

ОТЗЫВ официального оппонента
на (о) диссертацию(и) на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Щеголева Андрея Евгеньевича
на тему: «Разработка элементной базы для сверхпроводниковых
искусственных нейронных сетей на основе макроскопических
квантовых эффектов»
по специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур,
атомная и молекулярная физика»

Диссертация А.Е. Щеголева посвящена актуальной теме разработки и создания аппаратных реализаций нейроморфных вычислений на основе сверхпроводящей электроники. Актуальность работы обусловлена стремительно возрастающей ролью автоматической обработки информации: распознавание речи, образов, обработка поисковых запросов, автоматический перевод с иностранного языка и т. д.

Диссертация состоит из Введения, пяти глав и Заключения. Во Введении обосновывается актуальность темы, ставятся цели и задачи исследования, определяются объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Также во Введении формулируются положения, выносимые на защиту, обосновывается их соответствие выбранной специальности, приводится степень достоверности и апробация результатов, а также описываются структура и объём диссертации.

Первая глава посвящена анализу предметной области и постановке задачи. В этой главе рассматриваются общие принципы построения и функционирования нейронных сетей, существующие типы нейронных сетей, различные типы аппаратной реализации сетей: полупроводниковые, сверхпроводниковые, квантовые, а также определяется современный мировой уровень в этой области.

Главы 2 и 3 посвящены основным элементам нейронной сети — нейрону и синапсу и их реализации на основе сверхпроводниковой электроники.

В Главе 2 разбираются реализации сверхпроводниковых нейронов различных типов: Сигма-нейрона (S-neuron), Гаусс-нейрон (G-neuron) и нейрон на основе потокового кубита. В частности, разработаны схемы таких нейронов, найдены оптимальные параметры схем, проведен анализ энергопотребления.

В Главе 3 рассматриваются джозефсоновская и индуктивная реализации синапса. Первая основана на использовании магнитных джозефсоновских контактов (англ. Magnetic Josephson Junction), которые позволяют влиять на величину своего критического тока; вторая схема основана на использовании взамен нелинейных джозефсоновских контактов перестраиваемых кинетических индуктивностей.

В Главе 4 рассматриваются принципы построения нейронной сети, рассматриваются обучающая ячейка (Learning cell), фильтрующий элемент Rectifier Linear Unit (ReLU), приводятся результаты моделирования работы сверхпроводниковой нейронной сети.

Глава 5 посвящена рассмотрению гибридных опто-сверхпроводниковых нейронных сетей. В частности, рассматриваются основные компоненты, необходимые для реализации гибридной сети: сверхпроводниковые детекторы и источники фотонов, пути совершенствования оптических линий передачи данных в гибридной сети, методы повышения эффективности работы болометрического детектора.

В Заключение формулируются основные выводы.

Список публикаций автора включает 11 статей в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, 2 статьи в сборниках трудов конференций, 1 патент, а также 2 учебно-методических пособия, в которых нашли отражение результаты исследований автора.

Полученные в работе результаты являются новыми и достоверными, выводы обоснованными. Автореферат правильно и полностью отражает содержание Диссертации.

Однако отметим некоторые замечания, которые можно сделать по тексту диссертации:

1. В работе, на мой взгляд, не достаточно убедительно показаны преимущества сверхпроводниковых реализаций нейронных сетей по сравнению с полупроводниковыми аналогами. Дело в том, что сверхпроводниковые устройства на основе джозефсоновских переходов имеют микронные размеры, что не позволяет достичь столь же высокой степени интеграции, как в полупроводниковых микросхемах. В чём же тогда состоят преимущества сверхпроводниковых реализаций, помимо энергоэффективности? Да и при оценке энергоэффективности следует помнить о мощности, требуемой для охлаждения сверхпроводниковой микросхемы до рабочей температуры.
2. Приведённое в начале 5-й главы (стр 123-124) описание физических принципов работы сверхпроводникового однофотонного детектора SNSPD взято из ранних работ 2000-2002 гг. и является сильно упрощённым. В качестве довольно подробного обзора физики работы SNSPD можно отметить работу A. Engel, J. J. Renema, K. Il'in and A. Semenov «Detection mechanism of superconducting nanowire single-photon detectors», *Superconductor Science and Technology*, 114003, **28**, 2015, а также совсем свежий обзор Itamar Holzman, Yachin Ivry «Superconducting Nanowires for Single-Photon Detection: Progress, Challenges, and Opportunities», *Advanced Quantum Technologies*, 1800058, **2**, 2019.
3. Неверно указано назначение нанокриотрона (Глава 5, стр 128): нанокриотрон (nTron) не является источником света, а используется в качестве усилителя или ключа для формирования достаточно высокого напряжения для включения светодиода [155]. Однако указанная неточность допущена в обзорной части главы и нисколько не влияет на полученные автором оригинальные результаты.

4. В контексте обсуждаемых в работе аппаратных реализаций нейронных сетей не вполне понятна практическая значимость работы в терагерцовом диапазоне длин волн, также обсуждаемая в 5-й главе. Кажется, что для реализаций на основе быстрой одноквантовой логики (БОК) и сверхпроводниковых кубитов более актуален диапазон СВЧ на частотах порядка десятков гигагерц, а в оптических волноводных реализациях (как в американских работах) обычно используется свет в ближнем инфракрасном диапазоне на длине волны 1550 нм. Также обсуждение детекторов излучения ТГц диапазона (стр 132) не полно без упоминания сверхпроводниковых детекторов: болометров на кинетической индуктивности (KID), болометров на горячих электронах (HEB), болометров на холодных электронах (CEB).
5. Имеются некоторые замечания к ясности и наглядности представления результатов. Так, например на рисунках 40 и 65 размерность по оси времени - « T/T_c ». В контексте сверхпроводимости такое обозначение применяется для обозначения отношения рабочей температуры к критической, а поскольку нигде нет расшифровки, что такое T и T_c в данном случае, это наводит на мысли об опечатке. С другой стороны, на рисунке 34 время выражено в единицах t_c (правда, опять без расшифровки что такое t_c). Может быть правильнее было бы использовать « t/t_c » вместо « T/T_c » и дать расшифровку t_c непосредственно рядом с соответствующим рисунком? Кроме того, трехмерный график на рисунке 65 ненагляден с точки зрения демонстрации линейности отклика.
6. В работе имеется некоторое количество опечаток. Так, например, ссылки [155] и [154] указывают на одну и ту же работу, а ссылки [231] и [232] имеют неполные выходные данные: только автора, название и год публикации.

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», а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Щеголев Андрей Евгеньевич заслуживает присуждения ученой степени кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.15 – «Физика и технология наноструктур, атомная и молекулярная физика».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
Профессор кафедры Общей и экспериментальной физики
Института физики, технологии и информационных систем
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Московский педагогический государственный
университет»

КОРНЕЕВ Александр Александрович


13.10.2020

Контактные данные:

тел.:

e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация: 01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1, стр. 1

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Московский педагогический государственный
университет», Институт физики, технологии и информационных систем,
Кафедра общей и экспериментальной физики

Тел.:

e-mail:

