

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук Соловьева Игоря Игоревича

на тему: «Сверхпроводящие квантовые интерферометры для устройств

приема сигнала и обработки информации»

по специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур,

атомная и молекулярная физика»

Диссертационная работа И. И. Соловьева посвящена развитию теории сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИДов) и разработке на их основе элементной базы устройств приема сигнала и обработки информации. В ней были предложены аналитические методы расчета основных характеристик СКВИДов постоянного тока, изготовленных из низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), с величиной индуктивности контура соответствующей реальным устройствам. К ним относится аналитическое описание отклика напряжения СКВИДа на магнитный сигнал как для случая симметричного СКВИДа, так и для случая СКВИДа с асимметрией индуктивных плеч интерферометра, критических токов и нормальных сопротивлений джозефсоновских контактов. Так же для симметричного и асимметричного случая представлено описание зависимости циркулирующего тока от магнитного потока в резистивном состоянии. Разработан метод определения тока, циркулирующего в СКВИДЕ в сверхпроводящем состоянии, для произвольного значения индуктивности интерферометра, а также метод определения критического тока СКВИДа для случая произвольной асимметрии его параметров. На базе развитого метода аналитического расчета отклика напряжения СКВИДа предложены методы линеаризации передаточной характеристики интерферометра, обеспечивающие существенное уменьшение гармонического искажения сигнала без использования обратной связи. Исследованы физические процессы, происходящие в сверхпроводящих интерферометрах с

распределенными джозефсоновскими контактами. В частности разработано аналитическое описание релятивистского процесса рассеяния флаксонов в длинных джозефсоновских переходах на коротких (по сравнению с размером флаксона) неоднородностях тока питания, создаваемых внешним магнитным полем. Проведено изучение динамики распространения флаксонов в дискретных джозефсоновских передающих линиях в присутствие флюктуаций и показано влияние черенковского излучения флаксона на стандартное отклонение времени его распространения. Представлено исследование интерферометрической схемы, соответствующей одиночному джозефсоновскому контакту с неоднородной областью слабой связи, содержащей ферромагнитный слой. Показано, что на базе данной структуры возможно создание компактных джозефсоновских спиновых вентиляй с непрерывной модуляцией критического тока в широком диапазоне. Проведено исследование динамики сверхпроводящих интерферометров, используемых в логических схемах адиабатической сверхпроводниковой логики. Показано, что использование магнитных джозефсоновских контактов в их конструкции позволяет заметно улучшить их рабочие характеристики. Предложена конструкция компактного интерфейсного усилителя на базе цепочки СКВИДов с многоквантовым откликом на одноквантовый сигнал, сопрягающего цепи сверхпроводниковой электроники с цифровыми полупроводниковыми устройствами.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью как более глубокого понимания физики функционирования сверхпроводящих интерферометрических схем, так и с возможностью создания на их основе целого ряда практических устройств.

В ходе выполнения работы диссидентом разработаны оригинальные методы расчета сверхпроводящих интерферометрических схем и создания на их основе компонент элементной базы сверхпроводниковой электроники, а также получен ряд важных новых результатов. В частности:

- получены аналитические выражения, описывающие отклик напряжения и тока, а также критический ток двухконтактного НТСП СКВИДа с индуктивностью контура в интервале $0 \leq L \leq \Phi_0/I_c$.
- получены аналитические выражения, описывающие релятивистскую динамику рассеяния флаксона на коротких (по сравнению с размером флаксона) неоднородностях тока питания в длинном джозефсоновском контакте, и развит метод использования описанного процесса рассеяния для детектирования слабых магнитных полей.
- показано влияние черенковского излучения на стандартное отклонение времени распространения флаксона (джиттер) в дискретной джозефсоновской передающей линии в присутствии флуктуаций.
- представлены методы линеаризации отклика напряжения на магнитный поток джозефсоновских структур на базе СКВИДов, позволяющие существенно уменьшить суммарное гармоническое искажение сигнала без использования обратной связи.
- предложена компактная схема интерфейсного усилителя на базе цепочки СКВИДов с многоквантовым откликом на одноквантовый сигнал.
- предложена интерферометрическая схема спинового вентиля на базе джозефсоновского контакта с пространственно-неоднородной областью слабой связи, содержащей единственный ферромагнитный слой, отличающаяся непрерывной модуляцией критического тока в больших пределах.
- предложен метод оптимизация элементарных ячеек адиабатической сверхпроводниковой логики посредством привнесения в их схемы магнитных джозефсоновских контактов.

Полученные в диссертации результаты важны как для понимания фундаментальных аспектов физики процессов в интерферометрических сверхпроводниковых схемах, так и для создания практических устройств в

самых разных областях применения, начиная от геофизики и медицины, и заканчивая data-центрами и суперкомпьютерами, которые защищены в 12 патентах.

Основные результаты, положенные в основу диссертации, являются оригинальными и получены автором впервые. Обоснованность и достоверность выводов и результатов диссертационной работы обеспечены согласием теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований, проведенных автором, и данными работ других авторов, посвященных исследованию аналогичных систем и устройств. Работы И. И. Соловьева получили широкое международное признание. Они докладывались на 37 международных конференциях, и опубликованы в 49 работах, из которых 45 в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, в том числе, в высокорейтинговых физических журналах: Phys. Rev. B (импакт фактор 3.836) – 3 работы, Appl. Phys. Lett. (импакт фактор 3.411) – 4 работы, Belstein J. Nanotechnol. (импакт фактор 3.127) – 2 работы, Supercond. Sci. Technol. (импакт фактор 2.878) – 7 работ, Phys. Rev. E (импакт фактор 2.366) – 1 работа, IEEE Trans. Appl. Supercond. (импакт фактор 1.583) – 11 работ, Письма в ЖЭТФ (импакт фактор 1.235) – 2 работы. По данным Web of Science, хирш-фактор И. И. Соловьева равен 14, среднее количество ссылок на статью 8.26, общее количество ссылок на его работы составляет 504.

Диссертация состоит из общей характеристики работы, 6 глав и заключения. Она изложена на 319 страницах, включая 156 рисунков и 6 таблиц.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященный принципам функционирования аналоговых, аналого-цифровых и цифровых схем на базе СКВИДов и их применению. Рассмотрены основные параметры СКВИДов, используемых в качестве высокочувствительных преобразователей магнитного потока в напряжение и методы их улучшения. Рассмотрены различные варианты конструкций сверхпроводниковых аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Показано, что характеристики сверхпроводящего

АЦП на данный момент ограничены приемным трактом, а именно следующим за антенной предусилителем. Отмечено, что создание высоколинейной приемной СКВИД-системы гигагерцового диапазона частот, работающей без обратной связи, для модернизации приемной цепи является актуальной задачей. Рассмотрены различные логики построения цифровых схем на базе СКВИДов и описаны основные направления их развития, включающие улучшение энергоэффективности и функциональной плотности.

Во второй главе автором представлен вывод аналитических выражений для описания откликов напряжения и тока НТСП СКВИДа на магнитный поток, и определения его критического тока в приближении нулевой емкости джозефсоновских контактов и отсутствии флюктуаций. Основной метода являлось разложение разностной фазы джозефсоновских контактов СКВИДа на медленно и быстро меняющиеся части. Найден отклик напряжения и тока для малой и большей индуктивности контура. Получены аналитические выражения для случая СКВИДа с асимметрией критических токов и нормальных сопротивлений джозефсоновских переходов и произвольного неравенства индуктивных плеч. Представлен метод описания тока, циркулирующего в СКВИДе в сверхпроводящем состоянии с произвольным значением индуктивности интерферометра, а также алгоритм расчета критического тока СКВИДа для произвольной асимметрии критических токов джозефсоновских переходов.

Третья глава посвящена разработке методов линеаризации отклика напряжения СКВИД-структур на магнитный поток. С использованием аналитических выражений, полученных во второй главе, показано, что отклик напряжения СКВИДа вблизи значения приложенного магнитного потока, равного $\Phi_0/2$, близок к параболической форме. Автором предлагается использование дифференциального включения СКВИДов, при котором нелинейное искажение сигнала может составлять всего десятитысячные доли процента. Описано изготовление и измерение экспериментальных образцов,

результаты которых качественно подтверждают эффективность предложенных методов линеаризации.

В четвертой главе автор описывает различные варианты конструкций интерфейсных усилителей на базе цепочек СКВИДов с использованием постоянного тока питания. Выделяется два режима работы, при которых цепочка находится в сверхпроводящем или резистивном состоянии. Посредством численного расчета показано, что оптимизированная схема позволяет усиливать одноквантовый цифровой сигнал, следующий с частотой 1 ГГц, до уровня напряжения 2 мВ на 50-омной нагрузке, что вполне достаточно для связи с цифровыми полупроводниковыми устройствами.

Пятая глава посвящена рассмотрению процессов в сверхпроводниковых интерферометрах, в которых вместо сосредоточенных используются длинные джозефсоновские переходы или дискретные джозефсоновские передающие линии (ДПЛ). Автором представлен аналитический метод описания релятивистского процесса рассеяния флаксона на коротких (по сравнению с размером флаксона) неоднородностях тока питания, создаваемых магнитным полем измеряемого объекта. С использованием данного метода проведена оптимизация классической схемы баллистического детектора, а также предложена симметричная схема детектора, в которой обе ДПЛ связаны с измеряемым объектом, что позволило увеличить отклик детектора и отношение сигнала к шуму в разы, параллельно уменьшив обратное влияние на детектируемый объект более чем на порядок. Рассмотрен процесс влияния плазменных колебаний, возникающих при взаимодействии движущегося флаксона с периодическим потенциалом дискретных ДПЛ (черенковским излучением), на стандартное отклонение времени прохождения флаксона по ДПЛ (джиттер). Показано, что переход от режима распространения одиночного флаксона к так называемому режиму «бегущей фазы», соответствующему множественному образованию флаксон-антифлаксонных пар, сопровождается резким ростом джиттера.

В шестой главе автор рассматривает возможность создания и использования компонент элементной базы сверхпроводниковой электроники с применением ферромагнитных материалов. Предложена интерферометрическая схема спинового вентиля на базе джозефсоновского перехода с пространственно-неоднородной областью слабой связи, соответствующая эффективному контуру джозефсоновского 0-пи интерферометра, критический ток которого соответствует величине и направлению намагниченности F-слоя. Показано, что при оптимальной величине намагниченности, соответствующей заданию в джозефсоновский контакт 0.7 кванта магнитного потока, поворот намагниченности на 90 градусов сопровождается непрерывным изменением критического тока структуры на порядок. Данный эффект сохраняется при масштабировании. Предложен метод оптимизации базовых ячеек адиабатической сверхпроводниковой логики посредством добавления в их схемы джозефсоновских пи-контактов.

В заключении суммированы основные выводы диссертации.

Решение сформулированных в диссертации задач имеет практическое значение. Автором разработаны методы расчета и анализа различных типов сверхпроводящих интерферометрических схем, которые учитывают широкий спектр реализующихся в них физических процессов, что позволяет создавать и оптимизировать конструкции практических устройств на их основе, а также проводить непосредственное сравнение полученных результатов с результатами экспериментальных исследований. Полученные в диссертации результаты будут полезны физикам и инженерам, которые занимаются разработкой устройств слаботочной сверхпроводимости.

По содержанию диссертации имеется несколько замечаний.

1. Неоднородность слабой связи джозефсоновского перехода, на базе которого предложен джозефсоновский поворотный вентиль, кроме способа, описанного в диссертационной работе, может быть реализована также посредством переменной толщины ферромагнитного

слоя. Соответствующие переходы, сегменты которых обладают стандартной ток-фазовой зависимостью (ТФЗ) и ТФЗ, сдвинутой на пи, известны в литературе (см., например, M. Weides et al., Supercond. Sci. Technol., 23, 095007 (2010)). В работе не обоснован выбор нового способа создания неоднородности слабой связи.

2. В ходе оптимизации параметров ячеек адиабатической логики рассчитывалась динамика одиночных ячеек. В то же время, в адиабатической схеме на исследуемую ячейку будут влиять связанные с нею цепи. Более правильным было бы проведение оптимизации параметров ячейки в «естественном окружении».
3. Для более точного задания тока питания в дифференциальной схеме, обладающей линейным откликом напряжения на магнитный сигнал, предлагалось использование параллельных цепочек вместо одиночных СКВИДов. Однако, сравнение достижимой линейности в дифференциальной схеме с одиночными СКВИДами и параллельными цепочками с реалистичными параметрами проведено не было, что не позволяет сделать вывод о целесообразности перехода к использованию более сложных структур.
4. Замечания по терминологии и грамматике. В работе термин «сверхпроводящий» используется по отношению к приборам и устройствам: «сверхпроводящий процессор», «сверхпроводящий кубит», «сверхпроводящий интерферометр», тогда как следует использовать «сверхпроводящий провод, сверхпроводящий слой, сверхпроводящее состояние», но «сверхпроводниковый прибор», «сверхпроводниковое устройство». Причастные и деепричастные обороты не всегда выделены запятыми.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М. В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации

соответствует паспорту специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о докторской совете Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель И. И. Соловьев заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории теоретической физики
международной межправительственной организации «Объединенный
институт ядерных исследований»

Шукринов Юрий Маджнунович

подпись

Дата подписания

4 июня 2018 г.

Контактные данные:

тел.: 7(496)2163844, e-mail: shukrinv@theor.jinr.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом
зашита диссертация:

01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:

141980, Московская область г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6,

ОИЯИ, Лаборатория теоретической физики

Тел.: +7 (49621) 6-50-59; e-mail: post@jinr.ru

Подпись сотрудника

ОИЯИ Ю. М. Шукринова удостоверяю:

Заместитель директора

лаборатории теоретической физики

Н. В. Антоненко

дата

04.06.2018

