

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу

Кленова Николая Викторовича

«Принципы построения устройств для приема и обработки сигнала на основе макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках»,

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук

по специальностям: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения;

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Диссертационная работа Н.В. Кленова посвящена теоретическому и экспериментальному поиску путей увеличения эффективности интеграции в сверхпроводниковых комплексах приема и обработки сигнала.

Тема диссертации. Темой диссертационной работы является разработка перспективных путей реализации когнитивных широкополосных сверхпроводящих систем (КШСС) для приема и обработки сигналов с использованием классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов. Это включает в себя решение задач по разработке физических основ создания элементов и ячеек для перспективного радиоприемного устройства, включающего в себя высокочастотные и чувствительные сверхпроводящие детекторы магнитной компоненты электромагнитного сигнала, сверхбыстрые энергоэффективные широкополосные аналого-цифровые преобразователи (ШП АЦП), способные осуществлять оцифровку сигнала без предварительного преобразования частоты, компактные и энергоэффективные логические цепи и блоки криогенной памяти, совместимые со сверхпроводниковыми детекторами и АЦП, нейросетевые и квантовые блоки обработки оцифрованного сигнала, интерфейсные цепи, связывающие сверхпроводниковые детекторы и аналого-цифровые преобразователи с блоками обработки сигнала, а также обеспечивающих передачу сигнала в цепи полупроводниковой электроники.

Актуальность тематики диссертации определяется необходимостью перехода в современных беспроводных и спутниковых средствах связи и других телекоммуникационных и радиолокационных системах к "прямой оцифровке" радиосигнала и его последующей цифровой обработке в реальном времени. Технология КШСС позволяет программным образом переключаться между полосами в сверхшироком диапазоне частот, а также адаптивно подстраивать вид и параметры модуляции радиосигнала под условия его распространения. Принципы КШСС активно разрабатываются как в мире, так и в нашей стране.

Объектами исследования в диссертационной работе являются сверхпроводящие джозефсоновские гетероструктуры, а также сверхпроводящие квантовые интерферометры как базовые элементы систем приема и обработки сигнала; компактные джозефсоновские переключатели, вентили и элементы памяти; квантовые и нейросетевые блоки обработки сигнала для когнитивных широкополосных сверхпроводниковых приемных систем на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров; а также многоэлементные джозефсоновские системы в активных электрически-малых антеннах.

Вход. № 1048
« 3 » 10 2018 г.
подпись

Новизна положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, обусловлена следующим:

1) Использован комплексный подход к разработке универсальной сверхпроводниковой энергоэффективной технологии, пригодной для реализации КШСС с высокой скоростью цифровой обработки радиосигналов за счет использования классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов. Созданы и прошли апробацию методики анализа процессов переноса заряда в компактных джозефсоновских элементах и фазовых батареях, входящих как в состав ШП АЦП, так и в состав RISC процессора, нейросетевого и квантового блока обработки сигнала.

2) Применяется согласованный анализ процессов как в отдельных джозефсоновских элементах, так и в цепях на их основе: созданы методики для анализа и оптимизации характеристик как отдельных элементов, так и систем в составе постоянных и оперативных сверхпроводниковых запоминающих устройств, квантовых регистров, нейронов и синаптических связей для увеличения скорости цифровой обработки радиосигналов.

3) Методика анализа макроскопических квантовых эффектов в многоконтактных и многоконтурных сверхпроводящих квантовых интерферометрах с магнитными джозефсоновскими контактами использована впервые:

– при разработке цепей управления для производительных и энергоэффективных адиабатических квантовых вычислений;

– для исследования возможностей интеграции искусственных нейронных сетей в системы обработки оцифрованного сигнала со встроенной магнитной джозефсоновской памятью.

4) Применен метод построения высоко-линейных последовательных и последовательно- параллельных цепочек сверхпроводящих квантовых интерферометров и систем на их основе для расширения частотного диапазона радиоприёмных устройств, а также для увеличения динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, помимо публикаций результатов в рецензируемых журналах и докладах на конференциях подтверждается также актами внедрения результатов диссертации.

Содержание диссертации

Диссертация объемом в 409 страниц состоит из семи глав, введения, заключения, списка цитируемой литературы (500 наименований), а также списка публикаций автора по теме диссертации (А1-А80) и приложенных актов внедрения.

В *Главе Введение* сформулированы цель и задачи диссертации, актуальность тематики, представлены защищаемые положения, научная новизна результатов, обоснован выбор объектов и методов исследований, обоснована практическая значимость работы и приведено краткое содержание диссертации.

В *Главе 1* представлена концепция создания когнитивных широкополосных систем, использующих прямую оцифровку принимаемого сигнала (вплоть до СВЧ) и последующую обработку в режиме реального времени при помощи классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов. На основании сопоставительного анализа выявленного набора

требований к элементной базе радиотехнических комплексов, работающих с широкополосным групповым СВЧ сигналом, продемонстрирована перспективность использования энергоэффективной сверхпроводниковой технологии. Представлен краткий очерк современной цифровой сверхпроводниковой электроники и выявлены проблемы, тормозящие внедрение такой элементной базы в комплексы приема, обработки и защиты информации. Представлено исследование конкурирующих «пост-металл-оксид-полупроводниковых» решений – включая нейроморфные мемристорные схемы и интегральную фотонику – и определены разумные ниши для внедрения сверхпроводниковых технологий.

В *Главе 2* кратко описаны макроскопические квантовые эффекты в сверхпроводниках. Цель этого изложения – ввести важные для работы понятия и подготовить почву для их использования при решении актуальных задач исследования. Особое внимание уделено принципам определения основного состояния электронных систем с взаимодействием и формализму описания возбуждений на основании преобразования Боголюбова с переходом к анализу пространственно-неоднородных систем при помощи уравнений Боголюбова–де Жена и «квазиклассических приближений». При обсуждении фундаментальных основ реализации предлагаемых технических решений отдельный параграф посвящен современному состоянию исследований квантовых и нейросетевых методов анализа сигнала. Развитие технологии в этой области уже привело к созданию вычислительных устройств, работающих с квантовым представлением информации, к которым относятся, например, аналоговые симуляторы спиновых решеток, позволяющие моделировать характеристики простых магнитных систем. Этот подход используется также в некоторых задачах оптимизационного характера при помощи так называемого «квантового отжига». Во второй главе заметное место отведено анализу возможностей конвергентного использования квантовых и нейросетевых алгоритмов, намечены пути их имплементации в рассматриваемые радиотехнические системы.

В *Главе 3* сформулированы конкретные требования к ячейкам квантовых блоков обработки сигнала и на основе анализа текущего состояния исследований выбраны фазовые и потоковые кубиты как наиболее перспективные ячейки, в том числе с точки зрения интеграции с другими блоками КШСС. В рамках работ по совершенствованию инструментария, предназначенного для оптимизации характеристик элементов квантового блока КШСС, был развит метод расчета ортонормированного базиса состояний джозефсоновского потокового кубита в двухуровневом приближении. Корректность всех проведенных рассуждений наглядно демонстрируется путем сравнения полученных результатов численных и аналитических расчетов с литературными данными.

Глава 4 посвящена анализу возможностей увеличения эффективной интеграции сверхпроводниковых интегральных схем за счет перехода к новым типам джозефсоновских контактов. Для этого оптимизирован самосогласованный численный алгоритм расчета критического тока, нормального сопротивления, ток-фазовой зависимости джозефсоновских структур с многокомпонентной областью слабой связи, содержащей материалы с непосредственной проводимостью, в том числе и магнитные. Здесь можно выделить демонстрацию принципиальной возможности создания субмикронных джозефсоновских контактов с расчетными характеристиками на основе структур «сверхпроводник – нормальный (несверхпроводящий) металл – сверхпроводник» (SNS) в

топологии «мостик переменной толщины» (МПТ). Автор показал, что добавляя в область слабой связи МПТ ферромагнитный слой (F) таким образом, чтобы обеспечить существование конкурирующих каналов с разными знаками эффективного критического тока, можно получить фазовую батарею субмикронного размера.

В *Главе 5* развитие подхода предыдущей главы позволило автору рассчитать характеристики базовых элементов постоянных запоминающих устройств для когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем приема и обработки сигналов. Показано, что использование здесь джозефсоновских гетероструктур со сверхпроводящими, изолирующими и магнитными слоями (например, $\text{SIF}_1\text{sF}_2\text{S}$) в области слабой связи позволяет довести длительность операции «Считывание» до 10 пс. В работе удалось найти условия, при которых для элементов уже оперативных запоминающих устройств можно уменьшить также и длительность операции «Запись» до суб-наносекундных величин.

В *Главе 6* особое внимание уделено анализу физических основ оптимизации управляющих цепей для квантового блока обработки сигнала на основе новой теории распространения солитоноподобных возбуждений в нелинейных, пространственно-неоднородных средах в присутствии флуктуаций. Этот подход позволяет перейти к использованию интегрированных на чип генераторов излучения, передающих линий и счетчиков на основе джозефсоновских цепей.

В *Главе 7* разбираются методы увеличения динамического диапазона и линейности преобразования до уровня более 100 дБ для электрически малых активных антенн за счет использования многоконтактных и многоконтурных цепочек, ячейки которых созданы на основе сверхпроводящих интерферометров.

В *Заключении* суммированы основные выводы диссертации.

Тема и содержание диссертации соответствуют специальностям 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения; 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Некоторые замечания, которые можно сделать по тексту диссертации:

1. Нам кажется сравнение энергопотребления современных суперкомпьютеров и рассматриваемых в работе систем на основе сверхпроводников не вполне корректно. В частности, в работе сказано: "продемонстрированы ... вычисления с диссипацией энергии менее 1 аДж на операцию, что на три порядка меньше характерных для «полупроводникового репера» значений ... Для адекватной оценки последней величины стоит указать, что обычные криокулеры, обеспечивающие требуемую для функционирования сверхпроводниковых устройств температуру, при весе порядка десяти килограмм потребляют 1.2 кВт, тогда как энергопотребление лучших современных суперкомпьютеров доходит до 20 МВт." Данное сравнение является недопустимым. Поскольку речь идет о криогенном оборудовании, то хладопроизводительность стандартного криокуллера существенно (на 3-4 порядка) отличается от мощности потребления. Так, например, двухступенчатый криогенный рефрижиратор RDK-205D имеет хладопроизводительность 0.5Вт, при мощности потребления 2кВт. Необходимость использования криогенных температур делает не столь явным энергетическую выгоду использования сверхпроводниковых устройств. Поскольку для обеспечения пентафлопсных вычислений потребуется далеко не один криокуллер, суммарная мощность потребления большого количества

криокуллеров будет существенна.

2. Дважды (на стр. 7 и на стр. 17) в тексте упоминается в качестве цели концепции "повышение чувствительности приемо-передающих устройств до уровня -300 дБВт, что позволяет расширить зону охвата радиосетей". Уровень -300дБВт, является недостижимым в настоящее время, поскольку чувствительность современных приемников находится на уровне 10^{-22} Вт/Гц^{0.5}. Достижение уровня -300дБВт требует больших входных полос приемника и больших времен накопления.
3. В настоящее время для решения задач, аналогичных поставленным в диссертации, всё чаще используются методы радиофотоники. К сожалению, нам не удалось найти в тексте диссертации подробного сравнения конкретных описываемых в диссертации устройств и методов с устройствами и методами радиофотоники, применяемыми для решения тех же задач. Поэтому довольно затруднительно определить насколько предлагаемые сверхпроводниковые устройства эффективнее, чем радиофотонные устройства.
4. В тексте работы имеется некоторое количество небрежностей, в частности, на целый ряд рисунков нет ссылок в тексте, либо в тексте ссылка на рисунок написана "Рисунок 5" (см., например, стр. 95), а соответствующий рисунок имеет номер "3.1.5". Аналогичное замечание есть и к ссылкам на формулы: например, на стр. 93 есть ссылка (3). Можно было бы ожидать, что эта формула 3.1.3, однако содержание формулы не соответствует тексту, где стоит ссылка на эту формулу. Также тексте встречаются опечатки и неточности, делающие чтение работы затруднительным.

Эти замечания, однако, не умаляют общей высокой оценки диссертации Н.В. Кленова, содержащей немало новых оригинальных результатов. Диссертация Н.В. Кленова является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. Результаты работы могут быть использованы в ведущих научных центрах, таких как Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова, Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), ИФП им. П. Л. Капицы РАН, ИФТТ РАН, Институт физики микроструктур РАН, НИТУ "МИСиС". Основные результаты диссертации Н.В. Кленова были опубликованы в 80 статьях в ведущих международных научных журналах, включая Superconductor Science and Technology, Physica C, Applied Physics Letters, Physical Review B, Physical Review B, а также докладывались автором на многих российских и международных конференциях.

Заключение. Диссертация Кленова Николая Викторовича «Принципы построения устройств для приема и обработки сигнала на основе макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках», является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным на высоком научном уровне. Научные результаты, приведенные в диссертации, представляют интерес как с **фундаментальной**, так и с **практической** точек зрения. Полученные автором результаты **достоверны**, выводы и заключения **обоснованы**.

Работа написана доступным языком для специалистов, работающих в области радиотехники, твердотельной электроники и нанoeлектроники, а также физики сверхпроводников, содержит иллюстрирующие рисунки, грамотно и аккуратно оформлена. По каждой главе и работе в целом сделаны четкие выводы. Автореферат правильно отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор, Кленов Николай Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальностям 05.12.04 – радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения и 05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Официальный оппонент
Корнеев Александр Александрович

Шведова
2.10.2018

Доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 – Оптика
Профессор кафедры общей и экспериментальной физики
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский педагогический государственный университет"
119991 ГСП-1 Москва, Малая Пироговская 1, стр 1
Телефон +7 (499)245-03-10, +7(903)970-72-53
Электронная почта: akorneev@rplab.ru

