

23

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д219.001.04 НА БАЗЕ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ФЕДЕРАЛЬНОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СВЯЗИ И ИНФОРМАТИКИ»,
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от «18» октября 2018 г., протокол № 41.

О присуждении Кленову Николаю Викторовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация на тему «Принципы построения устройств для приема и обработки сигнала на основе макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках» по специальностям 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки) и 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах (технические науки) принята к защите 28.06.2018, протокол № 35/1, диссертационным советом Д219.001.04 на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ), Федеральное агентство связи, 111024, г. Москва, улица Авиамоторная, 8а, Приказ Министерства образования и науки Российской Федерации от «03» марта 2016г. №244/нк.

Соискатель Кленов Николай Викторович, 1982 года рождения, в 2005 г. окончил с отличием физический факультет Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по специальности «Физика». В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Сверхпроводниковые устройства, основанные на нетривиальных фазовых и амплитудных характеристиках

джозефсоновских структур» по специальности 01.04.04 – Физическая электроника (диплом № ДКН 067817) в диссертационном совете Д 501.001.66 на базе МГУ имени М.В. Ломоносова. В 2015 г. Кленову Н.В. по той же специальности присвоено ученое звание доцента (аттестат ЗДЦ № 001961).

Соискатель работает в НИО-48 НИЧ МГУСИ в должности ведущего научного сотрудника, где и была подготовлена диссертация.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор Аджемов Сергей Сергеевич, начальник НИО-48 НИЧ МГУСИ.

Официальные оппоненты:

Вдовин Вячеслав Федорович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», отдел радиоприемной аппаратуры и миллиметровой астрономии, главный научный сотрудник;

Шукринов Юрий Маджнунович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова, Объединенный институт ядерных исследований, ведущий научный сотрудник;

Корнеев Александр Александрович – доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский педагогический государственный университет», Институт физики, технологии и информационных систем, профессор,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технологический институт Российской академии наук» (ФТИАН) в своем положительном заключении, утвержденном директором, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Лукичевым Владимиром Федоровичем, дала высокую оценку рассматриваемой работы. Ведущая организация указала, что выполненные исследования являются актуальными, отметила новизну, высокую практическую значимость результатов, соответствие темы и содержания

работы выбранным специальностям. Рекомендовано использовать основные результаты диссертации 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-исследовательский институт 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.

Соискатель имеет 173 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации 112 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях; 29,8 печатных листа – объем научных изданий (авторский вклад: 55%); 9 патентов (авторский вклад: 51%).

Наиболее значительные работы соискателя, в первую очередь из числа рецензируемых научных изданий, с указанием выходных данных:

Кленов Н.В. Принципы построения сверхпроводниковых искусственных нейросетей // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения.* – 2017. – Т. 17. – № 4. – С. 1031-1034.

Кленов, Н.В. Нетривиальная ток-фазовая зависимость в джозефсоновских переходах из анизотропных сверхпроводников: механизм и применение / Н. В. Кленов, В. К. Корнев, И. И. Соловьев и др. // *Нелинейный мир.* — 2005. — Т. 3, № 1-2. — С. 75–91. Личный вклад автора – 50%.

Н. В. Кленовым здесь предложен метод анализа ток-фазовой зависимости джозефсоновских гетероструктур на основе высокотемпературных сверхпроводников, включенных в асимметричный джухконтактный интерферометр. Рассчитана зависимость критического тока интерферометра и определены амплитуды гармонических компонент в ток-фазовой зависимости

из аппроксимации экспериментальных данных, предоставленных соавторами. Разработанный метод позволяет получать информацию о виде ток-фазовой зависимости джозефсоновских контактов на образцах с достаточно простой геометрией и без использования высокочастотных измерений, что выгодно отличало его от известных на тот момент конкурентов.

Кленов Н. В., Корнев В. К. Фазовый кубит на основе двухконтактного СКВИДа с несинусоидальной ток-фазовой характеристикой джозефсоновских переходов // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2006. — № 5. — С. 38–43. Личный вклад автора – 70%.

Кленовым Н.В. предложен новый тип джозефсоновских кубитов, «защищенных» от влияния слабых флуктуаций магнитных полей. Выполнен численный расчет спектра такой квантовой системы и разработан метод для аналитической оценки энергий её базисных состояний.

Klenov N.V., Kornev V.K., Pedersen N.F. The energy level splitting for unharmonic dc-SQUID to be used as phase Q-bit // Physica C: Superconductivity and its Applications. — 2006. — Vol. 435, no. 1. — P. 114–117. Личный вклад автора - 70%.

Кленовым Н. В. выполнен численный анализ особенностей энергетического спектра защищенного «тихого» кубита с учетом вторых и третьих гармонических компонент в ток-фазовых зависимостях джозефсоновских контактов.

Кленов Н.В., Корнев В.К. Особенности токового транспорта в джозефсоновских гетероструктурах с нормальным и ферромагнитным би-каналом слабой связи // Радиотехника. — 2012. — № 12. — С. 42–48. Личный вклад автора – 70 %.

Кленов Н. В. в этой работе разработал методику для численного анализа на двумерной сетке транспорта тока через джозефсоновские гетероструктуры с нормальным и ферромагнитным би-каналом слабой связи. Представлена качественная физическая интерпретация полученных результатов. Предложены и рассмотрены возможные реализации таких структур с учетом особенностей транспорта тока и вида ток-фазовых зависимостей.

Кленов, Н.В. Сверхпроводящие ф-элементы на основе джозефсоновских

структур с ферромагнитными слоями / Н. В. Кленов, С. В. Бакурский, В. И. Ружицкий и др. // Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). — 2013. — Т. 5. Личный вклад автора – 60%.

Кленовым Н. В. описаны методы моделирования транспорта тока через джозефсоновские гетероструктуры с нормальным и ферромагнитным би-каналом слабой связи произвольной геометрии и анализа ток-фазовых зависимостей (алгоритмы реализованы студентами и аспирантами под его руководством). Кленовым Н.В. предложен метод создания на основе джозефсоновских структур с NF би-каналом не только джозефсоновских ф-контактов, но и перспективных ф-ячеек со встроенным заданием рабочей точки, представлен анализ параметров таких элементарных логических ячеек, содержащих ф-контакты.

Klenov N.V., Sharafiev A.V., Bakurskiy S.V., Kornev V.K. Informational description of the flux qubit evolution // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. — 2011. — Vol. 21, no. 3. — P. 864–866. Личный вклад автора – 60%.

Кленовым Н.В. предложено использовать информационную интерпретацию эволюции квантовой системы для описания распада когерентных состояний “джозефсоновских атомов”, в том числе кубитов на основе двух- и трехконтактных сверхпроводящих интерферометров. Разработана методика анализа процедуры измерения состояния джозефсоновского кубита и влияние измерительного прибора на распад его когерентного состояния на основе редуцированного уравнения Линдблада.

Klenov, N. V. Flux qubit interaction with rapid single-flux quantum logic circuits: Control and readout / N. V. Klenov, A. V. Kuznetsov, I. I. Soloviev et al. // Low Temperature Physics. — 2017. — Vol. 43, no. 7. — P. 789–798. Личный вклад автора - 60%.

Кленовым Н.В. предложен и разработан метод реализации простейших логических операций с джозефсоновскими кубитами на пикосекундных временах. Аспирантом Кузнецовым А.В. под руководством соискателя исследована аналогия между уравнениями Блоха и Ландау-Лифшица-Гильберта при анализе воздействии на кубит управляющего короткого импульса.

Полученные Кленовым Н.В. результаты аналитического рассмотрения подтверждены данными суперкомпьютерного моделирования, выполненного соавторами.

Klenov N.V., Soloviev I.I., Shchegolev A.E., Pankratov A.L. Ballistic detection of weak signals in active Josephson media // Moscow University Physics Bulletin. — 2015. — Vol. 70, no. 1. — P. 35–41. Личный вклад автора – 50%.

Кленовым Н. В. выполнено численное моделирование процесса считывания слабых магнитных сигналов с квантового регистра в присутствии тепловых флуктуаций с помощью сверхпроводникового баллистического детектора на основе джозефсоновских передающих линий. Разработана методика оптимизация таких параметров детектора, как величина тока питания и уровень демпфирования джозефсоновских контактов для максимизации отношения сигнал-шум.

Соловьев И.И., Куприянов М.Ю., Снигирев О.В., Кленов Н.В. Флаксонный баллистический детектор. Патент РФ RU 2592735 от 27.07.2016. Личный вклад автора – 55%.

Кленовым Н.В. выполнено исследование уровня техники, разработаны конкретные практические реализации флаксонного баллистического детектора для маловозмущающего быстрого считывания состояний квантового регистра и подготовлен текст заявки на патент.

Кленов, Н.В. Макроскопическая квантовая электроника: от основ к применениям. Учебное пособие в вопросах и задачах / Н. В. Кленов, А. Е. Щеголев, А. А. Киселев и др. — Брис–М Москва, 2016. — 164 с. Вклад 70%.

Кленовым Н.В. разработана концепция учебного пособия, изложены основы квантовой физики конденсированного состояния вещества, а также принципы их использования в устройствах современной электроники, включая комплексы приема и обработки информации.

Недостовверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации, отсутствуют.

На автореферат поступило 12 положительных отзывов: ФГБОУ ВО РГРТУ, ФГУП НИИФП им. Ф. В. Лукина, ФГБОУ ВО РТУ МИРЭА, ФГБОУ

ВО НГТУ, ФГБОУ ВО НИИЯФ МГУ, ФГАОУ ВО МФТИ, ИЭИиН имени Д. Гицу, ФГУП ВНИИА, ФГБУН ИФП им. П.Л. Капицы, ФГБУН ФИЦ КазНЦ РАН, ФГБОУ ВО МГТУ им Н.Э. Баумана, ФГБУН ИФТТ.

Замечания, поступившие на автореферат, можно обобщенно представить в следующем виде:

1. в автореферате диссертации не представлен подробный анализ связи между характеристиками разрабатываемых джозефсоновских структур и предельной частотой функционирования блоков и цепей на их основе;
2. отсутствуют обсуждения проблем практической реализации разработанных «магнитных» контактов для криогенной памяти, представляется разумным провести анализ совместных требований к ферромагнитным и сверхпроводящим слоям предлагаемых гетероструктур (материалы, толщины);
3. из текста автореферата не очевидна возможность переключения между устойчивыми состояниями ключевого элемента ПЗУ при помощи магнитных полей, типичных для устройств криогенной электроники;
4. в автореферате не раскрыты физические механизмы возникновения у джозефсоновских контактов с магнитными, нормальными, сверхпроводящими и изолирующими слоями в области слабой связи устойчивых бестоковых состояний с джозефсоновской фазой, не кратной π ;
5. в тексте автореферата не рассматривается проблема паразитных переходов между состояниями в квантовом регистре под действием ультракоротких пикосекундных импульсов;
6. в автореферате отсутствует описание деталей анонсированного автором теоретического обоснования реализуемости ключевых операций над сверхпроводниковыми кубитами при помощи пикосекундных импульсов магнитного поля;
7. к числу недостатков автореферата можно отнести отсутствие обсуждения проблем практической реализации разработанных «магнитных» контактов для криогенной памяти;
8. из-за огромного объема проведенных исследований невозможно достаточно подробно изложить все полученные результаты.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается

следующими фактами:

1. доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник В.Ф. Вдовин является один из лучших специалистов России в области высокочувствительной криостатируемой приемной аппаратуры миллиметрового диапазона длин волн, а анализ сверхпроводниковых приемных систем является важной частью диссертационной работы Н.В. Кленова;
2. доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Ю.М. Шукринов – выдающийся специалист по динамике джозефсоновских контактов в многоэлементных системах, что составляет предмет рассмотрения в целом ряде параграфов диссертации Н.В. Кленова;
3. доктор физико-математических наук А.А. Корнеев является крупным отечественным специалистом в области исследования сверхпроводниковых наноструктур и применения построенных на этой основе устройств в квантовой оптике и квантовых вычислениях, что тесно связано содержание важных концепций и предложений Н.В. Кленова.
4. ФГБУН ФТИАН является одной из ведущих исследовательских организаций России в области твердотельной электроники, радиоэлектронных компонентов, микро- и наноэлектроники, приборов на квантовых эффектах, в том числе и предназначенных для современных радиотехнических систем.

Официальные оппоненты и сотрудники ведущей организации имеют большое количество публикаций, близких к теме диссертационного исследования, в том числе в таких изданиях, как Nanotechnology, Nano Letters, Scientific Reports, Physical Review Applied, Applied Physics Letters, Physical Review A, B, E, Superconductor Science and Technology, IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology.

Диссертационный совет отмечает, что по результатам проведенных исследований

- разработана методика анализа токового транспорта в гетероструктурах со сверхпроводящими материалами для получения субмикронных воспроизводимых джозефсоновских контактов – базовых элементов когнитивных широкополосных систем приема и обработки сигналов;
- разработана методика оптимизации характеристик фазовой батареи на

основе джозефсоновских гетероструктур с непосредственной проводимостью в области слабой связи в топологии «мостик переменной толщины», позволившая на порядок (до 100 нм) уменьшить допустимый размер элемента по сравнению с известными аналогами;

– разработан метод создания базовых элементов постоянных запоминающих устройств для когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем приема и обработки сигналов на основе джозефсоновских гетероструктур со сверхпроводящими, изолирующими и магнитными слоями в области слабой связи;

– метод сформирован математической и имитационной моделями, использование которых позволяет довести длительность операции «Считывание» до 10 пс;

– разработан метод создания базовых элементов оперативных запоминающих устройств, выявлены возможности управления джозефсоновскими гетероструктурами при помощи только импульсов тока без переворота вектора намагниченности в области слабой связи элемента, что позволяет сделать длительность операции «Запись» менее 1 нс;

– предложены оригинальные методы создания ячеек для нейросетевого блока когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем приема и обработки сигналов на основе одно- и двухконтактных сверхпроводящих квантовых интерферометров, шунтированных дополнительной индуктивностью;

– разработана оригинальная концепция осуществления манипуляций с состояниями кубита за счет приложения импульсов магнитного потока длительностью 0.5...5 пс за счет воздействия распространяющихся по нелинейным джозефсоновским резонаторам солитоноподобных возбуждений (флаксонов).

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– применительно к проблематике диссертации результативно использован согласованный анализ процессов как в отдельных джозефсоновских элементах, так и в цепях на их основе;

– для решения технических задач по миниатюризации сверхпроводниковых блоков обработки сигнала использован анализ

специфических проявлений эффекта близости в джозефсоновских гетероструктурах субмикронного размера с непосредственной проводимостью в области слабой связи, применены методы «диаграммной техники» для процессов токопереноса в таких структурах;

- изучены особенности поведения коллектива носителей заряда в гетероструктурах со сверхпроводящими, изолирующими, магнитными слоями и слоями нормального металла для моделирования здесь статических характеристик и специфических динамических процессов;

- изложен ряд специализированных методов анализа джозефсоновских цепей, включая многоконтактные интерферометры в квантовом пределе;

- предложены оригинальные методы оптимизации характеристик электрически малых активных антенн на основе последовательных цепочек сверхпроводящих квантовых интерферометров.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что они позволяют уменьшить более чем в 2 раза характерные размеры на плоскости базовых элементов когнитивной широкополосной системы связи. Это дает возможность, в частности, увеличить более чем на 20 дБ предельную линейность и динамический диапазон активной приемной системы. Также разработанные элементы открывают возможность уменьшить более чем на порядок (до десятков пикосекунд) длительность операций «Запись» и «Считывание» в криогенных блоках памяти в составе КШСС, а также базовых логических операций для квантового блока обработки сигнала. Найден способ уменьшить диссипацию энергии в нейросетевых блоках обработки сигнала более чем на два порядка до уровня менее 10 аДж на операцию. Результаты диссертации были использованы при разработке устройств сверхпроводниковой электроники для радиотехнических применений в рамках ряда научно-исследовательских работ, в том числе при реализации федеральных целевых программ «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России» и «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России». В МГУСИ результаты работы использовались для исследования новых методов обработки широкополосного группового сигнала в научно-исследовательских работах

«Экспедиция-2020-МТУСИ», «Экспедиция-2020-МТУСИ-2», «Эстафета-Ф-МТУСИ», «Эстафета-2030-МТУСИ». Практическая значимость использования результатов диссертационной работы подтверждена соответствующими актами.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что основные теоретические результаты были получены автором с использованием проверенных аналитических и численных методов решения граничных задач для интегро-дифференциальных уравнений квазиклассической микроскопической теории сверхпроводимости применительно к различным геометриям многослойных гетероструктур. Численный расчет характеристик переноса заряда в джозефсоновских контактах производился на основе самосогласованного решения уравнений Узаделя итерационным методом с использованием схемы продольно-поперечной прогонки. Многоэлементные цепи с джозефсоновскими контактами анализировались с использованием реалистичных исходных данных на основе обобщенной резистивной модели, где ток фазовая зависимость представлялась в виде ряда Фурье с амплитудами гармонических компонент, полученными из микроскопического рассмотрения. Выводы аналитических исследований были проверены и развиты при помощи численного моделирования, выполненного на высокопроизводительных вычислительных комплексах с использованием современных методик обработки информации. Результаты работы выдержали экспериментальную проверку в различных исследовательских группах в нескольких странах (РФ, США, Германия).

Личный вклад соискателя включает непосредственное участие в получении исходных данных и научных экспериментах (в том числе и численных), личное участие в апробации результатов исследования на международных и всероссийских конференциях, обработку и интерпретацию экспериментальных данных, подготовку основных публикаций по выполненной работе, среди которых есть и публикации без соавторов.

Диссертация является законченной научно-исследовательской работой, содержащей изложение новых научно обоснованных технических решений, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, написана на хорошем научном уровне и соответствует требованиям, предъявляемым к

докторским диссертациям.

На заседании 18.10.2018 диссертационный совет принял решение присудить Кленову Н.В. ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 7 докторов наук по специальности 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения (технические науки) и 5 докторов наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах (технические науки), участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 5 человек, проголосовали: за 21, против 0, недействительных бюллетеней 1.

Председатель диссертационного совета

Д219.001.04

д.т.н., профессор



А.С. Аджемов

Ученый секретарь диссертационного совета

Д219.001.04

к.т.н., доцент



М.В. Терешонок

Заключение совета составлено 18.10.2018.