

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Ионина Александра Сергеевича «Практическая реализация и экспериментальное исследование прототипов сверхпроводящих нейронов», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Развитие современных вычислительных систем все в большей степени требует поиска альтернативных физических принципов реализации логических элементов цифровой и нейроморфной электроники. Традиционные полупроводниковые технологии, достигнув впечатляющих успехов в миниатюризации и производительности, начинают упираться в фундаментальные ограничения, связанные с рассеянием мощности, тепловыделением и квантовыми эффектами. В этом контексте сверхпроводниковая электроника, особенно адиабатические вычислительные подходы, предлагает беспрецедентные возможности по энергоэффективности, приближаясь к термодинамическому пределу. Диссертационная работа А.С. Ионина посвящена практической реализации ключевого элемента таких систем – сверхпроводящего нейрона, выполняющего нелинейное преобразование входного сигнала. **Актуальность** работы обусловлена не только фундаментальным интересом к физике джозефсоновских интерферометров, но и острой потребностью в создании элементной базы для гибридных квантово-классических вычислителей, функционирующих при криогенных температурах.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении четко сформулированы цель и задачи исследования, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава содержит развернутый обзор литературы, в котором последовательно рассмотрены микроскопическая теория сверхпроводимости, феноменологический подход Гинзбурга–Ландау, эффект Джозефсона в туннельных контактах, модели RSJ и RCSJ, а также

физические принципы работы одноконттактных и двухконттактных интерферометров. Особое внимание уделено теоретическим основам сверхпроводящих нейронов – сигма-нейрона и гаусс-нейрона. Этот обзор служит методологической основой для последующего экспериментального исследования.

Во второй главе подробно описан технологический маршрут изготовления многослойных тонкопленочных структур на основе Nb/AlO_x/Nb, включая все восемь основных этапов. Приведены методы характеристики образцов и численные подходы к расчету индуктивностей с использованием программ 3D-MLSI и wxLL. Описана экспериментальная установка, включающая криостат с жидким гелием и систему магнитного экранирования.

В третьей главе представлены конструкции и передаточные характеристики изготовленных прототипов сигма-нейрона и гаусс-нейрона. Подробно представлена методика высокочувствительных измерений малых магнитных потоков, основанная на применении двухконттактного СКВИД-магнитометра в режиме компенсации с обратной связью. Экспериментально показано, что сигма-нейрон реализует сигмоидальную функцию активации в рамках одного периода, а гаусс-нейрон – гауссоподобную. Выявлено наличие линейной паразитной компоненты. Продемонстрирована возможность управления формой передаточной функции путем изменения температуры, что позволяет перестраивать характеристики нейронов в широких пределах. Экспериментально показаны режимы с гистерезисным поведением передаточных функций.

В четвертой главе рассмотрен механизм возникновения «паразитной» индуктивной связи между элементами нейроморфной ячейки через сверхпроводящий экран, обусловленный циркуляцией экранирующих токов. С помощью численного моделирования в программных пакетах 3D-MLSI, wxLL рассчитаны полные матрицы индуктивностей нейронных ячеек. На основе матричного подхода разработаны усовершенствованные аналитические и численные методы расчета передаточных функций, учитывающие все взаимные индуктивности элементов. Показано хорошее количественное согласие расчетных и экспериментальных кривых. Детально исследовано влияние начального тока в измерительном СКВИДе на форму передаточной функции гаусс-нейрона, включая эффекты «переворота купола» и трансформации характеристики в прямоугольный

цуг. Обсуждается влияние асимметрии джозефсоновских переходов на передаточную функцию.

В заключении подведены основные итоги работы.

Научная новизна и практическая значимость диссертационной работы А.С. Ионина не вызывают сомнений. К наиболее значимым результатам можно отнести следующие:

- Впервые осуществлена практическая реализация и экспериментальное исследование прототипов сверхпроводящих нейронов двух типов (сигма-нейрон и гаусс-нейрон), изготовленных по технологии Nb/AlO_x/Nb. Экспериментально подтверждена возможность получения как сигмоидальной, так и гауссоподобной передаточных функций, что является критическим шагом на пути создания сверхпроводниковых нейроморфных архитектур.
- Обнаружены и охарактеризованы новые физические эффекты: перекрестная индуктивная связь между элементами нейрона через сверхпроводящий экран и влияние начального тока смещения в линии обратной связи измерительного интерферометра. Показано, что эти эффекты приводят к искажениям передаточной функции, сравнимым по амплитуде с полезным сигналом, что необходимо учитывать при проектировании нейроморфных схем.
- Разработаны аналитические и численные методы расчета передаточных функций на основе полной матрицы взаимных индуктивностей. Предложенный подход позволил не только описать экспериментальные данные, но и предсказать возможность трансформации формы передаточной функции гаусс-нейрона (переворот купола, преобразование в прямоугольный цуг), что открывает перспективы создания перестраиваемых нейроморфных элементов и логических вентилей на их основе.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний и вопросов:

1. Все расчёты передаточных функций выполнены в рамках стационарной модели: система уравнений баланса фаз и законов Кирхгофа решается относительно токов при заданной

джозефсоновской фазе, а роль нестационарных эффектов (RSJ/RCSJ-динамика, LC-резонансы, ступеньки Шапиро) обсуждаются отдельно. Между тем, в работе экспериментально наблюдаются гистерезисные участки, «полки» на ВАХ, связанные с LC-резонансом, и немонотонности вольт-поточковой характеристики. Насколько правомерно использование квазистатического приближения для описания передаточных функций в области гистерезиса и вблизи границ периода?

2. В разделах 4.2.2 и 4.3.2 показано, что начальный ток i_0 в контуре измерительного СКВИДа приводит к сдвигу и деформации передаточных функций — вплоть до «переворота купола» у G-нейрона. Фактически это означает, что измерительная схема не является пассивным наблюдателем, а активно влияет на состояние нейрона через общий сверхпроводящий экран и взаимные индуктивности. В диссертации не обсуждается подробно, насколько сильно это обратное влияние.

3. В разделе 4.3.1 отмечено, что использование джозефсоновского перехода с треугольным ток-фазовым соотношением в σ -нейроне «в перспективе позволяет реализовать функцию активации ReLU». Нет четкого ответа, могут ли реальные джозефсоновские структуры, ток-фазовое соотношение которых достаточно близко к треугольному или двугармоническому, реализовать ReLU-подобную активацию в рамках использованного техпроцесса Nb/AlO_x/Nb.

Указанные замечания и вопросы носят дискуссионный характер и не ставят под сомнение высокий научный уровень представленной работы. Основные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и представлены на российских и международных конференциях. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

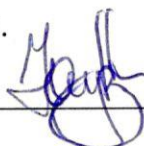
Диссертационная работа А.С. Ионина является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему с применением современной экспериментальной базы и передовых методов численного моделирования. По объему, новизне и достоверности полученных результатов она полностью соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013

года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Автор работы, Ионин Александр Сергеевич, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния», профессор, ведущий научный сотрудник Лаборатории теоретической физики Международной межправительственной научно-исследовательской организации «Объединённый институт ядерных исследований»

«24» 09 2026 года  /Шукринов Юрий Маджнунович

Согласен на обработку персональных данных.  /Шукринов Ю.М.

«24» 09 2026 года

Подпись Шукринова Ю.М. заверяю.

Ученый секретарь ЛТФ ОИЯИ
к.ф.-м.н



 /Андреев Александр Васильевич
«24» 09 2026 года

Контактная информация: Почтовый адрес: 141980, Московская область, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Телефон: 89150442981

e-mail: shukrinv@theor.jinr.ru