

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Неило Алексея Александровича
на тему: «Спин-вентильные структуры для сверхпроводниковой
электроники»
по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.**

Представленная диссертационная работа Неило А.А. посвящена **актуальной** проблеме физики конденсированного состояния – теоретическому моделированию и анализу электронного транспорта в сложных сверхпроводниковых гибридных структурах с ферромагнетиками. Выбор темы представляется не только актуальным, но и стратегически важным для формирования научно-технологического задела в области пост-кремниевой электроники. Работа представляет из себя целостную исследовательскую платформу для проектирования и прогнозирования свойств сложных квантовых материалов.

В работе проведен комплексный теоретический анализ широкого класса гибридных систем (S/F , $S/N_{SO}/F$, SF_1SiF_2S , $SIsFS$ и их модификаций) с целью выявления новых физических эффектов и создания на их основе перспективных элементов для сверхпроводниковой электроники. Центральное место в исследовании занимает разработка и численная реализация последовательной микроскопической модели на основе уравнений Узаделя, позволяющей самосогласованно описывать синглетные и триплетные сверхпроводящие корреляции, токовый транспорт и кинетические свойства в условиях диффузного транспорта и произвольной ориентации намагниченностей.

Логика построения диссертации отражает классический научный подход: от постановки проблемы и освоения инструментария к его применению для генерации нового знания и, наконец, к поиску альтернативных, более удобоваримых решений.

Глава 1 формирует постановку проблем исследований и проектирования сверхпроводниковых устройств, решаемых в работе Неило А.А. В главе дан детальный разбор аппарата функций Грина, вывод уравнений Боголюбова-де Жена, Узалея и Эйленбергера, а также интерпретации граничных условий Зайцева и Куприянова-Лукичева. Также в главе дан анализ современных достижений и проблем в области спиновых вентилей.

Глава 2 служит важным мостом между теорией и решением конкретных физических задач. В ней представлен численный алгоритм решения нелинейной задачи по моделированию гибридных сверхпроводниковых структур, а также проведена его верификация на основе метода «джозефсоновской спектроскопии». Он основан на аналитическом продолжении гриновских функций на вещественную ось энергий и расчете вольт-амперных характеристик. Его успешное применение для расшифровки данных по CuNi/Nb, где Неило А.А. предложил непротиворечивую модель кластерной неоднородности, показывает эффективность разработанного подхода. Исследование ДОС в SIsFS-структурах в зависимости от обменной энергии, толщин слоев и прозрачности границ раскрывает сложность и многосторонность физических процессов электронных корреляций в подобных системах.

Глава 3 является главной в работе, где разработанный метод применяется для предсказания и исследования нового физического эффекта – спинового триггера. Неило проводит демонстрацию явления, а также показывает его исчерпывающее параметрическое исследование, включая построение подробных карт оптимальных параметров в пространстве толщин и материальных характеристик. Детальное описание пространственных распределений амплитуд и фаз спаривания выявляет механизмы рассогласования фаз между параметром порядка и гриновскими функциями. Предложенные на основе эффекта устройства – джозефсоновский вентиль $\text{SF}_1\text{S}_1\text{F}_2\text{sIS}$ с несколькими режимами работы (плавное управление, $0-\pi$

переход) и вентиль с управляемой кинетической индуктивностью $SF_1S_1F_2sN$ – являются перспективными элементами для сверхпроводниковой электроники.

Глава 4 демонстрирует продолжение развития идеи сверхпроводящих спиновых вентилях. В ней осуществляется переход от систем с двумя ферромагнетиками, требующими сложного управления, к более простым и технологичным структурам с одним F-слоем и со слоем нормального металла со спин-орбитальным взаимодействием (COB). Теоретический анализ $sN_{so}F$ -системы, включающий вывод и анализ модифицированных уравнений Узалея с учетом COB смешанного типа, выявил зависимость сверхпроводящего параметра порядка в s-слое от угла между вектором намагниченности и кристаллографическими осями N_{so} материала. Предложенная конструкция джозефсоновского клапана $SI sN_{so}F$ является новым решением, обеспечивающим плавное управление критическим током, что открывает уникальные возможности для аналоговой сверхпроводниковой электроники.

Научная новизна работы выражена ярко и подтверждается рядом существенных результатов, таких как первое объяснение спектроскопических данных $CuNi/Nb$ с позиций кластерной модели, открытие и количественное описание спин-триггерного эффекта, исследование нелинейной кинетической индуктивности и установление роли анизотропного COB. Выносимые на защиту положения сформулированы четко и находят строгое обоснование в результатах проведенного численного эксперимента. **Достоверность** результатов обеспечена использованием фундаментального аппарата, корректными численными методами, внутренней непротиворечивостью и их частичной перекрестной проверкой.

Научно-практическая ценность работы определяется ее значительным вкладом в фундаментальную науку – в понимание сосуществования сверхпроводимости, ферромагнетизма и спин-орбитального взаимодействия в мезоскопических системах. Для прикладных

задач могут быть ценны конкретные предложения по архитектуре элементов с предсказанными высокими характеристиками, а также сам разработанный вычислительный инструментарий.

Работа полностью соответствует критериям специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы, так как исследует тонкопленочные гетероструктуры, где квантово-размерные и интерфейсные эффекты определяют их макроскопические свойства.

Тем не менее, хотелось бы отметить следующие замечания :

1. Применимость граничных условий Куприянова-Лукичева (1-15) к рассматриваемым многослойным ультратонким структурам, да еще со спин-орбитальным взаимодействием, подробно не обсуждена.
2. Во всех расчетах принималась *sd* модель ферромагнетика и считалось, что за явления переноса ответственны только *s*-подобные электроны (стр. 26). Для 3d переходных металлов в переносе участвуют и *d*-подобные состояния, также играет роль *sd* гибридизация. Какова возможная роль этих состояний в рассматриваемых спин-вентильных структурах?
3. При сравнении с экспериментом (Рис. 2.5) автор использует много подгоночных параметров, а экспериментальные данные о микроструктуре самой пленки CuNi не приводятся. Автор сам признает, что это фитирование носит исключительно демонстрационный характер. Но все-таки хотелось бы знать насколько правомерно использовать саму концепцию о том, что пленка CuNi состоит из кластеров разного размера (7 и 11 нм), с разной величиной обменного взаимодействия.
4. В четвертой главе рассматриваются структуры со спин-орбитальным взаимодействием Рашбы и Дрессельхауза. Во-первых, никак параметры этих взаимодействий не привязаны к другим энергетическим параметрам, а во-вторых, в структуре, когда прикладывается напряжение действует не только обычное спин-орбитальное взаимо-

действие Рашбы за счет градиента потенциала у поверхности пленки, но и спин-орбитальное взаимодействие за счет градиента электрического поля.

5. В работе много недостатков оформления. Во-первых, свои работы не выделены в тексте, а список обозначений (далеко неполный) дан в конце диссертации. Во-вторых, некоторые термины просто неправильные, например, главный спин и вторичный спин (стр. 25), или не удачны (например “сила спин-вентильного эффекта” или “проксимизация” на стр. 94), встречаются дублирование слов (стр.92) или ссылок (248 совпадает с 252), обозначения в тексте и на рисунках иногда не совпадают и др.

Указанные замечания ни в коей мере не умаляют значимости диссертационного исследования, не влияют на ее выводы, а носят скорее характер пожеланий и рекомендаций для дальнейшей работы.

Работы Неило А.А. хорошо известны специалистам, опубликованы в ведущих журналах, результаты докладывались на конференциях.

Автореферат диссертации точно и в полной мере отражает ее содержание.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы. (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова. Диссертационное исследование оформлено согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Подводя итог, следует заключить, что диссертация Неило А.А. представляет собой объемное, многоаспектное и методологически

самосогласованное исследование, характеризующееся теоретической глубиной, новизной и практической значимостью. Неило демонстрирует владение современным аппаратом физики конденсированного состояния, а также навыки численного моделирования.

Таким образом, соискатель Неило А.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.6.6. Нанотехнологии и наноматериалы.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры магнетизма физического факультета МГУ
им. М.В. Ломоносова

ГРАНОВСКИЙ Александр Борисович

10.12.2025

Дата подписания

Контактные данные:

тел.: 7 9055414398, e-mail: granov@magn.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.11 "Физика магнитных явлений"

Адрес места работы:

119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2
МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет
Тел.: +7 (495) 939-18-47; e-mail: info@physics.msu.ru

Подпись проф. Грановского А.Б. удостоверяю
Ученый Секретарь ученого совета физического факультета МГУ
им.М.В. Ломоносова, профессор Стремоухов С.Ю.