следующие **новые научные результаты**:

- В технике Келдыша впервые получено выражение для электрон-фотонного столкновительного интеграла в диффузном пределе при произвольном виде когерентных факторов, обобщающее результат теории Элиашберга [17] на случай ненулевых токов и магнитных полей.
- Произведён теоретический анализ работы сверхпроводникового детектора излучения на кинетической индуктивности. Для разных условий теплообмена с подложкой рассчитан предельный отклик детектора на кинетической индуктивности при низкой температуре.
- Получены зависимости порога свободной энергии для флуктуации проскальзывания фазы в одномерном диффузном сверхпроводнике от тока, магнитного поля и температуры.
- В пределе магнитных полей, близких к критическому, впервые получено уравнение типа уравнения Гинзбурга-Ландау, описывающее состояние одномерного диффузного сверхпроводника.
- Аналитическими оценками и численным моделированием исследована зависимость формы отклика сверхпроводникового однофотонного детектора от величины кинетической индуктивности детектора и параметров схемы смещения. Показано, что достижение предельных временных характеристик возможно при уменьшении кинетической индуктивности ниже 5 нГн. Предсказанное значение хорошо совпадает с данными эксперимента.

### **На защиту выносятся следующие положения:**

- Поглощение энергии высокочастотного электромагнитного поля в диффузном сверхпроводнике может быть полностью описано в рамках метода Келдыша-Узаделя. Получающийся при этом интеграл электрон-фотонных столкновений является обобщением результата теории Элиашберга на случай произвольного вида когерентных факторов.
- Максимальный отклик сверхпроводникового детектора на кинетической индуктивности на основе узкой и длинной сверхпроводящей полоски достигается при величине тока смещения, сравнимого с током распаривания. Положение максимума определяется конкуренцией между ростом тока и кинетической индуктивности полоски и уменьшением относительной величины отклика кинетической индуктивности из-за сокращения времени рекомбинации квазичастиц.
- Зависимости порога свободной энергии для процесса проскальзывания фазы в одномерном диффузном сверхпроводнике от магнитного поля и тока во всём диапазоне температур качественно сходны с получающимися в пределе высоких температур  $1 - \frac{T}{T_c} \ll 1$  в рамках теории Гинзбурга - Ландау; количественное отличие составляет приблизительно два раза в пределе низких температур, малых токов и магнитных полей, и уменьшается с ростом этих параметров.
- В окрестности критического магнитного поля состояние одномерной диффузной нанопроволоки может быть описано замкнутым уравнением для параметра порядка типа уравнения Гинзбурга-Ландау, следующим из уравнений микроскопической теории как их предельный случай.
- Уменьшение кинетической индуктивности сверхпроводникового однофотонного детектора до величин менее 5 нГн позволяет достичь длительностей отклика, обусловленных собственной динамикой образованного после поглощения фотона резистивного состояния.

### **Практическая значимость работы.**

Практическая значимость работы обусловлена востребованностью для практики исследуемых в ней устройств на основе узких полосок сверхпроводников.

Результаты, полученные при изучении задачи о теоретически предельном отклике сверхпроводникового детектора на кинетической индуктивности, будут востребованы для оптимизации детекторов этого типа. Кроме того, развитая теория поглощения энергии электромагнитного поля в

сверхпроводнике с произвольным видом когерентных факторов актуальна для разработки новых типов детекторов излучения, например, детекторов на основе структур с туннельными контактами (SINIS и SIS'IS структур), а также для фундаментальных исследований оптики нетрадиционных сверхпроводников.

Результаты, полученные при микроскопическом рассмотрении задачи о проскальзывании фазы в диффузной нанопроволоке, необходимы для вычисления предельных шумовых характеристик детекторов на основе узких сверхпроводящих полосок и других устройств сверхпроводниковой электроники, как уже реализованных, так и проектируемых. С точки зрения фундаментальных исследований, те же результаты позволят уточнить условия, в которых могут наблюдаться термодинамические и квантовые проскальзывания фазы.

Результаты теоретических исследований предельных временных характеристик сверхпроводниковых однофотонных детекторов необходимы для дальнейшей оптимизации данных устройств, в частности, для создания практических детекторов со скоростью счёта более 1 ГГц.

**Апробация работы.** Результаты представленных в диссертации исследований докладывались на следующих международных конференциях:

- Applied Superconductivity Conference (ASC-2010)
- Superconductivity and Magnetism (SM-2010)
- XIV Международный симпозиум “Нанофизика и наноэлектроника” (2010)
- International conference on Micro and Nanoelectronics (ICMNE-2005, 2007, 2009)

**Публикации** Результаты настоящего исследования опубликованы в шести печатных работах, список которых приведён в конце автореферата.

**Объем и структура диссертации** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка публикаций автора, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 107 страниц, включая 17 рисунков.

## Основное содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность выбранной темы, формулируется цель исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость работы, приводится краткое содержание диссертации.

### Глава 1. Обзор литературы

В главе дан обзор литературы в предметной области диссертационного исследования.

В §1.1 описан принцип работы сверхпроводникового детектора на кинетической индуктивности. Приведены содержащиеся в литературе оценки его чувствительности и модельные результаты, относящиеся к бестоковому случаю. Обоснована необходимость более общего рассмотрения для исследования вопроса о предельной чувствительности детектора.

В §1.2 приводятся общие сведения о явлении проскальзывания фазы. Излагается теория этого явления для случая высоких температур, разработанная Ланжером и Амбегаокармом. Упомянуты основные экспериментальные и теоретические работы последнего десятилетия, посвящённые явлению проскальзывания фазы. Обоснована актуальность микроскопического рассмотрения задачи о проскальзывании фазы в диффузной нанопроволоке.

В §1.3 описаны устройство и принцип действия сверхпроводникового однофотонного детектора, приведены его основные характеристики. Обозначены проблемы теоретического описания и направления оптимизации детектора.

## **Глава 2. Теоретический анализ работы сверхпроводящего детектора микроволнового излучения на кинетической индуктивности**

Глава 2 посвящена теоретическому описанию работы детектора на кинетической индуктивности на основе узкой диффузной сверхпроводящей полоски. Происходящие в детекторе неравновесные процессы поглощения электромагнитного излучения, релаксации, размножения и рекомбинации квазичастиц и формирования индуктивного отклика описаны в рамках теории Узаделя, сформулированной в технике реального времени.

В §2.1 описана модель детектора и сформулированы исходные уравнения. Получено выражение для электрон-фотонного источника, обобщающее результат Элиашберга [17] на случай ненулевого тока смещения, а также электрон - фононный и фонон - электронный столкновительные интегралы. Описана процедура линеаризации кинетических уравнений.

В §2.2 с использованием обобщения теории Маттиса - Бардина на случай произвольного вида спектральных функций получено выражение для индуктивного отклика детектора.

В §2.3 приведены результаты численных расчётов неравновесных функций распределения квазичастиц и фононов и отклика детектора при различных токах смещения и при различных условиях теплообмена с подложкой. Показано, что отклик детектора на кинетической индуктивности существенно зависит от соотношения между скоростью ухода фононов в подложку  $\tau_{esc}^{-1}$  и скоростью фонон - электронной релаксации  $\tau_{p-b}^{-1}(\omega_0)$ . В режиме “фононного термостата”  $\tau_{p-b}^{-1}(\omega_0)/\tau_{esc}^{-1} \rightarrow 0$  в сверхпроводящей пленке нет мультипликации фононов из - за фонон - электронного взаимодействия

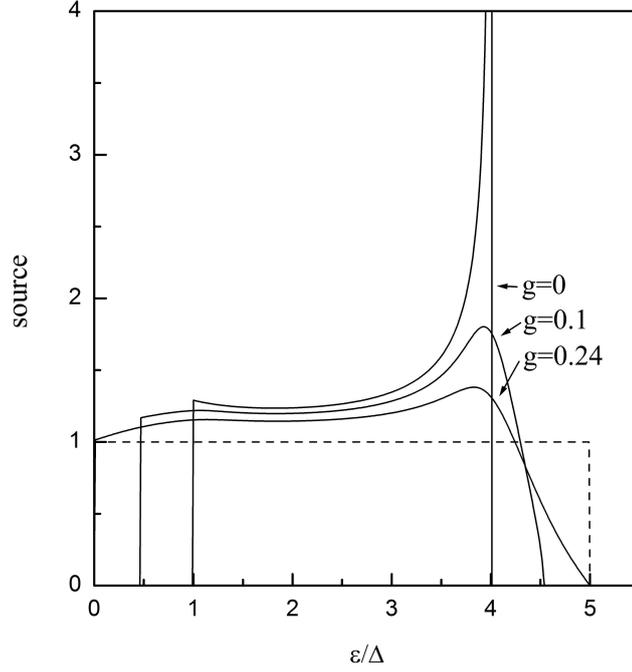


Рис. 1. Нормированная на скорость электрон - фотонных столкновений функция источника как функция энергии квазичастиц, рассчитанная для различных значений “параметра распаривания”  $g$  ( $g = 0$  соответствует нулевой ток,  $g = 0.24$  – ток однородного распаривания). Частота электромагнитного сигнала  $\omega_0$  положена равной  $5\Delta_0$ , температура  $T = 0$ . Пунктир соответствует нормальному металлу.

и реактивный отклик устройства существенно меньше достигаемого в обратном пределе “эффективно запертых фононов”  $\tau_{esc}^{-1}/\tau_{p-b}^{-1}(\omega_0) \rightarrow 0$ , когда мультипликация есть. Проведено сравнение полученной величины отклика с результатами предыдущих расчетов [2] и показано, что отклик данного устройства существенно меньше и конечен для любого соотношения параметров.

### Глава 3. Проскальзывание фазы в диффузной сверхпроводящей нанопроволоке

В главе 3 задача о флуктуационном проскальзывании фазы в узкой (максимальный размер в сечении меньше длины когерентности при данной температуре) диффузной сверхпроводящей полоске постоянного сечения рассматривается в формализме уравнений Узаделя [18], записанных в мацубаровской технике. Численно рассчитаны координатно - зависимые функции Грина, соответствующие седловой точке траектории в конфигурационном пространстве, и получена зависимость барьера свободной энергии от транспортного тока, приложенного магнитного поля и температуры.

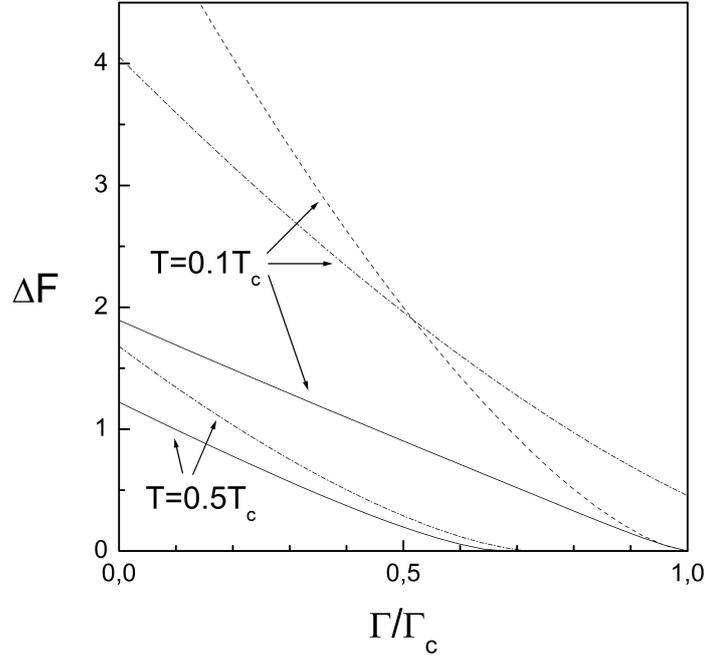


Рис. 2. Зависимость порога свободной энергии от “параметра распаривания”  $\Delta F(\Gamma)$  при  $J_s = 0$ . Сплошные кривые – численный расчёт, пунктир – формула для предельного случая больших магнитных полей ( $1 - \frac{\Gamma}{\Gamma_c} \ll 1$ ), пунктир с точками – теория Гинзбурга - Ландау. Свободная энергия нормирована на характерный масштаб энергии конденсации  $\delta F_{ns}$ , “параметр распаривания” нормирован на своё критическое значение при нулевой температуре  $\Gamma_{c0}$ .

В §3.1 осуществлена формализация задачи в рамках квазиклассических уравнений теории сверхпроводимости для “грязного” предела. В адекватной данной задаче калибровке записано уравнение Узаделя для одномерного диффузного сверхпроводника, смещённого током и помещённого во внешнее магнитное поле. Определены граничные условия, соответствующие описываемому состоянию “седловой точки” солитонному решению. Получена формула, выражающая порог свободной энергии для флуктуации проскальзывания фазы через узаделевские функции Грина.

В §3.2 показано, что в окрестности критического магнитного поля система, состоящая из уравнения Узаделя и уравнения самосогласования для параметра порядка, сводится к замкнутому уравнению для параметра порядка типа уравнения Гинзбурга-Ландау. Получены решение этого уравнения, описывающее состояние “седловой точки”, и формула для порога свободной энергии.

В §3.3 описана процедура и приведены результаты численного решения микроскопических уравнений, описывающих одномерный диффузный сверхпроводник в состоянии “седловой точки”. Построены зависимости порога свободной энергии от магнитного поля и тока при различных темпе-

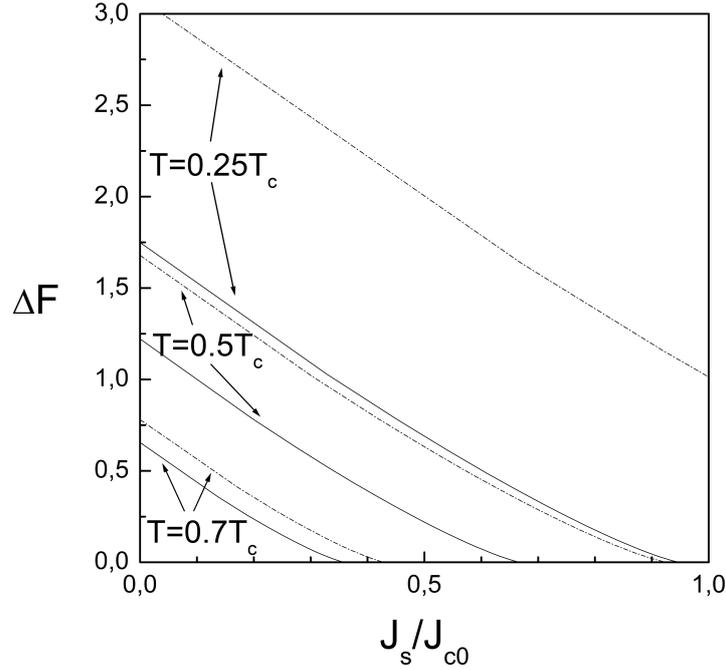


Рис. 3. Зависимость порога свободной энергии от тока  $\Delta F(J_s)$  при  $\Gamma = 0$ . Сплошные кривые – численный расчёт, пунктир с точками – теория Гинзбурга - Ландау. Свободная энергия нормирована на характерный масштаб энергии конденсации  $\delta F_{ns}$ , а ток нормирован на критический ток в низкотемпературном пределе  $J_{c0}$ .

ратурах и произведено их сравнение с аналитическими аппроксимациями. Рассчитанные зависимости порога свободной энергии от магнитного поля и тока во всём диапазоне температур оказались качественно сходны с получающимися в пределе высоких температур  $1 - \frac{T}{T_c} \ll 1$  в рамках теории Гинзбурга-Ландау; количественное отличие составляет приблизительно два раза в пределе низких температур, малых токов и магнитных полей, и уменьшается с ростом этих параметров.

#### Глава 4. Оптимизация сверхпроводникового однофотонного детектора

В главе исследуются перспективы оптимизации сверхпроводникового однофотонного детектора (SSPD) путём изменения его геометрии.

В §4.1 моделированием и сравнением с экспериментом исследуется вопрос о предельных временных характеристиках отклика SSPD, обусловленных динамикой его резистивного состояния. Для моделирования формы импульса отклика предложена электротермическая модель, включающая уравнение теплового баланса, уравнение, описывающее отклик схемы смещения детектора, и динамическое уравнение, описывающее отклик сверхтока. Совместное численное решение уравнений модели показывают, что для индуктивности, соответствующей полоске стандартного однофотонного детектора длиной 500 мкм ( $L_k = 500$  нГн), время жизни резистивного

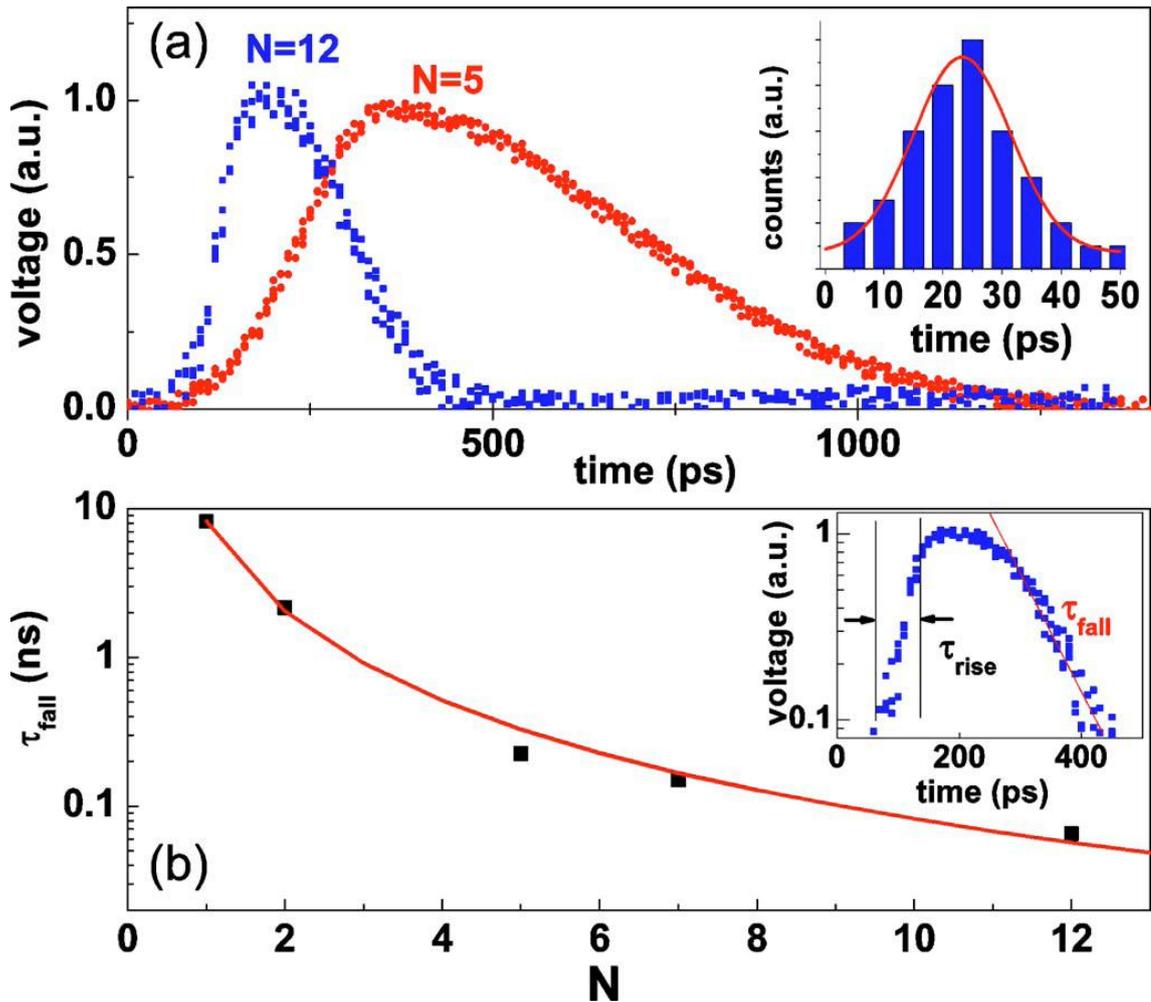


Рис. 4. Временные характеристики отклика SSPD, состоящих из параллельно включённых секций. (a) Импульсы напряжения с детекторов, состоящих из 5 и 12 секций. Вставка - джиттер для 12-секционного детектора. (b) Характеристическое время спада  $\tau_{fall}$  в зависимости от числа параллельных секций  $N$ . Сплошная кривая - зависимость  $\propto N^{-2}$ . Вставка: импульс напряжения с 12-секционного детектора, построенный в полулогарифмическом масштабе.

состояния оказывается равным приблизительно 100 пс, в то время как для кинетической индуктивности в 5 нГн оно сокращается до 50 пс. При этом в первом случае время существования резистивной области приходится в основном на передний фронт импульса, причём успевает сформироваться электротепловой домен. Когда происходит падение тока до величины, соответствующей абсолютной неустойчивости домена, резистивная область быстро схлопывается и далее происходит релаксационное восстановление тока с постоянной времени  $\sim 10$  нс. Во втором случае, резистивная область не успевает дорасти до размера, соответствующего электротепловому домену, из-за слишком быстрого падения тока и соответствующего уменьшения джоулева нагрева. Значительная часть времени жизни резистивного со-

стояния приходится на задний фронт импульса, и, тем самым, время спада перестаёт определяться только кинетической индуктивностью. Полная длительность импульса, получаемая в расчёте, составляет приблизительно 120 пс. Эта величина хорошо согласуется с данными эксперимента [10] (Рис. 4), в котором исследовался отклик с детекторов, чувствительный элемент которых представлял собой несколько параллельно включённых полосок и кинетическая индуктивность которых была тем самым уменьшена по сравнению со стандартной конфигурацией. Таким образом, изложенные в §4.1 результаты показывают, что уменьшением кинетической индуктивности SSPD возможно добиться выхода его временного разрешения на предельные значения, определяемые динамикой резистивного состояния.

В §4.2 исследована возможность применения SSPD, разрешающих число фотонов в импульсе, в качестве детекторов в телекоммуникационных линиях связи. Проведены оценки числа фотонов в импульсе, необходимого для реализации требуемой современными протоколами доли ошибочных битов (bit error ratio, BER) на уровне  $10^{-11}$ . Показано, что при эффективности детектирования 0.1 требуется иметь в оптическом импульсе  $\sim 250$  фотонов, что в среднем на 2 порядка меньше, чем при использовании существующих приёмных модулей. Результаты §4.2 демонстрируют перспективность использования SSPD, разрешающих число фотонов в импульсе, в телекоммуникационных применениях.

В **заключении** сформулированы научные результаты работы.

В **приложение** вынесена большая часть технических выкладок, а также другие материалы вспомогательного характера.

**Основные результаты диссертации изложены в следующих работах** (все издания, в которых опубликованы работы, относятся к числу рекомендованных ВАК):

1. А.В. Семенов, П.А. Крутицкий, И.А. Девятов, “Микроскопическая теория явления проскальзывания фазы в узкой диффузной сверхпроводящей полоске”, Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики (2010), т. 92, вып. 11, с. 842; авторских 80%, 0.3 п.л.
2. А.В. Семенов, И.А. Девятов, М.Ю. Куприянов, “Теоретический анализ работы сверхпроводящего детектора микроволнового излучения на кинетической индуктивности”, Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики (2008), т. 88, вып. 7, с. 514; авторских 70%, 0.4 п.л.
3. И.А. Девятов, П.А. Крутицкий, А.В. Семенов, Д.В. Гончаров, “Неравновесные флуктуации тонкой металлической

- диффузной пленки под действием микроволнового излучения”, Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики (2008), т. 88, вып. 4, с. 291; авторских 10%, 0.375 п.л.
4. L. Maingault, M. Tarkhov, I. Florya, A. Semenov, R. Espiau de Lamaestre, P. Cavalier, G. Gol'tsman, J.-P. Poizat, and J.-C. Villegier “Spectral dependency of Superconducting Single Photon Detectors”, Journal of Applied Physics (2010), vol. 107, issue 9, p. 116103; авторских 10%, 0.2 п.л.
  5. Markus Marksteiner, Alexander Divochiy, Michele Sclafani, Philipp Haslinger, Hendrik Ulbricht, Alexander Korneev, Alexander Semenov, Gregory Gol'tsman and Markus Arndt “Superconducting NbN detector for neutral nanoparticles”, Nanotechnology (2009), vol. 20, issue 45, p. 455501; авторских 10%, 0.375 п.л.
  6. M. Tarkhov, J. Claudon, J. Ph. Poizat, A. Korneev, A. Divochiy, O. Minaeva, V. Seleznev, N. Kaurova, B. Voronov, A. V. Semenov, and G. Gol'tsman, “Ultrafast reset time of Superconducting Single Photon Detectors”, Appl. Phys. Lett., (2008), vol. 92, issue 24, p. 241112; авторских 10%, 0.18 п.л.

## Литература

- [1] *Grossman E. N., McDonald D. G., Sauvageau J. E.* Superconducting kinetic-inductance radiometer // *IEEE Trans. Magn.* — 1991. — Vol. 27. — Pp. 2757–2763.
- [2] *Sergeev A. V., Mitin V. V., Karasik B. S.* Ultrasensitive hot-electron kinetic-inductance detectors operating well below the superconducting transition // *Appl. Phys. Lett.* — 2002. — Vol. 80. — Pp. 817–819.
- [3] A broadband superconducting detector suitable for use in large arrays / P. K. Day, H. G. LeDuc, B. A. Mazin, et al. // *Nature.* — 2003. — Vol. 425. — Pp. 817–820.
- [4] Experimental evidence for a surface distribution of two-level systems in superconducting lithographed microwave resonators / J. Gao, M. Daal, A. Vayonakis, S. Kumar, J. Zmuidzinas, B. Sadoulet, B. A. Mazin, P. K. Day, H. G. LeDuc // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — Vol. 92. — Pp. 152505–1–152505–4.
- [5] NIKA: A millimeter-wave kinetic inductance camera / A. Monfardini, L. J. Swenson, A. Bidaud, F. X. Dresert, S. J. C. Yates, A. Benoit, A. M. Baryshev, J. J. A. Baselmans et al. // *E-Print arxiv 1004.2209v2 [astro-ph.IM]*. — 2010.
- [6] Picosecond superconducting single-photon optical detector / G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov et al. // *Appl. Phys. Lett.* — 2001. — Vol. 79. — Pp. 705–707.
- [7] *Semenov A., Gol'tsman G., Korneev A.* Quantum detection by current carrying superconducting film // *Physica C.* — 2001. — Vol. 352. — Pp. 349–356.
- [8] Time Delay of the Resistive State Formation in Superconducting NbN Stripes Illuminated by Single Optical Photons / J. Zhang, W. Slysz, A. Verevkin, R. Sobolewski, O. Okunev, G. Gol'tsman // *Phys. Rev. B.* — Vol. 67.
- [9] Kinetic-Inductance-Limited Reset Time of Superconducting Nanowire Photon Counters / A. Kerman, E. Dauler, W. Keicher, J. Yang, K. Berggren, G. Gol'tsman, B. Voronov // *Appl. Phys. Lett.* — 2006. — Vol. 88. — Pp. 111–116.

- [10] Ultrafast reset time of Superconducting Single Photon Detectors / M. Tarkhov, J. Claudon, J. P. Poizat, A. Korneev, A. Divochiy, O. Minaeva, V. Seleznev, N. Kaurova et al. // *Appl. Phys. Lett.* — 2008. — Vol. 92. — Pp. 241112-1-241112-3.
- [11] Superconducting nanowire photon-number-resolving detector at telecommunication wavelengths / A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld, A. Gaggero, R. Leoni, F. Mattioli, A. Korneev, V. Seleznev et al. // *Nature Photonics.* — 2008. — Vol. 2. — Pp. 302-306.
- [12] Current-assisted thermally activated flux liberation in ultrathin nanopatterned NbN superconducting meander structures / H. Bartolf, A. Engel, K. Il'in, A. Schilling, M. Siegel, H.-W. Hubers, A. D. Semenov // *Physical Review B.* — 2010. — Vol. 81. — Pp. 024502-1-024502-12.
- [13] *Arutyunov K. Y., Golubev D. S., Zaikin A. D.* Superconductivity in one dimension // *Phys. Rep.* — 2008. — Vol. 464. — Pp. 1-70.
- [14] *Bezryadin A.* Quantum suppression of superconductivity in nanowires // *J. Phys.: Condens. Matter.* — 2008. — Vol. 20. — Pp. 043202-1-043202-19.
- [15] *Mooij J., Harmans C.* Phase-slip flux qubits // *New J. Phys.* — 2005. — Vol. 7. — Pp. 219-224.
- [16] *Mooij J., Nazarov Y.* Quantum phase slip junctions // *Nat. Phys.* — 2006. — Vol. 2. — Pp. 169-176.
- [17] *Элиашберг Г. М.* К теории высокочастотной проводимости сверхпроводников // *ЖЭТФ.* — 1971. — Т. 61. — С. 1254-1271.
- [18] *Usadel K. D.* Generalized diffusion equation for superconducting alloys // *Phys. Rev. Lett.* — 1970. — Vol. 25. — Pp. 507-509.