

На правах рукописи

Соловьев Игорь Игоревич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В УСИЛИТЕЛЕ СИГНАЛОВ
БЫСТРОЙ ОДНОКВАНТОВОЙ ЛОГИКИ НА ОСНОВЕ
МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ДЖОЗЕФСОНОВСКИХ СТРУКТУР**

Специальность 01.04.04 – Физическая электроника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2007

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

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

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор Валерий Павлович Кошелец.
- кандидат физико-математических наук Александр Львович Гудков.

Ведущая организация: Физико-технологический институт Российской академии наук.

Защита диссертации состоится “31” мая 2007г. в 14.30 часов на заседании Диссертационного Совета Д.501.001.66 в Московском Государственном Университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Москва, Ленинские Горы дом 1, строение 2, физический факультет МГУ, аудитория 5-19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ.

Автореферат разослан “ ” апреля 2007 г.

Ученый секретарь
Диссертационного Совета Д.501.001.66

Ершов А.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

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 [1]. RSFQ устройства характеризуются крайне низкой энергией переключения джозефсоновских элементов $E_J = \Phi_0 I_C = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб} \times 10^{-4} \text{ А} \approx 10^{-18} \text{ Дж}$, а также очень высоким быстродействием, допускающим тактовые частоты устройств на основе низкотемпературных сверхпроводников до 100 ГГц. Это позволяет одновременно наращивать быстродействие 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 позволила достичь очень высокой степени 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). В настоящее время в ISTEС разрабатывается интегральная схема с плотностью 81 000 JJ/чип.

Для охлаждения таких сверхпроводниковых схем до рабочих температур ($T \leq 4.2 \text{ К}$) уже разработаны малогабаритные криокулеры с низким энергопотреблением (SUMITOMO SRDK101D, Lockheed Martin и другие). Характеристика криокулера SRDK101D: размеры 130x226x442 мм, вес 7.2 кг, энергопотребление 1.2 кВт, температура охлаждения 3 К, частота технического обслуживания – 1 раз в 10 000 часов (416 суток).

В процессе разработки основ цифровой сверхпроводниковой электроники в научных лабораториях фирмы HYPRES (США) и университетов Чалмерс (Швеция), Илменау (Германия), Нагойя и Йокогама (Япония), SUNY (США) были созданы полные библиотеки логических элементов ячеек памяти. Эти библиотеки используются в системах автоматизированного проектирования больших интегральных схем (например, системы проектирования, разрабатываемые Cadence Design Systems, Inc.). В каждой из этих библиотек логические ячейки описаны схемой, программным кодом, отражающим физические основы работы ячейки, послойным фотошаблоном и символьным представлением ячейки, включающим в себя все входы и выходы ячейки для создания блок-схем на макроуровне.

Достигнутый уровень цифровой сверхпроводниковой электроники характеризует созданный группой CONNECT (Cooperation of Nagoya Univ., NEC, CRL, and Yokohama National Univ. Team.) RISC микропроцессор CORE1 β [2] для которого продемонстрирована корректная работа с тактовой частотой 20 ГГц и минимальный период тактового сигнала 36.2 пс (27.6 ГГц) для отдельных частей [3]. Результатом признания крайне высокой перспективности цифровой сверхпроводниковой электроники в США явилось выделение в 2007 году бюджетных средств на выполнение проекта по разработке RSFQ суперкомпьютера с тактовой частотой 50 ГГц и процессором, содержащим 1 млн. логических вентилей (на базе лаборатории университета Беркли) [4].

Использование макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках позволяет также создавать высокочувствительные быстродействующие аналого-цифровые преобразователи (АЦП), 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, разрабатываемый в HYPRES [5] с АЦП, максимальная продемонстрированная частота работы которого составила 10.5 ГГц [6].

Крайне низкая энергия переключения джозефсоновских элементов, обеспечивающая преимущество сверхпроводниковой электроники, одновременно создает значительное препятствие для передачи сигналов RSFQ логики в цепи полупроводниковой электроники. Поэтому исключительно важная роль в развитии цифровой сверхпроводниковой электроники отводится разработке высокоэффективных выходных усилителей одноквантовых импульсов (сигналов RSFQ логики). Разные подходы к построению таких интерфейсов были предложены и экспериментально реализованы в ряде работ. Это усилители переменного питания [7-10], усилитель, основанный на использовании логических элементов [11], усилители на базе умножителей напряжения [12,13], усилители на цепочках сверхпроводящих квантовых интерферометров [14,15] и некоторые другие. Однако все эти интерфейсы обладают теми или иными недостатками, поскольку были разработаны для решения проблемы сопряжения в конкретных разрабатываемых устройствах. Таким образом, разработка физических основ построения высокоэффективного быстродействующего выходного усилителя-интерфейса, пригодного для решения различных задач, в настоящее время является весьма актуальной.

Цель диссертационной работы

Целью данной работы является исследование физических процессов в усилителе сигналов быстрой одноквантовой логики на основе многоэлементных джозефсоновских структур, включающих в себя последовательную суммирующую цепочку сверхпроводящих квантовых интерферометров. Данное исследование направлено на разработку физических основ нового перспективного типа интерфейса между сверхпроводниковыми устройствами быстрой одноквантовой логики и полупроводниковой электроникой.

Научная новизна

Следующие результаты были получены впервые:

1. Предложен, разработан и экспериментально исследован новый перспективный тип выходного импульсного усилителя для передачи сигналов сверхпроводниковой быстрой одноквантовой логики в цепи полупроводниковой электроники. Структура усилителя позволяет поднимать амплитуду выходного сигнала за счет увеличения числа суммирующих элементов без ограничения быстродействия и допусков на технологический разброс параметров интегральной схемы.

2. Впервые реализован режим усиления сигналов быстрой одноквантовой логики на цепочке сверхпроводящих квантовых интерферометров в резистивном состоянии. Для этой цели была разработана специальная техника мультиплицирования и уширения одноквантовых импульсов.

3. Показано, что разработанный принцип построения усилителя позволяет максимально поднять предельную частоту следования одноквантовых импульсов до значения, составляющего 10% – 20% характерной частоты джозефсоновских элементов интегральной схемы. В случае ниобиевой технологии джозефсоновских структур с плотностью критического тока $j_c = 1 \text{ кА/см}^2$ предельная частота следования импульсов составляет 9 – 18 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 .

4. Разработана и оптимизирована топология послойных фотошаблонов интегральной схемы для изготовления выходного усилителя 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 интегральной схемы с 32-мя суммирующими элементами.

Практическая ценность работы

В процессе работы было проведено детальное изучение физических процессов связанных с распространением, мультиплицированием, уширением и усилением одиночных

квантовых магнитного потока и соответствующих им одноквантовых импульсов напряжения в многоэлементных джозефсоновских структурах.

В результате проведенного исследования был предложен новый тип выходного усилителя одноквантовых импульсов, отличающегося увеличенным быстродействием и возможностью свободного масштабирования многоэлементной структуры для получения необходимой амплитуды выходного сигнала без существенной деградации характеристик устройства.

Выполнена оптимизация всех функциональных частей усилителя. Разработана и оптимизирована топология послойных фотошаблонов интегральной схемы для изготовления выходного усилителя на основе ниобиевой технологии. Проведено экспериментальное исследование разработанной интегральной схемы, подтверждающее полученные теоретические результаты.

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

Достоверность представленных результатов

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

Личный вклад

Автором лично было выполнено численное моделирование физических процессов в многоэлементных джозефсоновских структурах с помощью программного комплекса PSCAN, а также другого современного программного обеспечения. Автором были исследованы и оптимизированы все основные части усилителя одноквантовых импульсов: 1) цепи изохронного мультиплицирования одноквантовых импульсов, 2) цепи уширения импульсов и 3) цепи результирующего суммирования импульсов.

Автором были разработаны и оптимизированы топологии послойных фотошаблонов для изготовления интегральной схемы на основе современной ниобиевой технологии джозефсоновских структур. Разработка выходного фильтра производилась автором совместно с научной группой лаборатории микроволновой микроэлектроники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (СПбГЭТУ) «ЛЭТИ».

Серия экспериментальных образцов была изготовлена фирмой HYPRES.

Все экспериментальные данные: результаты низкочастотных измерений характеристик исследуемых структур и результаты высокочастотного тестирования интегральной схемы усилителя были получены автором лично.

Апробация работы

Основные материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах лаборатории криоэлектроники кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова и в Институте Радиотехники и Электроники РАН. Основные положения и результаты диссертации докладывались на 6 международных конференциях и симпозиумах, а именно, на международных конференциях по прикладной сверхпроводимости (Applied Superconductivity Conference, ASC) в 2004 и 2006 годах, на международной конференции по сверхпроводниковой электронике (International Superconductive Electronics Conference, ISEC) в 2005 году, на международной европейской конференции по прикладной сверхпроводимости (European Conference on Applied Superconductivity, EUCAS) в 2005 году, на международном студенческом семинаре по микроволновым применениям современных физических явлений (12th International Student Seminar on Microwave Applications Of Novel Physical Phenomena) в 2005 году (2 доклада).

Публикации

По результатам вошедших в диссертацию исследований имеется 6 печатных работ, опубликованных в ведущих отечественных и зарубежных реферируемых журналах.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из общей характеристики диссертационной работы, четырех глав, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем диссертации составляет 94 страницы, включая 58 рисунков, 6 таблиц, список публикации автора по теме диссертации из 6 наименований и список цитируемой литературы из 42 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Глава 1. Введение. Постановка задачи

В разделе 1.1 дано краткое описание макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках, на которых основана работа устройств сверхпроводниковой электроники.

Раздел 1.2 посвящен обзору современного состояния сверхпроводниковой электроники и рассмотрению перспективных направлений ее развития. Показано, что современная технология позволяет разрабатывать интегральные схемы с очень высокой степенью интеграции элементов. Существуют полные библиотеки логических элементов. Уровень развития сверхпроводниковой электроники характеризуют разработанные прототипы RSFQ процессоров, тактовые частоты которых в несколько раз больше максимальных частот работы полупроводниковых процессоров. В то же время, крайне низкая энергия переключения джозефсоновских элементов, обеспечивающая преимущество сверхпроводниковой электроники, создает значительное препятствие для передачи сигналов RSFQ логики в цепи полупроводниковой электроники. Поэтому исключительно важная роль в развитии цифровой сверхпроводниковой электроники отводится разработке высокоэффективных выходных усилителей-интерфейсов.

В разделе 1.3 приведен обзор основных типов существующих выходных усилителей-интерфейсов. Приводится обоснование концепции построения высокоэффективного быстродействующего выходного усилителя-интерфейса на основе последовательной цепочки сверхпроводящих квантовых интерферометров.

В заключение первой главы производится постановка задачи.

Глава 2. Изучение физических основ работы функциональных частей усилителя одноквантовых импульсов

Раздел 2.1 посвящен описанию предлагаемой конструкции выходного усилителя интерфейса. Основными частями усилителя являются: цепь изохронного мультиплицирования одноквантовых импульсов, цепь уширения импульсов и суммирующая цепочка двухконтактных квантовых интерферометров (рис. 1). Цепь мультиплицирования импульсов представляет собой сплиттерное дерево (от англ. splitter - разветвитель), состоящее из K колонок, осуществляющее мультиплицирование каждого входного одноквантового импульса в набор 2^K изохронных одноквантовых импульсов [16]. Полученные импульсы с 2^K параллельных выходов цепи мультиплицирования через буферные JTL (JTL – Josephson Transmission Line – джозефсоновская передающая линия) поступают в цепи уширения импульсов, в которых происходит увеличение длительности и амплитуды импульсов тока. Магнитное поле импульсов тока воздействует на интерферометры суммирующей цепочки, вызывая модуляцию ВАХ. Isoхронность

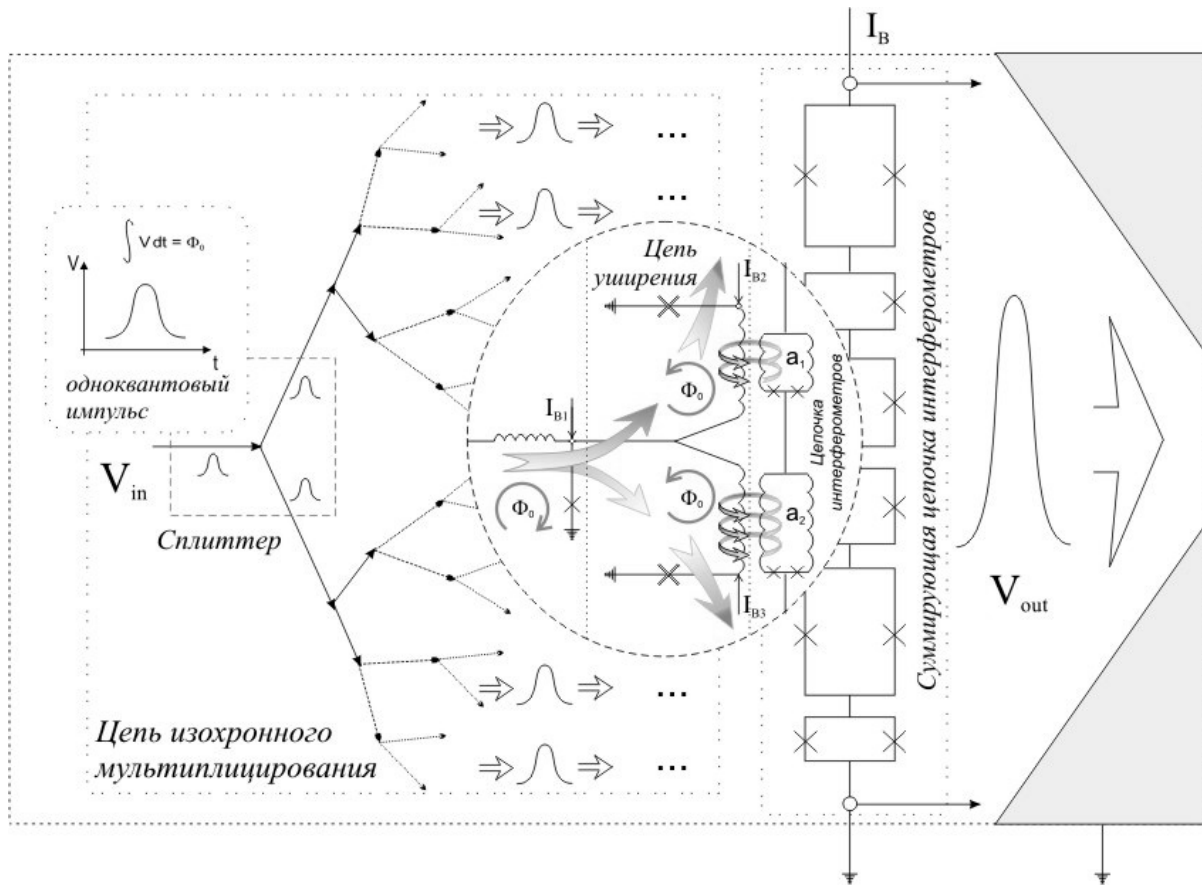


Рис.1. Принципиальная схема выходного усилителя-интерфейса. Основными частями усилителя являются: (1) цепь изохронного мультиплицирования одноквантовых импульсов, (2) цепь уширения импульсов и (3) суммирующая цепочка двухконтактных квантовых интерферометров.

импульсов тока приводит к сложению импульсов напряжения на интерферометрах последовательной цепочки.

Основным преимуществом предложенной концепции усилителя является возможность увеличения числа суммирующих элементов и повышение амплитуды выходного сигнала без ограничения быстродействия усилителя и уменьшения допусков на технологический разброс параметров интегральной схемы.

Раздел 2.2 посвящен изучению цепи изохронного мультиплицирования одноквантовых импульсов.

В параграфе 2.2.1 описывается модель сплиттерного дерева, которая представляет собой JTL с переменными параметрами ячеек: индуктивностью $L_n = L/q^n$ и критическим током джозефсоновских переходов $I_{c_n} = I_c \cdot q^n$, где L и I_c – соответственно индуктивность и критический ток в первой ячейке сплиттерного дерева, q – коэффициент преобразования, а n – номер колонки сплиттерного дерева. В такой модели каждая ячейка JTL представляет собой колонку сплиттерного дерева. В случае одинакового значения параметров ячеек (L и

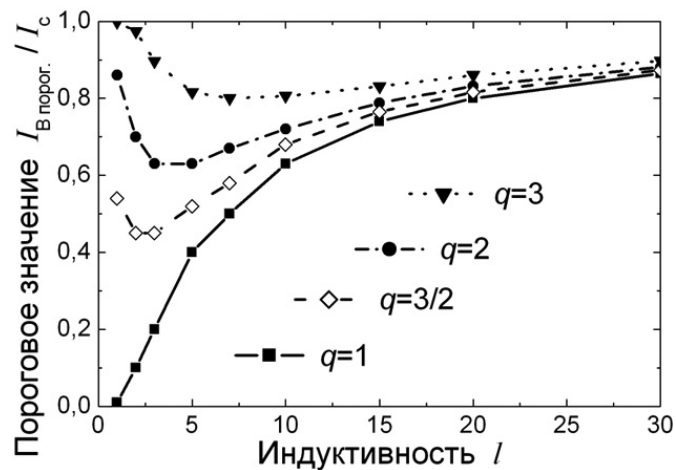


Рис. 2. Зависимость порогового значения тока смещения от индуктивностей ячеек l при различных значениях коэффициента трансформации q .

I_c) сплиттерного дерева во всех его колонках, коэффициент ветвления k и соответствующий ему коэффициент трансформации q в модели совпадают. Уменьшение (или увеличение) коэффициента трансформации q по сравнению с коэффициентом ветвления k будет означать неоднородную сплиттерную структуру, характеризующуюся монотонным уменьшением (увеличением) критического тока переходов I_c в сплиттерном дереве и пропорциональным увеличением (уменьшением) индуктивности ячеек L с номером колонки n .

В параграфе 2.2.2 определяются наиболее оптимальные параметры сплиттерного дерева, для чего проводится исследование времени распространения одноквантового импульса по сплиттерному дереву (с использованием предложенной модели) в зависимости от коэффициента трансформации q , токов смещения джозефсоновских переходов I_B , а также значений индуктивностей ячеек L . Определяются значения пороговых токов смещения для различных параметров q и L . Выше порогового значения, по мере увеличения тока время распространения импульса быстро уменьшается и в диапазоне токов $I_B = 0.8 \dots 1 I_C$ выходит примерно на константу, величина которой зависит от q и L .

Зависимость порогового значения тока смещения от нормированного значения индуктивностей ячеек l ($l = (2\pi/\Phi_0)I_C L$) для различных значений коэффициента преобразования q представлена на рис. 2. Следует отметить, что характер зависимости порогового значения тока для сплиттерных структур ($q > 1$) принципиально отличается от той зависимости, которая имеет место в случае обычной JTL ($q = 1$).

В результате проведенного исследования была обоснована необходимость использования структуры с эффективным коэффициентом мультиплицирования (коэффициент трансформации q) не выше 2.

В параграфе 2.2.3 проводится рассмотрение динамики распространения кванта магнитного потока и соответствующего ему одноквантового импульса по сплиттерному

дереву. В результате проведенного исследования обоснована необходимость обеспечения условий, при которых отсутствует взаимодействие между квантами магнитного потока. Это может быть достигнуто в двух случаях: когда расстояние между квантами потока в сплиттерной структуре больше, чем радиус взаимодействия или когда по этой структуре распространяется (с мультиплицированием) только один квант потока.

Если расстояние между квантами потока меньше радиуса взаимодействия, то происходит формирование групп с фиксированным количеством квантов магнитного потока внутри структуры, которое было предсказано и описано в [18]. В этом случае при монотонном изменении периода следования входных импульсов период выходных импульсов будет изменяться немонотонно (скачкообразно).

Сформулированное условие накладывает ограничение на максимальную частоту входных импульсов.

В параграфе 2.2.4 описывается влияние емкости джозефсоновских переходов на характеристики сплиттерного дерева. Наличие этой емкости дает некоторое уменьшение порогового значения тока смещения, которое пропадает с увеличением индуктивности l . Уменьшение порогового значения продолжается с увеличением емкостного параметра Маккамбера β_C ($\beta_C = (2\pi/\Phi_0)I_C R_N^2 C$) до 0.5. Сплиттерная структура может правильно работать даже при наличии небольшого гистерезиса на ВАХ джозефсоновских переходов ($\beta_C = 1 \dots 2$), однако дальнейшего уменьшения порогового значения тока смещения при этом не наблюдается.

Раздел 2.3 посвящен разработке цепи уширения одноквантовых импульсов.

В параграфе 2.3.1 обсуждается уширение импульсов тока непосредственно в цепи сопряжения выходных ячеек сплиттерного дерева с интерферометрами суммирующей цепочки, а также рассматриваются возможные конструкции схем уширения. Предлагаемая конструкция усилителя отличается использованием цепочки интерферометров в резистивном состоянии. Это означает, что скорость изменения сигнала должна быть меньше, чем частота джозефсоновской генерации ω_J переходов цепочки ($d\Phi_{in}/dt < \omega_J$, где Φ_{in} – входной магнитный поток в интерферометр цепочки), что диктует необходимость уширения импульсов тока и соответствующих импульсов магнитного потока, воздействующих на интерферометры. Уширение одноквантового импульса напряжения, который имеет постоянную площадь $\int V dt = \Phi_0$, означает соответствующее уменьшение амплитуды импульса. При этом происходит обеднение спектра импульса гармониками, в результате чего энергия импульса сосредотачивается в самых первых гармонических компонентах, упрощая проблему фильтрации сигналов. В тоже время, амплитуда импульса тока через

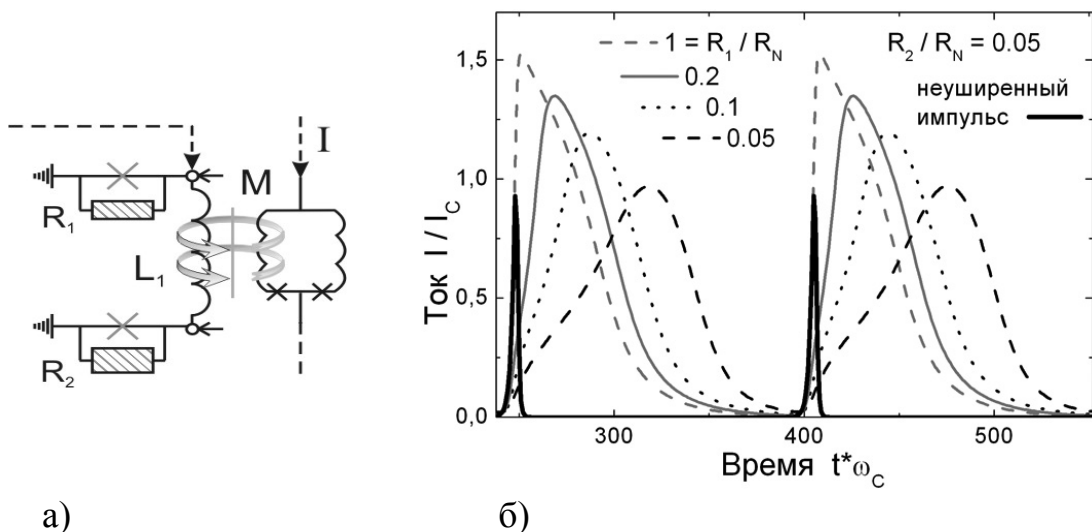


Рис. 3. Схема предложенной цепи уширения (а) и форма уширенного импульса при различных значениях шунтирующих резисторов R_1 и R_2 (б). Жирной линией представлен одноквантовый импульс в буферной JTL (до уширения). Частота следования импульсов $\omega/\omega_C = 0.04$.

индуктивность выходной ячейки не только не уменьшается, но даже увеличивается в 1.5 – 2 раза (см. рис. 3б). Максимальное уширение ограничено частотой следования импульсов.

Предложенное уширение достигается путем дополнительного шунтирования джозефсоновских переходов в выходных ячейках сплиттерного дерева. На рис. 3 представлена схема выходной ячейки, осуществляющей уширение импульсов, и форма уширенного импульса тока в индуктивности ячейки. Резистор R_2 , шунтирующий выходной переход, определяет основное уширение и спад импульса, в то время как шунт R_1 влияет на фронт импульса. Выходной джозефсоновский переход может быть заменен низкоомным резистором для предотвращения паразитных круговых токов в рассматриваемой ячейке, однако, импульс в таком случае будет иметь более острую форму.

В параграфе 2.3.2 обсуждается компенсация неизохронности мультиплицированных импульсов, возникающей вследствие технологического разброса критических токов джозефсоновских переходов.

В рамках современной технологии разброс критических токов переходов составляет порядка 5% значения критического тока, т.е. для $I_C = 125$ мкА, $\delta I_C = 6.25$ мкА. В соответствии с резистивной моделью джозефсоновского перехода величина тепловых флуктуаций $\delta I_{CF} = (2e/\hbar)k_B T$ [19] составляет порядка 0.35 мкА при $T = 4.2$ К (фактор $\gamma = \delta I_{CF}/I_C$ порядка 0.003). Поэтому мы можем пренебречь δI_{CF} и учитывать только δI_C .

Существование разброса критического тока накладывает ограничение на ток смещения джозефсоновских переходов $I_B < I_C - \delta I_C$, а также приводит к различному времени прохождения одноквантового импульса по ветвям сплиттерного дерева и, следовательно,

неизохронному сложению импульсов на суммирующей цепочке. Для оценки среднеквадратичного временного сдвига между одноквантовыми импульсами на выходах сплиттерного дерева $\delta\tau$ можно сложить временные сдвиги во всех выходных ячейках как случайные величины, что приводит к выражению:

$$\delta\tau = \frac{\delta I_C}{\sqrt{M}} \frac{I_B}{I_C^2} \cdot \frac{d\tau}{dI_B}, \quad (1)$$

где τ - время распространения одноквантового импульса по сплиттерному дереву, M – число выходных ячеек. В таблице 1 представлены значения $\delta\tau$ для $I_B / I_C = 0.85$. Здесь время τ и $\delta\tau$

Таблица 1. Нормированный среднеквадратичный временной сдвиг $\delta\tau$.

	$l = 2$	$l = 7$	$l = 10$
$q = 3/2$	1	2.6	5
$q = 2$	3	4.7	8

нормированы на характерное время $(\omega_C)^{-1}$, где ω_C – характерная частота джозефсоновских переходов.

Эти значения сопоставимы с характерной шириной одноквантового импульса $\tau_0 \approx 3$. Сложение неизохронных импульсов на последовательной цепочке двухконтактных интерферометров приведет к формированию растянутого импульса с малой амплитудой вместо образования выходного импульса с большой амплитудой. При задании максимальной частоты следования импульсов $\omega/\omega_C = 0.1$ ширина уширенного импульса может достигать значения $\tau^* = 30$, которое уверенно превышает величину сдвига импульсов $\delta\tau$. Таким образом, уширение импульсов позволяет компенсировать неизохронность мультиплицированных импульсов.

Раздел 2.4 посвящен исследованию суммирующей цепочки двухконтактных квантовых интерферометров.

В параграфе 2.4.1 исследуется амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) интерферометров суммирующей цепочки. Воздействие на интерферометр внешнего высокочастотного магнитного потока приводит к синхронизации джозефсоновской генерации, в результате чего на ВАХ интерферометра формируются ступеньки на частоте внешнего сигнала и ее гармониках. Это явление очень близко к хорошо известному явлению образования ступенек Шапиро на ВАХ джозефсоновских переходов. Результаты моделирования показывают, что процессы синхронизации, приводящие к искажению АЧХ цепочки интерферометров, начинаются, когда частота сигнала превышает $0.2 \omega_J$, где ω_J – средняя частота джозефсоновской генерации в рабочей точке. Таким образом, существует определенное ограничение на частоту сигнала.

В параграфе 2.4.2 производится рассмотрение внутренних резонансов интерферометров суммирующей цепочки, а также геометрических резонансов цепочки в целом.

Наличие емкости переходов обуславливает существование LC резонанса в петле интерферометра цепочки, в результате которого на ВАХ интерферометра появляется резонансная особенность, наиболее выраженная при задании внешнего магнитного потока $\Phi_0/2$. Это приводит к взаимному пересечению ВАХ при различных приложенных магнитных потоках. С увеличением емкости джозефсоновских переходов (или индуктивности петли интерферометра), частота LC резонанса уменьшается, и точка пересечения ВАХ смещается в область низких напряжений. Если точка пересечения ВАХ находится вблизи выбранной рабочей точки, то модуляция ВАХ под действием внешнего магнитного потока существенно уменьшается. Для устранения этого эффекта нормированное значение емкости джозефсоновских переходов должно быть достаточно малым ($\beta_C \leq 0.5$ для нормированного значения индуктивности петли интерферометра $l \leq 3$). Более полное подавление LC резонанса возможно с помощью подключения параллельно индуктивности интерферометра демпфирующего сопротивления порядка нормального сопротивления джозефсоновского перехода R_N .

Возникновение геометрических резонансов в суммирующей цепочке интерферометров обусловлено конкретной реализацией цепочки в экспериментальной интегральной схеме. В экспериментальной схеме суммирующая цепочка располагается между экранирующими слоями для уменьшения индуктивностей интерферометров и ячеек цепи уширения, а также для защиты этих цепей от замороженных магнитных потоков. В такой конструкции суммирующая цепочка представляет собой отрезок микрополосковой линии, в котором могут возбуждаться стоячие волны. Демпфирование геометрических резонансов возможно путем подключения высокоомных резисторов, задающих волновые потери в этой структуре.

Раздел 2.5 посвящен изучению согласования усилителя с выходной цепью.

В параграфе 2.5.1 проводится оценка возможности согласования суммирующей цепочки интерферометров с внешней нагрузкой. Для этой цели проведена оценка реальной и мнимой части импеданса цепочки на частоте $\omega = 0.1\omega_C$. Показано, что импеданс цепочки на этой частоте является в основном реальным. Учитывая типичное значение нормального сопротивления $R_N = 2$ джозефсоновского перехода в стандартной ниобиевой технологии [20], значение импеданса цепочки, состоящей из $N = 50$ интерферометров, значение импеданса будет соответствовать стандартному входному импедансу СВЧ приборов (50 Ом).

В параграфе 2.5.2 рассматривается влияние импеданса выходной нагрузки на ВАХ суммирующей цепочки интерферометров. В то время как подключение выходной нагрузки к цепочке напрямую шунтирует цепочку, уменьшая наклон ВАХ, подключение нагрузки через

емкость осуществляет шунтирование цепочки только по высокой частоте. Численный расчет показывает, что дополнительное шунтирование цепочки по высокой частоте внешним сопротивлением порядка нормального сопротивления последовательной цепочки $NR_N/2$ даже несколько увеличивает отклик цепочки в области напряжения $V = (0.8 \dots 2)NV_C$. Увеличение отклика напряжения происходит за счет уменьшения эффективного значения параметра Маккамбера в этом диапазоне частот.

В параграфе 2.5.3 исследуется эффект взаимной синхронизации джозефсоновской генерации в элементах суммирующей цепочки. Подключение внешней нагрузки к цепочке приводит к образованию внешней цепи электродинамической связи элементов цепочки, в результате чего через элементы цепочки протекают высокочастотные токи, ответственные за синхронизацию джозефсоновской генерации. В случае синхронного режима генерации суммарная амплитуда джозефсоновских осцилляций на последовательной цепочке из N элементов будет в N раз больше, чем амплитуда осцилляций на одном элементе, в то время как в асинхронном режиме генерации среднеквадратичная величина размаха осцилляций на цепочке увеличится только в \sqrt{N} раз по сравнению с амплитудой осцилляций на одном элементе. Отличие в размахе осцилляционного процесса в \sqrt{N} раз очень важно с точки зрения задачи фильтрации, т. е. задачи отделения выходного сигнала от джозефсоновских осцилляций близкой частоты. Если в качестве последовательной суммирующей цепочки использовать СКИФ-структуру (сильно нерегулярная цепочка), то в этом случае приложенный магнитный поток обуславливает разную модуляцию ВАХ элементов этой цепочки и, как следствие, асинхронный режим джозефсоновской генерации. При использовании регулярной структуры цепочки асинхронный режим генерации может быть достигнут путем задания некоторого разброса (20...30%) величин характерного напряжения V_C джозефсоновских переходов в цепочке от элемента к элементу. Практически такая квазирегулярная цепочка интерферометров может быть сформирована путем введения соответствующего разброса (заложенного в фотошаблон регулярной цепочки) шунтов туннельных Nb джозефсоновских переходов.

Раздел 2.6 посвящен численному моделированию совместной работы цепей усилителя.

В разделе представлен расчет динамики интерферометра суммирующей цепочки, индуктивно связанного с ячейкой цепи уширения (выходной ячейкой сплиттерного дерева) при различных значениях коэффициента взаимной индукции M . Полученные результаты представлены на рис. 4.

Для изучения отклика интерферометра постоянный магнитный поток задавался непосредственно из ячейки цепи уширения. Для этой цели в ячейку включался генератор постоянного тока для формирования необходимого магнитного потока. Оказалось, что

максимальный размах отклика напряжения интерферометра в такой конструкции увеличивается с увеличением взаимной индуктивности M (см. рис. 4а). Это можно объяснить влиянием на интерферометр подключенной к нему ячейки, в результате чего эффективная индуктивность интерферометра уменьшается с ростом коэффициента M :

$$L_{эфф} = L_2(1 - k^2), \quad (2)$$

где $k^2 = M^2 / (L_1 L_2)$, L_2 – индуктивность ячейки интерферометра, L_1 – индуктивность ячейки цепи уширения.

Для изучения динамики рассматриваемой цепи в режиме усиления одноквантовых импульсов ячейка цепи уширения подключалась к сплиттерному дереву. Одноквантовый импульс, поступавший из сплиттерного дерева, уширялся в выходной ячейке и воздействовал магнитным образом на интерферометр. На рис. 4б показана зависимость амплитуды выходных импульсов от тока смещения интерферометра при различных значениях отношения M / L_1 . Численное моделирование показало, что амплитуда выходных импульсов не зависит от степени уширения импульсов, если их ширина $\tau^* \geq \tau^*_{\min}$, где $\tau^*_{\min} = 15 \dots 30$. Указанное значение τ^*_{\min} допускает максимальную частоту следования импульсов на уровне 10% - 20% характерной частоты ω_C .

Важно отметить, что при $M / L_1 > 0.5$ разность между максимальной величиной отклика интерферометра и амплитудой выходного импульса существенно сокращается с ростом M .

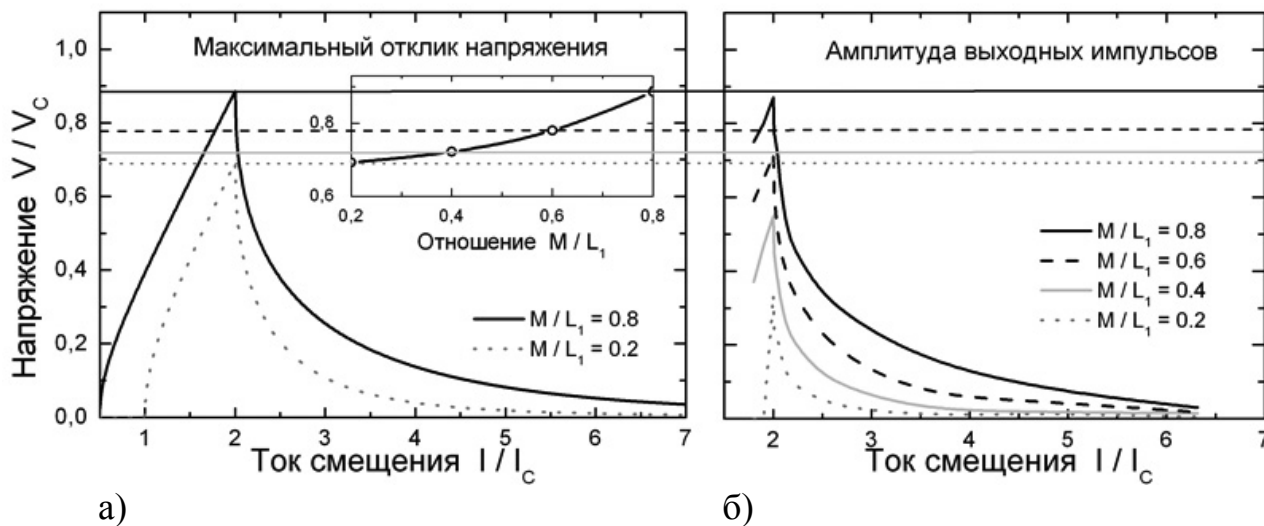


Рис. 4. а) Зависимость максимального размаха отклика напряжения интерферометра, индуктивно связанного с ячейкой цепи уширения, от тока смещения при различных значениях коэффициента связи M / L_1 , где M – коэффициент взаимной индукции, L_1 – индуктивность ячейки цепи уширения. Нормированное значение индуктивностей ячейки цепи уширения и интерферометра $l_1 = l_2 = 3$. На вставке показана зависимость максимального отклика напряжения от отношения M / L_1 при $I / I_C = 2$. б) Зависимость амплитуды выходного импульса напряжения на интерферометре от тока смещения при различных значениях M / L_1 .

Поэтому при разработке топологии схемы крайне важно добиваться наибольшего коэффициента связи, когда $M/L_I > 0.5$.

Для проверки предлагаемой конструкции было также произведено численное моделирование работы прототипа усилителя, с суммирующей цепочкой, состоящей из $N = 16$ интерферометров, не подключенной к выходной нагрузке. Было показано, что при $M/L_I = 0.5$ и токе смещения $I_B/I_C = 2.2$ амплитуда выходного импульса напряжения составляет порядка $V_{\text{вых}} \approx 4V_C$. По проведенным оценкам с учетом 50-омной нагрузки и необходимое количество интерферометров для получения амплитуды выходного сигнала $V = 0.8 \dots 1.2$ мВ будет составлять $N \approx 32$ при использовании стандартной ниобиевой технологии HYPRES с плотностью критического тока $j_C = 1$ кА/см² [20].

Раздел 2.7 посвящен разработке выходного фильтра усилителя.

Выходной фильтр разрабатывался совместно с лабораторией микроволновой микроэлектроники СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Выходной фильтр предназначался для отделения выходного сигнала с максимальной частотой $F_S = 9$ ГГц от джозефсоновской генерации. Характерная частота джозефсоновских переходов в суммирующей цепочке $F_C \approx 90$ ГГц. Был разработан выходной фильтр второго порядка с емкостью на выходе, включенной последовательно. Входной и выходной импедансы фильтра на частоте сигнала соответствовали требованию согласования цепочки из $N = 64$ интерферометров с 50-омной выходной линией. На высокой частоте (частоте джозефсоновской генерации) входной импеданс фильтра был достаточно высоким (больше 100 Ом) и, следовательно, практически не вызывал шунтирования цепочки. Разработанный фильтр характеризуется резкой границей пропускания и обеспечивает подавление джозефсоновской генерации более чем в 100 раз (согласно характеристике пропускания S21).

Глава 3. Разработка топологии и фотошаблонов

Раздел 3.1 посвящен описанию характеристик используемой ниобиевой технологии.

Стандартный процесс изготовления интегрированных схемы в HYPRES [20] включает в себя использование 10 слоев из которых 2 резистивных слоя и 4 слоя металлизации, с минимальным характерным размером формируемой структуры 1 мкм². В качестве сверхпроводящего материала используется ниобий. Для формирования джозефсоновских переходов Nb/AlO_x/Nb на первом этапе производится напыление на всю подложку слоев Nb, Al, с последующим окислением, и Nb. На следующем этапе производится выделение областей джозефсоновских переходов методом 1 мкм² литографии и последующего травления. Для шунтирования джозефсоновских переходов, формирования резисторов в цепях питания и прочих сопротивлений используется слой молибдена с погонным сопротивлением 1 Ом/квадрат (при температуре 4.2 К). Второй резистивный слой PdAu с

сопротивлением 0.02 Ом/квadrat используется в основном для металлизации контактных площадок. Для обеспечения изоляции между джозефсоновскими переходами, резисторами, земляным слоем и различными соединениями напыляется диоксид кремния. В процессе изготовления используются подложки из оксида кремния. Размер чипов 5x5 мм².

Раздел 3.2 посвящен описанию оптимизации топологии разрабатываемых структур.

В параграфе 3.2.1 описывается программа L-METER [21] для расчета индуктивностей сверхпроводящих цепей, проектируемых в фотошаблоне. Помимо топологии анализируемой структуры, входными данными программы служат описание эквивалентной схемы и характеристики используемых слоев. Выходными данными программы являются собственные и взаимные индуктивности рассчитываемой цепи. В качестве примера в диссертации приводится расчет сопряжения ячейки цепи уширения с интерферометром суммирующей цепочки.

В параграфе 3.2.2 описывается поэтапная оптимизация топологии для подавления геометрических резонансов в суммирующей цепочке. В первой итерации была использована топология, в которой каждая ячейка цепочки имела индивидуальный экран, не соединенный гальванически с экранами других ячеек. Это позволяет избежать формирования единой микрополосковой линии по всей длине цепочки. Недостатком такой топологии является значительное увеличение индуктивности элементов схемы, расположенных между экранами ячеек. Кроме того, оказалось, что такая топология способствует захвату магнитных потоков и их фиксации в области ячеек цепочки.

В следующей итерации был использован общий экран. Для подавления геометрических резонансов было использовано равномерное подключение к цепочке высокоомных резисторов, задающих волновые потери в этой структуре. Недостатком такого демпфирования резонансов, как показали измерения, является дополнительное шунтирование цепочки, которое особенно сильно сказывается при использовании цепочек с большим числом ячеек.

Для устранения этого недостатка в третьей итерации было использовано неравномерное распределение потерь вдоль цепочки. При таком способе демпфирования резонансов сохраняется суммарная проводимость подключенных к цепочке резисторов, но проводимости резисторов уменьшаются по линейному или квадратичному закону от заземленного конца цепочки примерно до ее середины. Такое неравномерное демпфирование позволяет эффективно подавлять геометрические резонансы без существенного шунтирования цепочки.

В параграфе 3.2.3 описана оптимизация защиты цепей усилителя от влияния замороженного магнитного потока. Для этих целей создавались специальные

неоднородности в топологии структуры, такие как прорези в экранирующем слое. После первой итерации для дополнительной защиты схем было применено двойное экранирование. В случае двойного экранирования, отверстия для захвата квантов замороженного магнитного потока проделывались в обоих экранах и окружались сквозными соединениями всех слоев, образуя структуру наподобие колодца. Структуры с двойным экраном работали гораздо более стабильно, в течение нескольких часов при измерениях в неэкранированном помещении.

Раздел 3.3 посвящен описанию используемых генераторов одноквантовых импульсов.

В качестве генераторов одноквантовых импульсов на входе усилителя использовались два источника сигнала: сильно демпфированный джозефсоновский переход, характеристики которого описаны в параграфе 2.2.3 и стандартный преобразователь импульсов постоянного напряжения в одноквантовые импульсы, известный как dc/SFQ преобразователь [16]. Оба источника одиночных квантов магнитного потока были подсоединены ко входу цепи изохронного мультиплицирования импульсов через объединитель импульсов Merger [16], который препятствовал прохождению импульсов от одного генератора к другому. Для контроля генерации одноквантовых импульсов на dc/SFQ преобразователе, импульсы также поступали на вход SFQ/dc преобразователя [21], который преобразовывал генерируемые одноквантовые импульсы в широкие импульсы напряжения.

Раздел 3.4 посвящен описанию состава чипов, изготовленных в трех последовательных итерациях.

В число изготовленных структур входили усилители и отдельные цепочки интерферометров для исследования различных параметров структур и сопоставления с теоретическими расчетами. Среднее значение нормального сопротивления джозефсоновских переходов в интерферометрах суммирующих цепочек во всех итерациях составляло порядка $R_N = 1.4$ Ом, что соответствует $\beta_C = 0.5$. Вводился также разброс нормальных сопротивлений джозефсоновских переходов в суммирующей цепочке в пределах 20%.

В первой итерации были реализованы усилители с количеством интерферометров в суммирующей цепочке $N = 64, 128, 256$, отличающиеся структурой цепочки (регулярная / нерегулярная), наличием или отсутствием разброса шунтов джозефсоновских переходов, а также величиной уширения импульсов. Помимо усилителей были реализованы отдельные цепочки интерферометров, отличающиеся также способом подключения к нагрузке: через высокоомный резистор, через емкость, LR или LCR фильтр.

Во второй итерации были изготовлены усилители с числом интерферометров: $N = 32, 64, 128$, оптимизированной цепью уширения и равномерным демпфированием суммирующей

цепочки. Один из усилителей был подключен к фильтру, описанному в разделе 2.7. Помимо усилителей была реализована СКИФ структура, состоящая из $N = 56$ интерферометров.

В третий итерации изготавливались 4 усилителя с количеством интерферометров в суммирующей цепочке $N = 32, 64$, отличающихся типом неравномерного демпфирования и временем уширения.

Глава 4. Экспериментальное исследование

Раздел 4.1 посвящен описанию техники проведения измерений.

Изготовление и измерение интегральных схем производились в лаборатории фирмы HYPRES [20]. Для проведения измерений чипов со сверхпроводниковыми схемами использовалась криогенная штанга, предназначенная для измерений в диапазоне частот от 0 до 25 ГГц. Штанга оснащена держателем чипа, обеспечивающим электрический контакт с 40 контактными площадками чипа. Для защиты измеряемой интегральной схемы от внешних магнитных наводок держатель чипа снабжен двумя цилиндрическими экранами из μ -металла. Держатель снабжен также пластиковым кожухом для защиты экранов от механического воздействия. Смонтированная штанга опускается в дьюар с жидким гелием, который также находится внутри высокого (выше дьюара) цилиндрического экрана из μ -металла. Измерения проводились в специальной экранированной комнате.

Для проведения экспериментальных исследований использовалось высокоточное измерительное оборудование фирм Agilent/HP и Tektronix. Кроме того, для измерений на постоянном токе использовалась управляемая компьютером многофункциональная система ОСТОРУХ. Для проведения высокочастотного тестирования интегральной схемы и визуализации выходных импульсов исследуемого усилителя был использован стробоскопический осциллограф Tektronix CSA 803, который позволял проводить измерения в режиме, характеризуемом шкалой по оси напряжений 2 мВ/дел и по оси времени 20 пс/дел.

Раздел 4.2 посвящен описанию результатов измерений на постоянном токе.

В процессе исследования интегральных схем, изготовленных в первой итерации, были получены ВАХ суммирующих цепочек, на которых отсутствовали особенности, обусловленные геометрическими резонансами в полном соответствии с использованной топологией (отсутствие единого экрана для элементов цепочки). В то же время на ВАХ отдельно размещенных цепочек с линией задания магнитного поля наблюдались ступеньки, соответствующие геометрическим резонансам. Эти резонансы соответствовали возбуждению стоячих волн в отрезке микрополосковой линии, образованной линией задания магнитного поля, размещенной над структурой цепочки (второй электрод этой линии). При задании магнитного потока в интерферометры цепочки ступеньки на ВАХ пропадали, и образовывалась характерная особенность LC резонанса внутри интерферометров, описанного

в параграфе 2.4.2. Максимальный размах отклика напряжения для цепочек, состоящих из $N = 128$ интерферометров, составил $V_{max} = 9$ мВ и для цепочки из $N = 256$ интерферометров $V_{max} = 18$ мВ.

Исследование интегральных схем, изготовленных во второй итерации, подтвердило эффективность предпринятых мер по демпфированию геометрических и LC резонансов в цепочках интерферометров. Однако, в силу равномерного размещения дополнительных потерь вдоль структуры суммирующей цепочки, приводящего к значительному шунтированию ВАХ, было получено заметное уменьшение размаха отклика цепочек. В этой итерации был исследован последовательный СКИФ, состоящий из $N = 56$ интерферометров. Отклик этой структуры имел острый пик в нуле магнитного поля.

Исследование интегральных схем, изготовленных в третьей итерации, показало, что разработанное неравномерное демпфирование геометрических резонансов в суммирующей цепочке действительно практически не шунтирует цепочку и не приводит к существенному уменьшению характерного напряжения цепочки. Примененный способ демпфирования приводил к достаточно хорошему подавлению резонансов: на ВАХ цепочек присутствовали лишь незначительные особенности, не способные препятствовать работе интегральной схемы. Выполненный цикл оптимизации параметров интегральной схемы позволил выполнить успешное тестирование схемы в режиме усиления отдельных одноквантовых импульсов.

Раздел 4.3 посвящен описанию высокочастотного тестирования прототипов усилителя.

Для проведения высокочастотного тестирования интегральная схема включала в себя два разных источника одноквантовых импульсов. Первый источник представлял собой сильно демпфированный джозефсоновский переход. Сильное демпфирование перехода применяется для обеспечения возможности плавного изменения частоты генерации. В качестве второго источника был использован стандартный преобразователь опорных низкочастотных импульсов напряжения в одноквантовые импульсы, следующих с такой же частотой (dc/SFQ преобразователь [16]). Оба источника одиночных квантов магнитного потока были подсоединены ко входу цепи изохронного мультиплицирования импульсов через объединитель импульсов Merger [16], который препятствовал прохождению импульсов от одного генератора к другому.

Первый источник импульсов использовался для генерации пакетов одноквантовых импульсов при использовании переменного тока питания I_B . Если $I_B < I_C$, генерация импульсов отсутствует. Когда $I_B > I_C$, формируется пакет одноквантовых импульсов с частотой, зависящей от величины I_B . 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. Поэтому выходной сигнал интегральной схемы в этом случае представляет собой прямоугольные импульсы с длительностью, равной длительности пакета импульсов.

Высокочастотное тестирование интегральных схем, изготовленных в первой итерации, проводилось только с использованием первого источника сигналов. В связи с недостаточным демпфированием внутреннего LC резонанса интерферометров суммирующей цепочки, выходной сигнал интегральной схемы мог быть либо в фазе, либо в противофазе с опорным сигналом (переменный ток питания генератора) в зависимости от тока смещения суммирующей цепочки. Амплитуда выходных импульсов усилителя с суммирующей цепочкой из 64 интерферометров составила порядка 0.2 мВ. Низкая амплитуда выходного сигнала объясняется присутствием указанного LC резонанса в интерферометрах цепочки, а также малой величиной коэффициента индуктивной связи M / L_I . Из-за отсутствия у цепочки единого экрана индуктивность ячейки уширения L_I (рис. 3а) становится большой в результате прохождения над областью разрыва экранов.

Высокочастотное тестирование интегральных схем, изготовленных в третьей итерации, проводилось с использованием как первого, так и второго генераторов одноквантовых импульсов. В экспериментах с использованием первого генератора изменялась амплитуда тока питания генератора I_B , влияющая на частоту следования одноквантовых импульсов в пакете импульсов. Увеличение частоты приводит к росту амплитуды прямоугольного импульса тока (и, следовательно, магнитного потока), который образуется в цепи уширения при слиянии импульсов. Поэтому при увеличении амплитуды тока I_B наблюдался рост амплитуды выходных импульсов интегральной схемы с $N = 32$ суммирующими элементами до значения 1.5 мВ, а затем происходило уменьшение амплитуды выходных импульсов. Это означает, что амплитуда импульсов магнитного потока, поступающего в ячейки суммирующей цепочки, становится больше $\Phi_0/2$. Следовательно, максимальный размах отклика напряжения цепочки составляет 1.5 мВ.

Использование dc/SFQ генератора позволило провести основное тестирование интегральной схемы в режиме усиления одиночных одноквантовых импульсов. Суммирующая цепочка тестируемого прототипа усилителя состояла из $N = 32$ интерферометров. В цепи усилителя использовалась схема уширения, представленная на рис. 3а с отношением сопротивлений $R_1/R_2 = 4$ и временем уширения $\tau = 0.7$ нс. Осциллограммы, полученные в процессе тестирования, представлены на рис. 5. На нижней осциллограмме показан опорный сигнал, подаваемый на dc/SFQ преобразователь, а на верхней осциллограмме показано выходное напряжение на суммирующей цепочке усилителя с 50-омной нагрузкой.

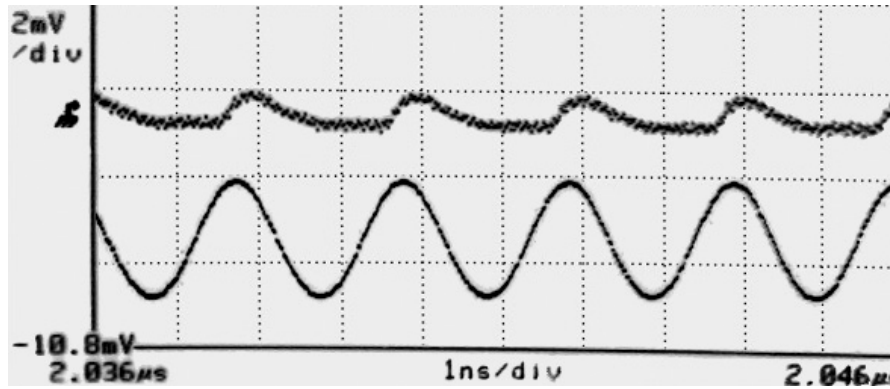


Рис. 5. Усиление одиночных одноквантовых импульсов генерируемых dc/SFQ преобразователем. Нижняя осциллограмма - опорный сигнал, подаваемый на dc/SFQ преобразователь, верхняя осциллограмма – выходные импульсы усилителя на 50-омной нагрузке. Шкала напряжения 2 мВ/дел, частота опорного сигнала 0.5 ГГц.

Ширина выходного импульса составляет $\tau_{имп} = 500$ пс и соответствует тому уширению импульсов, которое было заложено в данной схеме. Форма импульса также соответствует форме токового импульса, полученной при моделировании цепи уширения импульсов (параграф 2.3.1) для этих параметров. Амплитуда выходного импульса составляет около 1 мВ и находится в полном соответствии с оценкой величины выходного импульса для $N = 32$ и $M/L_I = 0.5$, сделанной в результате численного моделирования интегральной схемы (раздел 2.6). Полученная экспериментально оценка максимального отклика суммирующей цепочки 1.5 мВ и амплитуда выходных импульсов 1 мВ достаточно хорошо соответствуют величине коэффициента индуктивной связи $M/L_I = 0.45$, полученной при расчетах с помощью L-METER.

В **заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы.

ВЫВОДЫ

1. Предложен и исследован новый тип выходного импульсного усилителя для передачи сигналов сверхпроводниковой быстрой одноквантовой логики в цепи полупроводниковой электроники. Показано, что предложенная концепция позволяет увеличивать число суммирующих элементов и поднимать амплитуду выходного сигнала до 5 – 10 мВ без ограничения быстродействия усилителя.
2. Впервые использован режим усиления сигналов быстрой одноквантовой логики на цепочке сверхпроводящих квантовых интерферометров в резистивном состоянии. Для этой цели была предложена специальная техника мультиплицирования и уширения одноквантовых импульсов.
3. Исследованы процессы распространения одноквантовых импульсов по цепям структуры изохронного мультиплицирования. Обоснована необходимость использования структуры с эффективным коэффициентом мультиплицирования не выше 2.
4. Исследована динамика процессов усиления одноквантовых импульсов. Показано, что уширение одноквантовых импульсов в 5 – 10 раз (до 50 – 100 пс при плотности критического тока $j_c = 1 \text{ кА/см}^2$) является достаточным для реализации режима усиления импульсов на цепочке интерферометров в резистивном состоянии, а также для компенсации неизохронности мультиплицированных импульсов. Кроме того, показано, что уширение импульсов тока приводит к увеличению их амплитуды в 1.5 – 2 раза.
5. Исследованный принцип построения усилителя позволяет максимально поднять предельную частоту следования одноквантовых импульсов до 10% - 20% характерной частоты джозефсоновских элементов интегральной схемы. В случае ниобиевой технологии джозефсоновских структур с плотностью критического тока $j_c = 1 \text{ кА/см}^2$ предельная частота следования импульсов составляет 9 - 18 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.
6. Разработана и оптимизирована топология послойных фотошаблонов интегральной схемы 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.

Список публикаций автора по теме диссертации

1. 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.
2. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, O. A. Mukhanov, "Splitting circuits for SFQ-pulse driver based on SQIF," *Ext. Abstracts, Int. Supercond. Electronics Conf. (ISEC'05)*, 5-9 Sept. 2005, The Netherlands, p. P-B.10;
3. V. K. Kornev, I. I. Soloviev, N. V. Klenov, O. A. Mukhanov, "Splitting circuits for SFQ-pulse driver based on SQIF," *Superconducting Science and Technology (SUST)*, 19 (2006) S390-S393.
4. I. I. Soloviev, V. K. Kornev, O. A. Mukhanov, "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.
5. N. V. Klenov, V. K. Kornev, I. I. Soloviev, "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.
6. Кислинский Ю.В., Комиссинский Ф.В., Константибян К.И., Овсянников Г.А., Карминская Т.Ю., СОЛОВЬЕВ И.И., Корнев В.К." Сверхпроводящий ток гибридных гетеропереходов металлооксидных сверхпроводников: размерная и частотная зависимости", *ЖЭТФ*, 2005 г., том 128, выпуск 3, с. 575-585.

Список цитируемой литературы

- [1] K. K. Likharev, O. A. Mukhanov, and V. K. Semenov, "Resistive single flux quantum logic for the Josephson-junction technology", in: H. Hahlbohm and H. Luebbig (eds.) *SQUID '85*, W. de Gruyter, Berlin, 1985, p. 1103-1108.
- [2] M. Tanaka, F. Matsuzaki, T. Kondo, N. Nakajima, Y. Yamanashi, H. Terai, S. Yorozu, N. Yoshikawa, A. Fujimaki, H. Hayakawa, "Prototypic design of the single-flux-quantum microprocessor, CORE1", *Superconductor Science and Technology* (2003), 16 (12), pp. 1460-1463.
- [3] N. Nakajima, F. Matsuzaki, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, M. Tanaka, T. Kondo, A. Fujimaki, H. Terai, S. Yorozu, "Design and implementation of circuit components of the SFQ microprocessor CORE1", *Superconductor Science and Technology* (2004), 17 (3), pp. 301-307.
- [4] *Superconductor Week, Vol. 20, No. 20., October 2, 2006.*
- [5] A. Kirichenko, S. Sarwana, D. Gupta, and D. Yohannes, "Superconductor Digital Receiver Components", *IEEE Trans. on App. Supercond.*, vol 15, no 2, June 2005, pp. 249-254.

- [6] O. A. Mukhanov, D. Gupta, A. M. Kadin, and V. K. Semenov, “Superconductor Analog-to-Digital Converters”, (*invited*) *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 10, October 2004, pp. 1564-1584. (also available at: <http://www.hypres.com/>)
- [7] J. X. Przybysz, J. H. Kang, S. S. Martinet, A. H. Worsham, “Interface circuits for input and output of gigabit per second data,” in *Extended Abstracts of ISEC'95*, Nagoya, Japan, Sep. 1995, pp. 304-306.
- [8] M. Suzuki, M. Maezawa, H. Takato, H. Nakagawa, F. Hirayama, S. Kiryu, M. Aoyagi, T. Sekigawa and A. Shoji, “An interface circuit for a Josephson-CMOS hybrid digital system,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 9, Jun. 1999, pp. 3314-3317.
- [9] Q. Liu, T. Van Duzer, K. Fujiwara, and N. Yoshikawa, “Hybrid Josephson-CMOS Memory in Advanced Technologies and Larger Sizes,” *Journ. of Phys.: Conf. Series* 43 (2006) 1171-1174.
- [10] C. J. Fourie and W. J. Perold, “A single-clock asynchronous input COSL set-reset flip-flop and SFQ to voltage state interface,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, Jun. 2005, pp. 263-266.
- [11] D. F. Schneider, J. C. Lin, S. V. Polonsky, and V. K. Semenov, “Broadband interfacing of superconducting digital systems to room temperature electronics,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 5, Jun. 1995, pp.3152-3155.
- [12] V. K. Semenov, and Y. A. Polyakov, “Circuit improvements for a voltage multiplier,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 11, Jun. 2001, pp.550-553.
- [13] Q. P. Herr, “Stacked double-flux-quantum output amplifier,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 15, Jun. 2005, pp. 259-262.
- [14] O. A. Mukhanov, S. R. Rylov, D. V. Gaidarenko, N. B. Dubash, and V. V. Borzenets, “Josephson output interfaces for RSFQ Circuits”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 7, Jun. 1997, pp. 2826-2831.
- [15] R. Koch, P. Ostertag, E. Crocoll, M. Goetz, M. Neuhaus, T. Scherer, M. Winter and W. Jutzi, “A NRZ – output amplifier for RSFQ circuits”, *IEEE Trans. Applied Supercond.*, vol. 9, Jun. 1999, pp. 3549-3552.
- [16] <http://pavel.physics.sunysb.edu/RSFQ/Lib/contents.html>
- [17] J. Oppenlaender, Ch. Haeussler, and N. Schopohl, “Non- Φ_0 -periodic macroscopic quantum interference in one-dimensional parallel Josephson junction arrays with unconventional grating structure”, *Phys. Rev. B*, vol 63, 1 Jan. 2001, pp. 024511-1-9.
- [18] V. Kaplunenko et al., *J. Appl. Phys.*, 74 (9), 1 Nov. 1993, p. 5854-5858.
- [19] Лихарев К.К., *Введение в динамику джозефсоновских переходов*, М.: Наука. 1985.
- [20] <http://www.hypres.com/>
- [21] P.I. Bunyk, and S.V. Rylov, “Automated calculation of mutual inductance matrices of multilayer superconductor integrated circuits”, in *Abstr. Of Int. Supercond. Electronics Conf.*, NIST, Boulder, CO (1993); LMETER is available at: <http://pavel.physics.sunysb.edu/RSFQ/>