

На правах рукописи

КОРНЕВ Виктор Константинович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ УСТРОЙСТВАХ СВЕРХПРОВОДНИКОВОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ**

Специальность

01.04.04. – физическая электроника

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук**

Москва - 2007

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Открытие макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках в 1957 - 1963 годах [1-5] положило начало развитию современной сверхпроводниковой электроники. В первую очередь были получены рекордные достижения в области низкочастотных устройств – магнитометров и градиентометров на основе свехпроводящих квантовых интерферометров, или сквидов (англ.: *SQUID – Superconducting Quantum Interference Device*), которые в частотном диапазоне от долей герца до единиц мегагерц имеют энергетическое разрешение порядка $10^{-30} \dots 10^{-32}$ Дж/Гц, то есть близкое к постоянной Планка h (в отдельных экспериментах было получено разрешение $\delta E/\Delta F \approx 2h$ [6-8]), и чувствительность по магнитному потоку $\delta\Phi/(\Delta F)^{1/2}$ порядка $(10^{-5} \dots 10^{-6})\Phi_0$, где $\Phi_0 = h/2e \approx 2 \cdot 10^{-15}$ Вб – квант магнитного потока. Такие магнитометры нашли применение в магнитокардиографии, магнитоэнцефалографии, геофизике, в системах сверхнизкочастотной связи, устройствах неразрушающего контроля металлических конструкций; пикоамперметры на основе сквидов обладают рекордной чувствительностью при измерении постоянного тока.

Джозефсоновские переходы характеризуются очень высоким быстродействием: характерная частота F_c джозефсоновских элементов на основе низкотемпературных сверхпроводников лежит в диапазоне сотен гигагерц, а в случае высокотемпературных сверхпроводников может достигать единиц и даже десятков терагерц. Высокое быстродействие, высокая чувствительность, предельно низкая энергия переключения джозефсоновских элементов $E_J = \Phi_0 I_C = 2 \cdot 10^{-15}$ Вб $\times 10^{-4}$ А $\approx 10^{-18}$ Дж открывает большие перспективы для разработки аналоговых и цифровых устройств, которые способны работать в более высоких диапазонах частот сигналов, обеспечивать более высокие скорости обработки информации. Так, например, использование джозефсоновских переходов в схемах параметрических усилителей позволяет получить чувствительность устройств, близкую к квантовому пределу на частотах от единиц до сотен гигагерц. Смесители на основе туннельных джозефсоновских переходов не имеют равных себе аналогов по шумовой температуре в частотном диапазоне 50 – 500 ГГц (миллиметровый и субмиллиметровый волновой диапазоны), и такие смесители уже устанавливаются на крупнейших радиотелескопах США и Европы. Разрабатываются полностью интегральные спектрометры миллиметрового диапазона волн для мониторинга атмосферы [9]. Джозефсоновские переходы позволяют также создавать узкополосные перестраиваемые генераторы сигналов миллиметрового, субмиллиметрового и ближнего инфракрасного диапазонов волн, отличающиеся исключительно малой потребляемой мощностью и габаритами.

Прогресс современных цифровых технологий в значительной степени связывается с развитием сверхпроводниковых цифровых устройств на основе быстрой одноквантовой логики, известной как RSFQ-логика (Rapid Single Flux Quantum logic), которая была впервые предложена и введена в разработку в лаборатории криоэлектроники физического факультета МГУ [10, 11]. Крайне низкая величина энергии переключения джозефсоновских элементов и их высокое быстродействие, допускающее тактовые частоты устройств на основе низкотемпературных сверхпроводников до 100 ГГц, позволяют одновременно наращивать как быстродействие, так и степень интеграции сверхпроводниковых цифровых устройств. В настоящее время в целом ряде ведущих научных центров мира, таких как HYPRES (США), ISTEС и AIST (Япония), IPHT и PTB (Германия), VTT (Финляндия) существует отработанная ниобиевая технология изготовления сверхпроводниковых интегральных схем. Эта технология уже позволила достичь очень высокой интеграции элементов сверхпроводниковых схем, характеризующейся числом джозефсоновских переходов (JJ) на одном чипе более десяти тысяч: 11 000 JJ/чип (ISTEC) и 12 000 JJ/чип (HYPRES).

Использование макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках позволяет также создавать высокочувствительные быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП) [12-14], а также высокоэффективные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП). Это делает возможным разработку полностью цифровых устройств, осуществляющих прием, обработку и передачу сигналов для современных телекоммуникационных систем в гигагерцовых и выше (десятки ГГц) диапазонах частот. В ряде таких устройств можно отметить полностью цифровой приемник высокочастотного аналогового сигнала (тактовая частота до 11,5 ГГц), разрабатываемый в HYPRES [15]. В связи с этим в последние годы наблюдается большой интерес к разработке высокочувствительных усилителей гигагерцового диапазонов частот на основе сквидов [16-18], которые могут обладать одновременно как малыми шумами (на уровне квантовых флуктуаций), так и чрезвычайно низкими мощностями энергопотребления.

Наряду с развитием традиционных цифровых технологий в последнее время большое внимание уделяется разработке квантовых алгоритмов обработки и защиты информации, разработке физических основ построения квантового компьютера, который смог бы органически дополнить и расширить возможности систем обработки, защиты и передачи информации. Наиболее перспективными кубитами (квантовый бит – элементарная ячейка квантового компьютера) по многим причинам признаются твердотельные кубиты на основе джозефсоновских структур [19-25]. Одной из таких причин является возможность более простого решения задачи построения многокубитных систем. В то же время, одной из наиболее остро стоящих проблем для твердотельных кубитов является проблема

декогерентности - самая главная на сегодня проблема квантовой информатики. В силу этого представляется крайне актуальной разработка и реализация так называемых “тихий” кубитов, которые предельно изолированы от воздействия окружающей среды.

Решение многих задач в области разработки перспективных как аналоговых, так и цифровых устройств сверхпроводниковой электроники связывается в настоящее время с использованием многоэлементных джозефсоновских структур. В число таких задач входит разработка генераторов широкополосных стохастических сигналов для передачи и защиты информации, узкополосных генераторов для приемных устройств миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн, выходных усилителей одноквантовых импульсов для передачи слабых сигналов цифровой RSFQ логики в полупроводниковые цепи, высокочувствительных и высоколинейных усилителей гигагерцового диапазона волн, фазовых кубитов с достаточно большим временем декогерентности, систем кубитов, устройств считывания информации и цепей управления работой кубитов.

Поэтому данная диссертационная работа, посвященная теоретическому и экспериментальному исследованию динамических процессов в различных типах многоэлементных джозефсоновских структур и изучению физических основ использования таких структур для создания новых перспективных аналоговых и цифровых устройств сверхпроводниковой электроники, является весьма актуальной.

Цель диссертационной работы

1. Развитие методов численного и аналогового моделирования динамики многоэлементных джозефсоновских структур и расчета динамических характеристик; разработка многоканального автоматизированного измерительного стенда для исследования многоэлементных джозефсоновских интегральных схем.
2. Изучение сложных хаотических и стохастических процессов в одно- и двухконтактных сверхпроводящих квантовых интерферометрах, формулировка необходимого условия возникновения хаоса в таких устройствах.
3. Развитие теории высокочастотных скиндов переменного тока резонаторного и безрезонаторного типов. Экспериментальное исследование характеристик резонаторного СВЧ скинда.
4. Теоретический анализ динамики и предельных характеристик балансных джозефсоновских компараторов тока. Экспериментальное исследование балансного компаратора на основе джозефсоновских элементов с безгистерезисной вольт-амперной характеристикой (ВАХ).

5. Изучение физических условий и процессов синхронизации джозефсоновской генерации в многоэлементных джозефсоновских структурах с сосредоточенными и распределенными цепями электродинамической связи. Исследование механизмов сужения линии синхронной генерации в многоэлементных структурах и анализ предельной ширины линии генерации.

6. Изучение джозефсоновских структур с нетривиальной ток-фазовой зависимостью. Разработка и применение модели на основе многоэлементной структуры из “0” и “ π ” джозефсоновских контактов для анализа характеристик бикристаллических джозефсоновских структур на основе высокотемпературных сверхпроводников. Развитие аналитической теории формирования ступеней Шапиро и детекторного отклика. Изучение характеристик “тихого” фазового кубита, анализ времени декогерентности и механизмов осуществления логических операций.

7. Исследование динамических процессов в многоэлементных джозефсоновских структурах и разработка физических основ создания высокоэффективных выходных усилителей импульсных сигналов быстрой одноквантовой логики. Разработка интегральной схемы для экспериментальной проверки разработанной концепции усилителя одноквантовых импульсов. Разработка физических основ построения высоколинейных усилителей аналоговых сигналов гигагерцового диапазона частот.

Научная новизна работы

Развиты методы теоретического и экспериментального исследования многоэлементных джозефсоновских структур и устройств на их основе:

(а) Разработан эффективный метод моделирования флуктуационной компоненты тока, позволяющий использовать переменный шаг численного интегрирования уравнений динамики сверхпроводниковых цепей, а также высокоэффективный метод расчета спектра джозефсоновской генерации, основанный на использовании алгоритма авторегрессионного фильтра высокого порядка $p \sim 100$. Разработанные методы были реализованы в рамках высокоэффективного программного пакета PSCAN для численного моделирования динамики многоэлементных джозефсоновских структур и анализа спектральных характеристик.

(б) Разработан быстродействующий электронный аналог джозефсоновских переходов и сверхпроводящих квантовых интерферометров, позволяющий выполнять моделирование динамики многоэлементных джозефсоновских структур с точностью $\sim 1\%$ и аналоговым значением характерной джозефсоновской частоты до 100 кГц.

(в) Разработан многоканальный автоматизированный измерительный стенд для экспериментального исследования джозефсоновских интегральных схем и устройств.

С помощью развитых методов исследования получены следующие новые результаты.

1. Впервые проведено изучение хаотических процессов в одно- и двухконтактном сверхпроводящих квантовых интерферометрах. Показано, что в отсутствие постоянной составляющей приложенного внешнего магнитного потока, в этих устройствах всегда имеет место предшествующее хаосу спонтанное нарушение симметрии процессов, которое сопровождается появлением постоянной составляющей джозефсоновской фазы. Показано также, что основная роль *дополнительных* степеней свободы, возникающих при переходе от одноконтактного к двухконтактному интерферометру, заключается лишь в снятии с системы вырождения, т. е. в стимулировании спонтанного нарушения симметрии процессов в системе.

Сформулирован критерий отсутствия динамического хаоса в неавтономной диссипативной колебательной системе, дифференциальная реактивность которой может принимать отрицательные значения. Согласно этому критерию, хаос в системе возникать не должен, если ее дифференциальная реактивность положительна в течение всего периода внешнего воздействия. Показано, что данный критерий хорошо выполняется как для одноконтактного, так и для двухконтактного интерферометров. В частности, согласно этому критерию, независимо от амплитуды и частоты внешнего воздействия, хаос в интерферометре всегда отсутствует при малых значениях нормированной индуктивности, когда $l < 1$.

2. Развита теория высокочастотных сквидов переменного тока резонаторного и безрезонаторного типов. Показано, что безрезонаторный СВЧ сквид может быть проанализирован как сквид резонаторного типа, но с низким значением добротности резонатора. Развита теория применена для анализа экспериментальных данных, полученных при изучении СВЧ сквида с высокодобротным диэлектрическим резонатором из рутила TiO_2 ($\epsilon \approx 100$) и нанесенным на него интерферометром с джозефсоновским переходом в виде мостика.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование динамики гистерезисного СВЧ сквида резонаторного типа с туннельным джозефсоновским переходом. Показано, что в случае малых значений индуктивности, когда $1 < l < l_1 \approx 4,6$, возможен нормальный гистерезисный режим работы вплоть до значений частоты накачки $\Omega \approx \Omega_c / (2\beta)$. Экспериментально полученные значения чувствительности по магнитному потоку

$\delta\Phi_x = 1,5 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \Gamma_{\text{ц}}^{1/2}$ и энергии $\delta E = 2 \cdot 10^{-30}$ Джс/Гц при частотной полосе сигнала от 10 до 10^4 Гц являются одними из лучших в мире для гистерезисных скивдов.

3. Впервые предложен и всесторонне изучен теоретически и экспериментально быстродействующий высокочувствительный балансный компаратор, стробируемый одиночными квантами магнитного потока (SFQ), на основе джозефсоновских переходов с безгистерезисной вольт-амперной характеристикой (ВАХ).

Проведен анализ предельной чувствительности и временного разрешения балансного SFQ компаратора. Показано, что для типичных параметров джозефсоновских переходов квантовый предел чувствительности составляет ~ 10 пА/Гц $^{1/2}$, тепловые флуктуации при гелиевой температуре (4,2 К) ограничивают чувствительность на уровне 50 пА/Гц $^{1/2}$. Показано, что временное разрешение балансного SFQ компаратора составляет $(\delta\tau)_{\text{min}} = 5\hbar/(2eV_c)$. При величине характерного напряжения джозефсоновских переходов компаратора $V_c > 1,6$ мВ, временное разрешение $(\delta\tau)_{\text{min}} < 1$ пс.

Впервые реализован и экспериментально исследован балансный SFQ компаратор. Получено рекордное значение чувствительности 30...70 пА/Гц $^{1/2}$, полностью соответствующее теоретическим оценкам для случая тепловых флуктуаций. Полученная чувствительность на 4 порядка лучше чувствительности, достигнутой для небалансных компараторов на туннельных джозефсоновских переходах (0,8 мкА/Гц $^{1/2}$).

4. Проведено изучение процессов синхронизации джозефсоновской генерации в многоэлементных джозефсоновских структурах с различным типом цепей электродинамической связи джозефсоновских элементов и механизмов сужения линии синхронной генерации. Показано, что максимальное взаимодействие джозефсоновских элементов, обеспечивающее синхронный режим генерации в наиболее широком диапазоне разброса их параметров (до 30...40%), имеет место в случае, когда импеданс цепей связи сравним с импедансом джозефсоновских элементов, мнимая часть импеданса имеет индуктивный характер, параметр Маккамбера β порядка 1.

Показано, что спектральная линия джозефсоновской генерации в синхронных структурах сужается пропорционально числу джозефсоновских элементов в цепочке или числу ячеек в двумерной решетке до тех пор, пока размеры структуры не превышают эффективного радиуса взаимодействия джозефсоновских элементов в данной структуре.

Показано, что использование распределенных цепей электродинамической связи позволяет существенно увеличивать эффективный радиус взаимодействия джозефсоновских элементов за счет установления взаимодействия джозефсоновских переходов с общей для всей структуры стоячей электромагнитной волной. Это позволяет осуществлять

одновременно значительное сужение линии генерации и увеличение выходной мощности, пропорциональное числу джозефсоновских элементов.

5. Проведено исследование джозефсоновских структур с нетривиальной ток-фазовой зависимостью. Разработана цепочечная модель высокотемпературных бикристаллических джозефсоновских переходов, а также итерационный алгоритм получения распределения плотности критического тока вдоль бикристаллической границы по экспериментально измеренной зависимости полного тока бикристаллического перехода от магнитного поля. Развита аналитическая теория гармонических и субгармонических ступеней Шапиро и детекторного отклика для структур с нетривиальной ток-фазовой зависимостью.

Предложен и исследован новый тип “тихого” фазового кубита (квантовый бит – базовый элемент квантового компьютера), получена оценка времени декогерентности ($\sim 0,1$ мкс), предложен механизм осуществления логических операций.

6. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование широкополосных СВЧ усилителей на основе цепочек двухконтактных интерферометров.

Предложен и исследован новый тип выходного импульсного усилителя для передачи сигналов сверхпроводниковой быстрой одноквантовой логики (RSFQ логики) в цепи полупроводниковой электроники. *Впервые* использован режим усиления одноквантовых импульсов на цепочке сверхпроводящих квантовых интерферометров в резистивном состоянии. Для этой цели была предложена специальная техника мультиплицирования и уширения одноквантовых импульсов. Показано, что предложенная концепция позволяет увеличивать число суммирующих элементов и поднимать амплитуду выходного сигнала до 5 – 10 мВ без ограничения быстродействия усилителя: предельная частота следования одноквантовых импульсов может составлять 10-20% характерной частоты джозефсоновских элементов интегральной схемы. В случае ниобиевой технологии джозефсоновских структур с плотностью критического тока $j_c = 1$ кА/см² предельная частота следования импульсов составляет 8 - 16 ГГц и увеличивается соответственно в 2 и 4 раза при переходе на технологию с плотностью критического тока 4.5 кА/см² и 20 кА/см².

Разработана интегральная схема усилителя–интерфейса на основе ниобиевой технологии с плотностью критического тока $j_c = 1$ кА/см². Экспериментально продемонстрировано усиление одноквантовых импульсов до уровня 1 мВ на нагрузке 50 Ом при использовании схемы усилителя с 32-мя суммирующими элементами.

Предложен новый тип многоэлементных джозефсоновских структур, который обеспечивает высокую линейность отклика напряжения на магнитную компоненту входного электромагнитного сигнала. Такие структуры предназначены для разработки высокочувствительных высоколинейных усилителей гигагерцового диапазона частот.

Предложена новая концепция усилителя на основе многоэлементных джозефсоновских структур, представляющая собой усилитель бегущей волны, для устранения ограничений, связанных с распределенным характером многоэлементных структур.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов, приведенных в диссертации, подтверждается тем, что они были получены автором с использованием современных математических методов и вычислительных средств, современного программного обеспечения и современных методов обработки экспериментальных данных, а также с использованием передового высокотехнологического оборудования и измерительной аппаратуры. Полученные теоретические результаты подтверждаются проведенными в диссертационной работе экспериментальными исследованиями, а также находятся в соответствии с имеющимися литературными данными по теоретическим и экспериментальным исследованиям других научных групп в России и за рубежом. Это позволяет считать полученные результаты полностью обоснованными и достоверными.

Практическая значимость работы

Развиты эффективные методы численного моделирования динамики многоэлементных джозефсоновских структур в присутствии термических флуктуаций, а также эффективные методы расчета спектра джозефсоновской генерации, в том числе ширины линии синхронной генерации. Разработанные методы реализованы в рамках высокоэффективного программного пакета PSCAN для численного моделирования систем с джозефсоновскими переходами.

Полученные теоретические и экспериментальные результаты могут быть использованы при разработке перспективных аналоговых и цифровых устройств сверхпроводниковой электроники:

- узкополосных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн, в том числе, для создания высокочувствительных параметрических и супергетеродинных усилителей, частотных преобразователей и спектрометров;
- высокочастотных сквидов переменного тока и измерительных систем на их основе;
- высокочувствительных джозефсоновских компараторов тока для создания на их основе быстродействующих высокочувствительных аналого-цифровых преобразователей, а также стробоскопических преобразователей;
- фазовых кубитов для разработки систем квантомеханической обработки и защиты информации;

- высокоэффективных выходных усилителей сигналов быстрой одноквантовой логики для сопряжения с цепями полупроводниковой электроники;
- высокочувствительных высоколинейных усилителей гигагерцового диапазона частот, в том числе, усилителей бегущей волны.

Полученные результаты могут служить основой для последующих опытно-конструкторских разработок в области современных цифровых технологий обработки и передачи информации.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на международных конференциях, таких, как международная конференция по прикладной сверхпроводимости (*Applied Superconductivity Conference, USA*), 1982, 1984, 1990, 1994, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, международная конференция по сверхпроводниковой электронике (*International Superconductive Electronics Conference*), 1987, 1989, 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, 2007, Европейская конференция по прикладной сверхпроводимости (*European Conference on Applied Superconductivity*), 1995, 1997, 1999, 2001, 2003, 2005, международная конференция “*SQUID '85*”, Germany, 1985, международный симпозиум по сверхпроводимости в Швеции (*Fourth Nordic Symposium on Superconductivity*), 1994, международная конференция по физике сверхпроводниковых устройств (*Superconductive Device Physics*), Токио, 2001, международная конференция европейского научного сообщества “*Combined ESF Vortex and ESF PiShift Workshop*”, Германия, 2004, международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам “*Ломоносов-2004*”, конференция “*Ломоносовские чтения, секция физики*”, 2004, Европейская конференция по физике сверхпроводниковых устройств основанных на механизме фазового сдвига (*Physics of Superconducting Phase Shift Devices*), Италия, 2005, 11-я и 12-я международные студенческие конференции по применению новых физических явлений в области СВЧ устройств (*Int. Student's Seminar on Microwave Applications of New Physical Phenomena*), Санкт-Петербург, 2004, 2005, международная конференция по слабой сверхпроводимости (*Workshop on Weak Superconductivity*), Словакия, 2005, международный симпозиум “*Нанофизика и нанoeлектроника*”, Нижний Новгород, 2005, 2006.

Различные части работы в разное время докладывались и обсуждались на научных семинарах лаборатории криоэлектроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, научных семинарах ИРЭ РАН, научных семинарах Института Физики Высоких Технологий (*IPHT*), Германия, научных семинарах института физики твердого тела Йенского университета им Ф. Шиллера, Германия, научном семинаре института теоретической физики

Тьюбингенского университета, Германия, научном семинаре Нюрнберг-Эрлангенского университета, Германия, научном семинаре физического факультета Датского Технического университета

Публикации

По теме диссертации опубликовано 44 статьи в реферируемых отечественных и зарубежных научных журналах, 47 статей в изданиях международных конференций, 1 препринт, более 40 тезисов докладов на конференциях. Список основных публикаций приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора

Диссертационная работа является результатом более чем 20-летних исследований автора в области свехпроводниковой электроники. Вклад соискателя в работы, написанные в соавторстве и вошедшие в диссертацию, является определяющим. Большинство работ было выполнено в соавторстве со студентами и аспирантами физического факультета МГУ. В работах, выполненных в соавторстве с сотрудниками ИРЭ РАН и содержащих данные по экспериментальному исследованию высокотемпературных джозефсоновских переходов и устройств на их основе, автору принадлежат результаты теоретических исследований. На основании полученных данных им сформулированы и обоснованы выводы диссертации.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из Введения, 7 Глав, Заключения, в котором сформулированы основные выводы, и списка работ автора. Каждая из глав диссертации содержит список цитированной литературы и заканчивается разделом кратких выводов, в котором кратко формулируются основные результаты, полученные в этой части. Объем диссертации составляет 343 страницы, 179 рисунков и списков литературы, содержащих в целом 470 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дается обоснование актуальности рассматриваемой темы, научная новизна и практическая ценность исследований, а также перечислены основные результаты. В конце введения кратко описана структура диссертации.

В главе I дается описание техники и методов исследований, которые были разработаны и использованы в цикле работ, которому посвящена диссертация. В первом разделе этой части дается описание быстродействующего электронного аналога цепей с

джозефсоновскими контактами. При частоте внутреннего опорного генератора $F_0 \cong 1$ МГц электронный аналог позволяет работать с частотами моделирующих сигналов до 100 кГц. При этом точность моделирования процессов не хуже 1...2%, и точность задания параметров не хуже 1...3%. Электронный аналог был использован при изучении хаотических процессов в сверхпроводящих квантовых интерферометрах, динамики радиочастотных сквидов с туннельными джозефсоновскими переходами, процессов синхронизации туннельных джозефсоновских переходов.

Во втором разделе данной части дается описание многоканального измерительного стенда для исследования сверхпроводниковых схем. Разработанный автоматизированный измерительный стенд поддерживает до 15 каналов задания тока и 32 каналов измерения напряжения и обеспечивает уровень флуктуаций тока во входных измерительных цепях ~ 1 мкА. Разработан также гибкий и универсальный программный комплекс, совместимый с различными типами приборной части стенда. Предусмотрена возможность оперативного развития измерительного комплекса путем создания дополнительных макроприборов. Можно выделить три основных части измерительного стенда: (i) персональный компьютер, реализующий комплекс управляющих программ, (ii) приборную часть и (iii) измерительное зондовое устройство, в котором устанавливается чип с исследуемой интегральной схемой. Электрический контакт с чипом осуществляется с помощью пружинящих игольчатых контактов из бериллиевой бронзы.

В третьем разделе дано описание высокопроизводительного программного комплекса PSCAN. Программный комплекс PSCAN (Personal Superconductor Circuit Analyzer), разработанный ранее в лаборатории криоэлектроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова [21] и работающий в настоящее время в среде WINDOWS, является одним из наиболее эффективных автоматизированных программных пакетов, для численного анализа сверхпроводниковых электронных схем, которые могут содержать от десятков до нескольких тысяч джозефсоновских элементов [10-17]. Высокая эффективность комплекса PSCAN достигается за счет использования автоматически изменяющегося переменного шага интегрирования (по времени) при численном решении системы дифференциальных уравнений. Данная система уравнений генерируется внутри программного пакета автоматически на основе заданной структуры исследуемой схемы и используемых моделей джозефсоновских элементов. Для описания структуры схемы используется специальный внутренний язык, в состав которого входят условные обозначения моделей джозефсоновских элементов и всех возможных элементов схемы, таких как резисторы, емкости, сверхпроводящие индуктивности, сверхпроводящие трансформаторы, а также генераторы фазы, тока и напряжения.

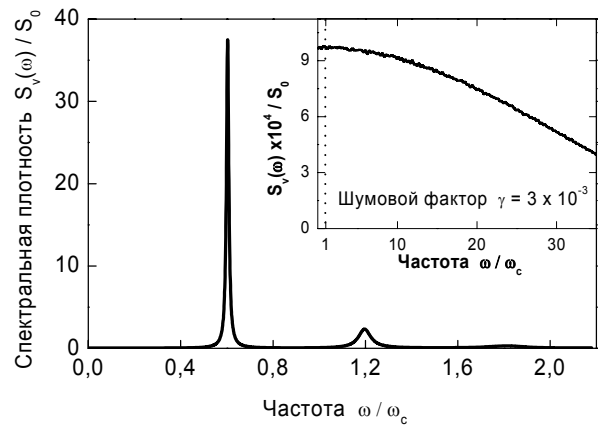
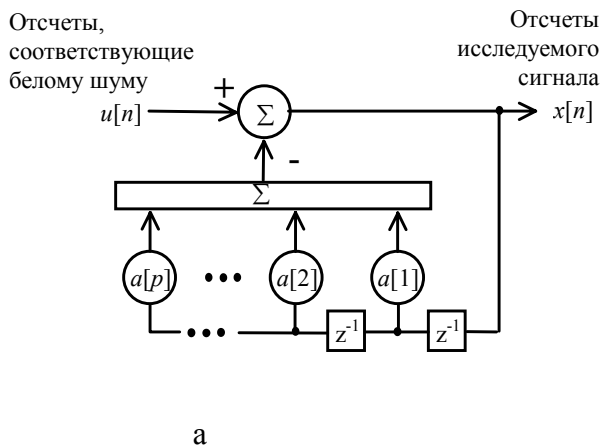


Рис. 1. (а) – авторегрессионный фильтр порядка p . Входной сигнал $u[n]$ – отсчеты, соответствующие белому шуму; выходной сигнал $x[n]$ – отсчеты, соответствующие исследуемому сигналу, $a[1] – a[p]$ - набор параметров фильтра. (б) - спектр джозефсоновской генерации, рассчитанный в рамках резистивной модели. На вставке представлен спектр квази-белого шума, используемого при расчете; ω_c – характерная джозефсоновская частота.

В процессе выполнения диссертационной работы был разработан эффективный метод численного моделирования флуктуационной компоненты тока, совместимый с переменным шагом численного интегрирования уравнений динамики сверхпроводниковых цепей, а также разработан высокоэффективный метод расчета спектра джозефсоновской генерации, основанный на использовании алгоритма авторегрессионного фильтра порядка $p \sim 100$. Итерационное обращение к алгоритму фильтра позволяет прийти к значениям параметров фильтра, при которых входной сигнал в виде белого шума преобразуется таким фильтром в изучаемый сигнал. Набор найденных параметров фильтра дает полную информацию о спектре изучаемого сигнала. Реализация разработанных методов в рамках программного пакета PSCAN привела к существенному расширению возможностей данного пакета. Это позволило выполнить численное моделирование динамических процессов в присутствии флуктуаций и провести изучение спектральных характеристик многоэлементных джозефсоновских структур.

Глава II посвящена изучению хаотических процессов в одно- и двухконтактном сверхпроводящих квантовых интерферометрах. Проведено изучение областей хаотических процессов в одноконтактном сверхпроводящем квантовом интерферометре, находящемся под воздействием внешнего периодического магнитного потока, а также в автономном и неавтономном двухконтактном интерферометре путем моделирования динамики процессов с помощью специального быстродействующего электронного аналога.

Показано, что при больших значениях индуктивности, когда параметр $l \gg 1$, области хаоса в одноконтактном интерферометре совпадают с аналогичными областями для

одиночного джозефсоновского контакта. По мере уменьшения параметра l , характеризующего степень нелинейности системы, области хаотического поведения также уменьшаются, а при $l < 1$ хаос в системе полностью отсутствует. В отсутствие постоянной составляющей приложенного внешнего магнитного потока, всегда имеет место предшествующее хаосу спонтанное нарушение симметрии процессов, которое сопровождается появлением постоянной составляющей джозефсоновской фазы $\bar{\varphi} \neq 0$ и, следовательно, постоянной составляющей полного магнитного потока через интерферометр.

В результате изучения двухконтактного интерферометра показано, что в автономном режиме работы области хаотических колебаний локализованы на вольт-амперной характеристике интерферометра вблизи особенностей саморезонансного характера.

Обнаружено, что в неавтономном режиме существование у двухконтактного интерферометра дополнительных, по сравнению с одноконтактным интерферометром, степеней свободы вызывает увеличение областей хаоса лишь в случае вырожденного, т. е. полностью симметричного интерферометра. Это означает, что основная роль дополнительных степеней свободы интерферометра заключается лишь в снятии с системы

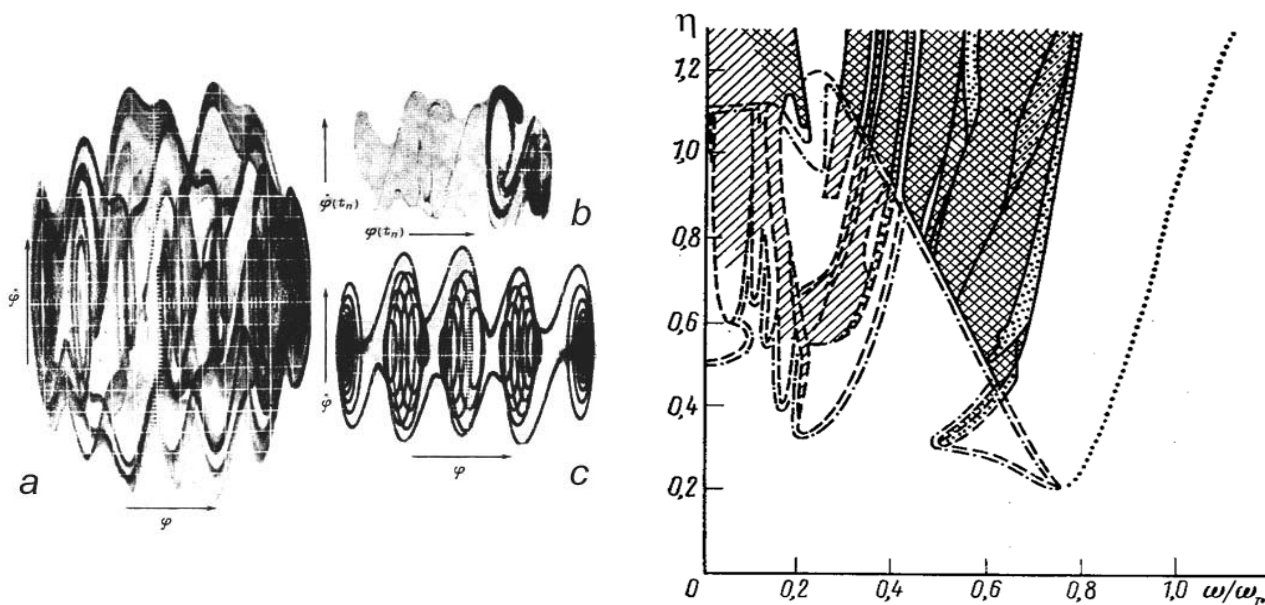


Рис. 2. Одноконтактный интерферометр под воздействием внешнего периодического магнитного потока $\varphi_e/l = \eta_0 + \eta \cos(\omega t)$ при $l = 10$, $\eta_0 = 0$, $\beta = 25$. Слева: фазовый портрет (a) и плоскость Пуанкаре (b) хаотического режима в области $\omega \cong 0.1$, $\eta \cong 1.3$, а также фазовый портрет (c) периодического процесса внутри данной области. Справа: области параметров ω и η внешнего гармонического воздействия соответствующие различным процессам в одноконтактном интерферометре. Пустые области соответствуют колебания с основным периодом $T = 2\pi/\omega$, области, заполненные точками, соответствуют периодическим процессам, содержащим субгармоники частоты ω , двойной штриховкой выделены области хаоса, пунктирная и штрих-пунктирная линии - граница, соответствующая необходимому критерию хаоса.

вырождения, т. е. в стимулировании спонтанного нарушения симметрии процессов в системе.

Сформулирован критерий отсутствия динамического хаоса в неавтономной диссипативной колебательной системе, дифференциальная реактивность которой может принимать отрицательные значения. Согласно этому критерию, хаос в системе возникать не должен, если ее дифференциальная реактивность положительна в течение всего периода внешнего воздействия. Данный критерий хорошо выполняется как для одноконтактного, так и для двухконтактного интерферометров. В частности, согласно этому критерию, независимо от амплитуды и частоты внешнего воздействия, хаос в интерферометре всегда отсутствует при малых значениях нормированной индуктивности, когда $l < 1$.

Физический смысл данного критерия заключается в том, что, если дифференциальная реактивность для малых возмущений становится отрицательной на достаточно длинном промежутке времени, отклонения от предельного цикла нарастают настолько, что за оставшуюся часть периода они не успевают затухнуть. В этом случае предельный цикл становится неустойчивым, и возникает странный аттрактор.

В главе III рассматриваются высокочастотные сквиды переменного тока. Развита теория высокочастотных сквидов переменного тока резонаторного и безрезонаторного типов. Показано, что анализ динамики резонаторного СВЧ сквида сводится к анализу эквивалентного сосредоточенного (радиочастотного) сквида: выходной сигнал СВЧ сквида представим в виде векторной суммы падающей волны накачки и напряжения на колебательном контуре эквивалентного сосредоточенного сквида. Показано также, что безрезонаторный СВЧ сквид может быть проанализирован как сквид резонаторного типа, но

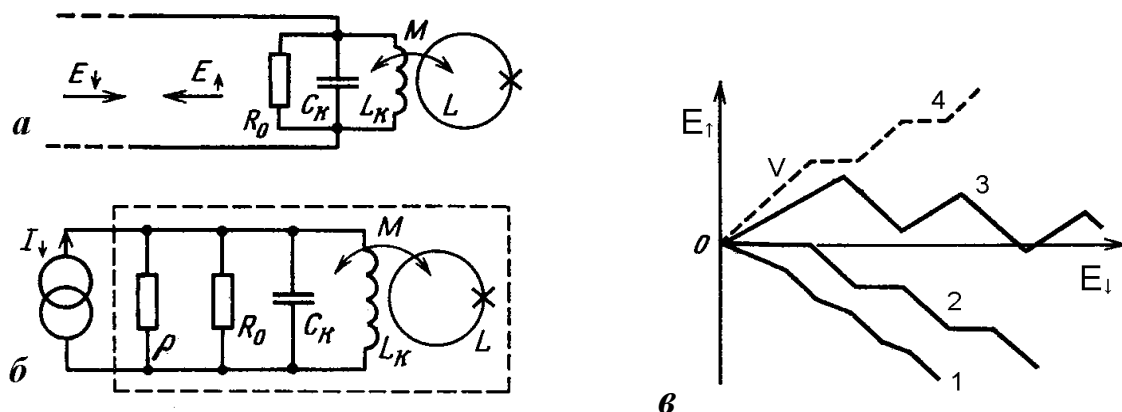


Рис. 3. Анализ резонаторного СВЧ сквида. (а)- эквивалентная длинная линия (с импедансом ρ), нагруженная на эквивалентный колебательный контур, (б) - эквивалентный “радиочастотный” сквид, (в) – выходной сигнал СВЧ сквида. Здесь E_{\downarrow} - падающая волна накачки, E_{\uparrow} - амплитуда (с учетом фазы) отраженной волны, V – амплитуда напряжения на колебательном контуре эквивалентного сосредоточенного сквида.

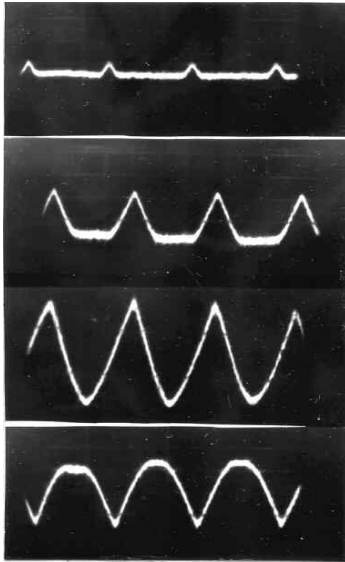


Рис. 4. Сигнальные характеристики резонаторного СВЧ сквида $P_1(\Phi_x)$ с джозефсоновским переходом в виде мостика при увеличении мощности накачки (эксперимент).

с низким значением добротности резонатора.

Развитая теория применяется для анализа полученных экспериментальных данных при изучении СВЧ сквида с высокодобротным диэлектрическим резонатором из рутила TiO_2 ($\epsilon \approx 100$) и напыленным на него пленочным одноконтактным интерферометром с джозефсоновским переходом в виде мостика. Для различных изготовленных датчиков были реализованы различные режимы работы сквида: гистерезисный режим, высокочастотный безгистерезисный режим, а также промежуточный режим.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование динамики гистерезисного СВЧ сквида

резонаторного типа с туннельным джозефсоновским переходом. Показано, что в случае $1 < l < l_1 \approx 4,6$ возможен нормальный гистерезисный режим работы вплоть до значений частоты накачки $\Omega \approx \Omega_c / (2\beta)$.

В силу того, что крутизна преобразования $dV/d\Phi_x$ в гистерезисном режиме растет пропорционально частоте накачки, СВЧ сквиды позволяют получить высокую чувствительность в сочетании с широкой полосой частот принимаемых сигналов. Так, полученные экспериментально для резонаторного СВЧ сквида с туннельным джозефсоновским переходом значения чувствительности по магнитному потоку и энергии $\delta\Phi_x = 1,5 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \Gamma\mu^{1/2}$, $\delta E = 2 \cdot 10^{-30} \text{ Дж} / \Gamma\mu$ при частотной полосе сигнала от 10 до 10^4 Гц являются одними из лучших в мире для гистерезисных сквидов.

Глава IV посвящена изучению компараторов тока на основе джозефсоновских переходов. Проведенное исследование показало *невозможность создания* балансного импульсного компаратора, обеспечивающего одновременно высокое быстродействие и высокую чувствительность, на основе туннельных джозефсоновских переходов, то есть джозефсоновских элементов с гистерезисной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Туннельные джозефсоновские переходы с неоднозначной ВАХ позволяют создавать только асимметричные, то есть небалансные, схемы компараторов, частота рабочего цикла которых, быстродействие и чувствительность далеки от предельных возможностей устройств на основе эффекта Джозефсона.

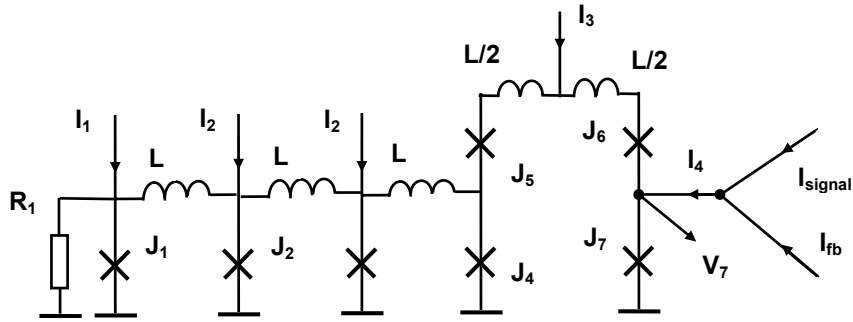


Рис. 5. Схема устройства, разработанного для экспериментального исследования балансного компаратора на основе джозефсоновских переходов с безгистерезисной вольт-амперной характеристикой: J_6 и J_7 – балансный компаратор (пара Гото), J_2 – J_4 – джозефсоновская линия передачи (JTL) одиночных квантов магнитного потока (SFQ) в контур компаратора, J_1 – генератор одиночных квантов магнитного потока. Токи смещения: $I_1 > I_c$, $I_2 < I_c$, $I_3 < 2I_c$; $R_1 < R_N$; $l = (2\pi/\Phi_0)I_cL \approx 3 \dots 6$.

Впервые предложен и проанализирован *быстродействующий высокочувствительный* балансный компаратор, стробируемый одиночными квантами магнитного потока (SFQ), на основе джозефсоновских переходов с безгистерезисной ВАХ. Проведен анализ предельной чувствительности балансного SFQ компаратора, определяющейся внутренними флуктуациями компаратора. Для реальных типичных параметров джозефсоновских переходов квантовый предел чувствительности составляет примерно $10 \text{ пА/Гц}^{1/2}$, тепловые флуктуации при гелиевой температуре (4,2 К) ограничивают чувствительность на уровне $50 \text{ пА/Гц}^{1/2}$. Показано, что временное разрешение балансного SFQ компаратора составляет $(\delta\tau)_{\min} = 5\hbar/(2eV_c)$. Если характерное напряжения джозефсоновских переходов компаратора $V_c > 1,6 \text{ мВ}$, временное разрешение $(\delta\tau)_{\min} < 1 \text{ пс}$.

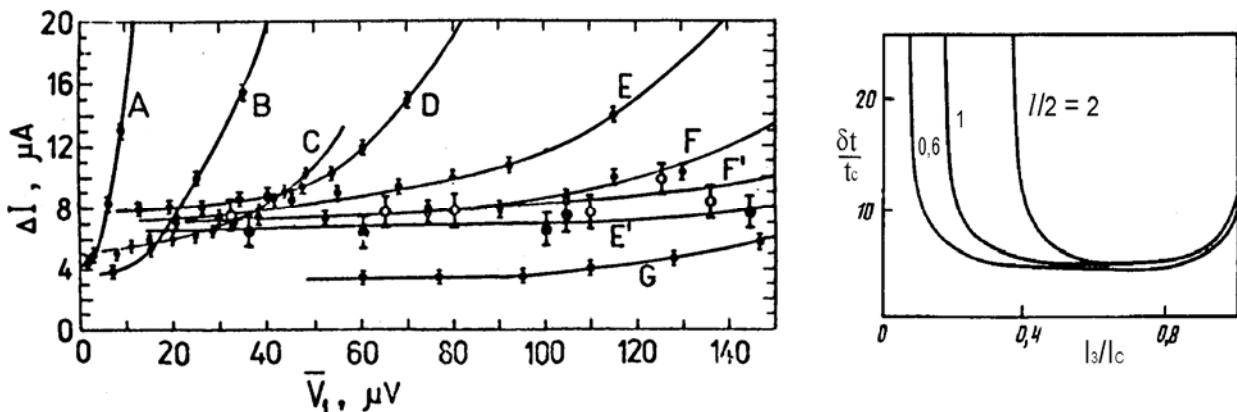


Рис. 6. Слева: величина размытия ΔI пороговой характеристики (ВАХ) балансного компаратора как функция постоянной составляющей напряжения на генераторе V_1 (т.е. функция частоты следования импульсов) для различных образцов, исследовавшихся экспериментально. Справа: временное разрешение балансного компаратора как функция тока смещения I_3 при различных значениях безразмерной индуктивности $l/2$ (расчет).

Впервые экспериментально реализован и исследован балансный SFQ компаратор. Экспериментально получено рекордное значение чувствительности $30...70 \text{ пА/Гц}^{1/2}$, полностью соответствующее теоретическим оценкам для случая тепловых флуктуаций. Полученная чувствительность на 4 порядка лучше чувствительности, достигнутой для небалансных компараторов на туннельных джозефсоновских переходах ($0,8 \text{ мкА/Гц}^{1/2}$).

В главе V представлены результаты исследования явления взаимной синхронизации в цепочках и решетках джозефсоновских переходов, а также результаты изучения механизмов сужения линии синхронной джозефсоновской генерации.

Показано, что максимальное взаимодействие джозефсоновских элементов обеспечивающее синхронный режим генерации в наибольшем диапазоне разброса их параметров (до $30...40\%$), имеет место в случае, когда импеданс цепей связи сравним с импедансом джозефсоновских элементов, мнимая часть импеданса имеет индуктивный характер, параметр Маккамбера β порядка 1. Предложены наиболее оптимальные одномерные цепочки и двумерные решетки джозефсоновских переходов. В случае туннельных джозефсоновских переходов с большой собственной емкостью ($\beta \gg 1$), которые, обеспечивают наиболее высокое значение характерной джозефсоновской частоты, также возможна их взаимная синхронизация хотя и в ограниченном частотном интервале, но со значительной устойчивостью к изменению (до $\pm 30\%$) параметров переходов при оптимальном выборе электродинамической системы, объединяющей туннельные джозефсоновские переходы. Частотная область этого явления ограничена полосой пропускания резонанса, образованного системой, объединяющей переходы, и их емкостями.

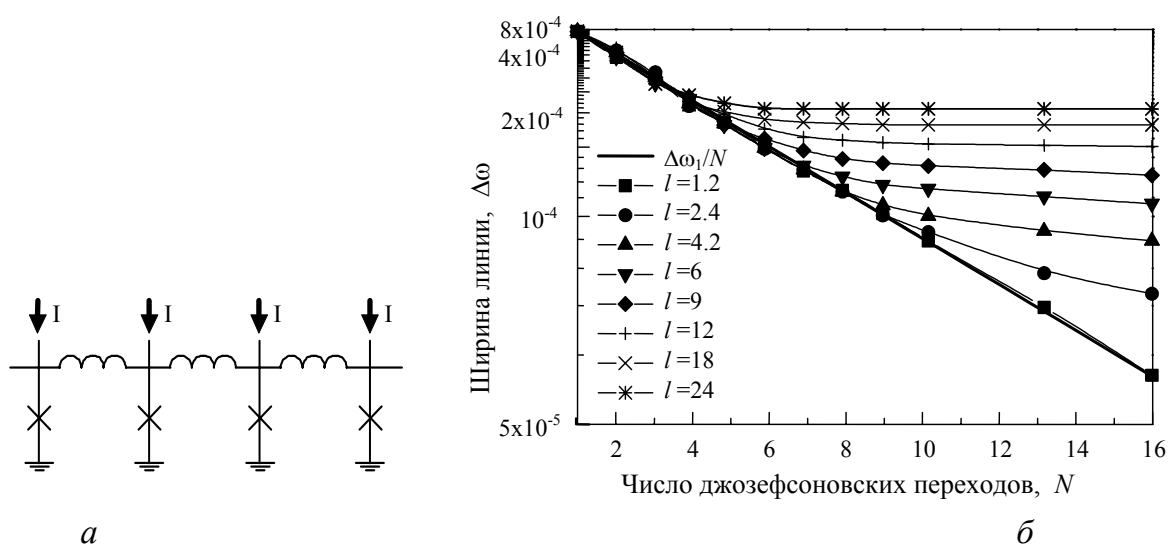


Рис. 7. Параллельная цепочка джозефсоновских переходов (а) и зависимость ширины линии синхронной генерации от числа N джозефсоновских переходов в цепочке при различном значении нормированной индуктивности l (б).

Показано, что линия джозефсоновской генерации в синхронных структурах с сосредоточенными цепями электродинамической связи сужается пропорционально числу джозефсоновских элементов в цепочке или числу ячеек в двумерной решетке до тех пор, пока размеры структуры не превышают эффективного радиуса взаимодействия джозефсоновских элементов в данной структуре. Анализ различных типов цепочек и решеток джозефсоновских элементов с сосредоточенными цепями электродинамической связи показывает, что практически вряд ли реально получить сужение линии генерации в таких структурах более, чем в 100 раз.

Проведено исследование многоэлементных джозефсоновских структур с распределенными цепями электродинамической связи. Показано, что наименьшая ширина линии генерации имеет место в случае слабого отражения волны от джозефсоновских элементов, включенных в распределенную структуру, когда импеданс джозефсоновского перехода Z_J (близкий к его нормальному сопротивлению R_N), должен быть значительно больше или, в зависимости от способа включения джозефсоновского элемента, наоборот, меньше волнового сопротивления распределенной структуры ρ . Это означает возбуждение в распределенной системе единой стоячей волны, частота которой в этом случае определяется только полной длиной распределенной линии. Радиус взаимодействия джозефсоновских переходов в такой структуре значительно возрастает за счет взаимодействия всех джозефсоновских элементов с общей стоячей волной. Показано, что увеличение числа

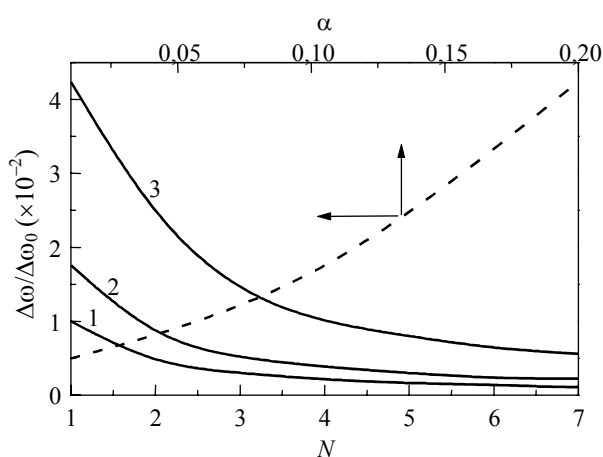


Рис. 8. Зависимость ширины линии генерации от числа N джозефсоновских элементов в распределенной структуре, при различных значениях коэффициента потерь α (1 - $\alpha = 0,05$; 2 - $\alpha = 0,1$; 3 - $\alpha = 0,2$). Штриховая линия - зависимость ширины линии генерации от коэффициента потерь α при $N = 1$. Здесь $\Delta\omega_0$ - ширина автономной линии генерации джозефсоновского перехода.

джозефсоновских элементов и соответственно числа $\lambda/2$ -секций в распределенной структуре, в которой возбуждается единая стоячая волна, позволяет одновременно увеличить выходную мощность (до нескольких десятков процентов мощности падающей волны) и уменьшить ширину линии генерации. Это подтверждается опубликованными экспериментальными результатами (Япония) для распределенных структур на основе низкотемпературных сверхпроводников, в которых была получена добротность линии генерации $\Omega_0/\Delta\Omega \sim 10^5$.

Глава VI посвящена исследованию джозефсоновских структур с нетривиальной ток-фазовой зависимостью (ТФЗ). Разработана модель на основе параллельной цепочки “0” и “пи” джозефсоновских элементов для описания бикристаллических джозефсоновских переходов из высокотемпературных сверхпроводников. Предложенная модель позволила объяснить особенности экспериментально наблюдаемой зависимости критического тока бикристаллических переходов от приложенного магнитного поля. В рамках этой модели разработан итерационный алгоритм, позволяющий рассчитывать распределение плотности критического тока внутри бикристаллического перехода по экспериментально измеренной зависимости полного критического тока от приложенного магнитного поля.

Показано также, что сильная неоднородность распределения плотности критического тока вдоль бикристаллического перехода приводит к появлению в спектре джозефсоновской генерации субгармонических компонент, существование которых обуславливает формирование субгармонических ступеней Шапиро на ВАХ бикристаллических переходов. Неоднородность плотности критического тока является одним из факторов, определяющих отклонение бикристаллических переходов от резистивной модели джозефсоновских элементов, в рамках которой субгармонические ступени отсутствуют. Другими такими факторами отклонения от резистивной модели являются собственная емкость

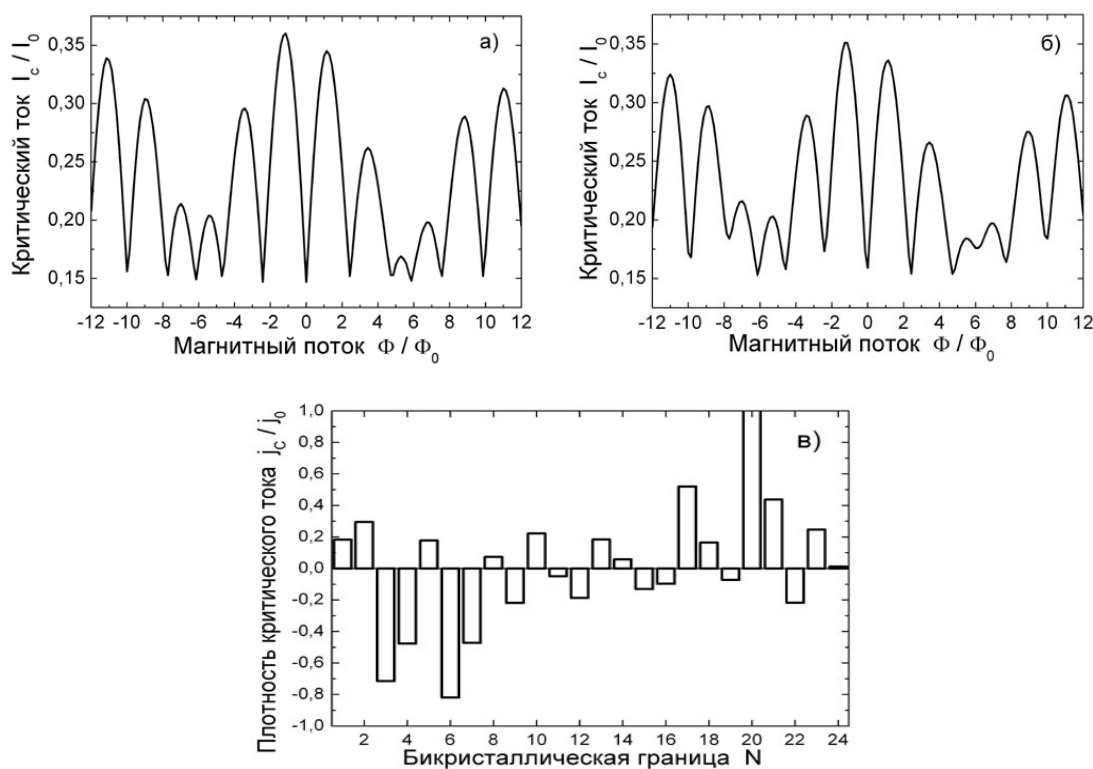


Рис. 9. (а) - экспериментально измеренная зависимость критического тока от магнитного поля (получена в Институте Кибернетики, Неаполь, Италия); (б) - расчетная зависимость $I_c(\Phi/\Phi_0)$, полученная с помощью итерационного алгоритма, (в) - найденное распределение плотности критического тока $j_c(x)$ вдоль границы бикристаллического перехода.

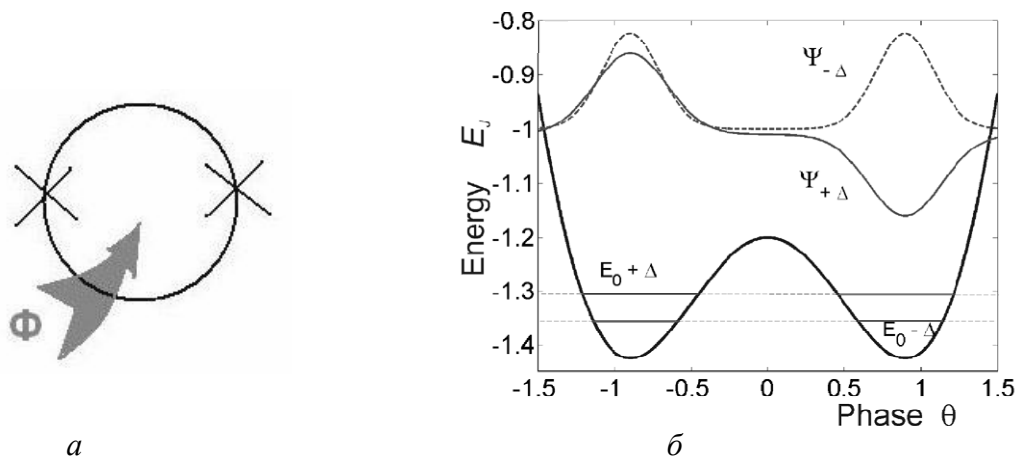


Рис. 10. (а) - тихий фазовый кубит, представляющий собой низкоиндуктивный двухконтактный интерферометр с несинусоидальной ТФЗ джозефсоновских элементов; (б) - двухямный потенциал, расщепленный основной энергетический уровень – базис кубита, и соответствующие волновые функции.

джозефсоновских переходов и присутствие второй гармоники в ток-фазовой зависимости (ТФЗ) переходов.

В диссертационной работе развита аналитическая теория гармонических и субгармонических ступеней Шапиро с учетом обоих факторов: емкости джозефсоновских переходов и второй гармоники в ТФЗ. Результаты аналитической теории сопоставляются с экспериментальными данными для высокотемпературных джозефсоновских переходов, изготовленных и исследованных в институте радиотехники и электроники (ИРЭ) РАН.

Предложен и исследован теоретически “тихий” фазовый кубит (квантовый бит) – базовый элемент квантового компьютера. Показано, что присутствие достаточно большой второй гармоники в ТФЗ джозефсоновских переходов, образующих двухконтактный сверхпроводящий квантовый интерферометр, приводит к образованию двухямного энергетического потенциала. Значения расщепленного основного энергетического уровня $E_0 \pm \Delta$ такой квантовомеханической системы образуют базис рассматриваемого кубита. Изучено влияние приложенного магнитного поля на величину расщепления Δ . Показано, что, изменяя размеры джозефсоновских переходов и устанавливая определенное соотношение между характерными величинами джозефсоновской и кулоновской энергий кубита, можно обеспечить изменение величины Δ или, наоборот, ее неизменность при приложении магнитного потока Φ_e ограниченной величины. Поскольку значение величины изменения щели входит непосредственно в выражение гамильтониана, контролирующего эволюцию состояния кубита, это позволяет создавать кубиты, специализированные на выполнение той или иной логической операции при приложении к кубиту импульса магнитного потока фиксированной длительности.

В главе VII представлены результаты исследований, направленных на разработку широкополосных СВЧ усилителей импульсных и аналоговых сигналов на основе цепочек двухконтактных интерферометров.

В первой части этой главы излагаются результаты теоретического и экспериментального исследования физических основ построения высокоэффективного выходного усилителя одноквантовых импульсов на основе многоэлементной джозефсоновской структуры. Такой усилитель крайне важен для осуществления надежной передачи сигналов сверхпроводниковой быстрой одноквантовой логики в цепи полупроводниковой электроники.

Впервые использован режим усиления сигналов быстрой одноквантовой логики на цепочке сверхпроводящих квантовых интерферометров в резистивном состоянии. Для этой цели были предложены специальная техника синхронного мультиплицирования квантов магнитного потока и техника уширения мультиплицированных одноквантовых импульсов. Проведено детальное изучение динамических процессов в функциональных частях усилителя: (i) цепи мультиплицирования входного кванта магнитного потока и сопровождающего его одноквантового импульса напряжения, (ii) цепи уширения мультиплицированных импульсов, (iii) суммирующей последовательной цепочке двухконтактных сверхпроводящих квантовых интерферометров (сквидов). Исследовано также обратное влияние выходной нагрузки на ВАХ и сигнальную характеристику суммирующей цепочки, а также проведено изучение влияния синхронизации джозефсоновской генерации в ячейках цепочки на характеристики усилителя.

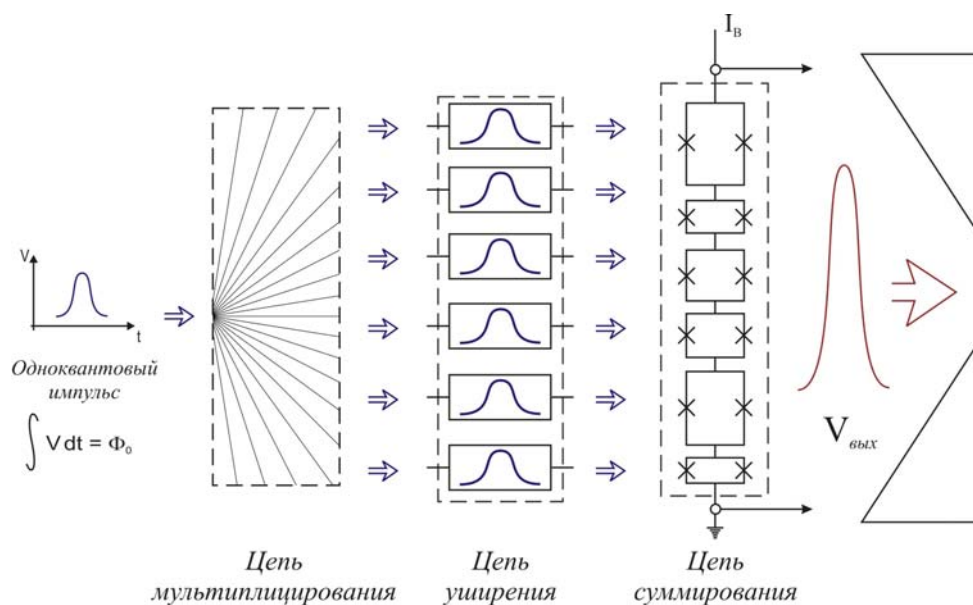


Рис. 11. Основные части усилителя одноквантовых импульсов: (i) цепь изохронного мультиплицирования одноквантовых импульсов, (ii) цепь уширения импульсов и (iii) суммирующая цепочка двухконтактных сквидов.

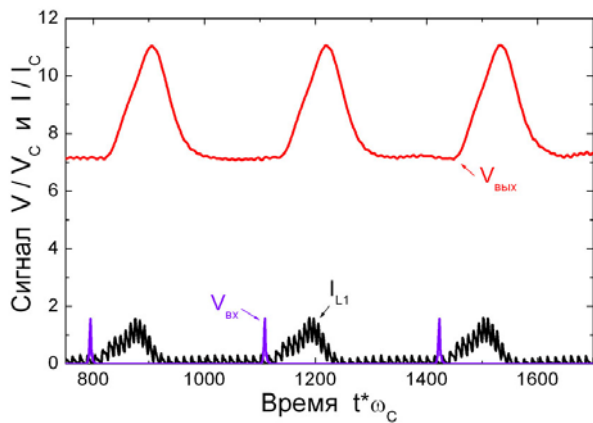


Рис. 12. Трансформация одноквантового входного импульса V_{in} в выходной импульс V_{out} на суммирующей цепочке из $N = 16$ ячеек; I_L - уширенный импульс тока в ячейке цепи уширения.

Показано, что предложенная концепция построения усилителя позволяет увеличивать число суммирующих элементов и поднимать амплитуду выходного сигнала до 5 – 10 мВ без ограничения быстродействия усилителя. Согласно теоретическим расчетам максимальная частота следования одноквантовых импульсов может составлять 10 - 20% характерной частоты джозефсоновских переходов, что соответствует частотам $F = 8...16$ ГГц

для стандартной ниобиевой технологии с плотностью критического тока 1 кА/см^2 [26]. При переходе к стандартной технологии с плотностью критического тока 4.5 кА/см^2 предельная частота следования импульсов и максимальная амплитуда выходного сигнала возрастают в 2 раза, а использование в дальнейшем технологии с плотностью критического тока 20 кА/см^2 [26] позволит увеличить частоту и амплитуду в 4 раза

Разработана и экспериментально исследована интегральная схема усилителя–интерфейса на основе ниобиевой технологии с плотностью критического тока $j_c = 1 \text{ кА/см}^2$. Было выполнено три последовательных итерации изготовления экспериментальных чипов с образцами интегральной схемы для совершенствования топологии и соответственно послойных фотошаблонов разрабатываемой интегральной схемы. Было найдено оптимальное использование экранирующих слоев и разработана техника демпфирования резонансов как внутри ячеек суммирующей цепочки, так и в структуре всей цепочки.

Проведено экспериментальное изучение функциональных частей усилителя и тестирование интегральной схемы усилителя в целом. Для проведения высокочастотного тестирования интегральных схем усилителей в состав интегральных схем были включены два разных источника входных одноквантовых импульсов: (i) сильно демпфированный джозефсоновский переход и (ii) dc/SFQ преобразователь - пороговый преобразователь внешнего входного сигнала в короткие одноквантовые импульсы такой же частоты. Оба генератора входных сигналов подключены к входу усилителя (к входу цепи мультиплицирования импульсов) через специальное буферное устройство “Merger”. Объединитель одноквантовых импульсов (Merger) препятствует прохождению квантов магнитного потока от одного генератора одноквантовых импульсов к другому.

Первый источник сигналов использовался для генерации периодических пакетов

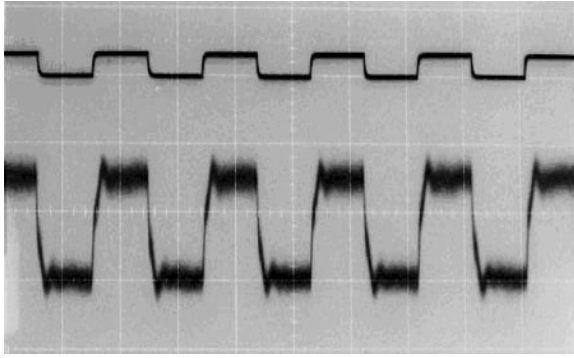


Рис. 13. Опорный сигнал для получения периодических групп одноквантовых импульсов и выходной сигнал (нижняя осциллограмма). Частота повторения групп 0.1 МГц. Масштаб напряжения 1 мВ/дел.

входных одноквантовых импульсов. После прохождения цепи мультиплицирования пакеты импульсов поступают в цепи уширения импульсов. Уширение импульсов в 5 – 10 раз (и больше) приводит к слиянию импульсов и образованию фактически прямоугольного импульса тока в ячейках уширения и, следовательно, прямоугольного импульса магнитного потока поступающего в ячейки суммирующей цепочки усилителя. Поэтому выходной сигнал интегральной

схемы в этом случае представляет собой прямоугольные импульсы с длительностью, равной длительности пакетов входных одноквантовых импульсов.

Второй источник, dc/SFQ преобразователь, использовался для генерации одиночных входных одноквантовых импульсов. Данный преобразователь формирует одиночные одноквантовые импульсы, следующие с частотой опорного синусоидального сигнала; при увеличении амплитуды опорного сигнала dc/SFQ преобразователь генерирует пары одноквантовых импульсов.

Экспериментально продемонстрировано усиление одноквантовых импульсов до уровня 1 мВ на нагрузке 50 Ом при использовании схемы усилителя с 32-мя суммирующими

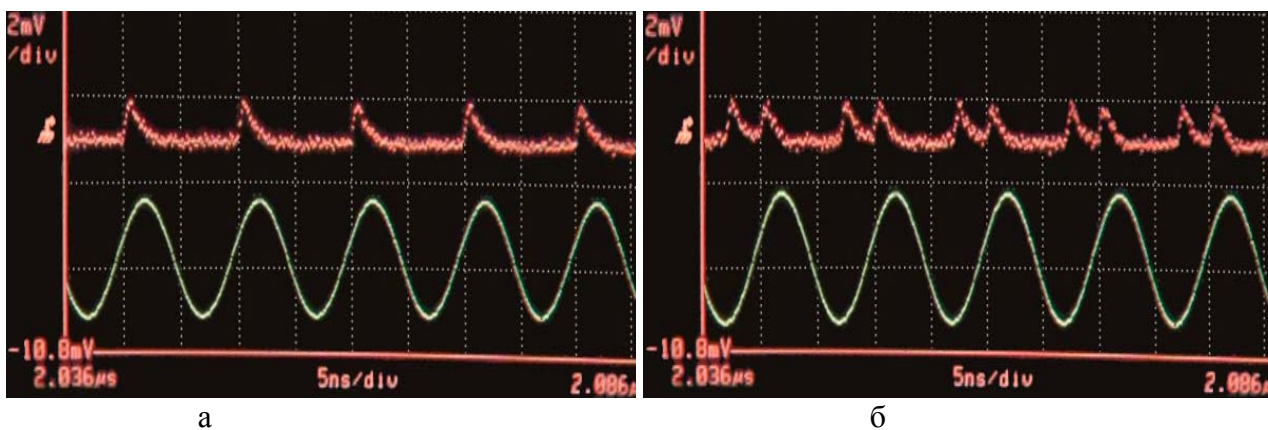


Рис. 14. Выходные импульсы напряжения, снимаемые с суммирующей цепочки усилителя, подключенной к 50-омной нагрузке (верхние осциллограммы) и опорный сигнал, подаваемый на dc/SFQ преобразователь (нижние осциллограммы синусоидального сигнала). Данный преобразователь формирует одиночные одноквантовые импульсы, следующие с частотой опорного сигнала (а); при увеличении амплитуды опорного сигнала dc/SFQ преобразователь генерирует пары одноквантовых импульсов (б). Частота опорного сигнала: 100 МГц. Шкала напряжения: 2 мВ/дел.

элементами. Ширина экспериментально полученных выходных импульсов составляет $\tau_{имп} = 500$ пс (длительность ~ 1 нс) и хорошо соответствует величине уширения импульсов, заложенной при проектировании схемы. Полученные экспериментально амплитуда выходных импульсов 1 мВ и максимальный отклик суммирующей цепочки 1,5 мВ хорошо согласуется с результатами численного моделирования динамики интерферометров суммирующей цепочки, индуктивно связанных с ячейками цепи уширения при величине коэффициента индуктивной связи $M/L = 0.45 \dots 0.5$, заложенной в топологии схемы.

Во второй части данной главы излагаются результаты исследования физических основ построения многоэлементных джозефсоновских структур, характеризующихся высоколинейной функцией отклика (треугольной формы) напряжения на магнитное поле смещения. Предложен новый тип многоэлементных джозефсоновских структур, который обеспечивает высокую линейность отклика напряжения на магнитную компоненту входного электромагнитного сигнала. Такая структура может быть реализована на основе последовательной цепочки скидвов, содержащей группы одинаковых скидвов, которые формируют необходимый спектральный состав функции отклика напряжения цепочки. Возможно также построение дифференциальных схем на основе последовательных цепочек. При замене в этих цепочках скидвов на параллельные цепочки джозефсоновских переходов получаем последовательно-параллельную дифференциальную структуру. Предложенные структуры позволяют разрабатывать высокочувствительные высоколинейные усилители гигагерцового диапазона частот. Для устранения ограничений, связанных с распределенным характером структур на основе длинных цепочек предложена новая концепция усилителя на основе многоэлементных джозефсоновских структур, представляющая собой усилитель бегущей волны. Идея такого усилителя во многом соответствует хорошо известному принципу усиления сигнала лампой бегущей волны.

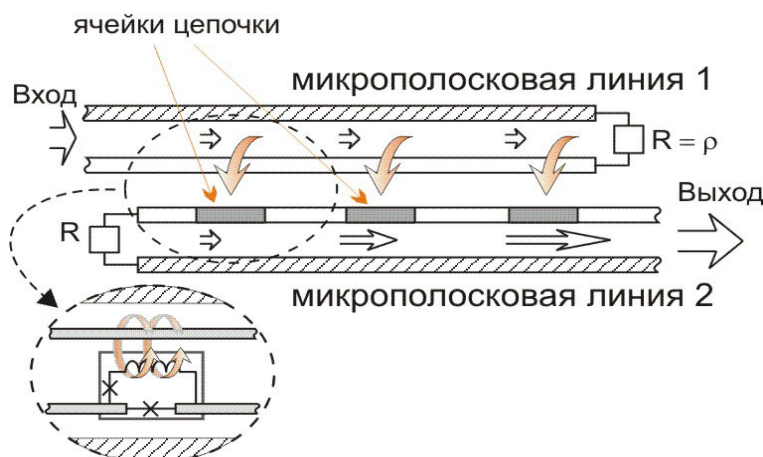


Рис. 15. Усилитель бегущей волны, представляющий собой две микрополосковые линии (входная и выходная), связанные через интерферометры последовательной цепочки. На вставке показана связь линий через один из интерферометров цепочки.

Основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Развита методика теоретического и экспериментального исследования многоэлементных джозефсоновских структур и устройств на их основе.

Разработан эффективный метод численного моделирования флуктуационной компоненты тока, позволяющий использовать переменный шаг численного интегрирования уравнений динамики сверхпроводниковых цепей, а также высокоэффективный метод расчета спектра джозефсоновской генерации, основанный на использовании алгоритма автрегрессионного фильтра порядка $p \sim 100$. Разработанные методы реализованы в рамках высокоэффективного программного пакета PSCAN для численного моделирования динамики многоэлементных джозефсоновских структур и анализа спектральных характеристик.

Разработан быстродействующий электронный аналог джозефсоновских переходов и сверхпроводящих квантовых интерферометров, позволяющий выполнять моделирование динамики многоэлементных джозефсоновских структур с точностью $\sim 1\%$ и аналоговым значением характерной джозефсоновской частоты до 100 кГц.

Разработан многоканальный автоматизированный измерительный стенд для экспериментального исследования джозефсоновских интегральных схем и устройств.

2. Проведено изучение хаотических процессов в одно- и двухконтактном сверхпроводящих квантовых интерферометрах. Показано, что в отсутствие постоянной составляющей приложенного магнитного потока, всегда имеет место предшествующее хаосу спонтанное нарушение симметрии процессов, которое сопровождается появлением постоянной составляющей джозефсоновской фазы. Показано также, что основная роль *дополнительных* степеней свободы, возникающих при переходе от одноконтактного к двухконтактному интерферометру, заключается лишь в снятии с системы вырождения, т. е. в стимулировании спонтанного нарушения симметрии процессов в системе.

Сформулирован критерий отсутствия динамического хаоса в неавтономной диссипативной колебательной системе, дифференциальная реактивность которой может принимать отрицательные значения. Согласно этому критерию, хаос в системе возникать не должен, если ее дифференциальная реактивность положительна в течение всего периода внешнего воздействия. Показано, что данный критерий хорошо выполняется как для одно-, так и двухконтактного интерферометров. В частности, согласно этому критерию, независимо от амплитуды и частоты внешнего воздействия, хаос в интерферометре всегда отсутствует при малых значениях нормированной индуктивности, когда $l < 1$.

3. Развита теория высокочастотных сквидов переменного тока резонаторного и безрезонаторного типов. Показано, что безрезонаторный СВЧ сквид может быть

проанализирован как сквид резонаторного типа, но с низким значением добротности резонатора. Развитая теория применена для анализа экспериментальных данных для СВЧ сквида с высокодобротным диэлектрическим резонатором из рутила TiO_2 ($\epsilon \approx 100$) и нанесенным на него пленочным одноконтактным интерферометром с джозефсоновским переходом в виде *мостика*.

Проведено теоретическое и экспериментальное исследование динамики резонаторного СВЧ сквида с *туннельным* джозефсоновским переходом. Показано, что в случае ограниченной индуктивности $1 < l < l_1 \approx 4,6$ возможен нормальный гистерезисный режим работы вплоть до значений частоты накачки $\Omega \approx \Omega_c/2\beta$. Экспериментально полученные значения чувствительности по магнитному потоку $\delta\Phi_x = 1,5 \cdot 10^{-4} \Phi_0 / \Gamma\mu^{1/2}$ и энергии $\delta E = 2 \cdot 10^{-30} \text{ Дж} / \Gamma\mu$ при частотной полосе сигнала от 10 до 10^4 Гц являются одними из лучших в мире для гистерезисных сквидов.

4. Впервые предложен и всесторонне изучен теоретически и экспериментально быстродействующий высокочувствительный балансный компаратор на основе джозефсоновских переходов с безгистерезисной вольт-амперной характеристикой (ВАХ), стробируемый одиночными квантами магнитного потока (SFQ),.

Проведен анализ предельной чувствительности и временного разрешения балансного SFQ компаратора, определяющейся его внутренними флуктуациями. Показано, что для типичных параметров джозефсоновских переходов квантовый предел чувствительности составляет примерно $10 \text{ пА/Гц}^{1/2}$, тепловые флуктуации при гелиевой температуре (4,2 К) ограничивают чувствительность на уровне $50 \text{ пА/Гц}^{1/2}$. Показано, что временное разрешение балансного SFQ компаратора составляет $(\delta\tau)_{\min} = 5\hbar/(2eV_c)$. Если характерное напряжения джозефсоновских переходов компаратора $V_c > 1,6 \text{ мВ}$, временное разрешение $(\delta\tau)_{\min} < 1 \text{ пс}$.

Впервые реализован и экспериментально исследован балансный SFQ компаратор. Экспериментально получено рекордное значение чувствительности $30 \dots 70 \text{ пА/Гц}^{1/2}$, полностью соответствующее теоретическим оценкам для случая тепловых флуктуаций. Полученная чувствительность на 4 порядка лучше чувствительности, достигнутой для небалансных компараторов на туннельных джозефсоновских переходах ($0,8 \text{ мкА/Гц}^{1/2}$).

5. Проведено изучение процессов синхронизации джозефсоновской генерации в многоэлементных джозефсоновских структурах с различным типом цепей электродинамической связи джозефсоновских элементов, а также изучение механизмов сужения линии синхронной генерации. Показано, что максимальное взаимодействие джозефсоновских элементов, обеспечивающее синхронный режим генерации в наибольшем диапазоне разброса их параметров (до $30 \dots 40\%$), имеет место в случае, когда импеданс

цепей связи сравним с импедансом джозефсоновских элементов, мнимая часть импеданса имеет индуктивный характер, параметр Маккамбера β порядка 1.

Показано, что линия джозефсоновской генерации в синхронных структурах сужается пропорционально числу джозефсоновских элементов в цепочке или числу ячеек в двумерной решетке до тех пор, пока размеры структуры не превышают эффективного радиуса взаимодействия джозефсоновских элементов в данной структуре.

Показано, что использование распределенных цепей электродинамической связи позволяет существенно увеличивать эффективный радиус взаимодействия джозефсоновских элементов за счет установления взаимодействия джозефсоновских переходов с общей для всей структуры стоячей электромагнитной волной. Это позволяет осуществлять одновременно значительное сужение линии генерации и повышение выходной мощности, пропорциональное числу джозефсоновских элементов.

6. Проведено исследование джозефсоновских структур с нетривиальной ток-фазовой зависимостью (ТФЗ). Предложена цепочечная модель бикристаллических джозефсоновских переходов, а также итерационный алгоритм получения распределения плотности критического тока вдоль бикристаллической границы по экспериментально измеренной зависимости полного тока перехода от магнитного поля. Развита аналитическая теория гармонических и субгармонических ступеней Шапиро и детекторного отклика с учетом конечной емкости второй гармоники ТФЗ джозефсоновских переходов.

Предложен и исследован новый тип “тихого” фазового кубита (квантовый бит – базовый элемент квантового компьютера), получена оценка времени декогерентности ($\sim 0,1$ мкс), предложен механизм осуществления логических операций.

7. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование широкополосных СВЧ усилителей на основе цепочек двухконтактных интерферометров.

Предложен и исследован новый тип выходного импульсного усилителя для передачи сигналов сверхпроводниковой быстрой одноквантовой логики (RSFQ логики) в цепи полупроводниковой электроники. *Впервые* использован режим усиления сигналов RSFQ логики на цепочке сверхпроводящих квантовых интерферометров в *резистивном* состоянии. Для этой цели была предложена специальная техника мультиплицирования и уширения одноквантовых импульсов. Показано, что предложенная концепция позволяет увеличивать число суммирующих элементов и поднимать амплитуду выходного сигнала до 5 – 10 мВ без ограничения быстродействия усилителя: предельная частота следования одноквантовых импульсов может составлять 10% - 20% характерной частоты джозефсоновских элементов интегральной схемы. В случае ниобиевой технологии джозефсоновских структур с плотностью критического тока $j_c = 1$ кА/см² предельная частота следования импульсов

составляет 8 - 16 ГГц и увеличивается соответственно в 2 и 4 раза при переходе на технологию с плотностью критического тока 4.5 кА/см^2 и 20 кА/см^2 .

Разработана интегральная схема усилителя–интерфейса на основе ниобиевой технологии с плотностью критического тока $j_c = 1 \text{ кА/см}^2$. Экспериментально продемонстрировано усиление одноквантовых импульсов до уровня 1 мВ на нагрузке 50 Ом при использовании схемы усилителя с 32-мя суммирующими элементами.

Предложен новый тип многоэлементных джозефсоновских структур, который обеспечивает высокую линейность отклика напряжения на магнитную компоненту входного электромагнитного сигнала. Такие структуры могут быть использованы для разработки высокочувствительных высоколинейных усилителей гигагерцового диапазона частот. Предложена новая концепция усилителя на основе многоэлементных джозефсоновских структур, представляющая собой усилитель бегущей волны, для устранения ограничений, связанных с распределенным характером многоэлементных структур.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В. К. Корнев, К. К. Лихарев, «Генерация импульсов с предосцилляциями в системе с запаздыванием, содержащей джозефсоновский контакт», *Радиотехника и электроника*, т. **25**, вып. 3, 1980, с. 656-659.
2. В. К. Корнев, К. К. Лихарев, О. В. Снигирев, Е. С. Солдатов, В. В. Ханин, «СВЧ сквид с высокодобротным диэлектрическим резонатором», *Радиотехника и электроника*, т. **25**, вып. 12, 1980, с. 2647-2655.
3. В. К. Корнев, О. В. Снигирев, «Теория безрезонаторных СВЧ сквидов», *Радиотехника и электроника*, т. **26**, вып. 10, 1981, с. 2187-2195.
4. В. К. Корнев, В. К. Семенов, «Быстродействующий электронный аналог джозефсоновских контактов и сверхпроводящих квантовых интерферометров», *Радиотехника и электроника*, 1985, т. **30**, № 9, с. 1768-1775.
5. V. K. Kornev, K. Yu. Platov, and K. K. Likharev, "Electronic simulation of multi-Josephson-junction circuits", *IEEE Trans. Magn.*, vol. **21**, No. 2, 1985, p. 586-589.
6. D. A. Butusov, V. K. Kornev, L. S. Kuzmin, and N. A. Simonov, "Hysteretic ac SQUIDs using tunnel Josephson junctions", *SQUID '85 – Superconducting Quantum Interference devices and their Applications*, Ed.: H. D. Hahibohm and H Luebbig, 1985 Walter de Gruyter & Co., Berlin – New York - Printed in Germany, p. 791-796.
7. V. K. Kornev, K. K. Likharev, E. S. Soldatov, and Yu. P. Tsar'gorodtsev, "Mutual phase locking of the josephson tunnel junctions", *SQUID '85 – Superconducting Quantum Interference devices and their Applications*, Ed.: H. D. Hahibohm and H Luebbig, 1985 Walter de Gruyter & Co., Berlin – New York - Printed in Germany, p. 1059-1064.
8. А. А. Ерохин, Д. Е. Кириченко, В. К. Корнев, А. Д. Маштаков, В. Д. Щедрин, "Автоматизированный многоканальный измерительный стенд для анализа сверхпроводниковых схем", *Приборы и техника эксперимента*, № 2, 1994, с. 62-71.
9. А. А. Erokhin, D. E. Kirichenko, V. K. Kornev, A. D. Mashtakov, V. D. Schedrin, "Automated multichannel test system for the superconductive circuits", *Instruments and Experimental*

Techniques, vol. **37**, N 2, part 1, 1994, p. 166 – 171.

10. V. K. Kornev and V. K. Semenov, "Chaotic and stochastic phenomena in superconducting quantum interferometers", *IEEE Trans. Magn.*, vol. **19**, 1983, p. 633-636.
11. В. К. Корнев, К. К. Лихарев, «Хаос в сверхпроводящем квантовом интерферометре», *Радиотехника и электроника*, т. **30**, вып. 10, 1985, с. 1999-2003.
12. В.К. Корнев, П. Сундриял, «Хаос в двухконтактных сверхпроводящих квантовых интерферометрах», *Радиотехника и Электроника*, т. **31**, вып. 5, 1986, с. 1003-1009.
13. Д. Ф. Бутусов, В. К. Корнев, Л. С. Кузьмин, Н. А. Симонов, «Динамика гистерезисных сквидов переменного тока с туннельными джозефсоновскими переходами», *Радиотехника и Электроника*, т. **33**, вып. 7, 1988, с. 1519-1525.
14. V. K. Kornev and V. K. Semenov, "The Josephson Goto pair as a basic element of high sensitive samplers", *Extended abstracts of Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'1987)*, Tokyo, Japan, 1987, p. 131-134.
15. А. Л. Гудков, В. К. Корнев, В. И. Махов, С. И. Мушков, В. К. Семенов, В. Д. Щедрин, «Джозефсоновский регенеративный импульсный триод как высокочувствительный компаратор», *Письма в ЖТФ*, т. **14**, вып. 12, 1988, с. 11227-1131.
16. I. N. Askerzade, T. V. Filippov, and V. K. Kornev, "Fundamental limits on signal and time resolution of the Josephson balanced comparator", *Extended abstracts of Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'1989)*, Tokyo, Japan, 1989, p. 553-556.
17. I. N. Askerzade, T. V. Filippov, and V. K. Kornev, "Fundamental limits on signal and time resolution of the Josephson balanced comparator", in: *Week Superconductivity*, ed. by S. Benacka and M. Kedro, Nova Science Publishers, New York, 1990, p. 167-175.
18. T. V. Filippov and V. K. Kornev, "Sensitivity of the balanced Josephson-junction comparator", *IEEE Trans. Magn.*, v. **27**, No. 2, 1991, p. 2452-2455.
19. И. Н. Аскерзаде, В. К. Корнев, «Временное разрешение балансного компаратора на безгистерезисных джозефсоновских переходах», *Радиотехника и Электроника*, т. **39**, вып. 3, 1994, с. 509-513.
20. И. Н. Аскерзаде, В. К. Корнев, «Динамика переключения пары Гото туннельных джозефсоновских переходов», *Радиотехника и электроника*, т. **39**, № 5, 1994, с. 869-875.
21. В. К. Корнев, К. К. Лихарев, Е. С. Солдатов, «Взаимная синхронизация джозефсоновских туннельных переходов», *Радиотехника и электроника*, т. **32**, вып. 7, 1987, с. 1521-1528.
22. В. К. Корнев, А. Д. Маштаков, Г. А. Овсянников, "Базовая ячейка синхронных джозефсоновских структур на одиночных квантах магнитного потока", *Письма в ЖТФ*, 1994, т. 20, № 22, с. 44 - 48.
23. V. K. Kornev, A. D. Mashtakov, G. A. Ovsyannikov, "Three unit cells of phase-locked Josephson-junction arrays", *Abstracts of Fourth Nordic Symposium on Superconductivity*, Varberg, Sweden, May 1994, p. 138-139.
24. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, A. D. Mashtakov, G. A. Ovsyannikov, "Basic cells for phase-locked 1D and 2D Josephson-junction Arrays", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. **5**, No.4, 1995, p. 3527-3531.
25. А. Д. Маштаков, В. К. Корнев, Г. А. Овсянников, "Элементарные ячейки многоэлементных синхронных джозефсоновских структур", *Радиотехника и электроника*, т. **40**, № 11, 1995, с. 1735-1741.

26. V. K. Kornev, A.V. Arzumanov, A. D. Mashtakov, and G. A. Ovsyannikov, "Millimeter and Submillimeter Wave Generation by Phase-Locked 1D and 2D Josephson-Junction Arrays", *Inst. Physics Conf. Ser.*, No 148, IOP Publishing Ltd, 1995, p. 1649-1652.
27. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, A. D. Mashtakov, and G.A. Ovsyannikov, "Josephson Oscillation Phase-Locking in Two-Dimensional SFQ Arrays", *Extended abstracts of 5th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC'95)*, Nagoya, Japan, Sept. 1995, p. 338-340.
28. В. К. Корнев, Дж. Мюгинд, О. А. Горбонососов и М. Джонсон, "К вопросу о модуляции тока через цепочку туннельных переходов сверхмалых размеров", *Письма в ЖТФ*, т. **22**, № 1, 1996, с. 26-33.
29. V. K. Kornev, A.V. Arzumanov, A. D. Mashtakov, and G. A. Ovsyannikov, "Phase-Locked One- and Two-Dimensional Josephson-Junction Arrays as Millimeter and Submillimeter Wave Generators", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, v. **7**, No. 2, 1997, p. 3111–3114.
30. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, "Numerical Simulation of Josephson-Junction System Dynamics in the Presence of Thermal Noise", *Inst. Physics Conf. Ser.*, No 158, IOP Publishing Ltd, 1997, p. 627-630.
31. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, K. I. Konstantinyan, A. D. Mashtakov, G. A. Ovsyannikov, "Spectral Study of the Shapiro Subharmonic Step Formation", *Inst. Physics Conf. Ser.*, No 158, IOP Publishing Ltd, 1997, p. 559-562.
32. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, "Oscillation Linewidth for Phase-Locked Josephson-Junction Arrays", *Extended abstracts of 6th Int. Superconductive Conf. (ISEC'97)*, Berlin, Germany, vol. **3**, 1997, p. 183–185.
33. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, G. A. Ovsyannikov, K. I. Konstantinyan, A. D. Mashtakov, "Spectrum Components for Parallel Josephson-Junction Arrays in Magnetic Field", *Extended abstracts of 6 Int. Supercond. Conf. (ISEC'97)*, Berlin, Germany, vol. **3**, 1997, p. 186–188.
34. А. В. Арзуманов, В. К. Корнев, Г. А. Овсянников, А. Д. Маштаков, "К вопросу о когерентном состоянии цепочки туннельных джозефсоновских переходов", *Письма в ЖТФ*, том **24**, вып. 15, 1998, с. 1-7.
35. В. К. Корнев, А. В. Арзуманов, "Численное моделирование ширины линии генерации в синхронных многоэлементных джозефсоновских структурах", *Письма в ЖТФ*, том **24**, вып. 15, 1998, с. 52-59.
36. А. В. Арзуманов, В. К. Корнев, К. И. Константиныан, Г. А. Овсянников, "Спектральный аспект возникновения субгармонических ступеней Шапиро в цепочке параллельно включенных джозефсоновских переходов", *Письма в ЖТФ*, том **24**, № 17, 1998, с. 45-52.
37. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, "Josephson-junction oscillation spectral linewidth for some phase-locked multijunction systems", *Journal de Physique IV*, France, vol. **8**, 1998, p. Pr3-279 – Pr3-282.
38. V K Kornev and A V Arzumanov, "Oscillation spectral linewidth for some phase-locked Josephson-junction arrays", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, vol. **9**, No. 2, 1999, p. 4262-4265.
39. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, and N. A. Shcherbakov, "Phase-Locked Josephson-Junction Arrays with Distributed Coupling Circuits", *Extended abstracts of 7th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC'99)*, Berkely, CA USA, June 21-23, 1999, p. 437-439.
40. В. К. Корнев, А. В. Арзуманов, "Ширина линии синхронной генерации в цепочках и решетках джозефсоновских переходов с конечным радиусом взаимодействия", *Письма в ЖТФ*, том **26**, вып. 3, 2000, с. 23-29.

41. V. K. Kornev, A. V. Arzumanov, and N. A. Shcherbakov, "Josephson-junction arrays with lumped and distributed coupling circuits", *Inst. Physics Conf. Ser.*, No 167, IOP Publishing Ltd, 2000, p. 753-756.
42. K. I. Constantinian, A. D. Mashtakov, G. A. Ovsyannikov, V. K. Kornev, N. A. Shcherbakov, M. Darula, N. F. Pedersen, and J. Mygind, "MM wave Josephson radiation in High- T_c bicrystal junction arrays", *Inst. Physics Conf. Ser.*, No 167, IOP Publishing Ltd, 2000, p. 717-720.
43. V. K. Kornev, N. A. Shcherbakov, A. V. Arzumanov, P. B. Mozhaev, K. I. Constantinian, A. D. Mashtakov, G. A. Ovsyannikov, "Arrays of Josephson junctions coupled by distributed circuits", *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, vol. **11**, 2001, p. 1227-1230.
44. В. К. Корнев, И. В. Борисенко, Г. А. Овсянников, *Высокочастотные электромагнитные взаимодействия в многоэлементных джозефсоновских структурах*, М: Изд. Физического фак-та МГУ, Зак. 35, 2001, 44 стр.
45. V. K. Kornev, N. A. Shcherbakov, P. B. Mozhaev, I. V. Borisenko, K. I. Constantinian, G. A. Ovsyannikov, "High- T_c Josephson-Junction Arrays with Distributed Coupling Circuits", *Extended abstracts of 8th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC'01)*, Osaka, Japan, June 19-22, 2001, p. 209-210.
46. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, P. B. Mozhaev, E. G. Ovsyannikova, I. V. Borisenko, G. A. Ovsyannikov, N. F. Pedersen, " π -Junction Circuit Dynamics", *Extended abstracts of 8th Int. Superconductive Electronics Conf. (ISEC'01)*, Osaka, Japan, June 19-22, 2001, p. 561-562.
47. В. К. Корнев, И. В. Борисенко, Г. А. Овсянников, "Высокочастотные электромагнитные взаимодействия в многоэлементных джозефсоновских структурах", *Радиотехника и электроника*, т. **46**, № 9, 2001, с. 1029-1048.
48. V. K. Kornev, I. V. Borisenko, G. A. Ovsyannikov "High-Frequency Electromagnetic Interactions in Multijunction Josephson Structures", *Journal of Communications Technology and Electronics*, v. **46**, No. 9, 2001, p. 949-967.
49. V.K. Kornev, I.V. Borisenko, P.B. Mozhaev, G.A. Ovsyannikov, N. F. Pedersen, "Dynamics of pi-junction interferometer circuits", *Physica C*, **367**, 2002, p. 285-389.
50. V.K. Kornev, G.A. Ovsyannikov, P.B. Mozhaev, I.V. Borisenko, N. F. Pedersen, "Bicrystal pi-interferometers", *Physica C*, **368**, 2002, p. 332-336.
51. Victor K. Kornev, Igor I. Soloviev, Nikolai V. Klenov, Niels F. Pedersen, Igor V. Borisenko Peter B. Mozhaev, Gennady A. Ovsyannikov, "The 0 and pi contact array model of bicrystal junctions and interferometers", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. **13**, No. 2., 2003, p. 825-828.
52. V. K. Kornev, N. V. Klenov, V. V. Ryazanov, V. A. Oboznov, A. V. Timofeev, and V. V. Bol'ginov, "Behavior of self-frustrated triangular array of pi-junctions in magnetic field", *Extended abstracts of Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'2003)*, Sydney, Australia, July 2003, p. PWe4 (2 pages).
53. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, J. Oppenlaender, Ch. Haeussler, N. Schopohl, "Noise properties and oscillation linewidth of parallel SQIF", *Extended abstracts of Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'2003)*, Sydney, Australia, July 2003, p. OWe4 (2 pages).
54. V.K. Kornev, N.V. Klenov, V.A. Oboznov, V.V. Bol'ginov, A.K. Feofanov, V.V. Ryazanov, and N.F. Pedersen, "Vortex Dynamics in Josephson Ladders with pi-Junctions", *Inst. Physics Conf. Ser.*, No. 181, IOP Publishing Ltd, 2004, p. 3553-3558.
55. 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", *Inst. Physics Conf. Ser.*, No. 181, IOP Publishing Ltd, 2004, p. 3189-3194.

56. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, J. Oppenlaender, Ch. Haeussler, N. Schopohl "Oscillation Linewidth and Noise Characteristics of Parallel SQIF", *Inst. Physics Conf. Ser.*, No. 181, IOP Publishing Ltd, 2004, p. 3413-3417.
57. V. K. Kornev, N. V. Klenov, V. A. Oboznov, V. V. Bol'ginov, A. K. Feofanov, V. V. Ryazanov, and N.F. Pedersen, "Vortex Dynamics in Josephson Ladders with pi-Junctions", *Superconductor Science and Technology (SUST)*, vol. 17, issue 5, 2004, p. S355 - S358.
58. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, J. Oppenlaender, Ch. Haeussler, N. Schopohl "Oscillation Linewidth and Noise Characteristics of Parallel SQIF", *Superconductor Science and Technology (SUST)*, vol. 17, issue 5, 2004, p. S406 - S409.
59. T. Y. Karminskaya, V. K. Kornev, "Subharmonic Shapiro steps on I-V curve of underdamped Josephson junctions", *Proceedings of Int. Student's Workshop on Microwave Applications of New Physical Phenomena*, Saint-Petersburg, Russia, 7-9 June, 2004, p. 119-121.
60. N. V. Klenov, V. K. Kornev, "Phase Qubit Based on high-temperature Josephson Junctions", *Proceedings of Int. Student's Workshop on Microwave Applications of New Physical Phenomena*, Saint-Petersburg, Russia, 7-9 June, 2004, p. 113-115.
61. I. I. Soloviev, V. K. Kornev, "The array Model of High- T_c Josephson Junctions", *Proceedings of Int. Student's Workshop on Microwave Applications of New Physical Phenomena*, Saint Petersburg, Russia, 7-9 June, 2004, p. 116-118.
62. В. К. Корнев, А. В. Арзуманов, "Применение Цепочек и решеток джозефсоновских переходов для решения задач сверхпроводниковой электроники", "Ломоносовские чтения, секция физики", Сборник расширенных тезисов докладов, МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, 2004, с. 41-45.
63. V. K. Kornev, N. V. Klenov, "Phase Q-bit based on the current-phase relation containing second harmonic", *Abstracts of Combined ESF Vortex and ESF PiShift Workshop*, Bad Muenstereifel, Germany, 15-19 May, 2004.
64. V. K. Kornev, N. V. Klenov, V. A. Oboznov, V. V. Bol'ginov, A. K. Feofanov, V. V. Ryazanov, "Vortex Dynamics in Josephson Ladders with pi-Junctions", *Abstracts of Combined ESF Vortex and ESF PiShift Workshop*, Bad Muenstereifel, Germany, 15-19 May, 2004.
65. Ю. В. Кислинский, Ф. В. Комиссинский, К. И. Константибян, Г. А. Овсянников, Т. Ю. Карминская, И. И. Соловьев, В. К. Корнев, "Сверхпроводящий ток гибридных металлооксидных сверхпроводников: размерная и частотная зависимость", *ЖЭТФ*, т. 128, № 3, 2005, с. 575-585.
66. Yu. V. Kislinskii, P. V. Komissinski, K. Y. Constantinian, G. A. Ovsyannikov, T. Yu. Karminskaya, I. I. Soloviev, and V. K. Kornev, "Superconducting current in hybrid heterojunctions of metal-oxide superconductors: size and frequency dependences", *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 101, No.3, 2005, p. 494-503.
67. Н. В. Кленов, В. К. Корнев, И. И. Соловьев, А. В. Шадрин, И. В. Борисенко, К. И. Константибян, Г. А. Овсянников, "Нетривиальная ток-фазовая зависимость в джозефсоновских переходах из анизотропных сверхпроводников: механизм и применение", *Нелинейный мир*, 2005, т. 3, № 1-2, с. 75-91.
68. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, and O. A. Mukhanov, "Possible Approach to the Driver Design Based on Series SQIF", *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, 2005, vol. 15, p. 388-391.
69. Kornev, V. K., Soloviev, I. I., Klenov, N. V., Mukhanov, O. A., "Splitting circuits for SFQ-pulse driver based on SQIF", *Extended Abstracts, Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'05)*, The Netherlands, 5-9 Sept. 2005, p. P-B.10 (2 pages).

70. Kornev, V. K., Karminskaya, T. Y., Ovsyannikov, G. A., Constantinian, K. I., Kislinskii, Y. V., Komissinki, F. V., "Impact of the second harmonic of the current-phase relation on dynamics of underdamped Josephson junctions", *Extended Abstracts, Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'05)*, The Netherlands, 5-9 Sept. 2005, p. P-S.12 (2 pages).
71. Klenov, N. V., Kornev, V. K., Pedersen, N. F., "The energy level splitting for unharmonic dc SQUID", *Extended Abstracts, Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'05)*, 5-9 Sept. 2005, The Netherlands, p. P-C.03 (2 pages).
72. Arzumanov, A.V., Kornev, V.K., "Interaction radius as an important characteristic of Josephson-junction arrays", *Proceedings of 12-th Int. Student's Seminar on Microwave Applications of New Physical Phenomena*, Saint Petersburg, Russia, 17-19 October, 2005, p. 49-51.
73. Soloviev, I. I., Kornev, V. K., Mukhanov, O. A., "Proposal for high-performance SFQ-pulse amplifier", *Proceedings of 12-th Int. Student's Seminar on Microwave Applications of New Physical Phenomena*, Saint Petersburg, Russia, 17-19 October, 2005, p. 37-39.
74. Klenov, N. V., Kornev, V. K., Soloviev, I. I., "Splitting tree for SFQ pulses", *Proceedings of 12-th Int. Student's Seminar on Microwave Applications of New Physical Phenomena*, Saint Petersburg, Russia, 17-19 October, 2005, p. 34-36.
75. Karminskaya, T. Y., Kornev, V.K., "Josephson junctions with nonsinusoidal current-phase relation under microwave signal", *Proceedings of 12-th Int. Student's Seminar on Microwave Applications of New Physical Phenomena*, Saint Petersburg, Russia, 17-19 October, 2005, p. 43-45.
76. И. В. Борисенко, Ю. В. Кислинский, Ф. В. Комиссинский, К. И. Константибян, Г. А. Овсянников, Т. Ю. Карминская, В. К. Корнев, И. И. Соловьев, "Гибридные Nb/Au/YBaCuO гетероструктуры из металлооксидных сверхпроводников", *Нанофизика и наноэлектроника*, Материалы X Симпозиума, Нижний Новгород, т. 2, 2005, с. 373-374.
77. И. В. Борисенко, Ю. В. Кислинский, Ф. В. Комиссинский, К. И. Константибян, Г. А. Овсянников, Т. Ю. Карминская, В. К. Корнев, И. И. Соловьев. "Гибридные Nb/Au/YBaCuO гетероструктуры из металлооксидных сверхпроводников", *Поверхность, Рентгеновские, Синхротронные и нейтронные исследования*, №2, 2006, с. 48-54.
78. Кленов, Н. В., Корнев, В. К., "Фазовый кубит на основе двухконтактного сквида с несинусоидальной ток-фазовой характеристикой джозефсоновских переходов", *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 5, 2006, с. 38-43.
79. Kornev, V. K., Karminskaya, T. Y., Kislinskii, Y. V., Komissinki, P. V., Constantinian, K. Y Ovsyannikov, G. A., "Dynamics of underdamped Josephson junctions with nonsinusoidal current-phase relation", *Inst. Physics Conf. Ser.*, IOP Publishing Ltd, vol. 43, 2006, p. 1105-1109.
80. Kornev, V. K., Karminskaya, T. Y., Kislinskii, Y. V., Komissinki, P. V., Constantinian, K. Y Ovsyannikov, G. A., "Dynamics of underdamped Josephson junctions with nonsinusoidal current-phase relation", *Physica C*, 435, 2006, p. 27-30.
81. N. V. Klenov, V. K. Kornev, N. F. Pedersen, "The unharmonic dc SQUID energy level splitting", *Inst. Physics Conf. Ser.*, IOP Publishing Ltd., vol. 43, 2006, p. 1409 - 1412.
82. 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*, 435, 2006, p. 114-117.
83. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, O. A. Mukhanov, "Splitting and broadening techniques for SFQ-pulse driver based on SQIF", *Inst. Physics Conf. Ser.*, IOP Publishing Ltd, vol. 43, 2006, p. 1191-1194.

84. Г. А. Овсянников, К. И. Константибян, Ю. В. Кислинский, Ф. В. Комиссинский, И. В. Борисенко, Т. Ю. Карминская, В. К. Корнев. “Микроволновые динамические параметры джозефсоновских структур с нетривиальной ток-фазовой зависимостью”, *Радиотехника и электроника*, т. **51**, № 9, 2006, с. 1-9.
85. K. Y. Constantinian, Y. V. Kislinski, P. V. Komissinski, I. V. Borisenko, G. A. Ovsyannikov, T. Y. Karminskaya, I. I. Soloviev, V. K. Kornev, and J. Mygind, “Frequency and size dependence of ac Josephson effect in Nb/Au/YBCO heterojunctions”, *Inst. Physics Conf. Ser.*, IOP Publishing Ltd, vol. **43**, 2006, p. 1127 - 1130.
86. K.Y. Constantinian, Y.V. Kislinski, P.V. Komissinski, G.A. Ovsyannikov, T.Y. Karminskaya, I. I. Soloviev, V.K. Kornev, J. Mygind. “Fractional Vortices in Lumped Planar Nb/Au/YBCO Heterojunctions” *Abstract Book “Physics of Superconducting Phase Shift Devices”*, Ischia (Napoli), April 2-5, 2005, p.72-73.
87. Ю. В. Кислинский, Ф. В. Комиссинский, К. И. Константибян, Г. А. Овсянников, И. В. Борисенко, Т. Ю. Карминская, В. К. Корнев, Э. Голдобин. “Детекторный отклик на воздействие миллиметрового излучения гибридных гетероструктур Nb/Au/YBaCuO из оксидных сверхпроводников с наноконтактами”, *Нанофизика и наноэлектроника*, Материалы X Симпозиума, Нижний Новгород, т. **1**, 2006, с. 166-167.
88. Kornev, V. K., Soloviev, I. I., Klenov, N. V., Mukhanov, O. A., “Splitting circuits for SFQ-pulse driver based on SQIF”, *Superconducting Science and Technology (SUST)*, v. **19**, 2006, S390-S393.
89. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, and O. A. Mukhanov, “Development of SQIF-Based Output Broad Band Amplifier”, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.*, vol. **17**, May 2007, p. 360-363.
90. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, and O. A. Mukhanov, “Synthesis of High Linearity SQIF Structures”, *Extended Abstracts, Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'07)*, 10-14 June 2007, Washington DC, p. P-D02 (2 pages).
91. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, and O. A. Mukhanov, “High Linearity Differential Parallel-Series Array Structures”, *Extended Abstracts, Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'07)*, 10-14 June 2007, Washington DC, p. P-D03 (2 pages).
92. N. V. Klenov, V. K. Kornev, D. N. Sosedko, and N. F. Prdersen, “Silent Phase Qubit Tuning for Logic Operations”, *Extended Abstracts, Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'07)*, 10-14 June 2007, Washington DC, p. P-303 (2 pages).

Цитированная литература

1. А. А. Абрикосов, *ЖЭТФ*, т. 32, 1957, с. 1142.
2. B. S. Deaver, Jr, W. M. Fairbank, *Phys. Rev. Lett.*, v. 7, 1961, p. 43.
3. R. Doll, M Natbauer, *Phys. Rev. Lett.*, v. 7, 1961, p. 51.
4. B. D. Josephson, “Possible New effects in Superconductive Tunneling”, *Phys. Lett.*, v. 1, 1962, p. 251.
5. P. W. Anderson, J. M. Rowell, *Phys. Rev. Lett.*, v. 10, 1963, p. 230.
6. J. Clarke, W.-M. Oxiban, M. B. Ketchen, “Thin film DC SQUID with low noise and drift”, *Appl. Phys. Lett.*, v. 27, No. 3, 1975, p. 155-156.

7. J. Clarke, "SQUID concepts and systems", *NATO ASI Series*, v.F59, edd. H. Weinstock and M. Nisenoff, Springer-Verlag, Berlin - Heidenberg. 1989, p. 88-148.
8. R. Kleiner, D. Koelle, F. Kudwig, and J. Clarke, "Superconducting Quantum Interference Devices: State of the Art and Applications", *Proc. IEEE*, vol. 92, No. 10, 2004, p. 1534-1548.
9. В.П. Кошелец, П.Н. Дмитриев, А.Б. Ермаков, Л.В. Филиппенко, О.В. Корюкин, М.Ю. Торгашин, А.В. Худченко, "Интегральный сверхпроводниковый спектрометр для мониторинга атмосферы", *Известия ВУЗов. Радиофизика*, т. 48, № 10-11, 2005, с. 947-954.
10. K.K. Likharev, O.V. Mukhanov, and V.K. Semenov, "Resistive single flux quantum logic for the josep-gson-junction technology", *In: SQUID'85*, H. hahlbohm and Luebbig (eds.), W. de Gruyter, Berlin, 1985, p. 1103-1108.
11. K. K. Likharev, O. V. Mukhanov, and V. K. Semenov, "Ultimate performance of RSFQ logic circuits", *IEEE Trans. on Magn.*, v. **23**, 1987, p. 759-762.
12. O. A. Mukhanov, V. K. Semenov, W. Li, T. V. Filippov, D. Gupta, A. M. Кайл, D. K. Brock, A. F. Kirichenko, Yu. A. Polyakov, I. V. Vernik, "A superconductor high-resolution ADC," *IEEE Trans. on Appl. Superconductivity*, vol. 11, March 2001, p. 601-606.
13. M. Maezawa, M. Suzuki, and A. Shoji, "Analog-to-digital converter based on RSFQ technology for radio astronomy applications", *Supercond. Sci. Technol.*, v. 14, No. 12, 2001, p. 1106-1110.
14. O. A. Mukhanov, D. Gupta, A. Kadin, V. K. Semenov, "Superconductor Analog-to-Digital converters", *Proc. IEEE*, vol. 92, No. 10, 2004, p. 1564-1584.
15. D. Gupta, O.A. Mukhanov, "RSFQ circuit components for digital rf receivers", Abstracts of Applied Supercond. Conf., Houston, USA, August 4-9, 2002, p. 42.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Yu. Makhlin, G. Schon, A. Shnirman, "Quantum-state engineering with Josephson-junction devices", *Reviews of modern physics*, vol. 73, 2001, p. 357-400.
20. 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.
21. Y. Nakamura et al., "Coherent dynamics of a flux qubit coupled to a harmonic oscillator", *Nature*, v. 431, 2004, p. 159-162.

22. T. P. Orlando, Lin. Tian, D. S. Crankshaw, S. Lloyd, C. H. van der Wal, J. E. Mooij, F. Wilhelm, “Engineering the quantum measurement process for the persistent current qubit”, *Physica C*, v. 368, 2002, p. 294-299.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. HYPRES design rules: <http://www.hypres.com/>