

Отзыв официального оппонента 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 (отрасль науки – физико-математические).

Актуальность избранной темы

Тема диссертации Скирдкова П.Н. посвящена теоретическому исследованию фундаментальных механизмов влияния спиновых токов на динамику намагниченности в магнитных туннельных переходах (МТП) и разработке моделей высокочувствительных широкополосных спин-трансферных диодов (СТД). Актуальность работы обусловлена бурным развитием спинтроники – одного из ключевых направлений современной физики конденсированного состояния. Устройства на основе спин-трансферного диодного эффекта обладают значительным потенциалом для создания нового поколения энергоэффективных микроволновых детекторов, приемников и систем сбора радиочастотной энергии для телекоммуникаций, интернета вещей и биомедицины. Исследование, направленное на расширение частотного диапазона и повышение чувствительности таких устройств, а также на изучение фундаментальных особенностей динамики различных микромагнитных состояний в МТП (легкоконусных, вихревых, однородных и неоднородных), безусловно является своевременным и востребованным.

Содержание работы

Диссертация является законченной научной работой, логично и последовательно структурированной. Она состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 151 наименования и приложения. Объем работы – 112 страниц, включая 39 рисунков и 1 таблицу.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и 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.

Вторая глава посвящена методологии исследования. 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

разработать 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 C- и S состояний в свободном слое, и доказана его магнитная природа.

В пятой главе исследовано легкоконусное магнитное состояние в свободном слое 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.

Научная новизна и значимость

Научная новизна диссертации может быть сформулирована в виде следующих пунктов:

- Предложена и теоретически обоснована новая конструкция СТД с двумя мягко закрепленными ферромагнитными слоями, позволяющая достигать рекордных резонансных частот до 9.5 ГГц и обеспечивающая метод настройки частоты на этапе изготовления.
- Впервые проведен комплексный аналитический и микромагнитный анализ вихревого СТД, работающего на субгигагерцовых частотах, и показана возможность значительного повышения его чувствительности с помощью постоянного тока смещения.
- Теоретически объяснены новые механизмы широкополосного выпрямления, связанные как с неколлинеарностью намагниченностей слоев, так и с формированием неоднородных микромагнитных состояний в свободном слое.
- Обнаружен и исследован новый механизм магнитостатически индуцированного формирования легкоконусного состояния в МТП с перпендикулярной анизотропией, позволяющий достичь рекордной чувствительности пассивного СТД до 4650 мВ/мВт. Предложен новый подход к устранению паразитных магнитостатических полей и повышению эффективности выпрямления через оптимизацию геометрии МТП.

К фундаментальным результатам следует отнести вклад в понимание динамики намагниченности в магнитных туннельных переходах под действием спиновых токов. Практическая ценность работы заключается в разработке теоретических основ для создания нового класса высокочувствительных и настраиваемых микроволновых устройств.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность научных результатов, представленных в диссертации, базируется на корректном применении фундаментальных физических законов и уравнений (Ландау-Лифшица-Гильберта, Тиля), а также на последовательном использовании аналитического подхода и метода численного микромагнитного моделирования. Теоретические построения сопровождаются детальными выводами и численными оценками. Ключевые рекомендации по конструированию СТД с заданными частотами и высокой чувствительностью логически вытекают из полученных зависимостей для изученных физических механизмов (неколлинеарность, неоднородные состояния, легкоконусная динамика). Обоснованность работы подтверждается также хорошим качественным и количественным согласием результатов моделирования с предсказаниями аналитических моделей, а также с известными экспериментальными фактами, упомянутыми в литературном обзоре.

Достоверность результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением современной методологии, сочетающей аналитические расчеты на основе уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта и Тиля и численное микромагнитное моделирование. Полученные результаты согласуются с известными литературными данными. Основные положения диссертации опубликованы в 7 высокорейтинговых рецензируемых журналах, включая *Physical Review B*, *Applied Physics Letters*, *Physical Review Applied*, что служит надежным свидетельством достоверности и научного признания работы. Полученные результаты также апробированы на многочисленных российских и международных конференциях.

Замечания и пожелания

При безусловно положительной оценке диссертации стоит отметить следующие замечания:

1. В тексте диссертации присутствует ряд опечаток и неточностей в рисунках.
2. В третьей главе диссертации, при рассмотрении влияния постоянного тока смещения, недостаточно подробно проведен анализ тепловых эффектов, которые могут возникать при высоких плотностях тока.
3. В четвертой главе диссертации не рассмотрен вопрос влияния тепловых шумов на динамику намагниченности и выпрямление, что особенно актуально при очень малых мощностях входного переменного сигнала.
4. Хотелось бы видеть в заключении более развернутый раздел, посвященный конкретным перспективам применения разработанных моделей СТД в реальных устройствах систем связи или сбора энергии.

Сделанные замечания, которые носят характер пожеланий для последующих исследований, не влияют на общую, безусловно 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.

Заключение

Диссертационная работа Скирдкова Петра Николаевича «Спин-трансферный диодный эффект в магнитных туннельных переходах» является законченной научно-квалификационной работой, которая выполнена на высоком научном уровне, имеет очевидную новизну и практическую значимость. Работа 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 специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния и отрасли науки – физико-математические. Диссертационная работа полностью соответствует требованиям новизны, научно-практической значимости и достоверности, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. На основании изложенного считаю, что диссертация Скирдкова Петра Николаевича заслуживает высокой оценки, а ее автор – присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния. Содержание автореферата и диссертации соответствуют друг другу.

Официальный оппонент:

ведущий научный сотрудник отдела магнетизма Земли и планет Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН)

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.11. Физика магнитных явлений

Адрес места работы: 108480, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, дом 4, ИЗМИРАН

Контактные данные:

Тел.: +7 (910) 861-5064

E-mail: usov@obninsk.ru

Усов Николай Александрович

27 февраля 2026 г.

Согласен на обработку персональных данных

Усов Николай Александрович

27 февраля 2026 г.

Подпись Усова Николая Александровича заверяю

Ученый секретарь ИЗМИРАН

к.ф.-м.н.

ИЗМИРАН
Институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения
радиоволн им. Н.В. Пушкова
27 февраля 2026 г.
А.И. Рез