

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.223.03,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «ИНСТИТУТ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
ИМ. А.М. ПРОХОРОВА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»,  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ  
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 23 марта 2026 г. № 42

О присуждении Скирдкову Петру Николаевичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Спин-трансферный диодный эффект в магнитных туннельных переходах» по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния принята к защите 22 декабря 2025 г. (протокол заседания № 39) диссертационным советом 24.1.223.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (119991 ГСП-1, Москва, ул. Вавилова, д. 38, приказ о выдаче разрешения на создание совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук на базе федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук» от 12.12.2023 г. № 2290/нк).

Соискатель Скирдков Петр Николаевич, 03 января 1990 года рождения. В 2013 году соискатель окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению 010900 «Прикладные математика и физика». В 2017 году соискатель окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия» по специальности 01.04.07 Физика конденсированного состояния.

Соискатель работает в должности младшего научного сотрудника теоретического отдела Центра плазменных и микроволновых технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М.

Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена в теоретическом отделе Центра плазменных и микроволновых технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук», Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель — Звездин Константин Анатольевич, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник специализированной учебно-научной лаборатории сверхбыстрой динамики ферроиков кафедры наноэлектроники Института перспективных технологий и индустриального программирования Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "МИРЭА - Российский технологический университет", Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Официальные оппоненты:

Усов Николай Александрович, доктор физико-математических наук, 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,

Пудонин Федор Алексеевич, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник Лаборатории физики неравновесных явлений в неоднородных системах Отдела физики полупроводников и наноструктур Отделения физики твердого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук

дали положительные отзывы о диссертации со следующими замечаниями:

1. Замечания Усова Н.А.:

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.

## 2. Замечания Пудонина Ф.А.:

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.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва, в своем положительном заключении, подписанным Коледовым Виктором Викторовичем, доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником Лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, Каманцевым Александром Павловичем, кандидатом физико-математических наук, старшим научным сотрудником Лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, и утвержденным ВРИО директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук академиком РАН, доктором физико-математических наук, Никитовым Сергеем Аполлоновичем, указала, что диссертация Скирдкова Петра Николаевича «Спин-трансферный диодный эффект в магнитных туннельных переходах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком теоретическом уровне, работа соответствует всем требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24 сентября 2013 года (ред. от 16 октября 2024 г.), в части: научной новизны и самостоятельности исследования,

актуальности и практической значимости полученных результатов, достоверности и обоснованности выводов, соответствия 1.3.8. Физика конденсированного состояния и отрасли физико-математических наук. Диссертационная работа Скирдкова Петра Николаевича заслуживает высокой оценки, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния.

При безусловно положительной оценке работы, диссертационная работа не лишена некоторых недостатков. В результате можно сформулировать следующие замечания:

1. В диссертации рассматривается влияние постоянного тока смещения, однако анализ тепловых эффектов, которые могут возникать при высоких плотностях тока, представлен недостаточно. Более того в диссертации не рассмотрен вопрос влияния тепловых шумов на динамику намагниченности и выпрямление, что особенно актуально при очень малых мощностях входного переменного сигнала.
2. В рамках теоретической работы было бы полезно более детально обсудить возможные экспериментальные пути реализации предложенных конструкций СТД и ожидаемые технологические сложности. Также отдельного обсуждения заслуживает вопрос конкретных перспектив применения разработанных моделей СТД в реальных устройствах систем связи или сбора энергии.
3. Рекомендуем автору в будущих работах более подробно остановиться на вопросах схемотехнической реализации конечного устройства: согласование импеданса предлагаемых СТД со стандартными СВЧ-цепями, проработка требований к принимающей антенне и т.п.
4. Следовало бы использовать термин не «широкополосный выпрямитель», а выпрямление с расширенным диапазоном рабочих частот, так как в любом случае выпрямитель является резонансным.
5. В тексте диссертации фигурирует выражение для чувствительности  $AP_{in}^{-1/3}$ , где  $P$  – входная мощность, а расшифровки коэффициента  $A$  не приведено.
6. В тексте диссертации присутствует ряд опечаток и стилистических неточностей (напр. стр.5,6 и т.д.).

Соискатель имеет 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 7 работ. Все они входят в международные базы Web of Science и Scopus. В 2 статьях Скирдков П.Н. является первым автором, в остальных 5 – вторым автором. Во всех работах, относящихся к диссертации, соискатель выполнял постановку задач совместно с научным руководителем, разработку методов их решения, проводил микромагнитное моделирование,

занимался построением аналитических моделей, анализом и интерпретацией полученных данных, а также непосредственно участвовал в написании текстов статей. Все результаты, представленные в диссертации, получены автором лично или при его определяющем участии, при консультационной поддержке научного руководителя. Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в работах автора. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах.

Список наиболее значительных работ:

1. Spin-torque diode frequency tuning via soft exchange pinning of both magnetic layers / A.A. Khudorozhkov, P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin [и др.] // *Physical Review B*. – 2017. – Т. 96. – №. 21. – С. 214410. – DOI: 10.1103/PhysRevB.96.214410
2. Nonlinear current resonance in a spin-torque diode with planar magnetization / N.E. Kulagin, P.N. Skirdkov, A.F. Popkov [и др.] // *Low Temperature Physics*. – 2017. – Т. 43. – №. 6. – С. 708-714. – DOI: 10.1063/1.4985978
3. Skirdkov, P.N. Vortex spin-torque diode: The impact of DC bias / P.N. Skirdkov, A.F. Popkov, K.A. Zvezdin // *Applied Physics Letters*. – 2018. – Т. 113. – №. 24. – С. 242403. – DOI: 10.1063/1.5064440
4. Skirdkov, P.N. Spin-Torque Diodes: From Fundamental Research to Applications / P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin // *Annalen der Physik*. – 2020. – Т. 532. – №. 6. – С. 1900460. – DOI: 10.1002/andp.201900460
5. Buzdakov, A.G. Magnetostatically Induced Easy-Cone Magnetic State Tuning by Perpendicular Magnetic Anisotropy in an Unbiased Spin-Torque Diode / A.G. Buzdakov, P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin // *Physical Review Applied*. – 2021. – Т. 15. – №. 5. – С. 054047. – DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.054047
6. Buzdakov, A.G. Easy-cone state in spin-torque diode under combined action of magnetostatics and perpendicular anisotropy / A.G. Buzdakov, P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2022. – Т. 55. – №. 11. – С. 115001. – DOI: 10.1088/1361-6463/ac3e93
7. Kichin, G.A. Ultrawide broadband rectification effect in an in-plane magnetic tunnel junction / G.A. Kichin, P.N. Skirdkov, K.A. Zvezdin // *Physical Review Applied*. – 2023. – Т. 20. – №. 4. – С. 044078. – DOI: 10.1103/PhysRevApplied.20.044078

На автореферат поступили 2 отзыва; все отзывы положительные, но есть замечания:

1. От Белотелова Владимира Игоревича, доктора физико-математических наук, доцента кафедры нанофотоники физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»:

- 1) В качестве замечания стоит отметить некоторую узость формулировки первого положения, выносимого на защиту, по поводу резонансной частоты спин-трансферного диода. В положении даны ряд конкретных числовых характеристик, однако не приведена толщина слоев. Кроме того, было бы полезно дать обобщение по поводу оптимальных параметров спин-трансферного диода.
- 2) Также есть замечание по оформлению автореферата, связанное с наличием некоторого количества опечаток и некоторой перегруженностью текста ссылками на литературу во вводной части.

2. От Демина Глеба Дмитриевича, кандидата физико-математических наук, доцента Института интегральной электроники имени академика К.А. Валиева, руководителя научно-исследовательской лаборатории «Моделирование и разработка изделий нано- и микросистемной техники» (НИЛ МР) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»:

- 1) Имеется несколько замечаний по оформлению автореферата: на рис. 6 «оранжевый» и «зеленый» маркеры едва заметны (хорошо бы увеличить их размер), на рис. 7 вместо «КЭ» следует писать «кЭ», также в подписи к рис. 7а отсутствует пояснение, что обозначает серая линия.
- 2) Также в макроспиновой модели автор выбирает фиксированные значения амплитуд полевого (Field-like) и антидемпингового (Slonczewski-like) вращательных моментов, хотя они имеют характерную зависимость как от напряжения смещения на МТП, так и от параметров его слоев, и по-хорошему должны быть рассчитаны из микроскопических моделей спинового транспорта через диэлектрическую прослойку (как вариант, из модели Зоммерфельда почти свободных электронов или на базе первопринципного подхода с учетом кристаллической структуры МТП). Стоило бы отметить, как это может повлиять на полученные результаты.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается высокой степенью их компетенции в вопросах физики конденсированного состояния, подтвержденной большим числом публикаций в ведущих рецензируемых изданиях, что позволяет им оценить достоверность полученных результатов и научно-практическую значимость рассматриваемой в диссертации проблемы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

**Разработана** научная концепция управления динамическими свойствами намагниченности в магнитных туннельных переходах под действием спиновых токов, позволившая создать теоретическую базу для проектирования высокочувствительных и широкополосных спин-трансферных диодов (СТД) с резонансными частотами от субгигагерцового до гигагерцового диапазона.

**Предложены** возможные варианты конструкций спин-трансферных диодов, включая устройства с двумя мягко закреплёнными ферромагнитными слоями, с вихревым распределением намагниченности, а также с магнитостатически индуцированным лёгкокonusным состоянием, обеспечивающие рекордные показатели чувствительности и возможность настройки частоты на этапе производства.

**Доказана** магнитная природа наблюдаемого экспериментально широкополосного выпрямления и обнаружена его связь с наличием ненулевого угла между намагниченностями свободного слоя и поляризатора.

**Предложен** подход к устранению паразитных магнитостатических полей, повышению эффективности выпрямления и контролю резонансных частот через оптимизацию геометрии и процесса отжига СТД.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

**Полученные** результаты расширяют представление о роли спиновых токов в динамике намагниченности магнитных туннельных переходов и спин-трансферном диодном эффекте. Разработанные подходы и модели расширяют понимание физики взаимодействия микроволновых спиновых токов с динамическими состояниями намагниченности в магнитных наноструктурах. В частности, результаты исследования позволяют описать и **объяснить** ранее неизвестные эффекты, включая механизмы формирования широкополосного выпрямления и зависимости динамики намагниченности от параметров туннельных структур.

**Применительно к проблематике диссертации** результативно использован комплекс взаимодополняющих методов исследования, включающий микромагнитное моделирование (программный пакет SpinPM) и аналитические подходы на основе уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта с учётом эффекта переноса спина, а также уравнения Тилля для описания вихревой динамики, что позволило

получить новые результаты о резонансных и спектральных свойствах наноструктур.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:**

**Разработаны** новые подходы к проектированию спин-трансферных диодов, защищённые тремя патентами на изобретения.

**Создана** теоретическая основа для разработки высокочувствительных микроволновых детекторов с заданными характеристиками;

**Представлены** рекомендации по выбору геометрии и параметров магнитных слоёв для оптимизации резонансной частоты и чувствительности устройств.

**Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:**

**Впервые предложена** и теоретически обоснована конструкция спин-трансферного диода с двумя ферромагнитными слоями, закреплёнными под различными углами с помощью антиферромагнетиков с разными температурами Нееля, что позволило расширить рабочий частотный диапазон до 9 ГГц и обеспечить настройку резонансной частоты на этапе производства без потери чувствительности.

**Разработана** аналитическая модель вихревого спин-трансферного диода на основе уравнения Тиля, учитывающая влияние постоянного тока смещения и мощности входного сигнала. Показано, что вблизи критического тока смещения чувствительность устройства возрастает до значений, следующих зависимости  $P^{-1/3}$ , что делает его идеальным кандидатом для детектирования сверхслабых субгигагерцовых сигналов.

**Установлены и теоретически описаны** два новых механизма широкополосного выпрямления в спин-трансферных диодах с планарной намагниченностью: первый обусловлен возникновением ненулевого угла между намагниченностями свободного слоя и поляризатора во внешнем магнитном поле, второй — формированием неоднородных микромагнитных С- и S-состояний в свободном слое, что обеспечивает выпрямление в диапазоне частот до 6 ГГц.

**Впервые обнаружено и исследовано** магнитостатически индуцированное лёгкоконусное магнитное состояние в свободном слое с перпендикулярной анизотропией первого порядка. Показано, что выбор толщины свободного слоя позволяет достичь пассивной чувствительности до

4650 мВ/мВт после согласования импеданса, что является рекордным значением для несмещённых спин-трансферных диодов.

**Предложен** подход к управлению областью существования лёгкоконусного состояния и подавлению паразитных магнитоэлектрических полей путём оптимизации геометрии (ориентации эллиптичности) магнитного туннельного перехода, что сохраняет высокую эффективность выпрямления вплоть до полей 50 Э.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила, что** все выводы диссертации обоснованы и подтверждены комплексным подходом, включающим как аналитическое моделирование, так и микромагнитное численное моделирование с использованием современного программного пакета SpinPM. Теоретические результаты, полученные на основе уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта и Тиля, корректно описывают динамику намагниченности и демонстрируют хорошее согласие с данными микромагнитного моделирования. Достоверность также подтверждается воспроизводимостью результатов и их соответствием экспериментальным данным, опубликованным в литературе, а также неоднократной экспериментальной проверкой предсказаний моделирования. Работы отечественных и зарубежных авторов в области спинтроники и физики магнитных наноструктур легли в основу методологических подходов, использованных в диссертации. Анализ полученных результатов производился с применением современных методов статистической обработки, что обеспечивает надежность и обоснованность научных положений и выводов.

**Личный вклад** соискателя состоит в постановке задач совместно с научным руководителем, разработке методов их решения и проведении теоретических исследований спин-трансферного диодного эффекта в магнитных туннельных переходах. Автором лично выполнено микромагнитное моделирование динамики намагниченности, построены аналитические модели на основе уравнений Ландау-Лифшица-Гильберта и Тиля, а также проведён анализ и интерпретация полученных данных. Соискателем осуществлена подготовка текстов научных статей, апробация результатов на всероссийских и международных конференциях, а также участие в патентовании трёх изобретений.

Соискатель Скирдков Петр Николаевич ответил на задаваемые ему в ходе заседания вопросы, замечания ведущей организации и оппонентов, согласился с некоторыми замечаниями и привёл собственную аргументацию.

На заседании 23 марта 2026 года диссертационный совет принял решение: за решение научной задачи, имеющей значение для развития

физики конденсированного состояния и заключающейся в теоретическом исследовании фундаментальных механизмов спин-трансферного диодного эффекта в магнитных туннельных переходах и разработке на этой основе новых типов высокочувствительных и широкополосных микроволновых детекторов, присудить Скирдкову Петру Николаевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8. Физика конденсированного состояния.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 6 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: «за» 17, «против» 0, недействительных бюллетеней 0.

Председатель диссертационного совета  
академик РАН



Гарнов  
Сергей  
Владимирович

Ученый секретарь диссертационного совета  
канд. физ.-мат. наук

Осадчий  
Александр  
Валентинович

23 марта 2026 г.