

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01

на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук

по диссертации

## НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 18.01.2024 № 1

О присуждении Никитченко Андрею Игоревичу

Гражданину Российской Федерации,

ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Электрически индуцированная спиновая динамика в ферромагнитных гетероструктурах с электрочувствительной магнитной анизотропией» по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния» принята к защите 19 октября 2023 г., протокол № 9, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от № 15 от 19.01.2021 г. и № 13 от 21.01.2022 г. об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.01 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 г. о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Никитченко Андрей Игоревич, дата рождения – 08.05.1996 г., в 2019 году с отличием окончил программу магистратуры Института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого по специальности 16.04.01 - «техническая физика», в 2023 году окончил программу аспирантуры Физико-технического

института им. А. Ф. Иоффе по направлению подготовки 03.06.01 - «физика и астрономия». Кандидатский экзамен по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния» успешно сдан соискателем в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе в 2022 году. В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории динамики материалов Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории динамики материалов Федерального бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Перцев Николай Андреевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией динамики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Глазов Михаил Михайлович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник сектора теории квантовых когерентных явлений в твердом теле Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 5 замечаний.

2. Сафин Ансар Ризаевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова Российской академии наук, дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 3 замечания.

Ведущая организация федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО» предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 3 замечания. Отзыв подготовлен профессором, ведущим научным сотрудником Университета ИТМО, доктором физико-математических наук по специальности 01.04.07 «физика конденсированного состояния», Уздиным Валерием Моисеевичем, подписан профессором, директором Института перспективных систем передачи данных Университета ИТМО, доктором физико-математических наук по специальности 01.04.07

«физика конденсированного состояния», Романовым Алексеем Евгеньевичем, утвержден проректором по научной работе Университета ИТМО, доктором технических наук, профессором Никифоровым Владимиром Олеговичем. В заключении указано, что содержание диссертации Никитченко А.И. соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния», а соискатель Никитченко А.И. заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что один из оппонентов имеет ученую степень доктора наук, другой кандидата наук, они работают в различных организациях, не имеют ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что Университет ИТМО ведет активные исследования в различных областях физики конденсированного состояния, в том числе в области теории спинтронных явлений. В Университете ИТМО работает диссертационный совет – 07.22.00 по специальности 1.3.8. – «физика конденсированного состояния».

Основное содержание диссертации представлено в 4 научных статьях, опубликованных в журналах, индексируемых в международной системе цитирования Web of Science:

1. Nikitchenko, A. I. Spin injection and pumping generated by a direct current flowing through a magnetic tunnel junction / A. I. Nikitchenko, N. A. Pertsev // Phys. Rev. B. — 2019. — Vol. 99. — P. 224426.
2. Nikitchenko, A. I. Current-driven magnetization switching and dynamic spin reorientation transition in magnetic tunnel junctions / A. I. Nikitchenko, N. A. Pertsev // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — Vol. 1400. — P. 077005.
3. Nikitchenko, A. I. Nanoscale Spin Injector Driven by a Microwave Voltage / A. I. Nikitchenko, N. A. Pertsev // Phys. Rev. Appl. — 2020. — Vol. 14. — P. 034022.

4. Nikitchenko, A. I. Spin-orbit torque control of spin waves in a ferromagnetic waveguide / A. I. Nikitchenko, N. A. Pertsev // Phys. Rev. B. — 2021. — Vol. 104. — P. 134422.

На автореферат поступило 2 отзыва.

Отзыв доктора физико-математических наук, главного научного сотрудника Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Ползиковой Натальи Ивановны положительный, содержит 1 замечание:

- В качестве замечания к автореферату отмечу, что в тексте не приведено ни одной формулы. Это несколько странно для теоретической работы, тем более что в диссертации содержатся аналитические расчеты.

Отзыв доктора физико-математических наук, директора научно-образовательного центра «Магнитоэлектрические материалы и устройства» МИРЭА – Российского технологического университета Фетисова Юрия Константиновича положительный, замечаний и вопросов не содержит.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем теоретических исследований макроспиновых моделей и численного микромагнитного моделирования электрически-индуцированной спиновой динамики и зарядового транспорта в ферромагнитных гетероструктурах с электрочувствительной магнитной анизотропией (ЭМА) были получены следующие основные результаты:

1. Описана спиновая динамика и зарядовый транспорт в туннельной гетероструктуре  $\text{CoFeB/MgO/CoFeB/Au}$ , подключенной к источнику постоянного тока. Установлено, что совместное действие ЭМА и вращающего момента, создаваемого спин-поляризованным током в туннельной гетероструктуре  $\text{CoFeB/MgO/CoFeB/Au}$ , подключенной к источнику постоянного тока, приводит к возникновению спин-ориентационного перехода нового типа, при котором намагниченность нанослоя  $\text{CoFeB}$  после потери устойчивости начинает прецессировать вокруг оси, отклоненной от ее первоначального направления. Показано, что эффективность спиновой накачки на постоянном токе в такой структуре достаточна для экспериментальной регистрации.
2. Предложен спиновый инжектор в металлы и полупроводники, возбуждаемый радиочастотным электрическим напряжением, приложенным к магнитному

туннельному контакту (МТК). Эффективное функционирование такого инжектора обеспечивается электрически индуцированной прецессией намагниченности в “свободном” электроде МТК, которая создает спиновую накачку в прилегающий слой. Рассчитана спиновая и зарядовая динамика в туннельных гетероструктурах  $\text{CoFeB/MgO/CoFeB/Au}$  и  $\text{CoFeB/MgO/CoFeB/GaAs}$ , и показано, что возникающее в слое Au поперечное напряжение, характеризующее эффективность генерации спинового тока, при резонансной частоте становится экспериментально измеримым. Также рассчитана спиновая аккумуляция в полоске  $n^+\text{-GaAs}$ , контактирующей с МТК, и установлено, что при резонансном возбуждении амплитуда осциллирующей спиновой аккумуляции является достаточной для экспериментальной регистрации измерения с помощью метода нелокального спинового детектирования даже на расстояниях в несколько микрометров от МТК.

3. Показано, что в волноводе  $\text{W/CoFeB/MgO}$ , в центральной части которого к слою  $\text{MgO}$  локально приложено радиочастотное напряжение, модуляция ЭМА порождает прецессию намагниченности в слое  $\text{CoFeB}$ . При частотах, превышающих резонансную частоту пленки  $\text{CoFeB}$ , в обе стороны от области электрического возбуждения распространяются спиновые волны, длины затухания которых приблизительно одинаковы в отсутствие тока в слое  $\text{W}$ . Если источник постоянного тока подключен к середине слоя  $\text{W}$ , пропускаемый ток индуцирует антипараллельные спиновые вращающие моменты для волн, распространяющихся в разных половинах волновода. Сравнительно малые плотности тока ( $4 \cdot 10^{10} \text{ А/м}^2$ ) приводят к значительной (до 100 раз) разнице в величинах длин затухания спиновых волн.
4. Показано, что в гетероструктуре  $\text{BiSe/CoFeB/MgO}$  топологический изолятор  $\text{BiSe}$ , обладающий большим спиновым углом Холла, позволяет генерировать спиновые волны в прилегающем слое  $\text{CoFeB}$  даже при малых амплитудах пропускаемого переменного тока. Для маршрутизации спиновых волн в такой гетероструктуре предложено использовать локальное изменение перпендикулярной анизотропии с помощью приложения постоянных напряжений к электродам, нанесенным на слой  $\text{MgO}$ , что и было подтверждено моделированием для структуры с тремя волноводами.
5. Показано, что в ферромагнитной наноструктуре с ЭМА – тройном слое  $\text{MgO/Fe/MgO}$  – можно создавать и маршрутизировать наномасштабные

капельные солитоны без компенсации магнитного затухания. Продемонстрировано образование магнитного капельного солитона под управляющим наноэлектродом, на который подается субнаносекундный импульс электрического напряжения. Солитон существует до 50 наносекунд при комнатной температуре и может перемещаться в ферромагнитном волноводе на микрометровые расстояния под действием ненулевого градиента поля размагничивания. Дополнительный полупроводниковый полосковый электрод, создающего контролируемый градиент перпендикулярной магнитной анизотропии, позволяет осуществлять электрическую маршрутизацию солитона к различным выходам магнитоэлектрического устройства

6. Установлено сильное влияние интерфейсного взаимодействия Дзялошинского-Мории на движение  $180^\circ$  доменных стенок, индуцированное локализованным градиентом перпендикулярной анизотропии, создаваемым в сверхтонком ферромагнитном нанотреке с помощью полупроводникового электрода конечной длины. Показано, что скорость доменной стенки возрастает с увеличением градиента анизотропии и уменьшением параметра затухания Гилберта. При этом в бездефектной наноструктуре Pt/Fe/MgO/Si стенка может перемещаться на расстояния, на порядок превышающие длину управляющего электрода, достигая в процессе движения пиковой скорости порядка 100 м/с благодаря сильному взаимодействию Дзялошинского-Мории и малому параметру магнитного затухания железа.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную значимость для развития металлической спинтроники, изучающей спин-зависимые явления в металлических наноструктурах. Практическая значимость полученных результатов обусловлена тем, что они получены для структур, приближенных к технологически-доступным, и позволяют выработать предложения для оптимизации компонент спинтроники и магноники, таких как магнитные туннельные контакты, магнитная память «на беговой дорожке» (race-track memory), элементы магнонной логики.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Пропускание постоянного электрического тока через магнитную туннельную структуру CoFeB/MgO/CoFeB/Au с ЭМА может порождать большеугловую

прецессию намагниченности, происходящую с гигагерцовой частотой в “свободном” слое CoFeB со слабой перпендикулярной анизотропией. Это явление возникает в определенном интервале плотностей тока и представляет собой динамический спин-ориентационный переход. Спиновый ток, генерируемый в слое золота в результате спиновой инжекции и накачки, создает разность потенциалов между боковыми гранями этого слоя, которая достаточно велика для экспериментального детектирования.

2. Динамика намагниченности, возникающая в свободном слое CoFeB при приложении к туннельному контакту CoFeB/MgO/CoFeB радиочастотного электрического напряжения  $V(t)$ , приобретает существенно нелинейный характер уже при небольшой амплитуде напряжения  $V_{\max} \approx 200$  мВ. При этом амплитудно-частотная характеристика прецессии намагниченности имеет разрыв, аналогичный поведению осциллятора Дуффинга со смягчающейся нелинейностью, и включает значительные пики параметрической природы. Резонансно возбуждаемый МТК эффективно генерирует осциллирующую спиновую аккумуляцию в полупроводниковой пленке GaAs, прилегающей к слою CoFeB.
3. В наноструктуре W/CoFeB/MgO, помещенной в слабое магнитное поле, возможна непараметрическая генерация спиновых волн с помощью модуляции перпендикулярной анизотропии радиочастотным напряжением, локально приложенным к слою MgO. При инжекции постоянного электрического тока в пленку W, обеспечивающую протекание тока в противоположных направлениях под двумя половинами волновода CoFeB, возникает спин-орбитальный вращающий момент, который противоположным образом изменяет эффективное магнитное затухание спиновых волн, распространяющихся в двух половинах волновода. В результате возникает возможность электрического контроля распространения спиновых волн на микрометровые расстояния и переключение его направления, позволяющего доставлять спиновый сигнал к тому или другому концу волновода.
4. Топологический изолятор BiSe, подвергнутый воздействию радиочастотного электрического тока, протекающего через его поверхностные состояния, является эффективным генератором спиновых волн в прилежащем слое CoFeB. Спиновые волны, возбуждаемые в структуре BiSe/CoFeB/MgO, можно направлять к одному из выходов магنونного устройства путем

локального изменения ЭМА с помощью напряжений, приложенных к управляющим электродам.

5. Ферромагнитные гетероструктуры с ЭМА позволяют генерировать наномасштабные капельные солитоны без компенсации магнитного затухания. Солитон, созданный в тройном слое MgO/Fe/MgO субнаносекундным импульсом напряжения, может существовать до 50 нс при комнатной температуре и перемещаться на микрометровые расстояния под действием градиента размагничивающего поля. Пропускание постоянного тока через полосковый полупроводниковый электрод, нанесенный на MgO, создает контролируемый градиент перпендикулярной анизотропии, позволяющий изменять траекторию движения солитона в пленке железа.
6. Интерфейсное взаимодействие Дзялошинского-Мории оказывает сильное влияние на движение  $180^\circ$  доменной стенки, порождаемое локальным градиентом перпендикулярной анизотропии, создаваемым в ферромагнитном нанотреке с помощью полупроводникового электрода конечной длины. При этом в бездефектной гетероструктуре Pt/Fe/MgO/Si стенка может перемещаться на расстояния, на порядок превышающие длину управляющего электрода, и достигать скорости вплоть до 100 м/с благодаря сильному взаимодействию Дзялошинского-Мории и малому параметру магнитного затухания железа.

Достоверность представленных в диссертации результатов и обоснованность положений основываются на хорошем согласии между экспериментальными данными и результатами теоретического анализа или микромагнитного моделирования, а также на соответствии выводов и заключений, сделанных в работе, с современными представлениями в данной области физики конденсированного состояния.

Основные результаты работы докладывались на российских и международных научных конференциях, симпозиумах и семинарах: “ФизикА.СПб 2019”, “XXIII симпозиум Нанозифика и наноэлектроника 2019”, “CMD 2020 GEFES”, “XXIV симпозиум Нанозифика и наноэлектроника 2020”, научные семинары лаборатории динамики материалов и лаборатории физики ферроиков ФТИ им. А. Ф. Иоффе.

Также следует отметить, что Никитченко А.И. является победителем конкурса на лучшую работу Отделения физики твердого тела ФТИ 2022.

Выбор и постановка задач, получение представленных в диссертации теоретических результатов осуществлены непосредственно автором или при его определяющем участии, что отмечено в тексте автореферата.

Диссертация Никитченко А.И. является законченным научным исследованием, вносящим существенный вклад в развитие таких актуальных направлений современной физики как спинтроника и магноника.

На заседании 18 января 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Никитченко А.И. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 15 докторов наук по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из \_\_\_ человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 16, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Кусраев Юрий Георгиевич

Ученый секретарь

диссертационного совета

PhD

Калашникова Александра Михайловна

18 января 2024 г.