

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

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 наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах.

Актуальность темы диссертации

Методы приема сигнала и его последующей обработки на базе сверхпроводниковых аналоговых и цифровых устройств в настоящее время широко используются в самых различных областях, включая телекоммуникации, медицину, геофизику, радиоастрономию. Прогресс в области изготовления джозефсоновских цепей позволяет создавать все более сложные устройства, содержащие большое количество джозефсоновских контактов и функционирующие, в том числе, в квантовом режиме. Диссертационная работа Кленова Н.В. чрезвычайно актуальна, поскольку она посвящена теме развития методов моделирования и разработки ключевых элементов и схем таких систем с обеспечением уникальных характеристик для использования их в практических устройствах. Здесь речь идет об устройствах в составе широкополосных систем приема и обработки сигнала, таких как высокочувствительные детекторы, аналого-цифровые преобразователи, регистры сверхпроводящих кубитов и интерфейсные цепи.

Качественное совершенствование указанных систем требует развития элементной базы сверхпроводниковой электроники. На сегодняшний день её возможности позволяют обеспечить работу простейших логических схем на тактовых частотах более 100 ГГц. Доступная энергоэффективность достигает $2 \cdot 10^{11}$ операций с плавающей точкой на Ватт. Но при этом размеры наиболее распространенных базовых элементов (туннельных

джозефсоновских контактов) составляют порядка $1\text{мкм}\times 1\text{мкм}$. В диссертационной работе разрабатываются теоретические основы для уменьшения размеров джозефсоновских гетероструктур - ключевых элементов рассматриваемых аналоговых и цифровых устройств, а также ячеек для постоянных и оперативных запоминающих устройств на основе джозефсоновских контактов с магнитными прослойками. Также здесь предлагаются и развиваются способы сопряжения традиционных цифровых сверхпроводниковых структур с квантовыми и нейросетевыми блоками обработки информации.

Структура диссертации

Рассматриваемая работа состоит из введения, семи глав и заключения. Объем её составляет 409 страниц, включая 158 рисунков, 6 таблиц, и список цитируемой литературы из 500 наименований.

В первой главе автор представляет анализ предметной области исследования. В частности, здесь изложена общая характеристика когнитивных комплексов приема и обработки сигнала, описано современное состояние исследований, выявлены ключевые проблемы, проведен сравнительный анализ перспективных путей их решения. Итогом этой главы стала формулировка задач исследования, среди которых необходимо выделить разработку методов и средств для создания:

(а) высокоэффективных сверхвысокочастотных и сверхчувствительных сверхпроводящих детекторов магнитной компоненты электромагнитного сигнала;

(б) сверхбыстрых (тактовые частоты более 100 ГГц) энергоэффективных (энерговыведение на операцию $\sim 1\text{аДж}$) сверхпроводящих аналого-цифровых преобразователей, способных обеспечить оцифровку получаемого сигнала без предварительного преобразования частоты;

(в) компактных и энергоэффективных логических элементов и

элементов памяти, совместимых со сверхпроводниковыми детекторами и аналого-цифровыми преобразователями;

(г) ячеек нейросетевых и квантовых блоков обработки оцифрованного сигнала;

(д) интерфейсных цепей, связующих сверхпроводящие детекторы и аналого-цифровые преобразователи с блоками обработки сигнала (в том числе и квантовыми), а также обеспечивающих передачу сигнала в цепи полупроводниковой электроники.

Во второй и третьей главах разработаны фундаментальные основы для методов исследования базовых элементов и ячеек систем приема и обработки сигнала: джозефсоновских контактов и сверхпроводящих квантовых интерферометров в классическом и квантовом режимах.

Особое внимание заслуживает четвертая глава, посвященная разработке методов миниатюризации джозефсоновских гетероструктур и оптимизации их характеристик. Здесь представлены результаты применения оптимизированного самосогласованного численного алгоритма расчета критического тока, нормального сопротивления, ток-фазовой зависимости и других ключевых электрофизических характеристик джозефсоновских структур с областью слабой связи, включающей слои изолятора, ферромагнетика, сверхпроводника, нормального металла. Так, для области слабой связи в виде «мостика переменной толщины» с конкуренцией нормального и ферромагнитного каналов токопереноса разработаны рекомендации по созданию компактной фазовой батареи с уменьшенным на порядок характерным размером, по сравнению с другими аналогами.

В пятой главе автор представил результаты численного расчета, демонстрирующие возможность создания быстрой и энергоэффективной криогенной памяти на основе описанных структур. В работе удалось подобрать параметры, при которых для элементов оперативных запоминающих устройств можно уменьшить и длительность операции «Запись» до субнаносекундных времен при характерных величинах

диссипации энергии на уровне 10 аДж на операцию и меньше.

В шестой главе такая фазовая батарея использована для оптимизации характеристик ячеек квантовых блоков обработки сигнала – сверхпроводниковых кубитов. Автор показал, с использованием оригинальных расчетных методов, что для двухконтактного интерферометра, содержащего две фазовые батареи в квантовом режиме работы, отсутствует необходимость прикладывать половину кванта магнитного потока $\Phi_0/2$ для задания рабочей точки, а спектр такой системы гораздо слабее зависит от флуктуаций магнитного потока, чем спектр наиболее известных аналогов.

В заключении суммированы основные выводы диссертации. В автореферате достаточно подробно отражены основные результаты диссертационного исследования, противоречия между данными автореферата и диссертации отсутствуют.

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 и практическая ценность результатов диссертации

В рамках работы автором впервые в деталях разработаны проблемы объединения в одном криогенном пакете блоков обработки данных, использующих как классические, так и квантовые и нейросетевые алгоритмы, причем «классическая» часть сигнального процессора берет на себя часть функций по управлению состояниями кубитов. Так как системы управления многокубитными сверхпроводниковыми квантовыми процессорами при помощи традиционной микроволновой техники на сегодняшний день сталкиваются с серьезными трудностями, практическая

ценность перспектив обсуждаемого технического решения не вызывает сомнений. Весьма полезными для разработчиков интегральных сверхпроводниковых схем будут разработанные Кленовым Н.В. следующие методы анализа свойств:

- субмикронных джозефсоновских контактов;
- их модификаций, содержащих магнитные материалы для компактной криогенной памяти;
- сверхпроводниковых кубитов и цепей для достаточно быстрого («пикосекундного») считывания и управления их состояниями на основе цифровой сверхпроводниковой электроники.

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.

Достоверность и апробация выводов, положений и рекомендаций диссертации

Постановка цели и задач диссертационного исследования свидетельствуют о высокой осведомленности Кленова Н.В. о современном состоянии научных исследований и разработок в области создания устройств для приема и обработки сигнала на основе макроскопических квантовых эффектов в сверхпроводниках.

Основные выводы, положения и рекомендации диссертации являются оригинальными, они подробно аргументированы с использованием надежного математического аппарата. Результаты работы выглядят обоснованными и достоверными благодаря согласию теоретических расчетов и численного моделирования с результатами экспериментальных исследований, проведенных как автором, так и независимыми исследовательскими коллективами России, Европы, США. Работы Н.В. Кленова получили широкое международное признание. Особо стоит

обратить внимание на публикации в известных журналах, где выходили работы, имеющие крайне важное значение для развития радиотехники, а также радиоэлектронной компонентной базы, использующей достижения микро- и нанoeлектроники:

Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics (импакт-фактор по версии WoS 3.836) – 3 статьи,

Applied Physics Letters (импакт-фактор по версии WoS 3.411) – 4 статьи,

Beilstein Journal of Nanotechnology (импакт-фактор по версии WoS 3.127) – 3 статьи,

Superconductor Science and Technology (импакт фактор 2.878) – 6 статей,

Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics (импакт фактор 2.366) – 1 статья,

IEEE Transactions on Applied Superconductivity (импакт фактор 1.583) – 10 статей,

Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики (импакт фактор 1.235) – 5 статей,

Радиотехника (журнал из списка ВАК) – 4 статьи.

По данным системы Web of Science фиксируется 65 публикаций Н.В. Кленова, его Хирш-фактор равен 14, общее количество ссылок на его работы равно 498. Наиболее удачные технические решения, найденные автором, защищены в 12 патентах РФ и США.

Замечания по представленной диссертации состоят в следующем:

- 1) Автор активно использует для описания динамики джозефсоновских структур сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник-ферромагнетик-сверхпроводник (SIsFS, глава 5 диссертации) модель сосредоточенных контактов (последовательное соединение SIs и sFS контактов, описываемых в рамках модели сосредоточенных контактов). Однако использование такого подхода требует более детального обоснования.
- 2) При анализе возможности переключения между 0- и π -состояниями (с

положительным и отрицательным эффективным значением критического тока, соответственно) для упомянутой выше SIsFS структуры важную роль играет её ток-фазовая зависимость. К сожалению, в работе не представлен подробный обзор тех особенностей ток-фазовой зависимости, которые вытекают из простейшей модели сосредоточенных джозефсоновских переходов.

3) При исследовании возможностей для быстрого переключения между базисными состояниями потокового кубита под действием униполярных импульсов автор не представил (не получил) общего аналитического выражения для определения требуемых для реализации основных операций амплитуды и длительности внешнего воздействия.

Приведенные замечания не снижают общей высокой оценки рассматриваемой работы.

Заключение

Диссертация является законченной квалификационной работой, выполненной Кленовым Н.В. на высоком научном уровне. Приведенные научно-технические результаты позволяют говорить о создании её автором нового направления в области разработки методов и средств для создания элементной базы когнитивных широкополосных сверхпроводниковых систем приема и обработки сигналов.

Содержание работы, верно и достаточно полно отраженное в автореферате, полностью соответствует выбранному названию, а также выбранным специальностям.

На основании изложенного выше считаю, что рассматриваемая диссертация отвечает всем требованиям к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук, изложенным в Постановлении Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 28.08.2017) «О порядке присуждения ученых степеней» (вместе с «Положением о присуждении ученых степеней»). 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.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности

01.04.02 – Теоретическая физика,

ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики

международной межправительственной организации «Объединенный

институт ядерных исследований» (ОИЯИ)

Шукринов Юрий Маджнунович

подпись

Дата подписания

01.10.2018

Контактные данные:

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

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:

Ученый секретарь

лаборатории теоретической физики



А. В. Андреев

дата 01.10.2018