МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Ружицкий Всеволод Игоревич

Новые физические подходы к решению задачи масштабирования элементной базы цифровой сверхпроводниковой электроники

Специальность 01.04.15 –
Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: **Соловьев Игорь Игоревич**
доктор физико-математических наук

Официальные оппоненты: **Рязанов Валерий Владимирович**
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБУН Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТТ РАН),
главный научный сотрудник, заведующий лабораторией

Шукринов Юрий Маджнунович
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Объединённый Институт Ядерных Исследований,
ведущий научный сотрудник

Васенко Андрей Сергеевич
доктор физико-математических наук,
ФГБОУВО Московский институт электроники и математики им. А.Н. Тихонова Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики»,
профессор, заместитель заведующего лабораторией

Защита состоится 19 января 2022 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.05 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-й корпус Научно-исследовательского института ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова), аудитория 2-15.

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27). Со сведениями о регистрации участия в защите в удаленном интерактивном режиме и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться, перейдя на страницу диссертационного совета по ссылкам:
`https://istina.msu.ru/dissertations/411567677/`
`https://www.msu.ru/science/dis-sov-msu.html`

Автореферат разослан « » 2021 г.
Электронная почта совета для справок: `nav19iv@gmail.com`

Ученый секретарь
диссертационного совета МГУ.01.05,
кандидат физико-математических наук Н. А. Власова

Общая характеристика работы

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Одним из ключевых факторов технологического прогресса является развитие полупроводниковой электроники. Количество транзисторов, которые могут быть размещены на чипе, вдвое увеличивается с каждым годом [1–3]. Данная тенденция была обнаружена одним из основателей компании Intel — Гордоном Муром. Рост числа транзисторов связан с развитием технологии производства: уменьшается размер транзисторов, который уже практически приблизился к атомному масштабу. Не смотря на то, что способ улучшения производительности схем, связанный с пространственным масштабированием, себя исчерпывает, развитие полупроводниковой электроники на этом не останавливается. Активно разрабатываются новые подходы: 3D интеграция, новые материалы и.т.п; и параллельно прорабатываются новые технологии для обработки, хранения, передачи информации. Однако, как сейчас видно, есть задачи для которых стандартная полупроводниковая электроника плохо пригодна: например, квантовые вычисления и квантовые коммуникации, для которых активно развиваются сверхпроводниковая и оптическая технологии, соответственно. “Классическая” сверхпроводниковая электроника также развивается в тех областях, где нужны высокие энергоэффективность и быстродействие.

Начиная с 1990-х годов, в области цифровой сверхпроводниковой электроники доминирует быстрая одноквантовая логика (БОК — RSFQ: Rapid Single-Flux-Quantum logic), в которой физическим представлением информации логического «0» или «1» является отсутствие или наличие кванта магнитного потока в сверхпроводящем контуре с джозефсоновскими контактами. На момент создания, основным преимуществом RSFQ логики перед конкурирующими технологиями являлась высокая тактовая частота [4]. Спустя всего несколько лет после первых реализаций RSFQ схем была экспериментально продемонстрирована рекордно высокая частота работы цифрового делителя на базе логического элемента Т-флип-флоп – 750 ГГц [5], которая остается практически в 8 раз большей максимальной частоты (около 100 ГГц) работы современного полупроводникового аналога.

Другим преимуществом сверхпроводниковой электроники является низкое энергопотребление. В настоящий момент в схемах сверхпроводниковой электроники с высокой энергоэффективностью [6–8] была достигнута энергия переключения $E_{bit} \leq 1$ аДж (в современных полупроводниковых схемах энергия переключения на 3 порядка больше). В работах [9, 10] была продемонстрирована работа 8-ми битного сумматора на основе RQL (Reciprocal-Quantum-Logic) и ERSFQ (energy-efficient Rapid Single-Flux-Quantum) логик с энергопотреблением соответственно 82 и 360 аДж на такт. Реализация 8-битного сумматора на адиабатических сверхпроводниковых цепях, на тактовой частоте 5 ГГц, показала уровень энерговыделения всего 12 аДж на такт [11]. Кроме того, использование определенных адиабатических алгоритмов позволяет достигнуть преимущества энергопотребления на 7 порядков (с учетом затрат энергии на охлаждение) по сравнению с полупроводниковыми аналогами [12]. Такой низкий уровень энергопотребления говорит о прорыве в этой области,

что является крайне важным для создания суперкомпьютеров, ускорителей вычислений и датацентров следующего поколения.

В настоящее время активно изучается возможность создания цифровой логики, позволяющей реализовать и логические операции, и функции памяти. Логические устройства, обладающие свойством внутренней памяти своего состояния, рассматриваются как возможные базовые элементы для построения новых, более эффективных вычислительных систем [13, 14]. Преимущества сверхпроводниковых схем с этой точки зрения были рассмотрены в работе [15].

Сравнительно большие размеры компонентов элементной базы являются одной из основных проблем сверхпроводниковой электроники. Они обусловлены практически исключительным использованием туннельных джозефсоновских контактов, структура сверхпроводник – изолятор – сверхпроводник SIS— Nb/Al-AlOx/Nb, с топологией типа «сэндвич» в качестве активных нелинейных элементов для передачи джозефсоновских вихрей, задающих логическое состояние схем. Критический ток джозефсоновского контакта должен быть больше шумового тока $I_c \gg I_n = (2\pi\Phi_0)k_BT$, где $\Phi_0 = 2.068 \cdot 10^{-15}$ Вб — квант магнитного потока, $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана и $T = 4.2$ К — стандартная рабочая температура. При стандартной плотности критического тока $j_c \sim 0.1$ мА/мкм^2 он составляет $I_c \sim 0.1$ мА, так что контакт имеет микронный (суб-микронный) размер, $a \sim 1$ мкм^2 [A1]. Вместе с этим такой контакт имеет относительно большую собственную емкость $c \geq 50$ фФ/мкм^2, что приводит к необходимости использования шунтирующего сопротивления R_S для предотвращения джозефсоновских осцилляций после прохождения джозефсоноского вихря через контакт. Значение R_S выбирается таким образом, чтобы значение параметра Стюарта-Маккамбера (нормированной ёмкости контакта) было порядка единицы $\beta_c = (2\pi/\Phi_0)j_c c R_s^2 a^2 \approx 1$. Соответствующее сопротивление шунта, $R_S \approx 5$ Ом, обычно реализуется с помощью MoN_x, имеющего сопротивление 5 Ом на квадрат при толщине пленки 60 нм [16]. Учитывая минимальные размеры проводов (0.5 - 1 мкм), шунтирование примерно втрое увеличивает общую площадь контакта. В настоящее время активно изучается возможность использования других материалов для создания джозефсоновских контактов, а также исследуются различные способы модификации геометрии джозефсоновских структур.

Уменьшение размеров джозефсоновского контакта не является единственной проблемой при миниатюризации сверхпроводниковых логических цепей. Теоретическая оценка [17] максимальной плотности схем на основе БОК-логики, использующих геометрическую индуктивность проводов, соответствует современному уровню $\sim 10^7$ джозефсоновских контактов на квадратный сантиметр. Дальнейшее уменьшение ширины линий и интервалов между ними является проблематичным из-за почти экспоненциального роста взаимной индукции и взаимных наводок между схемами [18]. Основной подход к сокращению размеров контуров связан с использованием кинетической индуктивности. В данном случае энергия, запасенная в индуктивности, соответствует кинетической энергии сверхпроводящего тока, а не магнитному полю вокруг провода. Вместе с этим, индуктивность контура цифровой схемы должна быть порядка отношения кванта магнитного потока к критическому току джозефсоновского контакта $L_{cell} = \Phi_0/I_c \sim 20$ пГн для

обеспечения возможности хранения джозефсоновского вихря в ячейке. Это ограничивает масштабирование проводов при использовании их кинетической индуктивности размером ~120 нм [A1].

Для решения проблемы масштабирования недавно было предложено добавить элементы спинтроники в сверхпроводниковые схемы. Одним из таких элементов является джозефсоновская гетероструктура SFS (сверхпроводник – ферромагнетик- сверхпроводник). Основные параметры таких структур могут существенно отличаться от параметров стандартных элементов [19]. Контакты, содержащие магнитные слои, могут обладать, например, сдвигом ток-фазового соотношения и/или изменением его периодичности. Это открывает возможности для создания новых базовых логических элементов [20] и элементов памяти [21–23], а также позволяет создавать компактные сверхпроводящие спиновые вентили, с помощью которых возможно осуществлять оперативное управление функционалом уже изготовленных схем. В ряде работ было показано, что использование магнитных джозефсоновских контактов позволяет уменьшить размеры существующих базовых элементов сверхпроводниковых схем, улучшить энергоэффективность их работы и увеличить их устойчивость к разбросу параметров [24–30].

В настоящее время степень интеграции сверхпроводниковых схем отличается от полупроводниковых на 3 порядка, что делает задачи по уменьшению размеров джозефсоновских контактов и миниатюризации базовых ячеек сверхпроводниковой логики одними из самых актуальных. Данная работа посвящена исследованию и разработке физических основ новых подходов к решению представленных задач.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является разработка новых подходов физической реализации цифровых сверхпроводниковых схем, позволяющих улучшить их масштабируемость. Для достижения данной цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Исследовать масштабируемость существующих типов джозефсоновских переходов. Определить наиболее перспективную гетероструктуру для масштабирования до наноразмеров. Произвести расчет основных физических характеристик выбранной гетероструктуры и оценить возможность ее использования в цифровых сверхпроводниковых схемах.

2. Исследовать возможные пути масштабирования базовых ячеек цепей сверхпроводниковых логик в том числе с использованием магнитных джозефсоновских переходов. Определить наиболее перспективный способ физического представления информации с точки зрения возможного масштабирования.

3. Разработать методы расчета и синтеза цифровых сверхпроводниковых схем с выбранным представлением информации. Спроектировать элементную базу цифровых сверхпроводниковых схем на основе предложенного метода. Исследовать возможность создания многоэлементных цифровых сверхпроводниковых схем с использованием выбранного представления информации.

Объект и предмет исследования

Объектом данного исследования являются такие джозефсоновские переходы и схемотехнические решения для логических цепей цифровых устройств, которые решают проблему миниатюризации цифровых устройств сверхпроводниковой электроники.

Предметом исследования в Главе 2 являются наиболее перспективные для миниатюризации джозефсоновские структуры: SN-N-NS мостики переменной толщины, вычисление их основных параметров, определение их минимально возможных размеров для пары материалов S = Nb, N = Cu.

Предметом исследования в Главе 3 является концепция представления информации в логических сверхпроводящих схемах в виде отличного от нуля скачка разности фаз параметров порядка между S электродами одного или нескольких джозефсоновских контактов логической ячейки цифрового сверхпроводникового устройства.

Научная новизна

1. Впервые получены аналитические выражения для характерного напряжения джозефсоновской SN-N-NS структуры в геометрии мостика переменной толщины для размера области слабой связи порядка или меньше длины когерентности в нормальном металле.

2. Впервые произведен расчёт характерного напряжения $I_C R_N$ при различных значениях параметра подавления сверхпроводимости γ_{BM} на SN интерфейсе для джозефсоновской SN-N-NS структуры в геометрии мостика переменной толщины с размером области слабой связи порядка или меньше длины когерентности в нормальном металле, показывающий возможность физической реализации наноразмерного джозефсоновского контакта.

3. Предложен новый подход схемотехнической реализации цифровых сверхпроводниковых логических схем, отличающийся представлением информации в виде фазы между S электродами джозефсоновского контакта, улучшающим масштабируемость и энергоэффективность.

4. Впервые показана возможность реализации цифровых сверхпроводниковых схем без использования соединительных индуктивностей, в которых передача информации осуществляется путем распространения скачка фазы сверхпроводящего параметра порядка.

5. На основе предложенного подхода разработаны компактные, энергоэффективные библиотечные элементы для проектирования цифровых сверхпроводниковых устройств нового типа: схема базового блока, ячейки памяти с различными механизмами операций записи и считывания, RS и T триггера, схема 8-ми битного сумматора.

Теоретическая и практическая значимость

Можно выделить целый ряд полученных результатов, обладающих высокой теоретической значимостью и представляющих интерес для дальнейшего практического применения в области создания сверхпроводниковой цифровой электроники:

1. разработана модель наноразмерного джозефсоновского контакта для цифровой сверхпроводящей электроники;
2. рассчитан тепловой баланс для наноразмерного джозефсоновского контакта, демонстрирующий его работоспособность в реальных условиях;
3. разработана новая концепция физического представления информации в сверхпроводниковой логике в основе которой лежит бистабильный джозефсоновский контакт. Спроектирован ряд компонентов элементной базы без использования соединительных индуктивностей: базовый блок, ячейки памяти с различными механизмами операций записи и считывания, RS и T триггера, 8-ми битный сумматор;
4. произведено моделирование и подбор рабочих параметров для разработанной элементной базы;
5. рассчитан рабочий диапазон параметров RS-триггера, демонстрирующий работоспособность схемы при разбросе её параметров ±20%.

Результаты по применению магнитных джозефсоновских контактов для улучшения характеристик сверхпроводниковых схем использованы для составления международной дорожной карты для устройств и систем в главе “Криогенная электроника и квантовая обработка информации” в 2021 году [31]. Практическая значимость полученных результатов также подтверждается успешным получением и выполнением проектов Российского Научного Фонда, Российского Фонда Фундаментальных Исследований, Фонда развития теоретической физики и математики «Базис», а именно:

- «Физические и инженерные основы вычислителей не фон Неймановской архитектуры на базе сверхпроводниковой спинтроники» (2020 – 2023)
- «Пост-кремниевая сверхпроводниковая электроника на базе наноразмерных джозефсоновских контактов для систем обработки больших объемов данных» (2020 – 2022)
- «Разработка программного комплекса для моделирования и проектирования элементов искусственных нейросетей на основе макроскопических квантовых эффектов» (2020 – 2021)
- «Вычислительные устройства на базе топологически-неоднородных джозефсоновских структур» (2019 – 2021)
- « Разработка новой элементной базы цифровой сверхпроводниковой электроники с магнитными материалами» (2017 – 2019)
- «Разработка физических основ элементной базы современной сверхпроводниковой электроники и спинтроники» (2015 – 2016)
- «Физические основы создания компактной и быстрой джозефсоновской памяти, сопряженной с энергоэффективной сверхпроводниковой электроникой» (2014 – 2015)

- «Разработка элементной базы для энергоэффективных сверхпроводниковых и полупроводниковых систем детектирования сигнала, приема и обработки информации» (2014 – 2015)

- «Сверхпроводниковый спиновый вентиль на основе джозефсоновского перехода с прослойкой из изолятора, сверхпроводника и ферромагнетика» (2012 – 2013)

Результаты диссертации использовались при создании спецкурсов «Моделирование сверхпроводниковых цепей в пакете MATLAB» и «Современные проблемы приема, передачи и обработки информации» для учебного процесса в МГУ М.В. Ломоносова на Физическом Факультете. Кроме того, программные комплексы и методология моделирования сверхпроводниковых цепей использовались студентами физического факультета в учебном процессе.

Полученные результаты предлагают новый подход в проектировании сверхпроводниковой цифровой электроники, а также задают вектор развития прикладного направления в данной области. В дальнейшем, разработанные схемы могут быть использованы в качестве компонент вычислительных устройств или для управления и контроля ядра квантового компьютера.

Методология диссертационного исследования

Основные теоретические результаты данной работы по разработке, численному расчёту и анализу были получены автором при использовании программной среды MATLAB. Был разработан программный комплекс, осуществляющий автоматическую генерацию дифференциальных уравнений для заданной сверхпроводниковой цифровой схемы. Данные уравнения были записаны в рамках резистивной модели и решались с использованием методов Рунге-Кутта 4-ого и 5-ого порядков, а также метода Гаусса для расчёта систем линейных уравнений.

Для получения зависимости характерного напряжения наноразмерного джозефсоновского контакта от температуры и от параметра подавления для различных геометрических параметров были записаны уравнения Узаделя. Было аналитически получено решение для выбранной структуры, а также получены выражения в предельных случаях. Автором был разработан программный модуль для расчёта зависимостей характерного напряжения по точной и приближенным формулам, использующий метод деления отрезка пополам для решения трансцендентных уравнений и перебор по джозефсоновским фазам для поиска критического тока.

Положения, выносимые на защиту

1. Джозефсоновская гетероструктура, пригодная для создания цифровых сверхпроводниковых схем на ее основе, может быть уменьшена до размеров в несколько десятков тысяч квадратных нанометров (18000 - 30000 нм^2).

2. Информация в схемах одноквантовой логики может быть представлена в виде скачков фазы сверхпроводящего параметра порядка. Данное представление позволяет создавать масштабируемые цифровые схемы, состоящие только из джозефсоновских контактов (без использования индуктивностей проводов).

3. Наиболее компактными схемами одноквантовой логики, состоящими только из джозефсоновских контактов, являются схемы на базе бистабильных джозефсоновских контактов. С их использованием возможна реализация логических элементов, элементов памяти с разрушающим и неразрушающим считыванием, RS и T триггеров, полусумматоров и более сложных компонент вычислительных устройств.

Соответствие положений выбранной специальности

Выносимые на защиту положения относятся к специальности «01.04.15 – Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика». Согласно паспорту, данная специальность включает в себя исследования по следующим направлениям:

1. «Моделирование свойств, физических явлений и технологических процессов в наноматериалах и композитных структурах»;
2. «Физические принципы работы и создание приборов на базе наноматериалов и композитных структур»;
3. «Магнитные свойства наноматериалов и композитных структур».

Выносимые положения на защиту относятся к определённым в паспорте специальности областям исследований. Они включают в себя «моделирование свойств, физических явлений ... в наноматериалах и композитных структурах», «физические принципы работы и создание приборов на базе наноматериалов и композитных структур», «магнитные свойства наноматериалов и композитных структур».

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов определяется использованием известных методов и подходов, а также сравнением результатов с похожими научными работами.

Результаты данной работы обсуждались на семинарах кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, на семинарах лаборатории физики наноструктур отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ, а также на семинарах ВНИИА им. Н. Л. Духова. Кроме того, апробация результатов проводилась на 3 российских и 4 международных конференциях.

Личный вклад автора

Автором был произведен анализ аналитических уравнений для наноразмерного джозефсоновского контакта, а также проведен расчёт его характерного напряжения $I_c R_N$ для различных значений параметра подавления сверхпроводимости на SN границе, γ_{BM}, в диапазоне температур от нуля до критической температуры сверхпроводящих электродов.

Автор участвовал в разработке концепции нового представления информации в сверхпроводниковых логических схемах и в проектировании элементной базы. Им было произведено моделирование, анализ и подбор параметров спроектированных схем. Автор лично разработал программный комплекс, осуществляющий генерацию и решение уравнений для заданных схем.

Помимо этого, автор принимал участие при подготовке докладов и публикаций по результатам исследований.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 6 статьях [A1–A6], индексируемых Web of Science и Scopus, в 1 статье [A7], индексируемой Scopus и в 1 статье [A8], индексируемой RSCI.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из общей характеристики работы, 3 глав и заключения, в котором сформулированы основные результаты диссертационной работы. Общий объем диссертации с приложением составляет 121 страницу, 44 рисунка, 99 формул и 4 таблицы, общее число наименований литературы во всех главах, включая публикации автора — 208.

Содержание работы

Глава 1 посвящена детальному обзору современных проблем сверхпроводниковой электроники и рассмотрению различных цифровых логик и типов джозефсоновских переходов. В ней поднимаются вопросы о масштабируемости джозефсоновского перехода [A1], миниатюаризации базовой ячейки одноквантовой логики и масштабируемости индуктивностей [A2, A2], а также о возможных применениях [A4, A7]. Рассмотрены различные типы джозефсоновских контактов с точки зрения их пригодности для миниатюризации, а также способы реализации контактов с несинусоидальными ток-фазовыми зависимостями [A5, A6, A8]. Несмотря на активные многолетние исследования в данной области, остаётся множество нерешенных задач, таких как:

1. Разработка наноразмерного джозефсоновского контакта для цифровой сверхпроводниковой электроники.

2. Для джозефсоновского контакта, рассмотренного в пункте 1, должен был рассчитан тепловой баланс для подтверждения его работоспособности и эффективности в реальных условиях.

3. Необходима разработка нового подхода физической реализации цифровых сверхпроводниковых логических схем, отличающийся представлением информации в виде скачка фазы сверхпроводящего параметра порядка, улучшающим масштабируемость. Для работы сверхпроводниковых схем, использующих предложенный способ представления информации, необходимо спроектировать компоненты элементной базы.

4. Разрабатываемую элементную базу необходимо минитюаризировать для повышения плотности интеграции сверхпроводниковых цифровых схем. Данную задачу можно решить, заменив в схемах привычные соединительные индуктивности на стеки джозефсоновских контактов и используя бистабильные джозефсоновские переходы для хранения скачка фазы сверхпроводящего параметра порядка, причем при проектировании важно учитывать, что подобные схемы должны работать в широком диапазоне параметров.

В **Главе 2** исследуются параметры наноразмерного джозефсоновского перехода для цифровой сверхпроводниковой электроники. Была рассмотрена модель [A1] перехода

SN-N-NS, содержащая нормальную металлическую пленку, соединяющую два массивных сверхпроводящих электрода длиной $(L - L_b)/2$, расположенных на расстоянии $\pm L_b/2$ от центра этой пленки. Схема такой структуры показана на рисунке 1. При расчете критического тока предполагалось, что грязный предел соблюдается для всех металлов, критическая температура материала N равна нулю, а его ширина W и толщина d_n значительно меньше джозефсоновской глубины проникновения λ_J и длины когерентности $\xi_n = \sqrt{D_n/2\pi T_c}$ соответственно.

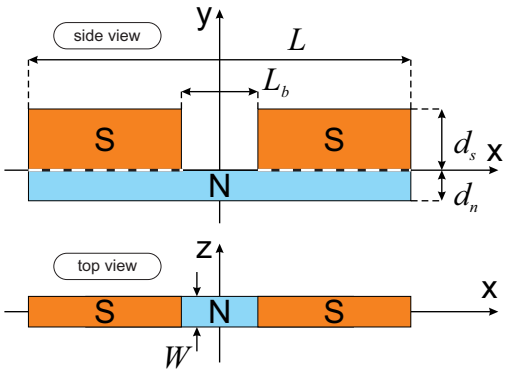

Рисунок 1 — Схема джозефсоновской SN-N-NS структуры в геометрии мостика переменной толщины [A1].

Эффект близости в этой системе был рассмотрен в рамках уравнений Узаделя. Для практически интересного случая, когда характерный масштаб меньше или порядка длины когерентности, $\zeta \lesssim \xi_n$, было получено следующее решение:

$$\frac{eR_nJ_s}{2\pi T_c} = t\sum_{\omega\geq 0}\frac{2Re\Phi_n\,(1+2\eta)}{\sqrt{\omega^2+(Re\Phi_n)^2}}C, \tag{1}$$

где T_c — критическая температура сверхпроводника, t — температура нормированная на T_c, Φ_n — модифицированная нормированная Узаделевская функция Грина, $\omega = (2m+1)T/T_c$ — мацубаровские частоты (m — целое число), $\eta = \sqrt{\gamma_{BM}}/L_b$, γ_{BM} — параметр подавления и C — константа интегрирования.

Характерное напряжение перехода SN-N-NS было получено непосредственно из выражения (1) и его предельных случаев: в пределе малого параметра подавления $\sqrt{\gamma_{BM}} \ll L_b/\xi_n \ll 1$ и в пределе большого параметра подавления $\frac{L_b}{\xi_n} \ll \frac{\gamma_{BM}}{(1+\gamma_{BM})}$. Рисунок 2(a) показывает нормированное произведение I_cR_n, $v_c = eI_cR_n/2\pi k_BT_c$ (где $I_c = \max[J_s(\varphi)]$), как функцию нормированной температуры t. Значение нормирующего коэффициента составляет $2\pi k_BT_c/e \approx 5$ mV для критической температуры ниобия $T_c = 9.2$ K. Длина моста равна $L_b = 0.1\xi_n$. Кривые, полученные в обоих пределах, хорошо согласуются. Представленные зависимости ограничены сверху кривой, полученной с использованием выражения KO-1 [32] для $\gamma_{BM} = 0$, как и ожидалось. Температура, соответствующая падению характерного напряжения на 20% от его максимального значения, уменьшается с $t \approx 0.5$ при малом подавлении, $\gamma_{BM} \leq 0.01$, до $t \leq 0.2$ при $\gamma_{BM} \geq 1$.

На рисунке 2(b) представлена зависимость $v_c(\gamma_{BM})$ для различных температур. На вставке эти зависимости представлены в двойном логарифмическом масштабе. Характерное напряжение увеличивается с понижением температуры, в соответствии с рисунком 2(a).

Для обычно используемой температуры $t \approx 0.5$ характерное напряжение падает от своего максимального значения $v_{c\,\max} \approx 0.46$ на 20% при $\gamma_{BM} \approx 0.06$ и уменьшается вдвое при $\gamma_{BM} \approx 0.25$. Начиная с $\gamma_{BM} \approx 1$, характерное напряжение $v_c(\gamma_{BM})$ падает как $\gamma_{BM}^{-3/2}$ с $v_c < 0.1$. Снижение характерного напряжения с увеличением параметра подавления происходит медленнее с понижением температуры.

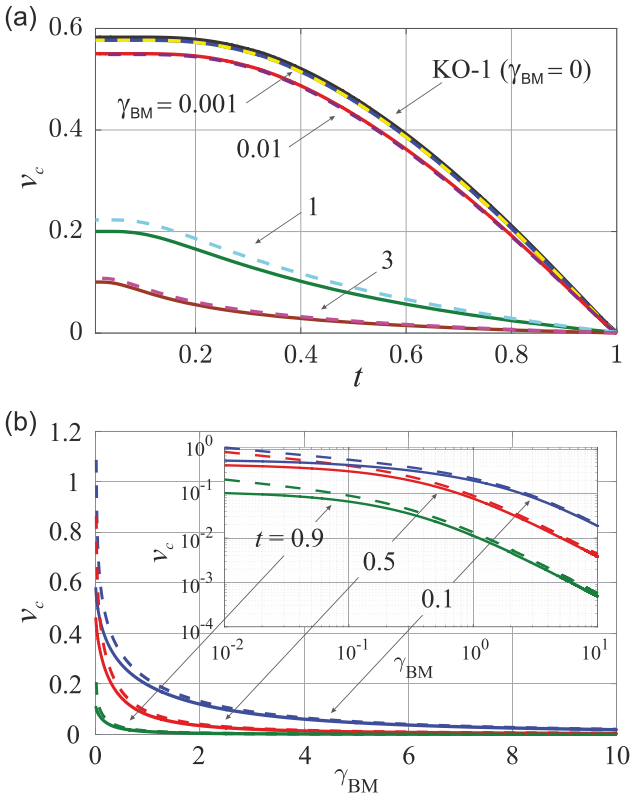

Рисунок 2 — Нормированный параметр $I_c R_n$, $v_c = eI_c R_n / 2\pi k_B T_c$, джозефсоновского перехода SN-N-NS в зависимости от (а) нормированной температуры $t = T/T_c$ и (б) параметра подавления γ_{BM}, рассчитанного с использованием (1) (сплошные линии), в пределе малого параметра подавления (пунктирные линии, $\gamma_{BM} = 0.001,\ 0.01$, панель (а)) и в пределе большого γ_{BM} (пунктирные линии, $\gamma_{BM} = 0.3...3$, панель (а) и панель (b)). Вставка показывает $v_c(\gamma_{BM})$ для $\gamma_{BM} \leq 1$. Верхняя сплошная линия на графике (а) соответствует выражению KO-1 [32]. [A1].

В рассматриваемом приближении характерное напряжение почти не зависит от длины моста вплоть до $L_b \lesssim \xi_n$ для произвольного γ_{BM}. Критический ток I_c тем больше, чем меньше L_b и γ_{BM}. Ток, протекающий через переход ($I \approx I_c$), не должен разрушать сверхпроводимость в его электродах. В работе было рассчитано ограничение на ток в сверхпроводящих электродах с использованием оценок, соответствующих современным экспериментальным данным.

Важным требованием к конструкции цепей на основе перехода SN-N-NS является то, что нормальная составляющая I_n общего тока не должна приводить к перегреву структуры SN-N-NS. В работе было произведено вычисление мощности, рассеянной в контакте в течение тактового периода цифровой схемы, и мощности, которая может быть поглощена окружением. Также был оценён нагрев ниобий-медной структуры SN-N-NS.

Значение параметра подавления $\gamma_{BM} \approx 1$ можно принять за верхний порог для изготовления джозефсоновских переходов, предназначенных для работы при температуре жидкого гелия, $T \approx 4.2$ К. Соответствующее нормированное характерное напряжение $v_c \approx 0.08$ соответствует $I_c R_n \approx 0.4$ мВ и характерной частоте $I_c R_n/\Phi_0 \approx 200$ ГГц. Поскольку тактовая частота сложных схем обычно составляет долю характерной, выбранное значение $\gamma_{BM} \lesssim 1$ обеспечивает возможность работы с частотами до нескольких десятков ГГц.

Увеличение W приводит к нежелательной неоднородности распределения сверхтока в S электродах. Его уменьшение приводит к быстрому подавлению критического тока S пленки. Для снижения критического тока перехода в этом случае может потребоваться применение дополнительных технологических шагов, направленных на снижение прозрачности интерфейса SN.

Одним из возможных способов контролируемого снижения прозрачности интерфейса SN является методика хорошо зарекомендовавшая себя при изготовлении туннельных переходов Nb/Al-AlO_x/Nb [18, 34–36]. В данном случае структуру типа сэндвич Nb/Al можно использовать как обычный металл. Тонкая непроводящая пленка Nb играет роль буферного слоя. Последующий рост Al на таком буфере может способствовать образованию атомарно гладкой поверхности Al, обеспечивающей преимущественно зеркальное отражение проводящих электронов. Требуемая прозрачность границы Nb/Al γ_B может быть достигнута либо естественным путем [37, 38], либо с помощью режима окисления алюминия, ранее использовавшегося при изготовлении туннельных переходов с высоким уровнем J_c [39]. В отличие от двухбарьерных устройств, в переходах SN-N-NS две границы раздела SN окисляются в одних и тех же условиях, сохраняя симметрию структуры.

Уменьшение прозрачности интерфейсов SN соответствует уменьшению характерного напряжения пропорционально $\gamma_{BM}^{-3/2}$ и критического тока пропорционально γ_{BM}^{-2}. В конечном счете, ограничения по ширине определяются качеством сверхпроводящих электродов в окрестности боковых торцов S электродов. Так экспериментально было установлено наличие в их окрестности так называемого “мертвого участка” шириной примерно равной 25 нм, который фактически не участвует в токопереносе. При наличии “мертвых участков” с суммарным размером размером $\sim$ 25 нм ширина SN-N-NS контакта вряд ли может быть меньше 150 нм.

Эффективная площадь перехода SN-N-NS a_{JJ} может быть определена по длине, в пределах которой происходит доминирующий перенос тепла от горячих электронов к сверхпроводящим пленкам $L_{ht} = L_b + 2\xi_n$. Таким образом, $a_{JJ} = 3\xi_n W$ для $L_b = \xi_n$, и при $W = 150$ нм мы получаем $a_{JJ} \approx 18000$ нм^2. Данное значение близко к размерам полупроводникового транзистора a_t, изготовленного в рамках 40 нм технологического процесса, в предположении, что $a_t \approx 50\lambda^2$, где λ — норма технологического процесса [40].

В **Главе 3** была рассмотрена разработка новой концепции проектирования сверхпроводниковых цифровых схем [A2, A3] в основе которого лежат два основных принципа:

- Информация хранится в фазе бистабильного джозефсоновского контакта, а не в наличии/отсутствии кванта магнитного потока в базовой ячейке;

- В разработанных схемах отсутствуют соединительные индуктивности: электрические цепи содержат только джозефсоновские контакты.

Была разработана схема базового блока (рисунок 3(d)), являющегося основополагающим элементом разрабатываемых схем на основе бистабильных джозефсоновских контактов и не содержащих индуктивностей.

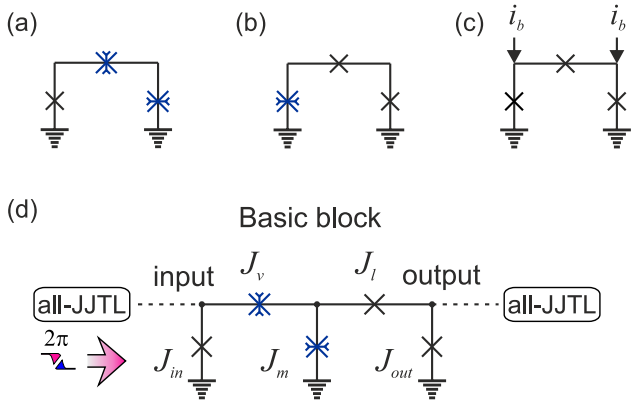

Рисунок 3 — Интерфейсные базовые схемы для (a) записи, (b) считывания. (c) базовая ячейка для линии передачи в схемах, состоящих только из джозефсоновских контактов. Схема базового блока [A2].

На рисунке 3(a) представлена ячейка для записи информации. В данной схеме джозефсоновский 0 контакт слева имеет устойчивые состояния с фазами $\varphi = 2\pi n$, а джозефсоновский 2φ контакт (ток-фазовая зависимость имеет вид $I_s = I_c \cdot sin(2\varphi)$) справа— $\varphi = \pi n$. Соединение в данном случае осуществляется с помощью ещё одного 2φ контакта, обеспечивая бестоковые состояния в ячейке для любых стационарных состояний. В случае соединения индуктивностью вместо джозефсоновского контакта и когда фаза на 2φ контакте равна π по ячейке начинает циркулировать ток $\Delta\varphi/l$, где $\Delta\varphi = 2\pi\Delta\Phi/\Phi_0$ — разность джозефсоновских фаз 2φ и 0 контактов, $l = L/L_J = 2\pi L/(\Phi_0 I_c)$ — индуктивность, нормированная на джозефсоновскую индуктивность.

На схеме 3(b) представлена схема, которая обеспечивает возможность считывания информации. В данном случае, когда фазы на контактах равны, то по ячейке не циркулирует ток, но если фаза на 2φ контакте становится равной π, то по ячейке начинает протекать ток. Отметим, что соединительный джозефсоновский 0 контакт выполняет функцию индуктивности, но ток пропорционален не разности фаз $I_l = \Delta\varphi/l$, а определяется следующим выражением

$$I_{con} = \ddot{\Delta\varphi} + \alpha\dot{\Delta\varphi} + Asin(\Delta\varphi), \tag{2}$$

где $\alpha = \sqrt{\frac{\Phi_0}{2\pi I_c R_N^2 C}}$ — параметр, характеризующий затухание в контакте, I_c — критический ток 0 контакта, R_N — нормальное сопротивление 0 контакта, C — собственная ёмкость 0 контакта, A — нормированный на I_c критический ток соединительного контакта и время нормировано на плазменную частоту $\omega_p = \sqrt{2\pi I_c/C\Phi_0}$.

Базовый блок представляет собой объединение двух ячеек: 3(a) и 3(b). Информация в данном базовом блоке хранится в фазе контакта J_m с параметрами: нормированный

критический ток, B = 1, и параметр затухания, $\alpha = 2$. Контакты J_{in} и J_{out} являются входным и выходным портами схемы. Контакт J_l соединяет основной контакт блока J_m с выходом схемы J_{out}. Его параметры в первую очередь влияют на механизм считывания состояния. Контакт J_v соединяет вход схемы с контактом J_m, играя роль преобразователя фазы на входе блока.

В зависимости от параметров джозефсоновского контакта J_v (B, α) базовый блок может работать в различных режимах: ограничитель, линия передачи, цифровой делитель частоты и генератор. На рисунке 4(а) показана карта параметров (B, α), показывающая реализацию этих режимов.

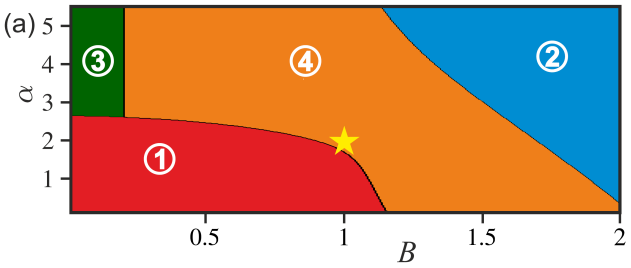

Рисунок 4 — Карта параметров джозефсоновского контакта J_v для реализации различных режимов базового блока: 1 — ограничитель, 2 — линия передачи, 3 — цифровой делитель частоты и 4 — генератор. Звездой на карте показаны значения параметров контакта J_m [A2].

В самом простом случае, когда контакт J_v “слабый” и “быстрый” по сравнению с J_m контактом $B_v < B_m, \alpha_v < \alpha_m$, то входная волна джозефсоновской фазы переключает фазы на контактах J_{in} и J_v на 2π, не оказывая влияния на основную схему.

В противоположном случае, когда $B_v > B_m, \alpha_v > \alpha_m$, контакт J_v переключается медленно, и входящая волна фазы создаёт через него большой ток, переключая контакты J_{in}, J_m и J_{out} на 2π, а затем распространяется в выходную линию передач. Таким образом, в данном случае базовый блок работает в режиме линии передачи.

Более интересные и важные случаи реализуются для промежуточных значений параметров контакта J_v. В случае малых B_v ($B_v < 0.2$) и больших $\alpha_v > \alpha_m > \alpha_{in}$ контакт J_v переключается медленно и за время переключения фаза на контакте J_m меняет значения на π. При изменении фазы на контакте J_m из 0 в π ток через контакт J_l протекает недостаточный для переключения контакта J_{out}, но в контуре $J_m - J_l - J_{out}$ начинает циркулировать ток, и при изменении фазы из π в 2π входной и циркулирующий ток складываются, что приводит к переключению контакта J_{out}. Таким образом, в данном случае базовой блок работает в качестве цифрового делителя частоты пополам: каждый второй импульс проходит на выход схемы.

Если, находясь в режиме делителя частоты пополам, увеличить критический ток B_m контакта J_m, то реализуется 4-ый режим: режим генератора. Входной импульс фазы, также как и в предыдущем случае, произведёт переключение состояния базового блока в состояние π. Однако, увеличение критического тока B_m приводит к тому, что ток смещения с контакта J_{in} и входной линии начинает сильнее оттекать в выходную ячейку. В состоянии π этот ток складывается с циркулирующим током в выходной ячейке. Причём при определенном

значении (вертикальная граница на карте параметров рисунка 4(a)) эта сумма превысит критический ток контакта J_{out}, который перейдёт в резистивное состояние, генерируя импульсы на выход схемы.

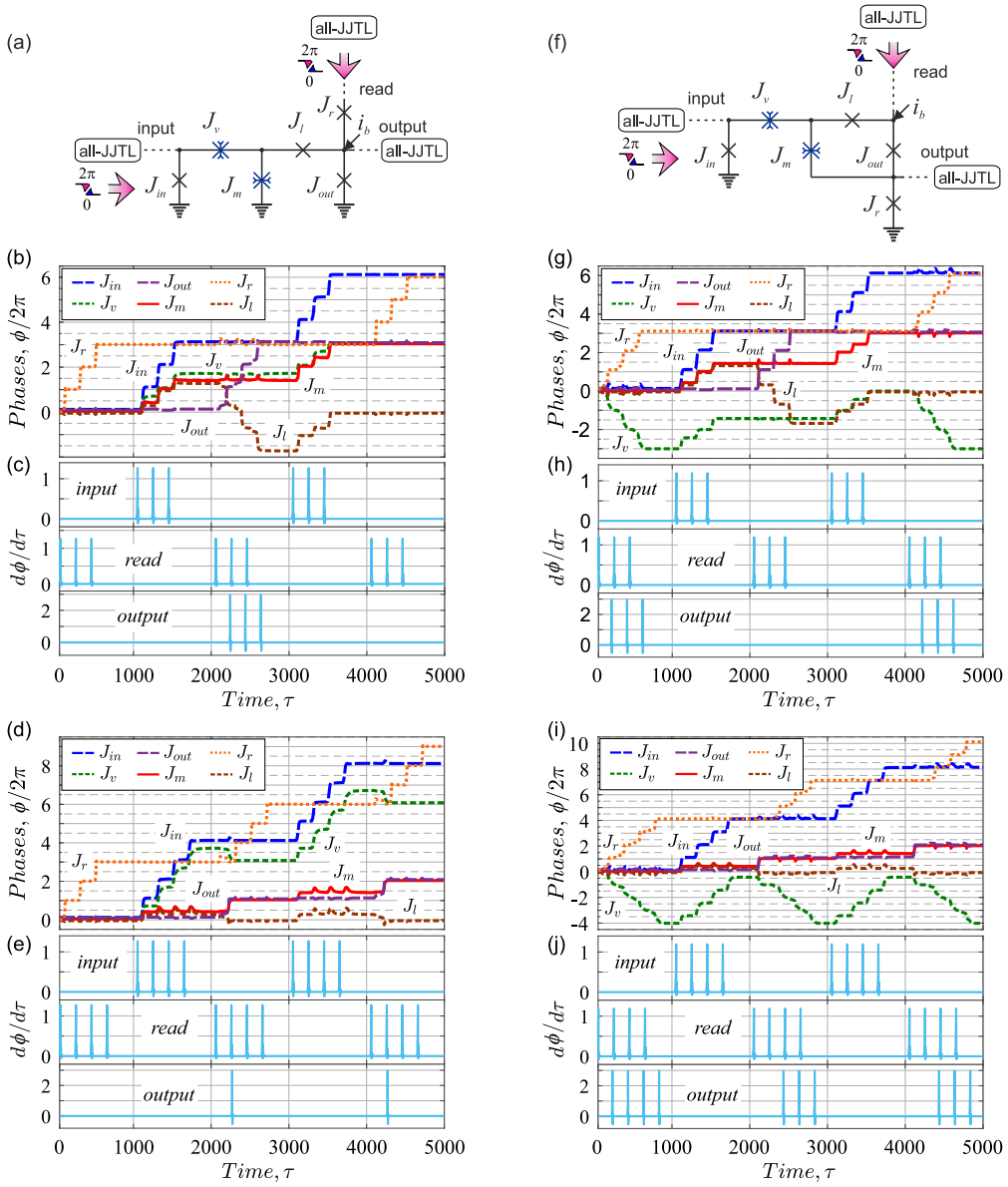

Рисунок 5 — Ячейка памяти на основе базового блока с линией считывания (NDRO — считывание, неразрушающее состояние системы, и DRO — разрушающее считывание) с (a) и без (f) инверсии данных на выходе. Динамика джозефсоновской фазы контактов и импульсы изменения джозефсоновской фазы ($d\varphi/d\tau$) в входной линии, линии считывания и выходной линии для NDRO ((b),(c)), DRO((d),(e)) без инверсии на выходе и NDRO ((g),(h)), DRO((i),(j)) с инверсией на выходе [A2].

Были рассмотрены различные варианты реализации основного запоминающего элемента сверхпроводящих цепей (рисунок 5). Использование индуктивностей в обычных схемах представляет технологические проблемы для глубокого масштабирования схемы. Использование бистабильного джозефсоновского перехода в качестве элемента хранения в этом контексте выглядит многообещающим. В этом случае магнитный поток не

используется в качестве физического представления информации. Это устраняет требования, предъявляемые к индуктивностям, включая возможность полностью избавиться от них. В данной главе представлена методология проектирования цепей без индуктивностей на основе бистабильных джозефсоновских переходов.

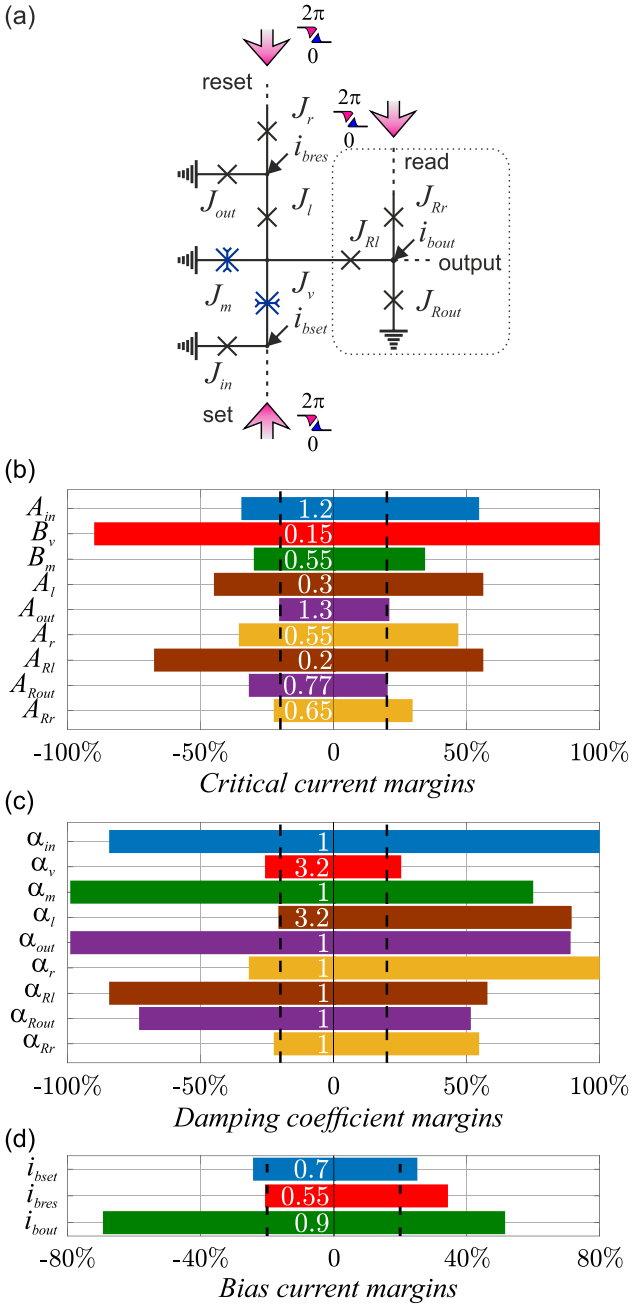

Рисунок 6 — (a) Схема RS-триггера. Схема считывания состояния RS-триггера выделена пунктирной линией. Рассчитанные рабочие диапазоны критических токов (b), параметров затухания α для всех контактов (c), а также рабочие диапазоны для токов питания в схеме (d) [A2].

Концепция была использована при проектировании различных базовых ячеек, таких как управляемый генератор, аналогичный обычному преобразователю SFQ в постоянный ток, T-триггер, D-триггер, RS-триггер, логическое НЕ и полусумматор. Также была разработана более сложная логическая схема 8-разрядного параллельного сумматора. Рабочие диапазоны

значений параметров ячейки RS-триггера с малыми паразитными индуктивностями при низкоскоростном тестировании превышают ±20% при моделировании (рисунок 6). Ячейка была спроектирована с использованием всего нескольких значений коэффициента α у джозефсоновских контактов, что благоприятно для ее реализации.

На примере конструкции ячейки полусумматора (рисунок 7(a)) было показано, что общее количество контактов в цепях, состоящих только из джозефсоновских контактов (all-JJ), может быть меньше, чем в стандартной конструкции. Предлагаемое использование бистабильных джозефсоновских переходов является перспективным с точки зрения устранения необходимости использования квантующих индуктивностей, возможного упрощения схем all-JJ и уменьшения общего количества JJ, что приводит к уменьшению размеров. Поиск технологических путей изготовления бистабильных джозефсоновских контактов и разработка методов обработки информации с использованием схем, основанных на таких соединениях, являются актуальными задачами в этой области исследований.

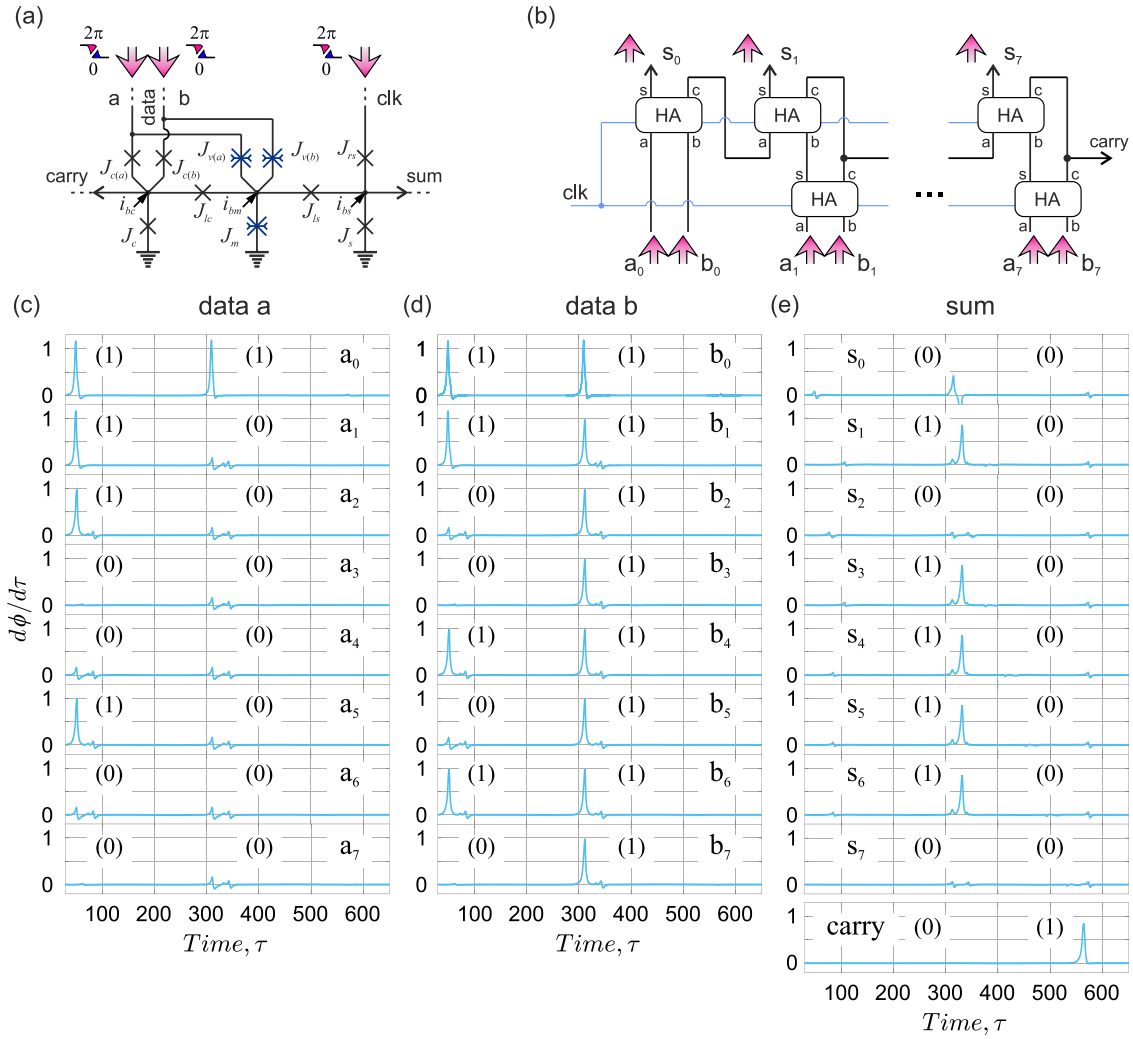

Рисунок 7 — (a) Схема полусумматора. (b) Схема 8-ми битного сумматора с асинхронным переносом. Импульсы напряжения, соответствующие волнам изменения фазы в линиях входных данных a (c), b (d) и в линиях выходных данных (e). Последний график (carry) показывает наличие сигнала переноса на выходе схемы [A2].

В **Заключении** представлены основные результаты и обсуждаются основные итоги работы.

- Переходы SN-N-NS с геометрией моста переменной толщины перспективны для миниатюризации сверхпроводниковых цифровых схем. Представленный теоретический анализ показывает, что значение перехода $I_c R_n$ достигает субмилливольтного уровня даже при невыполнении жестких граничных условий на границах раздела SN. Согласно полученным аналитическим выражениям, зависимость тока через переход от джозефсоновской фазы близка к синусоидальной при рабочей температуре $T/T_c \approx 0,5$. Это позволяет использовать стандартные средства автоматизированного проектирования для моделирования сверхпроводящих цифровых схем.

- На основании имеющихся экспериментальных данных [33] можно утверждать, что оптимальная ширина структуры SN-N-NS лежит вблизи 250 нм. Для пары материалов, таких как Nb и Cu, при $W = 250$ нм, $d_n = 10$ нм и $L_b = 40$ нм характерное напряжение $I_c R_n \approx 0.7$ мВ достигается для $I_c \approx 0.53$ мА и $R_n \approx 1.3$ Ом.

- Предложенный вариант топологии, мостик переменной толщины SN-N-NS, может быть изготовлен с использованием широко используемых материалов, таких как Nb, MoRe, V в качестве сверхпроводника и Cu, Au, Al в качестве нормального металла. Предполагая тактовый период $T_{clk} = 40$ пс (тактовая частота, $f_{clk} = 25$ ГГц), Рассеянная энергия в течение тактового периода составляет $E = I_c \Phi_0 \approx 1.1$ аДж и рассеянная мощность равна $P = E/T_{clk} \approx 2.7 \times 10^{-8}$ W.

- В интересующем температурном диапазоне $T \approx 0.5 T_c$ горячие электроны эффективно диффундируют из области слабой связи в массивные сверхпроводящие пленки, тем самым устраняя влияние неравновесного состояния электронной подсистемы на рабочий режим перехода SN-N-NS. Снижение рабочей температуры приводит к экспоненциальному подавлению канала теплопередачи от горячих электронов к S-электродам. Это может привести к заметной разнице между электронной и фононной температурами, особенно в диапазоне мК температур. В соответствии с тепловым балансом рассеянная в переходе SN-N-NS мощность может быть поглощена S-электродами и фононами N-пленки с последующим частичным переносом мощности в подложку. Произведенная оценка нагрева структуры составляет $\delta T \approx 0.13$ K. Такое повышение температуры может привести к незначительному уменьшению величины критического тока на величину $\left|\frac{\delta I_c}{I_c}\right| = \left|\frac{\partial v_c}{v_c \partial t}\right| \frac{\delta T}{T_c} \approx 3.5\%$. Полученное отклонение критического тока представляется приемлемым с точки зрения стандартной оптимизации критических токов джозефсоновских переходов в цифровых схемах в пределах $\pm 20\%$ и стандартного технологического разброса критических токов, $\delta I_{ctec} \approx 3\%$.

- Использование бистабильных джозефсоновских контактов устраняет необходимость в хранении квантов магнитного потока и, следовательно, необходимость в

технологической реализации квантующих индуктивностей. Индуктивность может использоваться в качестве соединительного элемента или не использоваться вообще. Последнее приводит к тому, что характеристики схемы определяются только параметрами джозефсоновских переходов. Схемы, состоящие только из джозефсоновских контактов, могут быть спроектированы с использованием всего нескольких значений параметров α, что является перспективным для их реализации. В то время как схемы без индуктивностей могут быть реализованы с обычными 0- и π- контактами, использование бистабильных джозефсоновских переходов значительно уменьшает общее количество джозефсоновских контактов.

- Была разработана методология проектирования цепей без индуктивностей на основе бистабильных джозефсоновских переходов, которая была использована при проектировании различных базовых ячеек, таких как управляемый генератор, аналогичный обычному преобразователю SFQ в постоянный ток, T-триггер, D-триггер, RS-триггер, логическое HE, полусумматор. Также была спроектирована более сложная логическая схема 8-разрядного параллельного сумматора.

Таким образом, задачи диссертационного исследования решены полностью. Дальнейшее развитие проводимых в данной работе исследований должно ориентироваться на решение следующих задач:

- Изготовление джозефсоновских SN-N-NS структур на основе полученных теоретических результатов, полученных в данной работе.
- Разработка сверхпроводниковых цепей на основе данной концепции с использование контуров, содержащих π-контакты и образующих бистабильную систему.
- Экспериментальная реализация схем на предложенной концепции проектирования сверхпроводниковых цепей в данной работе.

Публикации автора по теме диссертации

В рецензируемых журналах, индексируемых Web of Science и SCOPUS:

[A1] I. I. Soloviev, S. V. Bakurskiy, V. I. Ruzhickiy, N. V. Klenov, M. Yu Kupriyanov, A. A. Golubov, O. V. Skryabina, and V. S. Stolyarov. “Miniaturization of Josephson Junctions for Digital Superconducting Circuits”. Physical Review Applied, 16(4):044060, 2021. **DOI**: 10.1103/PhysRevApplied.16.044060. **IF**: 4,985

[A2] I. I. Soloviev, V. I. Ruzhickiy, S. V. Bakurskiy, N. V. Klenov, M. Yu Kupriyanov, A. A. Golubov, O. V. Skryabina, and V. S. Stolyarov. “Superconducting circuits without inductors based on bistable josephson junctions”. Physical Review Applied, 16(1):014052, 2021. **DOI**: 10.1103/PhysRevApplied.16.014052. **IF**: 4,985

[A3] V. I. Ruzhickiy, A. A. Maksimovskaya, I. I. Soloviev, S. V. Bakurskiy, and N. V. Klenov. “Generation and propagation of fractional fluxons in josephson media”. Journal of Experimental and Theoretical Physics, 132(5):800–809, 2021. **DOI**: 10.1134/S1063776121030171. **IF**: 1,29

[A4] I. I. Soloviev, V. I. Ruzhickiy, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, and M. Yu Kupriyanov. “A linear magnetic flux-to-voltage transfer function of a differential dc squid”. Superconductor Science and Technology, 32:074005, 2019. **DOI**: 10.1088/1361-6668/ab0d73. **IF**: 3,22

[A5] S. V. Bakurskiy, V. I. Filippov, V. I. Ruzhickiy, N. V. Klenov, I. I. Soloviev, M. Yu Kupriyanov, and A. A. Golubov. “Current-phase relations in sisfs junctions in the vicinity of 0-π transition”. Physical Review B, 95(9):094522–1–094522–11, 2017. **DOI**: 10.1103/PhysRevB.95.094522. **IF**: 4,036

[A6] N. V. Klenov, V. I. Ruzhickiy, and I. I. Soloviev. “Switching between the stable states of a long josephson φ-junction”. Moscow University Physics Bulletin, 70(5):404–410, 2015. **DOI**: 10.3103/S0027134915050070. **IF**: 0,672

В рецензируемых журналах, индексируемых SCOPUS:

[A7] M. V. Bastrakova, N. V. Klenov, V. I. Ruzhickiy, and A. M. Satanin. “Propagation of short current pulses in josephson transition line and ultrafast qubit control”. Journal of Physics: Conference Series, 1410:012142, 2019. **DOI**: 10.1088/1742-6596/1410/1/012142. **SJR**: 0,21

В рецензируемых журналах, индексируемых RSCI:

[A8] Н. В. Кленов, С. В. Бакурский, В. И. Ружицкий, А. В. Кузнецов, К. Е. Нестеров, С. Ж. Герасимова, and И. И. Соловьев. “Сверхпроводящие φ-элементы на основе джозефсоновских структур с ферромагнитными слоями”. Журнал радиоэлектроники, 5, 2013. **ИФ РИНЦ**: 0,412

Список литературы

[1] Simonite, T. “Intel Puts the Brakes on Moore’s Law”, MIT Tech. Review, 23 March 2016.

[2] Simonite, T. “Moore’s Law Is Dead. Now What?”, MIT Tech, Review, 13 May 2016.

[3] Colwell, R. “The Chip Design Game at the End of Moore’s Law”, Hot Chips, August 2013.

[4] K. K. Likharev, “Superconductor digital electronics”, Physica C 482, 6, 2012.

[5] W. Chen, A. V. Rylyakov, V. Patel, J. E. Lukens, K. K. Likharev, “Superconductor digital frequency divider operating up to 750 GHz”, Appl. Phys. Lett. 73, 2817, 1998.

[6] O. A. Mukhanov, “Energy-Efficient Single Flux Quantum Technology”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 760, 2011.

[7] Q. P. Herr, A. Y. Herr, O. T. Oberg, A. G. Ioannedis, J. “Ultra-low-power superconductor logic”, Appl. Phys. 109, 103903, 2011.

[8] M. Tanaka, M. Ito, A. Kitayama, T.Kouketsu and A. Fujimaki, Jpn. J. “18-GHz, 4.0-aJ/bit operation of ultra-low-energy rapid single-flux-quantum shift registers”, Appl. Phys., Part I 51, 053102, 2012.

[9] A. Y. Herr, Q. P. Herr, O. T. Oberg, O. Naaman, J. X. Przybysz, P. Borodulin and S. B. Shauck, J. “An 8-bit carry look-ahead adder with 150 ps latency and sub-microwatt power dissipation at 10GHz”, Appl. Phys. 113, 033911, 2013.

[10] A. F. Kirichenko, I. V. Vernik, J. A. Vivalda, R. T. Hunt and D. T. Yohannes, “ERSFQ 8-Bit Parallel Adders as a Process Benchmark”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 25, 1300505, 2015.

[11] N. Takeuchi, Y. Yamanashi, N. Yoshikawa, J. “Adiabatic quantum-flux-parametron cell library adopting minimalist design”, Appl. Phys. 117, 173912, 2015.

[12] Q. Xu, N. Yoshikawa, C. L. Ayala, N. Takeuchi, T. Ortlepp, “International Superconductive Electronics Conference (ISEC)”, 2015 IEEE 15th ISEC, July 6 - 9, 1-3, 2015.

[13] M. Di Ventra and Y. V. Pershin, “The parallel approach”, Nat. Phys. 9, 200, 2013.

[14] J. J. Yang, D. B. Strukov, and D. R. Stewart, “Memristive devices for computing”, Nat. Nanotechnol. 8, 13, 2012.

[15] V. K. Semenov, Magic Cells and Circuits: “New Convergence of Memory and Logic Functions in Superconductor Devices”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 23, 1700908, 2013.

[16] “Niobium process”, available at http://www.hypres.com/foundry/niobium-process/

[17] S. K. Tolpygo, V. Bolkhovsky, R. Rastogi, S. Zarr, A. L. Day, T. J. Weir, A. Wynn, and L. M. Johnson, “Developments toward a 250-nm, fully planarized fabrication process with ten superconducting layers and self-shunted Josephson junctions”, in 2017 16th International Superconductive Electronics Conference (ISEC), 2018.

[18] S. K. Tolpygo, V. Bolkhovsky, D. E. Oates, R. Rastogi, S. Zarr, A. L. Day, T. J. Weir, A. Wynn, and L. M. Johnson, “Superconductor electronics fabrication process with MoNx kinetic inductors and self-shunted Josephson junctions”, IEEE Trans. Appl. Supercond. 28, 1100212, 2018.

[19] I. I. Soloviev, N. V. Klenov, S. V. Bakurskiy, V. V. Bol’ginov, V. V. Ryazanov, M. Yu. Kupriyanov, and A. A. Golubov, “Josephson magnetic rotary valve”, Appl. Phys. Lett. 105, 242601, 2014.

[20] A. V. Ustinov and V. K. Kaplunenko, J. “Rapid single-flux quantum logic using π-shifters”, Appl. Phys. 94, 5405, 2003.

[21] M. I. Khabipov, D. V. Balashov, F. Maibaum, A. B. Zorin, V. A. Oboznov, V. V. Bolginov, A. N. Rossolenko, and V. V. Ryazanov, "A single flux quantum circuit with a ferromagnet-based Josephson π-junction", Supercond. Sci. Technol. 23, 045032, 2010.

[22] S. Narayana and V. K. Semenov, ISEC'07: Extended Abstracts of 11th Int. Supercond. Electron. Conf. (O-A01, Washington, DC, June 2007).

[23] O. Mielke, T. Ortlepp, P. Febvre and F. Uhlmann, "Reduced Probability of Noise Introduced Malfunction in RSFQ Circuits by Implementing Intrinsic π-Phaseshifter", IEEE Trans. Appl. Supercond. 19, 621, 2009.

[24] O. Wetzstein, T. Ortlepp, R. Stolz, J. Kunert, H.-G. Meyer and H. Toepfer, "Comparison of RSFQ logic cells with and without phase shifting elements by means of BER measurements", IEEE Trans. Appl. Supercond. 21, 814, 2011.

[25] T. Ortlepp, O. Mielke, J. Kunert and H. Toepfer, "Improved operation range of digital superconductive electronics by implementing passive phase shifters", Physica C 470, 1955, 2010.

[26] A. K. Feofanov, V. A. Oboznov, V. V. Bol'ginov, J. Lisenfeld, S. Poletto, V. V. Ryazanov, A. N. Rossolenko, M. Khabipov, D. Balashov, A. B. Zorin, P. N. Dmitriev, V. P. Koshelets and A. V. Ustinov, " of superconductor/ferromagnet/ superconductor π-shifters in superconducting digital and quantum circuits", Nat. Phys. 6, 593, 2010.

[27] L. B. Ioffe, V. B. Geshkenbein, M. V. Feigelman, A. L. Fauchère, and G. Blatter, "Environmentally decoupled sds -wave Josephson junctions for quantum computing", Nature 398, 679, 1999.

[28] G. Blatter, V. B. Geshkenbein, and L. B. Ioffe, "Design aspects of superconducting-phase quantum bits", Phys. Rev. B 63, 174511 (2001).

[29] C. Bell, G. Burnell, C.W. Leung, E. J. Tarte, D.-J. Kang, and M. G. Blamire, "Controllable Josephson current through a pseudospin-valve structure", Appl. Phys. Lett. 84, 1153, 2004.

[30] F. S. Bergeret, A. F. Volkov and K. B. Efetov, "Odd triplet superconductivity and related phenomena in superconductor-ferromagnet structures", Rev. Mod. Phys. 77, 1321, 2005.

[31] Holmes, D. Scott [Chair] et al., "International roadmap for devices and systems. Cryogenic electronics and quantum information processing", 2021

[32] I. O. Kulik and A. N. Omelyanchuk, "Contribution to themicroscopic theory of the Josephson effect in superconducting bridges", JETP. Lett.21, 96, 1970.

[33] S. K. Tolpygo, V. Bolkhovsky, R. Rastogi, S. Zarr,E. Golden, T. J. Weir, L. M. Johnson, V. K. Semenov,and M. A. Gouker1, "A 150-nm node of an eight-Nb-layer fully planarized process for superconductor electronics", presentation wk1eor3b-01 at applied superconductivity conference 2020 virtual conference (American Physical Society, 2020).

[34] S. K. Tolpygo, V. Bolkhovsky, R. Rastogi, S. Zarr, A. L. Day, E. Golden, T. J. Weir, A. Wynn, and L. M. Johnson, "Advanced fabrication processes for superconductor electronics: Current status and new developments", IEEE Trans. Appl. Supercond. 29, 1102513, 2019.

[35] S. K. Tolpygo, V. Bolkhovsky, S. Zarr, T. J. Weir, A. Wynn, A. L. Day, L. M. Johnson, and M. A. Gouker, "Properties of unshunted and resistively shunted Nb/AlOx-Al/Nb Josephson junctions with critical current densities from 0.1 to 1 mA/μm^2", IEEE Trans. Appl. Supercond. 27, 1100815, 2017.

[36] S. K. Tolpygo, "Superconductor digital electronics: Scalability and energy efficiency issues", Low Temp. Phys.42,361, 2016.

[37] A. Zehnder, P. Lerch, S. P. Zhao, T. Nussbaumer, E. C. Kirk, and H. R. Ott, "Proximity effects in Nb/Al-AlOxAl/Nb superconducting tunneling junctions", Phys. Rev. B 59, 8875, 1999.

[38] G. Brammertz, A. Poelaert, A. A. Golubov, P. Verhoeve,A. Peacock, and H. Rogalla, "Generalized proximity effect model in superconducting bi- and trilayer films", J. Appl.Phys.90, 355, 2001.

[39] S. Tolpygo, A. Brinkman, A. Golubov, and M. Kupriyanov, "Transport properties of SINIS junctions with high-current density", IEEE Trans. Appl. Supercond. 13, 138, 2003.

[40] M. Ansari, H. Afzali-Kusha, B. Ebrahimi, Z. Navabi,A. Afzali-Kusha, and M. Pedram, "A near-threshold 7T SRAM cell with high write and read margins and lowwrite time for sub-20nm FinFET technologies", Integr.VLSI J.50, 91, 2015.