

**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.**

Диссертационная работа Неило А.А. посвящена теоретическому моделированию сверхпроводящих ферромагнитных гетероструктур. Выбор темы является **актуальным** в контексте развития пост-кремниевой электроники. В работе предпринята попытка создания целостной теоретической платформы для прогнозирования свойств элементов сверхпроводящей электроники на основе сложных гетероструктур типа сверхпроводник/ферромагнетик.

Неило А.А. проведен теоретический анализ гибридных тонкопленочных систем (такие, как структуры S/F, S/N_{so}/F, SF₁S₁F₂S, SIsFS) с целью выявления новых эффектов для применения в сверхпроводниковой электронике. Основным инструментом исследования выступает численная реализация модели на основе уравнений Узаделя, призванная описывать синглетные и триплетные сверхпроводящие корреляции в условиях диффузного транспорта.

Глава 1 формирует теоретическую базу работы. Представлен анализ аппарата функций Грина, уравнений Боголюбова-де Жена, Узаделя и Эйленбергера, а также граничных условий. Проведен обзор современных исследований в области спиновых вентилей, определяющий направление для диссертационной работы.

Глава 2 посвящена применению численного алгоритма решения граничной задачи для анализа важных материальных параметров в гибридных структурах. Применение метода "джозефсоновской спектроскопии", основанной на аналитическом продолжении гриновских функций, для анализа данных по CuNi/Nb привело к подтверждению модели

клusterной неоднородности в магнитном сплаве CuNi. Исследование плотности состояний в SIsFS-структурах выявило зависимость их характеристик от обменной энергии, толщин слоев и прозрачности границ.

Глава 3 содержит исследование спин-триггерного эффекта. В работе проведено параметрическое изучение явления, включая построение карт оптимальных параметров. Анализ пространственных распределений амплитуд и фаз спаривания выявил механизмы триггерного эффекта в $SF_1S_1F_2S$ структуре — изменение сверхпроводимости s-слоя за счет накачки его сверхпроводящими корреляциями со стороны S-электрода при открытом $F_1S_1F_2$ спиновом вентиле. На основе эффекта предложены устройства: джозефсоновский вентиль $SF_1S_1F_2sIS$ и вентиль с управляемой кинетической индуктивностью $SF_1S_1F_2sN$, исследованы их нелинейные характеристики.

Глава 4 осуществляет переход к структурам с одним ферромагнитным слоем. Проанализирована $sN_{SO}F$ -система с учетом спин-орбитального взаимодействия, выявлена зависимость сверхпроводимости от ориентации намагниченности. Предложена конструкция джозефсоновского вентиля $SIsN_{SO}F$, обеспечивающая управление критическим током.

Научная новизна исследования проявляется в ряде ключевых достижений: подтверждение кластерной модели, объясняющей спектроскопию CuNi/Nb, открытие спин-триггерного эффекта в $SF_1S_1F_2S$ структуре, анализ нелинейной кинетической индуктивности и количественное описание роли комбинированного спин-орбитального взаимодействия типа Рашбы+Дрессельхауса в сложных многослойных сверхпроводящих гибридных структурах. Положения, выносимые на защиту, четко сформулированы и подтверждены численными экспериментами, достоверность которых обеспечена корректной методологией и внутренней согласованностью.

Работа вносит вклад в фундаментальную науку, углубляя понимание связи между сверхпроводимостью, ферромагнетизмом и спин-орбитальными эффектами в мезоскопических системах. Её **практическая ценность**

заключается в предложениях по созданию элементов (сверхпроводящих спиновых вентиляй) с улучшенными характеристиками и в демонстрации применимости спектрографических методов для анализа экспериментальных образцов.

Исследование соответствует специальности «Нанотехнологии и наноматериалы», так как фокусируется на тонкопленочных гетероструктурах, где макроскопические свойства определяются наноразмерными и интерфейсными эффектами.

Тем не менее, хотелось бы отметить следующие замечания и задать ряд вопросов:

1. В Главе 2, при анализе данных СТМ по Nb/CuNi, автор рассматривает несколько сценариев, но в конечном итоге останавливается на одном, основанном на пространственной неоднородности. Однако, учитывая сложность реальных образцов, нельзя полностью исключить иные механизмы, такие как влияние магнитных вихрей, эффекты сильной локализации или роль граничных состояний. Автор не в полной мере обосновывает, почему предложенная им модель является единственно верной, а не просто одной из возможных, хорошо описывающих эксперимент.
2. Вся работа построена на строгом соблюдении условий "грязного" предела ($l \ll \xi$). Однако при обсуждении структур с сильными ферромагнетиками (где $H = 100 T_C$) это условие может нарушаться. Автор упоминает это ограничение, но не дает качественной оценки, как именно его нарушение могло бы изменить количественные, а может быть, и качественные выводы для таких случаев.
3. В чем состоят преимущества рассмотренных в диссертации многослойных спин-вентильных систем типа S/F/S/F/s по сравнению с известными в литературе спиновыми вентилями типа FI/S/FI, в которых был экспериментально продемонстрирован 100% спин-вентильный эффект [PRL 110, 097001 (2013)]?

4. Каковы оценки магнитных полей, требуемых для переключения вентиля между параллельным и антипараллельным состояниями? Не приведет ли приложение полей такой величины к разрушению сверхпроводимости в рассматриваемой гибридной структуре?
5. Возможно ли в системе джозефсоновского вентиля S/F/S/F/s/I/S реализовать обратный эффект переключения между параллельным и антипараллельным состояниями ферромагнетиков при помощи импульсов джозефсоновского тока? Проводились ли соответствующие оценки?
6. В диссертации присутствует ряд опечаток, причем не только орографических. Например, на стр. 84-85 автор ошибочно ссылается на формулу (4.17) вместо (3.9); подписи вертикальных осей рисунков 3.10 и 3.11 содержат ошибку.

Указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования, а вопросы носят скорее характер мотивации к дальнейшим исследованиям. 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
Заведующая лабораторией спиновых явлений в
сверхпроводниковыхnanoструктурах и устройствах
Московский физико-технический институт

Бобкова Ирина Вячеславовна

10.12.2025 г.

Контактные данные:

тел.: +79031151926, e-mail: bobkova.iv@mipt.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
1.3.3 "Теоретическая физика"

Адрес места работы:

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9
Тел.:+79031151926; e-mail: bobkova.iv@mipt.ru

Подпись сотрудника МФТИ, Физтех
Бобковой И.В удостоверяю: