

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Физико-
технологический институт Российской академии
наук» (ФТИАН)

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН



В.Ф. Лукичев

«22» сентября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технологический институт Российской академии наук» (ФТИАН) – на диссертацию Кленова Николая Викторовича на тему «Принципы построения устройств для приема и обработки сигнала на основе макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 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 Кленова Николая Викторовича посвящена исследованиям, проводимым на стыке радиотехники и твердотельной нанoeлектроники, а именно разработке методов и средств для создания элементной базы когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем для приема и обработки сигналов с использованием классических, нейросетевых и квантовых алгоритмов.

Актуальность темы исследования

Развитие современной радиотехники требует качественного совершенствования электронной компонентной базы. В работе рассматривается концепция когнитивной широкополосной системы, состоящей из широкополосной антенны, совмещенной с малошумящим усилителем, аналого-цифрового преобразователя и блока обработки сигнала, включающего и устройства вывода обработанных данных. Такой подход

Вход. № 116/18
« 3 » 10 2018 г.
подпись

подразумевает прямую оцифровку принимаемого сигнала во всём диапазоне частот с последующей его цифровой обработкой. Отсутствие аналогового частотного преобразования, как в схеме супергетеродинного приёмника, благотворно сказывается на ряде технических характеристик, но при этом повышаются требования к линейности аналогового тракта. Потенциальные возможности сверхпроводниковых цифровых устройств с высоким быстродействием, достигаемым за счёт высоких тактовых частот, так и с низким энергопотреблением обуславливают актуальность проведённого исследования.

Диссертационное исследование особое внимание уделяет анализу технологических проблем, не позволивших до сих пор реализовать очевидный потенциал использования макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках для создания полноценных комплексов приема и обработки сигнала. Здесь разрабатываются теоретические основы для уменьшения размеров джозефсоновских гетероструктур – ключевых элементов рассматриваемых аналоговых и цифровых устройств, а также ячеек для постоянных и оперативных запоминающих устройств, работающих с квантами магнитного потока. Также разрабатываются основы для технических решений, позволяющих использовать возможности квантовых и нейросетевых алгоритмов при обработке сигнала.

Структура диссертации

Работа Кленова Н.В. изложена на 409 страницах текста и состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитируемой литературы.

В первой главе автор представляет концепцию когнитивной широкополосной системы и рассматривает требования к элементной базе, вытекающие из особенностей таких радиотехнических систем. Большое место уделено сравнительному анализу возможных подходов, причем, наряду с традиционной «полупроводниковой» технологией, достоинства и недостатки мемристивных устройств и устройств интегральной фотоники сопоставляются с возможностями сверхпроводниковых цифровых и аналоговых систем.

Во второй главе введены важные для работы понятия из теории сверхпроводимости и физики квантовых вычислений, которые в третьей главе используются для построения методик описания как отдельных джозефсоновских

структур, так и цепочек на их основе в классическом и квантовом режимах.

В четвертой главе автор применяет часть разработанных подходов для моделирования характеристик субмикронных джозефсоновских контактов. Выполнен численный двумерный анализ транспорта тока через джозефсоновские гетероструктуры с нормальным и ферромагнитным би-каналом слабой связи и рассчитаны ток-фазовые зависимости. Представлена качественная физическая интерпретация полученных результатов. Рассмотрены возможные топологии таких структур, особенности транспорта тока в них и вид ток-фазовых зависимостей. Используемая в работе методика моделирования позволила объяснить особенности токового транспорта для джозефсоновских элементов с характерным размером области слабой связи 35... 250 нм, что крайне важно для решения обозначенной выше проблемы интеграции в сверхпроводниковых интегральных схемах.

Далее в пятой главе Н.В. Кленов переходит к анализу токового транспорта через более сложные гетероструктуры, содержащие в области слабой связи магнитные материалы. За счет совместного использования особенностей сверхпроводников и ферромагнетиков автору удалось разработать топологии для достаточно быстрой и энергоэффективной криогенной памяти. Имитационное моделирование работы ячеек показало, что для элементов постоянных запоминающих устройств можно довести длительность операции «Считывание» до 10 пс; для элементов оперативных запоминающих устройств до сравнимых величин можно уменьшить и длительность операции «Запись».

В шестой главе представлен оригинальный способ, позволяющий до пикосекундных величин уменьшить также длительность характерных операций (ДХО) при обращении к логическим сверхпроводниковым устройствам, функционирующим в квантовом режиме. Использование специализированных методик, представленных в третьей главе диссертации, для исследования спектров сверхпроводящих кубитов, позволяет оптимизировать их топологии, добиваясь максимального отношения времени потери когерентности состояний к ДХО. В этой части работы разбираются также и принципы создания сверхпроводящих нейронов с ультра-малой диссипацией энергии, составляющей порядка 10^{-18} Дж на операцию.

Наконец, в главе 7 исследуются проблемы блока приема широкополосной

сверхпроводниковой системы (ШСС), связанные с малым динамическим диапазоном сверхпроводящего квантового интерферометра, используемого в качестве усилителя-преобразователя магнитной компоненты сигнала в отклик напряжения. Здесь особо стоит отметить представленную автором концепцию радиуса взаимодействия в параллельных цепочках джозефсоновских контактов, позволившую получить оценки на динамический диапазон и чувствительность (до $3 \text{ фТл/Гц}^{1/2}$) этого компонента ШСС.

При анализе диссертации не выявлены признаки плагиата. 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.

Научная новизна результатов исследования

В рамках работы впервые в мире использован комплексный подход, позволяющий в итерационном цикле из микро- и макроскопического рассмотрения оптимизировать свойства (размер, быстродействие) как отдельных джозефсоновских контактов, так и сложных систем на их основе, включая

- элементы сигнальных процессоров с тактовыми частотами до 100 ГГц;
- компактные и энергоэффективные ячейки криогенной памяти (оперативной и постоянной), совместимые упомянутыми сигнальными процессорами;
- ячейки нейросетевых (нейроны) и квантовых (кубиты) блоков обработки оцифрованного сигнала;
- интерфейсные цепи, связывающие сверхпроводящие детекторы и аналого-цифровые преобразователи с блоками обработки сигнала, в том числе и квантовыми;
- высокочастотные (в пределе до 100 ГГц) чувствительные сверхпроводящие детекторы магнитной компоненты электромагнитного сигнала.

Практическую значимость предлагаемых решений можно оценить как высокую ввиду описанных выше перспектив использования энергоэффективных радиотехнических комплексов с возможностью обработки сверхвысокочастотных широкополосных сигналов в режиме реального времени.

Полученные результаты имеют ключевое значение для успешной реализации ряда Федеральных Целевых Программ, проектов Российского Научного Фонда и Российского

Фонда Фундаментальных Исследований, что подтверждается приведенными в диссертации документами.

Рекомендации по использованию результатов работы

Основные результаты диссертационной работы Н.В. Кленова могут быть использованы для дальнейшего развития сверхпроводниковой цифровой и аналоговой электроники в Московском Государственном университете имени М.В. Ломоносова, Московском педагогическом государственном университете, Институте прикладной физики РАН, Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, Физико-техническом институте РАН. Практическая реализация разработанных автором концепций в области широкополосных систем связи возможна с использованием научных и производственных мощностей ГК «Росатом» (Всероссийским научно-исследовательским институтом автоматики им. Н.Л. Духова совместно с Московским государственным техническим университетом им Н.Э. Баумана), МИРЭА – Российский технологический университет, Московского технического университета связи и информатики.

Достоверность и апробация результатов диссертационного исследования

Достоверность полученных автором результатов подтверждается многочисленными публикациями в ведущих российских и международных изданиях, а также в их активном цитировании. Кленов Н.В. является автором (соавтором) 112 научных трудов автора, а также 5 учебных пособий, его Хирш-фактор по версии системы Web of Science равен 14. Приведенные в автореферате сведения о публикациях, а также о представлении полученных результатов на ведущих российских и международных конференциях соответствуют действительности.

Замечания по представленной диссертации состоят в следующем:

- 1) Вторая глава диссертации содержит излишне подробный вывод уравнений Боголюбова – де Жена (страницы 53-58) и избыточно подробное освещение особенностей квантовых и алгоритмов (страницы 63-70).
- 2) В четвертой главе, в разделе 4.1, где говорится о численном моделировании простой SN-N-NS структуры, не описана геометрия расчетной области, из текста не совсем ясно, для задачи какой размерности проведено моделирование. Согласование

численных расчетов для этой структуры с экспериментом получено варьированием удельного сопротивления металла ρ_N и длины когерентности ξ_N . Здесь, на наш взгляд, нелишне было бы привести значения подобранных таким образом величин ρ_N и ξ_N , и сравнить их со значениями, полученными какими-либо другими методами, в том числе из эксперимента.

3) В разделе 4.2, описана методика численного решения нелинейного уравнения Узалея в двумерной области, когда для заданного нулевого приближения методом итераций получается одно из решений. Далее эта методика применяется в следующих разделах для моделирования различных структур. Что можно сказать о существовании и физической адекватности другого возможного решения этого нелинейного уравнения? Как влияет выбор нулевого приближения на сходимость к тому, или иному решению, и по какому критерию выбирается одно из этих решений? На наш взгляд, это нелишне было бы упомянуть.

4) В пятой главе предположение о практической реализуемости переключений между устойчивыми состояниями элемента памяти на основе SF_1sF_2S структуры (страницы 206 и 207) требует дополнительного обоснования. В частности, вызывает сомнение возможность переключения под действием типичных для сверхпроводниковых цифровых систем слабых токов и полей на уровне 20 Э.

5) Представленная, например, на странице 268 принципиальная схема элемента системы считывания состояний квантового регистра представляется малоперспективной ввиду высокой для данного режима диссипации энергии в процессе переключений отдельных джозефсоновских контактов. Видно, что автор осознает эту проблему и разрабатывает вариант модификации джозефсоновской передающей линии с использованием так называемых «н-СКВИДов». Однако на практике такое решение повлечет за собой существенное увеличение размеров всех интерфейсных цепей.

Приведенные замечания не снижают общей высокой оценки рассматриваемой работы.

Заключение

Диссертация является законченной квалификационной работой, соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК при Минобрнауки РФ к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, а её автор Николай Викторович

Кленов заслуживает присуждения 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.

Результаты диссертационной работы были рассмотрены на научном семинаре ФТИАН РАН «Квантовые компьютеры» 17 мая 2018 г. Отзыв на диссертацию получил одобрение на заседании Ученого совета ФТИАН РАН, протокол № 5-018 от 06 сентября 2018 г.

Сведения о составителях отзыва:

Семенihin Игорь Александрович, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», старший научный сотрудник лаборатории физики квантовых компьютеров ФТИАН, адрес 117218, Россия, г. Москва, Нахимовский просп., 34, Тел.: +7 (499) 129-63-45, электронная почта: isemenihin@mail.ru

Катеев Игорь Юльевич, кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Физика конденсированного состояния», старший научный сотрудник лаборатории архитектуры высокопроизводительных вычислительных систем ФТИАН, адрес 117218, Россия, г. Москва, Нахимовский просп., 34, Тел.: +7 (499) 129-63-45, электронная почта: ikateyev@mail.ru.

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технологический институт Российской академии наук». Адрес 117218, Россия, Москва, Нахимовский проспект д.34 к.1, тел. (499) 129-00-46, факс (499) 125-38-26, e-mail: lukichev@ftian.ru

Отзыв подготовили:

кандидат физ.-мат. наук
старший научный сотрудник

27.09.18

И.А. Семенихин
(подпись, дата)

кандидат физ.-мат. наук
старший научный сотрудник

27.09.18

И.Ю. Катеев
(подпись, дата)