

*На правах рукописи*

Клёнов Николай Викторович

**СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЕ УСТРОЙСТВА, ОСНОВАННЫЕ НА  
НЕТРИВИАЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ И АМПЛИТУДНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИКАХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ СТРУКТУР**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2008

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники  
физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент  
Корнев Виктор Константинович

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

кандидат физико-математических наук  
Гудков Александр Львович

Ведущая организация: Физико-технологический институт РАН, г. Москва

Защита диссертации состоится “05” июня 2008 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д.501.001.66 в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ленинские Горы, физический факультет МГУ, аудитория 5-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан “ ” 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д.501.001.66

Ершов А.П.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Развитие и внедрение *сверхпроводниковых микро- и нанотехнологий, а также систем для квантовых вычислений*, является важнейшим условием прогресса современной электроники, современных телекоммуникационных систем, систем обработки и защиты информации. Прогресс беспроводных и спутниковых средств связи, радарных систем диктует использование цифровых технологий, создание передающих и приемных устройств с прямой оцифровкой СВЧ сигналов [1]-[4]. Такая задача может быть успешно решена с применением сверхпроводниковых АЦП, для которых были продемонстрированы предельно низкая шумовая температура, крайне высокая линейность и динамический диапазон. Использование стандартной ниобиевой технологии с плотностью критического тока джозефсоновских переходов  $1 \text{ кА/см}^2$  и  $4,5 \text{ кА/см}^2$  позволило создать сверхпроводниковые АЦП для X-диапазона частот [5]-[8]; переход к технологии с более высокой плотностью критического тока позволит разработать такие АЦП для K-диапазона.

В то же время, общая эффективность приемных систем на основе сверхпроводниковых цифровых устройств ограничивается антенной и следующим за ней низкошумящим предусилителем, имеющим более высокую шумовую температуру, более низкую линейность и меньший динамический диапазон по сравнению со сверхпроводниковым АЦП. Предложенные для решения этих проблем сквид-усилители [9]-[12] легко интегрируются со сверхпроводниковым АЦП в один криогенный пакет, но, к сожалению, не способны обеспечить требуемые характеристики. Несмотря на достаточно низкую шумовую температуру таких усилителей  $T_N \approx 1...3 \text{ К}$  [10], одновременно низкая температура насыщения  $T_{\text{sat}} \approx 100...150 \text{ К}$  [10]-[11] приводит к слишком малому динамическому диапазону  $D = T_{\text{sat}}/T_N$  сквид-усилителей (порядка  $10...15 \text{ дБ}$  [10]-[11]) в отсутствие цепи эффективной следящей обратной связи. Попытки реализации цепи эффективной обратной связи в гигагерцовом диапазоне частот [12] пока не увенчались успехом.

Новые возможности открывает использование цепочек сквидов постоянного тока (цепочек двухконтактных интерферометров), поскольку динамический диапазон как параллельной, так и последовательной цепочек увеличивается с ростом числа  $N$  ячеек цепочки как  $\sqrt{N}$  (в отсутствие какой-либо цепи обратной связи). Значительное увеличение динамического диапазона многоэлементных устройств дает возможность эффективной работы без цепи следящей обратной связи. Однако при этом на первое место выходит задача существенного повышения линейности характеристик такого устройства. Это может быть

достигнуто за счет использования многоэлементных джозефсоновских устройств с нетривиальной амплитудной характеристикой, обеспеченной специально разработанной структурой и топологией цепей.

Другое направление развития систем обработки и защиты информации связывают с использованием принципиально новых подходов к работе с информацией и созданием квантового компьютера. Крайне высокий интерес к разработке квантового компьютера определяется двумя основными факторами. С одной стороны, согласно известному эмпирическому «закону» Мура степень интеграции микросхем, а вместе с тем, и миниатюризации элементов микросхем, удваивается каждые полтора года, и, следовательно, менее чем через 20 лет размеры интегральной схемы станут порядка атомных, а законы их функционирования будут полностью определяться квантовой механикой. До настоящего времени во всех разработках квантовые эффекты, связанные с малостью размеров различных элементов устройств, воспринимались как преграда на пути миниатюризации. В этой связи одной из задач квантовой теории информации является выяснение того, каким образом можно использовать фундаментальные неклассические свойства информации для нужд технического прогресса. С другой стороны, развитие квантовой теории информации привело к появлению принципиально новых квантовых алгоритмов, значительно более эффективных для некоторых классов задач, чем их классические аналоги. Среди таких алгоритмов можно отметить широко известный алгоритм Шора [13]-[14] для факторизации больших натуральных чисел, роль которого для проблем квантовой криптографии сложно переоценить, а также алгоритм Гровера [15] для поиска в больших неупорядоченных базах данных.

В настоящее время квантовомеханические методы вычислений, обработки и защиты информации рассматриваются одновременно как определенное дополнение и альтернатива по отношению к классическим цифровым методам обработки информации. Успешное завершение активно ведущихся работ по созданию квантового компьютера должно решить многие важные проблемы криптографии и вычислительной техники. С другой стороны, это должно привести к новому освещению фундаментальных проблем квантовой механики и квантовой теории информации. Наиболее перспективной элементной базой реализации такого квантового компьютера являются сверхпроводниковые джозефсоновские наноструктуры.

Первой и наиболее фундаментальной проблемой на пути создания квантового компьютера является разработка и реализация таких типов кубитов (квантовых битов), которые обладают достаточно большим временем декогерентности и позволяют строить

многокубитные цепи. Несмотря на существующие попытки разработок кубитов с использованием ионных ловушек [16], спиновых моментов [17], ядерного магнитного резонанса [18] и т. д., в настоящее время наиболее перспективными типами кубитов признаются твердотельные кубиты на основе эффекта Джозефсона в сверхпроводниках. Лидирующие позиции в области разработки отдельных кубитов и систем кубитов такого типа занимают научные центры Японии, Германии, Голландии, Канады. В японском центре “NEC Fundamental research Laboratories” разрабатывается так называемый зарядовый кубит и системы на его основе [19]-[23], в Йенском институте высоких технологий (IPHT), Германия, и Техническом университете Delft, Голландия, изучается потоковый кубит на основе трехконтактного сверхпроводящего интерферометра [24]-[26], в лабораториях Соединенных Штатов и Германии разрабатывается фазовые кубиты [29]. К настоящему времени достигнут существенный прогресс не только в изучении зарядовых и фазовых кубитов как таковых, но и предложены схемы, позволяющие контролируемым образом связывать кубиты и осуществлять над ними логические операции [27]-[28]; выполнены тонкие эксперименты по обнаружению квантовых когерентных осцилляций в кубитах [29]-[30]; уже давно продемонстрировано макроскопическое квантовое туннелирование [31].

В то же время, одной из наиболее острых проблем для твердотельных кубитов является проблема *декогерентности* - самая главная на сегодня проблема квантовой информатики. Взаимодействие кубитов с окружающей средой ведет к потере когерентности и, как следствие, к нарушению квантовых вычислений. В силу этого представляется крайне актуальным создание квантовых алгоритмов исправления ошибок [32]-[33], а также разработка и реализация так называемых “тихих” кубитов, которые предельно изолированы от воздействия окружающей среды. Для реализации таких “тихих” кубитов в работах, выполненных в Канадском Центре “D-wave systems” [34] и лаборатории криоэлектроники МГУ [35], было предложено использовать джозефсоновские переходы с нетривиальными фазовыми характеристиками - несинусоидальной зависимостью сверхпроводящего тока от джозефсоновской фазы. Такой характер ток-фазовой зависимости (ТФЗ) наблюдается в бикристаллических джозефсоновских переходах на основе высокотемпературных сверхпроводников, а также в SFS джозефсоновских структурах с ферромагнитной прослойкой.

Поэтому данная диссертационная работа, посвященная изучению физических основ построения новых сверхпроводниковых устройств на основе джозефсоновских структур с нетривиальными ток-фазовыми и амплитудными характеристиками, является весьма актуальной.

## **Цель диссертационной работы**

Целью данной работы являются изучение джозефсоновских структур с нетривиальными ток-фазовыми и амплитудными характеристиками и разработка физических основ создания на основе таких структур новых сверхпроводниковых устройств для систем приема, обработки и защиты информации: «тихих» кубитов – базовых элементов квантового компьютера, а также высокочувствительных и высоколинейных широкополосных усилителей гигагерцового диапазона частот.

## **Научная новизна**

Следующие результаты были получены впервые:

1. Синтезированы многоэлементные джозефсоновские структуры со специальным видом амплитудных характеристик, обеспечивающие высокий уровень линейности (до 80-100 дБ) и динамического диапазона отклика напряжения на магнитную компоненту сигнала. На основе таких структур могут создаваться высокочувствительные широкополосные усилители гигагерцового диапазона частот.

2. Предложены и экспериментально проверены для структур на основе многослойной ниобиевой технологии приемы защиты формы отклика напряжения многоэлементной джозефсоновской структуры от негативного влияния распределенного характера структуры и паразитных элементов цепи.

3. Предложен и детально исследован новый тип фазового кубита, являющегося тихим. Рассчитаны характеристики тихого кубита, включая время декогерентности, и проанализированы физические основы осуществления логических операций с тихим кубитом и способы задания и считывания состояний кубита.

4. Исследованы процессы токопереноса в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник (SFS) с учетом s-d рассеяния электронов в ферромагнетике и выделены оптимальные SFS гетероструктуры для создания на их основе тихих кубитов. Рассмотрен механизм связи тихого кубита на основе высокотемпературных сверхпроводников d-типа с окружающей средой через “узловые” квазичастицы.

## **Практическая ценность работы**

В процессе выполнения работы было проведено детальное изучение физических свойств, классической и квантовой динамики джозефсоновских структур с нетривиальными ток-фазовыми и амплитудными характеристиками.

В результате проведенного исследования были синтезированы многоэлементные

джозефсоновские структуры со специальным видом амплитудных характеристик, обеспечивающие высокий уровень линейности и динамического диапазона отклика напряжения на магнитную компоненту сигнала. На основе таких структур могут создаваться высокочувствительные широкополосные усилители гигагерцового диапазона частот.

Проведено экспериментальное исследование многоэлементных джозефсоновских структур, изготовленных на основе ниобиевой технологии, и изучено влияния топологии структур и параметров джозефсоновских элементов на свойства функции отклика многоэлементной структуры.

Предложен и детально проанализирован новый тип кубита – квантового бита, который является тихим вследствие предельно слабой связи с окружающей средой. Рассчитаны характеристики тихого кубита, включая время декогерентности, и проанализированы физические основы осуществления логических операций с таким кубитом.

Полученные результаты могут быть успешно использованы в передовых компаниях, занятых разработкой сверхпроводниковой электроники, и служить основой для последующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в области современных технологий приема, передачи и обработки информации.

### **Достоверность представленных результатов**

Достоверность результатов, приведенных в диссертации, подтверждается тем, что они были получены автором с использованием передового высокотехнологического оборудования, современных методов обработки экспериментальных данных, а также адекватного математического аппарата и программного обеспечения для проведения теоретических расчетов. Полученные результаты находятся в соответствии с имеющимися литературными данными.

### **Личный вклад**

Автором лично было выполнено численное моделирование физических процессов в многоэлементных джозефсоновских структурах с помощью программного комплекса PSCAN, а также другого современного программного обеспечения. Автором были исследованы и оптимизированы последовательные, дифференциальные и параллельно-последовательные структуры, обеспечивающие высокий уровень линейности и динамического диапазона усиления магнитных сигналов.

Автором были разработаны и оптимизированы топологии послойных фотошаблонов для изготовления интегральной схемы на основе современной ниобиевой технологии джозефсоновских структур. Серия экспериментальных образцов была изготовлена фирмой

HYPRES.

Исследования характеристик «тихих» кубитов и изучение возможностей осуществления маловозмущающих логических операций, основанные на квантово-механическом анализе предложенной системы, проведены автором лично.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах лаборатории криоэлектроники кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, а также на научном семинаре в Институте радиотехники и электроники РАН. Основные положения и результаты диссертации были представлены в 27 докладах на 13 международных конференциях и симпозиумах:

- Международная конференция по прикладной сверхпроводимости (*Applied Superconductivity Conference, ASC*) в 2004 и 2006 годах;
- Международная конференция по сверхпроводниковой электронике (*International Superconductive Electronics Conference, ISEC*) в 2005 и 2007 году;
- Международная европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (*European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS*) в 2005 и 2007 году;
- Международный симпозиум «Нанопизика и Нанозлектроника» в 2005 и 2006 годах;
- Международный семинар по вихревым структурам в сверхпроводниках (*Combined ESF Vortex and ESF PiShift Workshop* и *V-th Int. Conf. on Vortex Matter in Nanostructured Superconductors, Vortex-V*) в 2004 и 2007 годах
- Международная конференция по микро- и нанозлектронике (*Int. Conf. "Micro- and nanoelectronics", ICMNE-07*) в 2007 году;
- Международный студенческий семинар по микроволновым применениям современных физических явлений (*11<sup>th</sup>, 12<sup>th</sup> International Student Seminar on Microwave Applications Of Novel Physical Phenomena*) в 2004 и 2005 годах.

### **Публикации**

По результатам вошедших в диссертацию исследований имеется 10 печатных работ, опубликованных в ведущих отечественных и зарубежных реферируемых журналах.

### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из общей характеристики диссертационной работы, четырех глав,



заключения и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 125 страниц, включая 63 рисунка, 3 таблицы, и список цитируемой литературы из 102 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В общей характеристике диссертационной работы** представлено обоснование выбранной темы, сформулированы цели исследования, раскрыты научная новизна, практическая ценность и личный вклад автора.

**В первой главе** приводится краткое описание макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках, лежащих в основе принципов работы устройств сверхпроводниковой электроники, а также дается обзор работ по созданию джозефсоновских квантовых битов (кубитов) и обзор достижений в области разработки сквид-усилителей гигагерцового диапазона частот.

В данном разделе диссертации описано и систематизировано текущее состояние исследований фазовых и потоковых кубитов, для которых характерная величина джозефсоновской энергии заметно превышает характерную величину кулоновской энергии. Изложены результаты, доказывающие существование квантовых когерентных осцилляций в таких кубитах, описаны наиболее перспективные подходы к измерению квантовых состояний и осуществлению логических операций. К настоящему времени продемонстрировано функционирование простейших квантовых регистров из двух-четырёх кубитов, а также выполнение двухкубитных логических операций. Дальнейшее увеличение числа кубитов в регистре серьезно ограничивается сложностью изготовления таких систем, высокими требованиями к точности задания начальных условий эволюции квантовой системы, а также ограниченной величиной времени потери когерентности состояния (0.1...0.5 мкс). Исключительно важную роль в решении этих проблем могут сыграть джозефсоновские структуры с нетривиальным характером ток-фазовой зависимости (ТФЗ), позволяющие создавать тихие кубиты, предельно изолированные от воздействия окружающей среды.

Далее рассматривается проблема создания высокочувствительных усилителей гигагерцового диапазона частот на основе сквидов постоянного тока. В этом частотном диапазоне реализация эффективной цепи следящей обратной связи на сегодняшний день не представляется возможной, все попытки реализации цепи обратной связи пока не увенчались успехом. Сквид-усилители обладают высокой чувствительностью, в гигагерцовом диапазоне получено значение шумовой температуры 1-3 К. В то же время температура насыщения составляет 100...150 К, и поэтому без цепи следящей обратной связи динамический диапазон не превышает 10...15 дБ. При переходе от одного сверхпроводящего квантового

интерферометра (сквида) к последовательной или параллельной цепочке из  $N$  интерферометров динамический диапазон увеличивается как  $\sqrt{N}$ . Это справедливо также и для сверхпроводящих квантовых интерференционных фильтров (СКИФ) – последовательных или параллельных цепочек с нерегулярной структурой. Отклик напряжения СКИФ зависит как от закона распределения эффективных площадей ячеек СКИФ, так и от пространственно-амплитудной характеристики СКИФ-структуры. Это позволяет ставить задачу синтеза многоэлементных структур, обеспечивающих одновременно широкий динамический диапазон и высокую степень линейности отклика напряжения на магнитную компоненту электромагнитного сигнала.

Во второй главе излагаются результаты изучения параллельных и последовательных многоэлементных джозефсоновских структур на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров (рис. 1,а), описываются подходы к синтезу структур с высокой степенью линейности отклика напряжения.

На рис. 1,б показаны непрерывный и дискретные амплитудно-“частотные” спектры последовательных многоэлементных структур, обеспечивающих треугольную форму отклика напряжения. Непрерывный спектр, являющийся огибающей дискретных спектров,

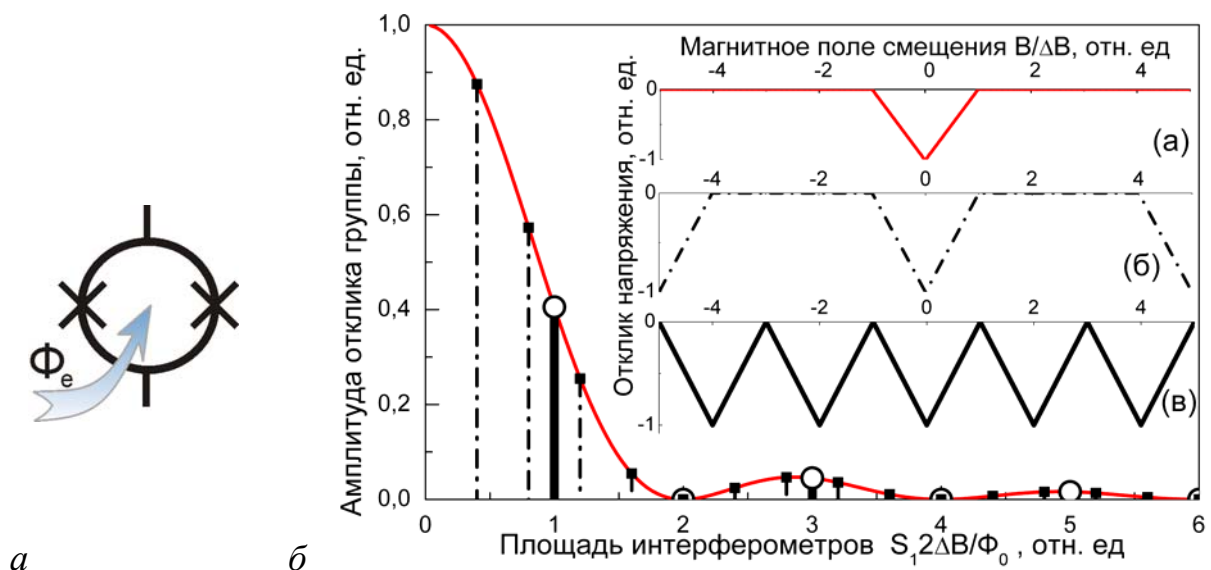


Рис. 1. (а) Двухконтактный сверхпроводящий квантовый интерферометр (сквид) – сверхпроводящее кольцо с двумя джозефсоновскими переходами. (б) Амплитудно-“частотный” спектр синтезированных структур, обеспечивающих треугольный отклик напряжения. Данный спектр описывает распределение числа интерферометров, дающих синусоидальный отклик напряжения, по значениям их эффективной площади. Непрерывный спектр обеспечивает отклик напряжения с одним единственным пиком (отклик “а” на вставке). Дискретные спектры, показанные вертикальными сплошными и штрихпунктирными линиями, обеспечивают периодические треугольные отклики напряжения с разными периодами (отклики “б” и “в” на вставке).

задается выражением

$$a = A_0 \frac{\sin^2(\omega \cdot \Delta B / 2)}{(\omega \cdot \Delta B / 2)^2}. \quad (1)$$

Здесь под “частотой” понимается величина  $\omega = 2\pi S / \Phi_0$ , где  $S$  – эффективная площадь ячейки структуры,  $\Delta B$  – полуширина треугольного отклика.

При увеличении тока смещения через последовательную цепочку интерферометров форма отклика напряжения этих интерферометров (ячеек цепочки) становится синусоидальной. В этом случае необходимый дискретный амплитудно-“частотный” спектр может быть получен для последовательной структуры, состоящей из  $N$  групп одинаковых ячеек (рис. 2,а). Изменение эффективной площади ячеек от группы к группе должно соответствовать дискретному набору “частот”, а количество ячеек  $m$  в каждой группе должно быть таким, чтобы обеспечить требуемую амплитуду соответствующей спектральной компоненты. Степень линейности отклика такой структуры зависит от числа групп  $N$ , то есть от числа спектральных компонент (рис. 2,б). Так, например, для получения уровня линейности 80 дБ периодического треугольного отклика “в” (рис. 1,б), в спектре которого отсутствуют четные гармоники, необходимо задать  $N = 25$  спектральных компонент. Если первая группа будет содержать 1000 ячеек, то полное число ячеек при этом составит около 1250 (т.е., 2500 джозефсоновских переходов). Современная ниобиевая технология позволяет создавать структуры, содержащие и значительно большее количество число джозефсоновских переходов.

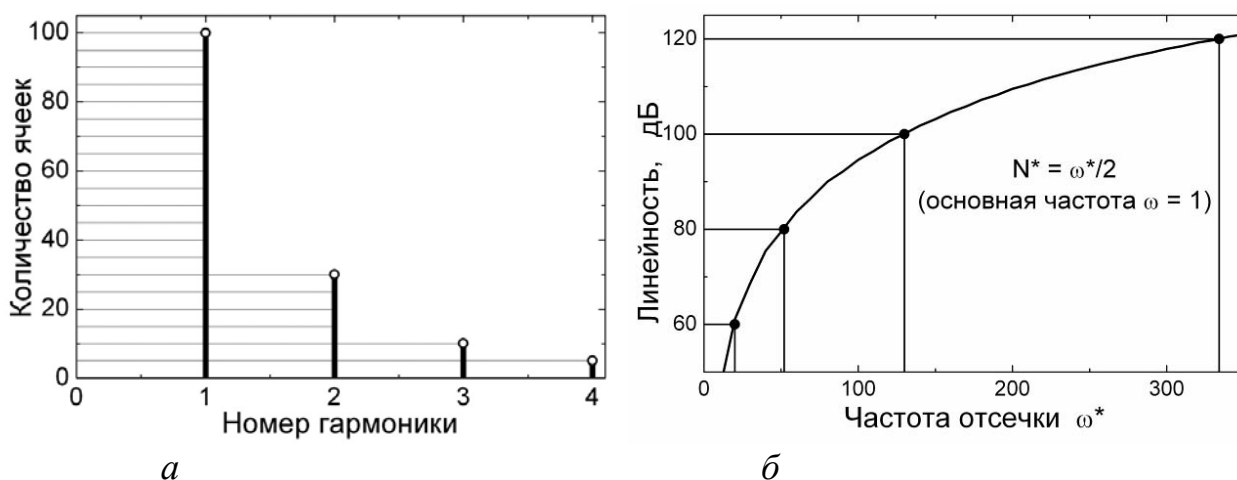


Рис. 2. (а) Составление групп интерферометров, включенных последовательно, для формирования амплитуд спектральных компонент. (б) Зависимость линейности отклика от “частоты” отсечки спектра в синтезированной структуре последовательно включенных интерферометров. В случае периодического треугольного отклика “в” (рис. 1,б), в спектре которого отсутствуют четные гармоники, полное число спектральных компонент и, следовательно, соответствующее число групп интерферометров  $N^* = \omega^* / 2$ .

Другой путь синтеза структуры, обеспечивающей периодический треугольный отклик “в” (рис. 1,б) – использование дифференциальной схемы включения двух одинаковых последовательных цепочек, смещенных током  $I_b$ , равным критическому току цепочки. В одной из этих цепочек к каждой ячейке приложен смещающий поток  $\Phi_0/2$ , который изменяет знак нечетных спектральных компонент отклика цепочки. При малых индуктивностях ячеек отклик цепочек имеет вид  $|\sin(y)|$  и  $|\sin(y-\pi/2)|$  соответственно, где  $y = \pi SB/\Phi_0$ ,  $S$  – площадь ячейки структуры,  $B$  – индукция магнитного поля сигнала. Амплитуды спектральных компонент у такого отклика монотонно убывают с увеличением номера гармоник:  $a_k = A/(k^2 - 1)$ . Если удалить все четные гармоники в этом спектре, что достигается за счет дифференциального включения цепочек, то получится спектр, очень близкий к спектру периодического треугольного отклика, для которого  $a_n = A/(2n - 1)^2$  (см. рис. 3). Некоторые отличия имеют место только для первых гармоник этих спектров.

Возможно увеличение линейности отклика напряжения такой дифференциальной структуры. Для этой цели необходимо добавить в цепочки несколько интерферометров с синусоидальным видом отклика - интерферометров с низким значением критического тока, для которых общий ток смещения цепочки значительно превышает величину их критического тока. Эти дополнительные ячейки должны “исправлять” амплитуды начальных

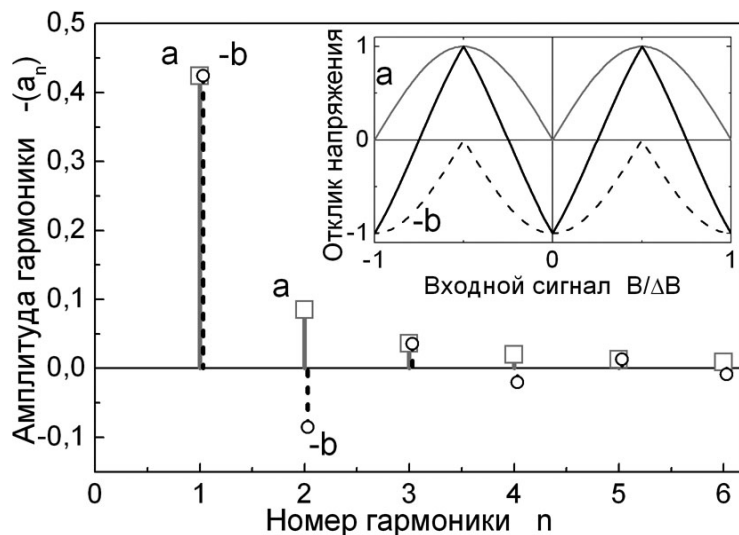


Рис. 3. Спектр отклика на напряжении двухконтактного сквида (а также последовательной цепочки одинаковых сквидов) с пренебрежимо малой индуктивностью, смещенного током  $I_b = I_C$ . Сплошными линиями с квадратными метками показан спектр отклика сквида, не смещенного магнитным потоком, (а); штриховыми линиями с круглыми метками – спектр инвертированного отклика сквида, смещенного потоком  $\Phi_0/2$ , (-b). На вставке показаны данные отклики, а также результирующий треугольный отклик, соответствующий дифференциальному включению  $\Phi_0/2$ -смещенного и несмещенного сквидов.

спектральных компонент для более точного приближения к спектру треугольного отклика. Такое “исправление” может включать в себя также коррекцию того изменения начальных компонент, которое обусловлено конечной величиной индуктивностей ячеек.

Дальнейшее развитие дифференциальных схем достигается при замене двухконтактных интерферометров параллельными цепочками и параллельными СКИФ-структурами. В результате этого приходим к двумерной последовательно-параллельной дифференциальной структуре, частным случаем которой является дифференциальная схема, состоящая из двух параллельных цепочек (или параллельных СКИФ), одна из которых смещена магнитным полем. Ток смещения задается равным критическому току цепочек. В случае пренебрежимо малых индуктивностей существует аналитическое выражение для отклика напряжения произвольной параллельной цепочки. Переходя в этом выражении от суммы к интегралу, можно выписать функционал и сформулировать задачу минимизации в выбранном диапазоне значений магнитного сигнала  $B$  нормы этого функционала. Решение этой задачи позволяет найти функцию распределения площадей ячеек вдоль цепочки  $S(x)$  и оптимальную величину магнитного смещения  $\delta B$  одной из цепочек, при которых достигается наиболее высокая степень линейности отклика дифференциальной структуры в заданном диапазоне значений сигнала  $B$ .

Проведенное исследование показало, что повышение линейности отклика достигается при замене регулярной параллельной цепочки на параллельный СКИФ со специальным

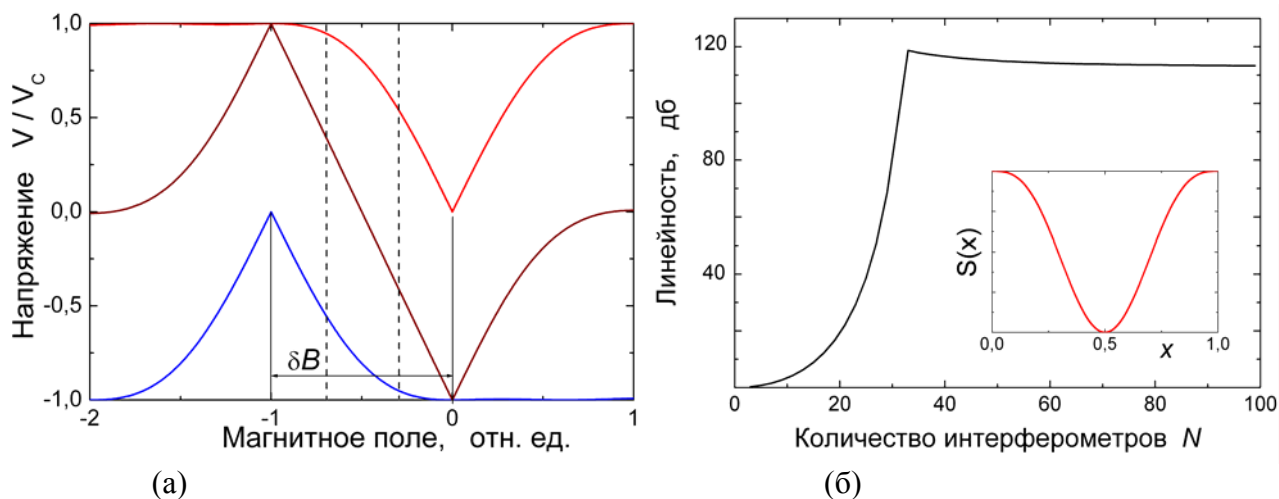


Рис. 4. Характеристики дифференциальной схемы, состоящей из двух параллельных СКИФ с распределением площадей ячеек по закону  $S(x) = 5 - 2|\sin(\pi x)|^3$ , один из которых смещен магнитным полем  $\delta B$ . (а) Отклики СКИФ (с учетом дифференциального включения) и результирующий отклик дифференциальной структуры. На выделенном штриховыми линиями участке достигается линейность отклика не менее 100 дб. (б) Зависимость линейности центрального участка отклика напряжения от числа ячеек в СКИФ. На вставке показана функция распределения площадей ячеек  $S(x)$  вдоль СКИФ.

законом распределения площадей его ячеек (рис. 4,а). Так, например, для функции распределения  $S(x) = 5 - 2|\sin(\pi x)|^3$  линейность отклика напряжения достигает 100-110 дБ. При увеличении числа ячеек  $N$  такого СКИФ линейность отклика дифференциальной структуры быстро возрастает и выходит на свое максимальное значение, начиная с  $N \approx 35$  (см. рис. 4,б). Дальнейшее увеличение числа ячеек в СКИФ, а также переход к двумерной дифференциальной структуре не изменяют степень линейности отклика, однако позволяют решить задачу увеличения динамического диапазона до требуемого уровня.

**Третья глава** посвящена решению проблем, которые возникают при практической реализации разработанных многоэлементных структур на основе стандартной ниобиевой технологии. Полученные для описания синтезированных структур аналитические выражения основаны на использовании резистивной модели джозефсоновских переходов с пренебрежимо малой емкостью. В то же время, в рамках ниобиевой технологии базовыми джозефсоновскими структурами являются туннельные джозефсоновские переходы с большой собственной емкостью  $C$ . Для получения джозефсоновских переходов с безгистерезисной ВАХ производится внутреннее шунтирование туннельных переходов достаточно малым резистором  $R_N$ , при наличии которого параметр Маккамбера  $\beta_c = (2\pi / \Phi_0) I_c R_N^2 C$  становится меньше единицы. Присутствие собственной емкости джозефсоновского перехода, а также паразитных емкостей между элементами

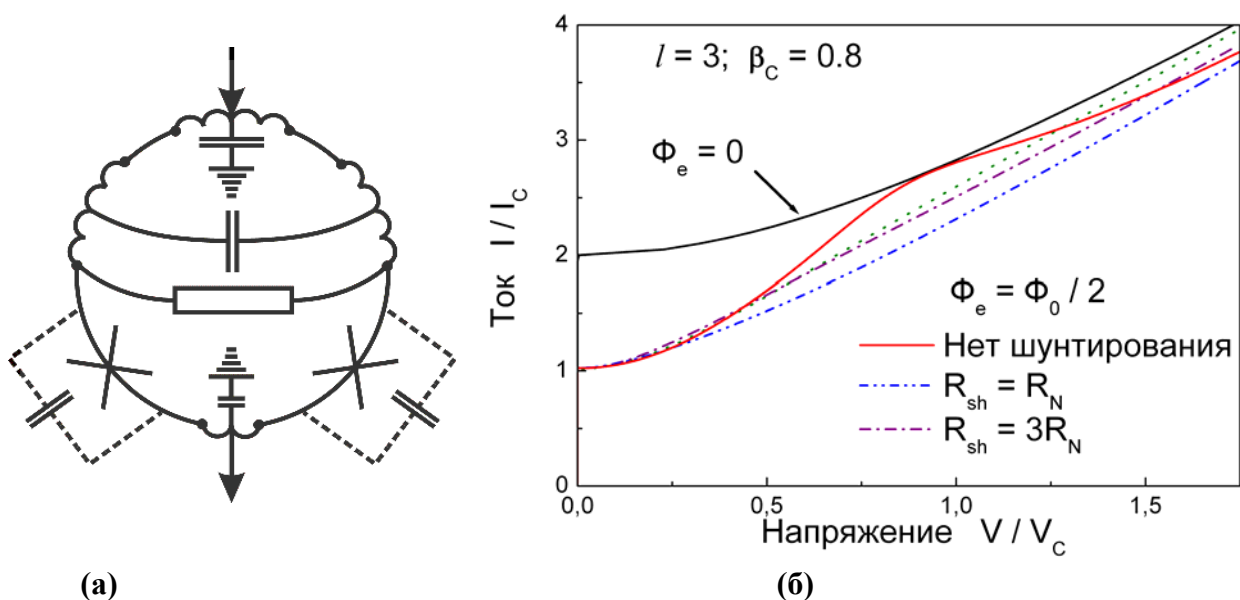
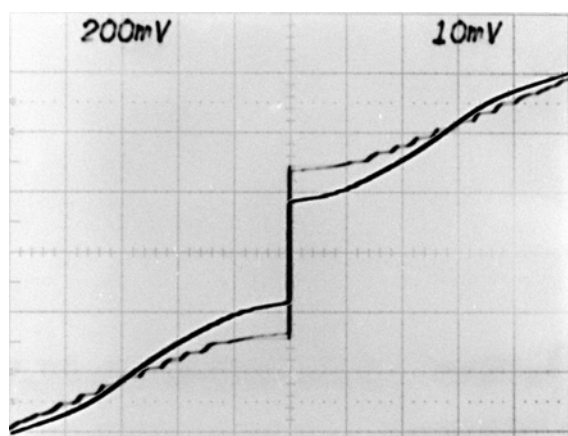


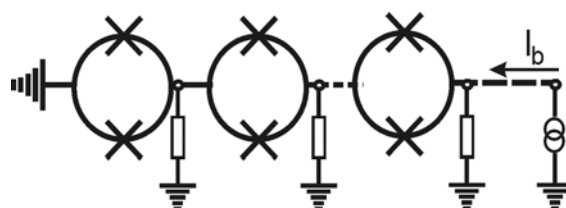
Рис. 5. (а) Схема двухконтактного интерферометра с учетом собственных емкостей джозефсоновских переходов, паразитных емкостей между элементами интерферометра и “поперечным” демпфирующим резистором  $R_{sh}$ . (б) Вольт-амперные характеристики интерферометра при различных значениях демпфирующего резистора  $R_{sh}$  для случая, когда приложен внешний магнитный поток  $\Phi_e = \Phi_0 / 2$ , а также в отсутствие магнитного потока.

сверхпроводящего интерферометра и сверхпроводящим экранирующим слоем, над которым размещается интерферометр, приводит к изменению вида ВАХ и, следовательно, формы отклика напряжения интерферометра. При приложении внешнего магнитного потока  $\Phi_0/2$  на ВАХ возникает выпуклость, связанная с резонансом в этой цепи. Для подавления резонанса необходимо установить “поперечный” демпфирующий резистор  $R_{sh}$  (сравнимый по величине с  $R_N$ ) между джозефсоновскими переходами, параллельно индуктивности интерферометра (см. рис. 5,а). В то же время слишком малая величина  $R_{sh}$  также нежелательна из-за шунтирования на высокой частоте индуктивности интерферометра, что приводит к изменению ВАХ и функции отклика.

Кроме особенностей, связанных с резонансом внутри ячеек цепочки, на ВАХ цепочки возникают резонансные пики, связанные с возбуждением стоячих волн в отрезке микрополосковой линии, которая формируется цепочкой интерферометров, расположенных над сверхпроводящим экранирующим слоем. Для подавления этих резонансов в отрезок микрополосковой линии вносились потери путем включения демпфирующих высокоомных резисторов  $R_D \gg R_N$  между интерферометрами цепочки и сверхпроводящим экраном. Для того чтобы избежать эффекта шунтирования последовательной цепочки, было разработано и апробировано неравномерное демпфирование цепочки. При таком демпфировании сохраняется суммарная проводимость демпфирующих резисторов, однако величины сопротивлений резисторов возрастают по мере удаления начальной точки подключения резисторов от заземленного конца цепочки. В качестве закона нарастания величин



а



б

Рис. 6. (а) ВАХ последовательной цепочки из  $N = 128$  интерферометров (i) в отсутствие внешнего магнитного потока и (ii) при задании потока  $\Phi_e = \Phi_0 / 2$  в каждую ячейку цепочки; масштаб по оси токов 200 мкА/дел., по оси напряжений 10 мВ/дел. На ВАХ видны резонансные пики, обусловленные возбуждением стоячих волн в этой структуре (i), а также выпуклость, обусловленная внутренним резонансом в ячейках цепочки (ii).

(б) Включение демпфирующих резисторов для подавления стоячих волн.

демпфирующих резисторов выбирался равномерный или квадратичный законы нарастания от заземленного конца цепочки до ее середины или другой точки цепочки. Анализ экспериментальных данных показал, что реализация обоих способов демпфирования приводит к необходимому подавлению геометрических резонансов, обеспечивающему корректную работу схемы усилителя. Однако для более качественного демпфирования геометрических резонансов, помимо суммарной проводимости демпфирующих резисторов, необходимо также корректировать распределение демпфирующих сопротивлений по цепочке в сопоставлении со структурой стоячей волны.

**В Главе 4** рассматриваются характеристики двухконтактного интерферометра с несинусоидальной ток-фазовой зависимостью (ТФЗ) джозефсоновских переходов:

$$I_j(\varphi) = A_j \sin \varphi_j - B_j \sin(2\varphi_j) + C_j \sin(3\varphi_j), \quad j = 1, 2, \quad (3)$$

а также излагаются результаты квантовомеханического анализа тихого кубита на основе такой системы. Обсуждаются джозефсоновские структуры, в которых может быть получен определенный характер ТФЗ, требуемый для создания кубита.

Здесь сформулированы пороговые условия на величину амплитуды второй и третьей гармоник (по отдельности и вместе) ТФЗ джозефсоновских переходов, для получения необходимого для функционирования кубита двухямного вида (рис. 7) энергетического потенциала двухконтактного интерферометра с малой приведенной индуктивностью  $l \ll 1$ . В частности, для амплитуды второй гармоники пороговое условие имеет вид (рис. 8,а):

$$2(B_1 + B_2) > (A_1 + A_2). \quad (4)$$

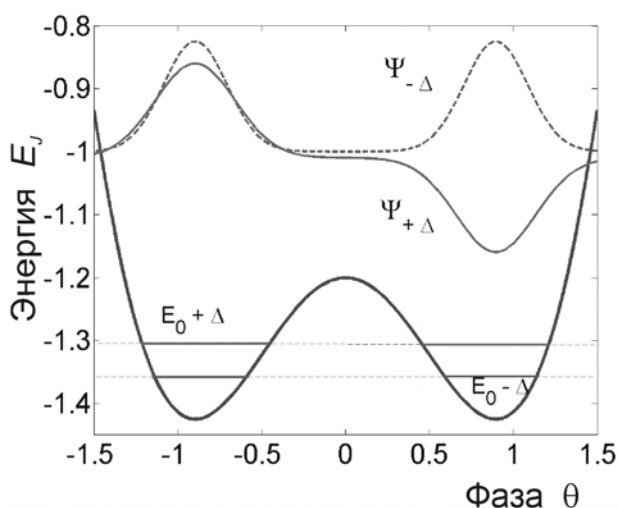


рис. 7. Двухямный энергетический потенциал, расщепленный основной энергетический уровень  $E_0 \pm \Delta$  и соответствующие волновые функции  $\Psi_{\pm \Delta}$ .

Выполнен детальный квантовомеханический анализ рассматриваемой системы для случая, когда характерное значение джозефсоновской энергии  $E_C$  существенно превышает характерную кулоновскую энергию  $E_Q = (2e)^2/2C$  (здесь  $C$  – ёмкость переходов), то есть, когда параметр  $s = E_C / E_Q$  значительно больше единицы. Найдены энергетические уровни системы и их расщепление, которое зависит от амплитуд второй и третьей гармоник, а также от величины



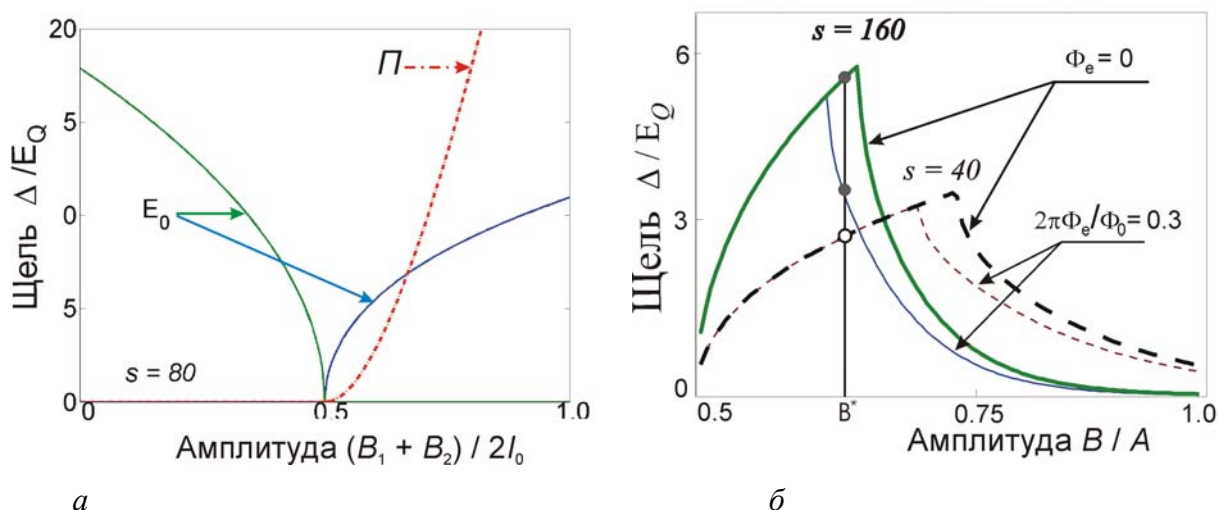


Рис. 8. (а) Зависимость положения основного уровня энергии  $E_0$  и высоты потенциального барьера  $\Pi$  от амплитуды второй гармоники. (б) Зависимость величины расщепления  $\Delta$  от амплитуды второй гармоники для двух значений  $s$ -параметра:  $s = 160$  (сплошная линия) и  $s = 40$  (штриховая линия), а также изменение расщепления  $\Delta$  при приложении магнитного потока  $\Phi_e = 0.3\Phi_0/2\pi$ . В случае фиксированной амплитуды второй гармоники  $(B_1 + B_2)/2I_0 = 0.62$  величины расщепления  $\Delta$  показано двумя сплошными точками для  $s = 160$  и полый точкой для  $s = 40$ .

параметра  $s$ . Возникающий барьер ( $\Pi$ ) между ямами энергетического потенциала увеличивается с ростом амплитуды гармоник быстрее, чем величина основного энергетического уровня  $E_0$ . Когда высота барьера  $\Pi$  достигает положения уровня  $E_0$ , величина его расщепления  $\Delta$  становится максимальной (рис. 8). Исследовано влияние приложенного магнитного поля на величину расщепления уровней  $\Delta$ , высоту барьера и положение энергетических уровней.

Полученные результаты исследований позволили предложить тихий фазовый кубит на основе низкоиндуктивного двухконтактного интерферометра с несинусоидальной ТФЗ джозефсоновских переходов. В качестве энергетического базиса тихого кубита предложено использовать основной энергетический уровень, расщепленный из-за туннельного проникновения фазы через барьер между ямами энергетического потенциала, при условии, что расстояние  $\Delta$  между базисными уровнями  $E_0 \pm \Delta$  намного меньше расстояния для следующих энергетических уровней  $E_n$  ( $n > 0$ ), но намного превосходит энергию тепловых флуктуаций  $k_B T$ . Такой кубит крайне слабо связан с внешним окружением, защищен от внешнего воздействия уже на классическом уровне. Показано, что из-за специфической нелинейной зависимости асимметрии кубитного потенциала и величины энергетического расщепления  $\Delta$  от внешнего нормированного магнитного поля время потери когерентности в исследуемом кубите за счет внешних источников шумов (например, флуктуаций тока в цепях управления кубитом и его считывания состояний) крайне велико и достигает 10 мс.

Выполнен анализ возможности осуществления логических операций с тихим фазовым кубитом путем приложения магнитного поля. Показано, что приложенный магнитный поток определенной величины может приводить к изменению только одного из “контролирующих” параметров: или расщепления  $\Delta$  или асимметрии потенциала  $g$ , в зависимости от вида ТФЗ и параметра  $s$ , величина которого изменяется с изменением размеров джозефсоновских переходов. Изменение каждого из данных “контролирующих” параметров  $\Delta$  и  $g$  отвечает за вращение вектора состояния кубита вокруг  $X$  и  $Z$  осей в пространстве состояний кубита. При этом поворот вокруг  $X$ -оси  $\xi_X = \tau \delta(\Delta) / \hbar$  на угол  $\xi_X = \pi$  дает логическую операцию *NOT*, поворот вокруг  $Z$ -оси  $\xi_Z = \tau g / \hbar$  дает логическую операцию *сдвиг фазы* на величину  $\xi_Z = \tau g / \hbar$ . Здесь  $\tau$  - время воздействия приложенного магнитного потока, которое по полученным оценкам может составлять 0.1...0.5 нс,  $\delta(\Delta)$  - величина изменения расщепления  $\Delta$  основного уровня. Комбинация этих логических операций позволяет реализовать все необходимые логические операции с таким кубитом.

Согласно опубликованным экспериментальным данным по исследованию ТФЗ бикристаллических джозефсоновских переходов на основе высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) при низких температурах [36], такие структуры могут быть использованы для создания тихих фазовых кубитов. Однако в кубитах на основе ВТСП структур доминирующую роль играют внутренние шумы, связанные, в том числе, с процессами туннелирования “бесщелевых” (или “узловых”) квазичастиц через бикристаллическую границу. Время потери когерентности в таком случае может быть оценено по формуле:

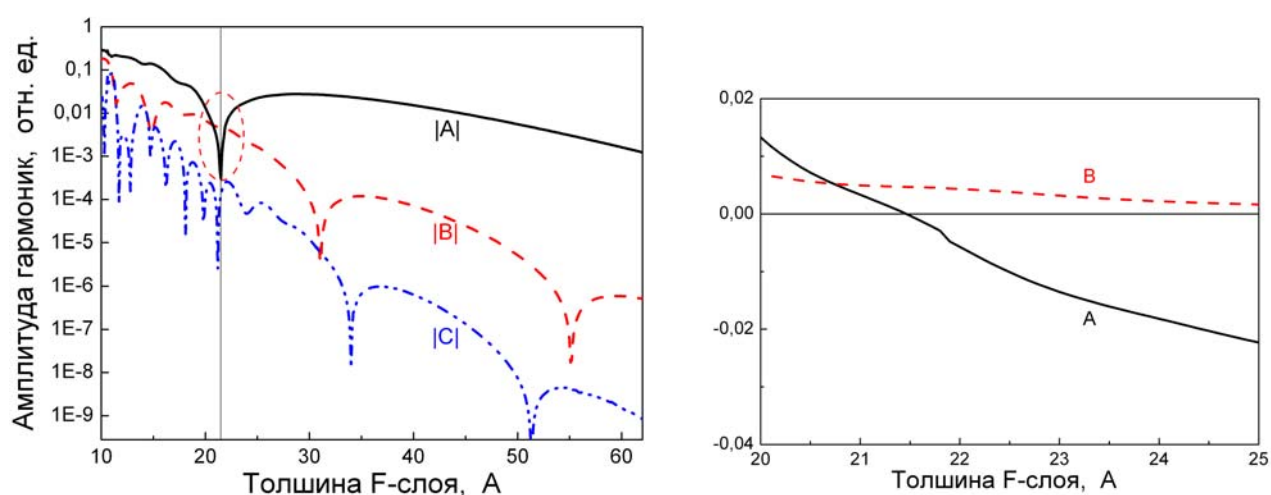


Рис. 8. Зависимость амплитуд первой, второй и третьей гармоник ТФЗ джозефсоновского перехода от толщины ферромагнитной прослойки  $\text{Cu}_{0.47}\text{Ni}_{0.53}$  в SFS гетероструктуре. Слева показано поведение абсолютной величины амплитуд гармоник ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ) в логарифмическом масштабе; справа – поведение амплитуд  $A$  и  $B$  в области толщин F-слоя 20 - 25 Å, где первая гармоника меняет знак.

$$\tau^* = \frac{4e}{(\theta_r^* - \theta_l^*)^2 I(\Delta/e)}, \quad (4)$$

где  $I(\Delta/e)$  - диссипативный квазичастичный ток, взятый для напряжения  $\Delta/e$ ,  $R_Q = \pi\hbar^2/e \approx 13.6$  кОм – квантовое сопротивление. Оценка времени декогерентности  $\tau^*$ , полученная для вполне разумных параметров джозефсоновских переходов составляет 0,1...0,5 пкс, что вполне достаточно для выполнения необходимого числа логических операций и считывания состояний кубита как базовой ячейки квантовых вычислительных систем.

Другим перспективным типом джозефсоновских переходов с необходимым характером ТФЗ являются гетероструктуры сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник (SFS). Для таких гетероструктур был выполнен теоретический анализ вида ТФЗ, основанный на прямом численном решении цепочки уравнений Горькова с учетом s-d рассеяния в ферромагнетике, была найдена область параметров, для которой выполняется пороговое условие (3), необходимое для построения тихих фазовых кубитов на основе джозефсоновских SFS-структур.

В данной главе приводятся также результаты теоретических расчетов, основанных на учете нестандартного характера ТФЗ, для объяснения экспериментальных результатов, которые были получены в ИРЭ РАН для ВТСП структур и в ИФТТ РАН для структур на основе SFS переходов.

### **Основные результаты и выводы диссертационной работы**

1. Проведено теоретическое исследование джозефсоновских структур с нетривиальной ток-фазовой зависимостью (ТФЗ), характеризующейся присутствием второй и третьей гармонических компонент и пи-сдвигом фазовой зависимости. Результаты расчетов применены для анализа экспериментальных данных, полученных для структур на основе высокотемпературных сверхпроводников и гетероструктур с прослойкой из ферромагнетика.

2. Предложен и детально проанализирован новый тип квантового бита (кубита), который является тихим вследствие предельно слабой связи с окружающей средой. Данный кубит основан на использовании джозефсоновских переходов с несинусоидальным видом ТФЗ; базисом кубита служит расщепленный основной энергетический уровень низкоиндуктивного двухконтактного интерферометра. Рассчитаны характеристики кубита, проанализированы физические основы осуществления логических операций с кубитом.

3. Рассмотрен внутренний механизм связи тихого кубита на основе высокотемпературных сверхпроводников d-типа с окружающей средой. Показано, что вследствие туннелирования бесщелевых квазичастиц время потери когерентности составляет

0,1...0,5 мкс. Полученная оценка удовлетворяет требованиям к времени декогерентности базовых ячеек квантовых вычислительных систем.

4. Исследованы процессы токопереноса в гетероструктурах сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник (SFS) с учетом s-d рассеяния электронов в ферромагнетике и выделены оптимальные SFS гетероструктуры для создания на их основе тихих фазовых кубитов.

5. Разработаны физические основы синтеза многоэлементных джозефсоновских структур со специальным видом амплитудных характеристик, обеспечивающих высокий уровень линейности (до 80-100 дБ) и динамического диапазона отклика напряжения на магнитную компоненту сигнала. Такие структуры могут быть использованы для создания высокочувствительных и высоколинейных усилителей гигагерцового диапазона частот.

6. Предложены и экспериментально проверены для устройств на основе современной ниобиевой технологии методы защиты формы отклика напряжения многоэлементной джозефсоновской структуры от влияния распределенного характера структуры и паразитных элементов цепи.

#### **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, N. F. Pedersen, I. V. Borisenko P. B. Mozhaev, G. A. Ovsyannikov, "The 0 and pi contact array model of bicrystal junctions and interferometers", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 13, No. 2, 2003, p. 825-828.
2. V. K. Kornev, N. V. Klenov, V. A. Oboznov, A.K. Feofanov, V. V. Bol'ginov, V. V. Ryazanov, N. F. Pedersen, "Vortex dynamics in Josephson ladders with  $\pi$ -junctions", *Superconductor Science and Technology*, vol. 17, 2004, p. S355-S358.
3. V. K. Kornev, N. V. Klenov, I. V. Borisenko, G. A. Ovsyannikov, "Dc SQUID Behavior Resulting from no Sinusoidal Current-Phase Relation of Bicrystal Junctions", *Institute of Physics Conference Series*, IOP Publishing Ltd, No. 181, 2004, p. 3189-3194.
4. V. K. Kornev, N. V. Klenov, V. A. Oboznov, A.K. Feofanov, V. V. Bol'ginov, V. V. Ryazanov, N. F. Pedersen, "Vortex dynamics in Josephson ladders with  $\pi$ -junctions", *Institute of Physics Conference Series*, IOP Publishing Ltd, No. 181, 2004, p. 3553-3558.
5. Кленов Н. В., Корнев В. К., Соловьев И. И., Шадрин А. В., Борисенко И. В., Константиныч К. И., Овсянников Г. А., «Нетривиальная ток-фазовая зависимость в джозефсоновских переходах из анизотропных сверхпроводников: механизм и применение», *Нелинейный мир*, т. 3, № 1-2, 2005, с. 75-91.
6. N. V. Klenov, V. K. Kornev, N. F. Pedersen, "The energy level splitting for unharmonic dc-SQUID to be used as phase Q-bit", *Physica C*, vol. 435, 2006, p. 114-117.
7. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, "Splitting Circuits for a single-flux-quantum-pulse driver based on a superconducting quantum interference filter",

*Superconductor Science and Technology*, vol. 19, 2006, p. S390-S393.

8. Н. В. Кленов, В. К. Корнев, «Фазовый кубит на основе двухконтактного сквида с несинусоидальной ток-фазовой зависимостью», *Поверхность*, №5, 2006, с. 38-43.
9. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, "Development of SQIF-Based Output Broad Band Amplifier", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 17, no. 2, 2007, p. 569-572.
10. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov and O. A. Mukhanov, "Synthesis of High Linearity Array Structures", *Superconductor Science and Technology*, vol. 20, 2007, p. S362-S366.

### Цитированная литература

- [1] M. Fujimaki, M. Katayama, H. Hayakawa, and A. Ogawa, "Advanced base-station based on superconductive devices and software-defined radio technology," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 12, 1999, p. 708–710.
- [2] A. Kirichenko, S. Sarwana, D. Gupta, and D. Yohannes, "Superconductor digital receiver components," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, 2005, No.2, p.249–254.
- [3] Лихарев К. К., Ульрих Б. Т. Системы с джозефсоновскими контактами. Основы теории. М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1978
- [4] Лихарев К.К., Введение в динамику джозефсоновских переходов, М.: Наука. 1985.
- [5] O.A. Mukhanov, V.K. Semenov, I.V. Vernik, A.M. Kadin, T.V. Filippov, D. Gupta, D.K. Brock, I. Rochwarger, and Y.A. Polyakov, "High-Resolution ADC Operation up to 19.6 GHz Clock Frequency", *Supercond. Sci. and Tech.*, vol. 14, 2001, p. 1065-1070.
- [6] A.M. Kadin and O.A. Mukhanov, "Analog-to-Digital Converters" in *Handbook of Superconducting Materials*, ed. D. Cardwell, Institute of Physics, Bristol, England, 2002, pp. 1815-1824.
- [7] D. Gupta, A.M. Kadin, R.J. Webber, I. Rochwarger, et al., "Integration of Cryocooled Superconducting Analog-to-Digital Converter and SiGe Output Amplifier" *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, 2003, pp. 477-483.
- [8] O. A. Mukhanov, V.K. Semenov, W. Li, T. V. Filippov, D. Gupta, A.M. Kadin, D.K. Brock, A. F. Kirichenko, Y.A. Polyakov, and I.V. Vernik, "A superconductor high-resolution ADC", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, 2001, p. 601-606.
- [9] M. Mueck, M.-O. Andre, J. Clarke, J. Gail, C. Heiden, "Radio-frequency amplifier based on a niobium dc superconducting quantum interference device with microstrip input coupling", *Appl. Phys. Letters*, v. 72, 1998, p. 2885-2887.
- [10] G. V. Prokopenko, S. V. Shitov, I. L. Lapitskaya, V. P. Koshelets, and J. Mygind, "Dynamic characteristics of S-band dc SQUID amplifier," *Applied Superconductivity Conf. (ASC'04)*, Jacksonville FL, October 2004, report 4EF10.
- [11] G. V. Prokopenko, S. V. Shitov, I. V. Borisenko, and J. Mygind, "A HTS X-band dc SQUID amplifier: modelling and experiment," *Applied Superconductivity Conf. (ASC'04)*, Jacksonville FL, October 2004, report 4EF12.

- [12] M. Mueck, "Increasing the dynamic range of a SQUID amplifier by negative feedback," *Physica C*, v. 368, 2002, p. 141-145.
- [13] P. W. Shor, "Polynomial-type algorithms for prime factorization and discrete logarithms on quantum computer", in: *Proc. 35<sup>th</sup> Annual Symp. on Found. of Computer Science*, IEEE Computer Society Press, 1994.
- [14] Холево А. С. Введение в квантовую теорию информации. М.: МЦНМО, 2000.
- [15] L. K. Grover, "Quantum mechanic helps in searching for a needle in a haystack", *Phys. Rev. Letters*, vol. 79, 1997, p. 325-328.
- [16] J. I. Cirac and P. Zoller, "Quantum computations with cold trapped ions", *Phys. Rev. Letters*, vol. 74, 1995, p. 4091-4094.
- [17] N. A. Gershenfeld and I. L. Chuang, "Bulk spinresonance quantum computations", *Science*, vol. 275, 1997, p. 350-356.
- [18] L. M. K. Vandersypen, M. Steffen, G. Breyto, C. S. Yannoni, M. H. Sherwood, I. L. Chuang, "Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using nuclear magnetic resonance", *Nature*, v. 414, 2000, p. 883-887.
- [19] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, "Coherent control of macroscopic quantum states in a single-cooper-pair box," *Nature*, vol. 398, 1999, p. 786–790.
- [20] Y. Nakamura et al., "Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator", *Nature*, v. 431, 2004, p. 159-162.
- [21] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, and J. S. Tsai, "Charge echo in a Cooper-pair box", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 88, 2002, p. 047901-1 - 047901-4.
- [22] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin, and J. S. Tsai, "Rabi oscillations in a Josephson-junction charge two-level system", *Phys. Rev. Lett.*, v. 87, 2002, p. 246601-1 – 246601-4.
- [23] Yu. A. Pashkin, T. Yamamoto, O. Astafiev, Y. Nakamura, D. V. Averin, and J. S. Tsai, "Quantum Oscillations in Two Coupled Charge Qubits", *Nature*, v. 421, 2003, p. 823-826.
- [24] C. H. van der Waal, A. C. J. ter Haar, F. K. Wilhelm, R. N. Schouten, C. J. P. M. Harmans, T. P. Orlando, Seth Lloyd, J. E. Mooij, "Quantum superposition of macroscopic persistent-current states," *Science*, vol. 290, 2000, p. 773-776.
- [25] J.E. Mooij, T.P. Orlando, L. Levitov, L. Tian, C.H. van der Wal, S. Lloyd, "Josephson persistent current qbit", *Science*, vol. 285, 1999, p. 1036-39.
- [26] J. R. Friedman, V. Patel, W. Chen, S. K. Tolpygo, J. E. Lukens, "Quantum superposition of distinct macroscopic states," *Nature*, vol. 406, 2000, p. 43-45.
- [27] T. Yamamoto, Yu. A. Pashkin, O. Astafiev, Y. Nakamura and J. S. Tsai, "Demonstration of conditional gate operation using superconducting charge qubits", *Nature*, v. 425, 2003, p. 941-944.
- [28] Yu. Makhlin, G. Schoen, A. Shnirman, "Josephson-junction qubits with controlled couplings", *Nature*, v. 398, 1999, p. 306-307.
- [29] J. M. Martinis, S. Nam, J. Aumentado, C. Urbina, "Rabi Oscillations in a Large Josephson-Junction Qubit", *Phys. Rev. Lett.*, v. 89, 2002, p. 117901-1 - 117901-14.

- [30] K. B. Cooper, M. Steffen, R. McDermott, R.W. Simmonds *et al.*, “Observation of quantum oscillations between a Josephson phase qubit and a microscopic resonator using fast readout”, *Phys. Rev. Lett.*, v. 93, 2004, p. 180401-1 - 180401-4.
- [31] R. F. Voss and R. A. Webb, “Macroscopic quantum tunneling in 1 $\mu$ m Nb Josephson junctions”, *Phys. Rev. Letters*, vol. 47, 1981, p. 265-268.
- [32] D. P. DiVincenzo, “Quantum computations”, *Science*, vol. 270, 1995, p. 1015-1022.
- [33] Э. Стин, Квантовые вычисления. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотич. динамика”, 2002.
- [34] M. H. S. Amin, A. Yu. Smirnov, A. M. Zagoskin, T. Lindstrom, S. A. Charlebois, T. Claeson, A. Ya. Tzalenchuk, “Silent phase qubit based on *d*-wave Josephson junctions,” *Phys. Rev. B*, vol. 73, 2005, p. 064516-1-5.
- [35] N. V. Klenov, V. K. Kornev, N. F. Pedersen, “The energy level splitting for unharmonic dc-SQID to be used as phase Q-bit”, *Physica C*, vol. 435, 2006, p. 114-117.
- [36] T. Bauch, F. Lombardi, F. Tafuri, A. Barone, G. Rotoli, P. Delsing, and T. Claeson, “Macroscopic Quantum Tunneling in *d*-Wave YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7- $\delta$</sub>  Josephson Junctions,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 94, 2005, p. 087003-1-4.