

Отзыв

официального оппонента Пудонина Федора Алексеевича на диссертационную работу **Скирдкова Петра Николаевича «Спин-трансферный диодный эффект в магнитных туннельных переходах»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния

Наномагнетизм и спинтроника, основанные на управляемой динамике намагниченности в тонкопленочных гетероструктурах, являются чрезвычайно перспективными направлениями фундаментальных и прикладных исследований в области физики конденсированного состояния. С момента открытия эффекта гигантского магнитосопротивления в области спинтроники был сделан еще целый ряд ярких фундаментальных открытий, которые обусловили новый этап развития спинтроники. Так, была создана целая индустрия жестких дисков и магнитной оперативной памяти, основанных на использовании спинтронных приборов, предложены магнитные наногенераторы, новые поколения высокоэффективных микроволновых детекторов и другие системы, использующие новые спиновые явления в магнитных структурах. Диссертация П.Н. Скирдкова посвящена теоретическому исследованию именно этих новых спиновых устройств – спин-трансферных диодов (СТД). Поэтому можно с уверенностью утверждать, что диссертационная работа Скирдкова П.Н. является актуальной как с точки зрения фундаментальной физики магнетизма и физики конденсированного состояния, так и имеет важный прикладной потенциал. Исследование сложных динамических состояний намагниченности, таких как, например, вихри и легкоконусные состояния, проведенное в работе, представляет значительный научный интерес.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, содержащих оригинальные результаты автора, опубликованные за последние годы, заключения, списка литературы из 151 источника и приложения. Структура диссертации логична и отражает последовательное решение поставленных задач. Материал изложен четко, с использованием 39 рисунков, что облегчает восприятие сложных теоретических моделей.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и конкретные задачи исследования, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, а также положения, выносимые на защиту.

Первая глава носит обзорный характер. В ней проведен анализ современного состояния исследований в области спинтроники, включая эффекты гигантского и туннельного магнетосопротивления, переноса спина и их применение. Подробно рассмотрены принципы работы магнитных туннельных переходов и спин-трансферного диодного эффекта, а также существующие методы повышения чувствительности и расширения частотного диапазона СТД.

Во второй главе изложены аналитические и численные методы, применяемые в работе. Приведено уравнение Ландау-Лифшица-Гильберта с учетом вклада спин-поляризованного тока. Детально описан процесс микромагнитного моделирования, включая используемый программный пакет SpinPM, постановку граничных условий и алгоритмы расчета.

В третьей главе представлены результаты разработки СТД с повышенными и пониженными резонансными частотами. В разделе 3.1 исследован СТД, в котором оба ферромагнитных слоя мягко закреплены под разными углами с помощью антиферромагнитных слоев с различными температурами Нееля. Показано, что такая конструкция позволяет достичь рекордных резонансных частот порядка 9 ГГц и предложен

метод их настройки на этапе изготовления. В разделе 3.2 теоретически исследован вихревой СТД, работающий на субгигагерцовых частотах (380–410 МГц), и проанализировано влияние постоянного тока смещения на его чувствительность.

В четвертой главе проведено исследование механизмов широкополосного выпрямления в СТД. В разделе 4.1 теоретически объяснен эффект широкополосного выпрямления, обусловленный неколлинеарностью намагниченностей свободного слоя и поляризатора, достигаемой с помощью внешнего магнитного поля. В разделе 4.2 изучен альтернативный механизм, связанный с формированием неоднородных микромагнитных состояний (C- и S-состояний) в свободном слое, и доказана его магнитная природа.

В пятой главе исследовано легкоконусное магнитное состояние в свободном слое в магнитном туннельном переходе (МТП) с перпендикулярной магнитной анизотропией. В разделе 5.1 продемонстрировано магнитостатически индуцированное формирование такого состояния даже при нулевой анизотропии второго порядка и показана возможность достижения рекордной чувствительности пассивного СТД. В разделе 5.2 построены фазовые диаграммы легкоконусного состояния с учетом анизотропий первого и второго порядка и магнитостатического взаимодействия, а также предложен подход к оптимизации геометрии МТП для расширения области эффективного выпрямления.

В заключении подведены итоги работы и сформулированы основные научные результаты.

Хотелось бы особо выделить наиболее интересные и значимые результаты диссертационной работы, а именно:

- Теоретически предложена и исследована оригинальная конструкция СТД с настраиваемой резонансной частотой за счет использования двух антиферромагнитных слоев с разными температурами Нееля для закрепления ферромагнетиков под разными углами.
- Разработана аналитическая модель вихревого СТД на основе уравнения Тилиа, позволившая описать его динамику и выявить зависимость чувствительности от тока смещения и входной мощности.
- Дано теоретическое объяснение двух новых механизмов широкополосного выпрямления в СТД: за счет неколлинеарности намагниченностей и за счет образования неоднородных микромагнитных конфигураций (C- и S-состояний) в свободном слое.
- Впервые продемонстрирована возможность формирования легкоконусного состояния в свободном слое МТП с перпендикулярной анизотропией первого порядка исключительно за счет магнитостатического взаимодействия, что привело к предсказанию рекордно высокой чувствительности пассивного СТД. Предложен новый подход к устранению паразитных магнитостатических полей и повышению эффективности выпрямления через оптимизацию геометрии МТП.

Представленные в диссертации научные положения, выводы и практические рекомендации обладают высокой степенью обоснованности. Каждое теоретическое утверждение подкреплено либо строгим аналитическим выводом из базовых уравнений динамики намагниченности, либо результатами масштабного численного эксперимента. Особую убедительность придает практика взаимной проверки: выводы, полученные из аналитических моделей (например, для вихревого СТД или макроспинового приближения), верифицируются независимым микромагнитным моделированием, и наоборот – обнаруженные в моделировании эффекты (широкополосное выпрямление) получают аналитическое объяснение. Рекомендации по настройке резонансной частоты, выбору геометрии нанозлемента и использованию тока смещения прямо следуют из

установленных количественных зависимостей и анализа фазовых диаграмм. Обоснованность также подкрепляется тем, что теоретические предсказания работы находят объяснение в рамках классической теории магнетизма и коррелируют с известными экспериментальными тенденциями в области спинтроники.

Диссертационная работа Скирдкова П.Н. представляет собой оригинальное и целостное теоретическое исследование, обладающее несомненной научной новизной. Впервые в рамках единого подхода проведен комплексный анализ фундаментальных механизмов, определяющих спин-трансферный диодный эффект в магнитных туннельных переходах, и на этой основе разработаны новые физические принципы управления частотными характеристиками и чувствительностью таких устройств. Таким образом, диссертационная работа содержит совокупность новых научных результатов, имеющих важное значение для развития физики конденсированного состояния и спинтроники, а также открывающих новые перспективы для практических применений.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации обоснована применением общепризнанных и корректных теоретических методов. Использование взаимодополняющих подходов – аналитического и микромагнитного моделирования – обеспечивает высокую надежность результатов. Хорошее согласие выводов работы с опубликованными данными других авторов, а также успешная апробация на ведущих международных конференциях (JEMS, INTERMAG и др.) подтверждают их достоверность. Основные результаты отражены в 7 публикациях в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах данных, включая журналы первого квартала.

Отмечая высокий уровень работы, позволю себе высказать несколько пожеланий, которые могут быть полезны для дальнейших исследований автора:

1. В работе основное внимание уделено ферромагнитным материалам. Было бы интересно рассмотреть возможность использования антиферромагнетиков и ферримагнетиков и их влияние на характеристики СТД.
2. В рамках теоретической работы было бы полезно более детально обсудить возможные экспериментальные пути реализации предложенных конструкций СТД и ожидаемые технологические сложности.
3. Было бы полезно в будущих работах более подробно остановиться на вопросах согласования импеданса предлагаемых СТД со стандартными СВЧ-цепями, что критически важно для практической реализации.
4. В тексте диссертации присутствует ряд опечаток.

Однако, сделанные замечания, большинство из которых носит характер пожеланий для последующих исследований диссертанта, никак не влияют на общую, несомненно положительную, оценку рассматриваемой работы. Все выносимые на защиту результаты являются новыми, обоснованными и значимыми. Материалы диссертации полностью отражены в опубликованных научных работах по тематике исследования. Автореферат удовлетворяет предъявленным требованиям, и в полной мере отражает результаты и выводы диссертационной работы.

В целом, представленная диссертационная работа П.Н.Скирдкова представляет собой добротную, логически завершенную научно-исследовательскую работу на актуальную тему, выполненную на высоком научном уровне и вносящую существенный вклад в развитие спинтроники и физики конденсированного состояния.

Таким образом, диссертационная работа Скирдкова Петра Николаевича «Спин-трансферный диодный эффект в магнитных туннельных переходах» является законченной

научно-квалификационной работой и соответствует всем критериям и требованиям, установленным в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденном постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года (ред. от 16 октября 2024 года). Содержание диссертации полностью соответствует паспорту специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния, а ее автор Скирдков Петр Николаевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
Главный научный сотрудник, и.о. заведующего
Отдела физики полупроводников и наноструктур
Отделения физики твердого тела
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Физического института
им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

Ф.А. Пудонин

25.02.26

Контактные данные:

тел. 8(916)4234331, e-mail: pudoninfa@lebedev.ru

Специальность: 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

119991, Москва, Ленинский проспект, д. 53,

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,

Отделение физики твердого тела, Отдел физики полупроводников и наноструктур

Тел. 8(499) 132-65-54 (секретариат); e-mail: office@lebedev.ru

Подпись Ф.А. Пудонина удостоверяю:

Ученый секретарь, заместитель директора по научной работе

Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева

Российской академии наук, к.ф.-м.н.

А.В. Колобов

25.02.2026