

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по науке Университета
ИТМО
доктор технических наук,
профессор

Никифоров Владимир Олегович
«__» _____ 2023

Отзыв

ведущей организации Университет ИТМО на диссертацию Никитченко Андрея Игоревича «Электрически индуцированная спиновая динамика в ферромагнитных гетероструктурах с электрочувствительной магнитной анизотропией», представленной на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

Актуальность темы. Электрические методы возбуждения и контроля спиновой динамики в конденсированных средах представляют интерес не только с точки зрения фундаментальной физики магнитных явлений, но и возможности практических приложений. В настоящее время активно изучаются способы эффективного управления магнитным порядком в твердом теле с помощью электрических токов и напряжений. Перспективными объектами для электрического возбуждения спиновой динамики являются контакты ферромагнетика и диэлектрика с электрочувствительной магнитной анизотропией. В таких гетероструктурах возможен сверхбыстрый и энергоэффективный контроль намагниченности путем приложения электрических полей.

Диссертационное исследование Андрея Игоревича Никитченко посвящено теоретическому исследованию спиновой динамики, индуцированной в ферромагнитных гетероструктурах с электрически управляемой магнитной анизотропией. Полученные результаты интересны не только для фундаментальной науки, но могут оказаться полезны при разработке элементной базы спинтроники. Приведено теоретическое описание транспортных свойств исследуемых гетероструктур, предложены новые спинтронные и магнитные устройства и дано подробное описание принципов их работы. Таким образом, представленное диссертационное исследование направлено на решение актуальных задач спиновой физики конденсированного состояния.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 171 страницу, включая 69 рисунков и 2 таблицы.

В **Главе 1** представлен обзор литературы по теме исследования и обсуждаются важные для дальнейшего изложения эффекты, наблюдаемые в ферромагнитных гетероструктурах. Описаны основные методы электрического возбуждения спиновой динамики, такие, как воздействие спин-перенесенного момента (spin-transfer torque – STT) и спин-орбитального момента (spin-orbit torque – SOT), а также изменение поля перпендикулярной магнитной анизотропии под воздействием электрического напряжения. В заключении к первой главе описываются принципы численного моделирования спиновой динамики.

В **Главе 2** представлены результаты, полученные при моделировании магнитной динамики в туннельном контакте CoFeB/MgO/CoFeB, подключенном к источнику постоянного и переменного напряжения. Показано, что в случае пропускания постоянного тока через контакт, в результате совместного действия STT и электрочувствительной магнитной анизотропии (ЭМА), возникает динамический спин-ориентационный переход. Рассчитываются возникающие при этом спиновые и зарядовые токи в структуре CoFeB/Au, а также поперечное электрическое напряжение, генерируемое на ее гранях. Дается описание нелинейной спиновой динамики в исследуемой гетероструктуре при приложении к ней радиочастотного электрического напряжения. В результате численного моделирования выявлены кратные параметрические пики на амплитудно-частотной характеристике свободного слоя CoFeB, а также их гистерезисные разрывы, обусловленные кубической нелинейностью. Наряду с аналитическими расчетами распределения спиновых токов в

прилегающих к ферромагнетику слоях Au и GaAs приведены численные оценки электрических сигналов, возникающих в немагнитных слоях.

Глава 3 посвящена исследованию генерации и маршрутизации спиновых волн в ферромагнитных гетероструктурах. Методом микромагнитного моделирования изучается непараметрическое возбуждение спиновых волн в структуре W/CoFeB/MgO с перпендикулярной магнитной анизотропией. Описывается влияние постоянного SOT, генерируемого электрическим током в слое W, на бегущие спиновые волны. Теоретически предсказано электрически управляемое переключение направления распространения спиновых волн, а также их временное усиление при комнатной температуре. Приводится описание возбуждения спиновых волн радиочастотным SOT в структуре BiSe/CoFeB/MgO, в которой переменный ток пропускается через поверхностные состояния топологического изолятора BiSe. Микромагнитные расчеты показали возможность маршрутизации спиновых волн при локальном изменении ЭМА за счет постоянного напряжения на управляющих электродах.

В **Главе 4** исследуется электрическое управление магнитными капельными солитонами и доменными стенками. Приведенные результаты показывают возможность генерации магнитных солитонов без компенсации магнитного затухания. Демонстрируется возможность маршрутизации капельных солитонов под действием неоднородного поля ЭМА, созданного протеканием тока через высокорезистивную полосу Si. Далее приведена аналитическая модель динамики доменных стенок в ферромагнитных гетероструктурах Pt/Co/MgO/Si и Co/MgO/Si, с градиентом ЭМА. Сделан ряд выводов, касающихся роли интерфейсного взаимодействия Дзялошинского-Мории и влияния магнитного затухания на скорость и инерцию доменной стенки. Приводятся результаты микромагнитного моделирования, согласующиеся с предложенной моделью.

В заключении работы перечислены основные результаты работы.

Научная новизна. В работе получен целый ряд новых научных результатов. Среди них можно выделить следующие:

- 1) Дано описание динамики намагниченности в туннельном контакте CoFeB/MgO/CoFeB, подключенном к источнику постоянного тока. Теоретически предсказан динамический спин-ориентационный переход – самостоятельная большеугловая прецессия намагниченности с гигагерцовой частотой около положения, отличного от равновесной ориентации. Для структуры CoFeB/Au получено значение генерируемого спиновым током напряжения на гранях Au, которое, согласно расчетам, может наблюдаться экспериментально.
- 2) Исследована нелинейная спиновая динамика в свободном слое туннельного контакта CoFeB/MgO/CoFeB при приложении к его обкладкам переменного напряжения. Показано, что в такой системе присутствует смягчающая нелинейность, а также резонансные пики, имеющие параметрическую природу.
- 3) Проведено моделирование возбуждения спиновых волн в структуре W/CoFeB/MgO при приложении радиочастотного электрического напряжения к металлическому электроду, расположенному на слое MgO. Показано, что спин-орбитальный момент, индуцированный током, текущим через слой W в противоположные стороны в разных половинах волновода, по-разному действует на спиновые волны, распространяющиеся в разных направлениях. В зависимости от полярности тока внутри слоя W одна из волн быстро затухает, а другая распространяется дальше, чем в отсутствие тока. При этом возможна полная компенсация магнитного затухания для этой волны, а при превышении критического тока – ее усиление по мере распространения.
- 4) Описано возбуждение спиновых волн в структуре BiSe/CoFeB/MgO, где радиочастотный ток, протекающий в поверхностных состояниях топологического изолятора BiSe, генерирует спин-орбитальный момент в прилегающем слое CoFeB.
- 5) Показано, что в тройном слое MgO/Fe/MgO возможна генерация магнитных капельных солитонов путем приложения субнаносекундных импульсов электрического напряжения к управляющему электроду. Предложен способ маршрутизации капельных солитонов с помощью создания градиента ЭМА в ферромагнитной пленке.
- 6) Определена роль интерфейсного взаимодействия Дзялошинского-Мории в движении 180° доменной стенки в электрически индуцированном градиенте перпендикулярной магнитной анизотропии. Показано, что скорость доменной стенки обратно

пропорциональна параметру магнитного затухания и линейно зависит от градиента ЭМА в ферромагнитном слое.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов. Представленные в диссертационном исследовании результаты изложены в 5 научных статьях, опубликованных в рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Web of Science, Scopus и РИНЦ. Все результаты и вынесенные на защиту положения обоснованы. Достоверность представленных в исследовании результатов обеспечена применением верифицированных методов численного моделирования и согласием полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Практическая значимость. Описанные в работе результаты могут оказаться важны для разработки энергоэффективных устройств, использующих спиновую степень свободы электронов для обработки, передачи и хранения информации. В частности, продемонстрирована возможность создания эффективных спиновых инжекторов на основе магнитных туннельных контактов с ЭМА, возбуждаемых как постоянным током, так и переменным напряжением. Показано, что структуры W/CoFeB/MgO и BiSe/CoFeB/MgO могут быть использованы для разработок магнитных устройств, в которых спиновые волны маршрутизируются к одному из возможных логических выходов устройства. Предложена структура, в которой посредством приложения электрического напряжения, реализуется энергоэффективное создание и маршрутизация магнитного каплевого солитона к считывающим магнитным туннельным контактам.

Рекомендации по использованию результатов работы. Результаты работы представляют интерес с точки зрения фундаментальных исследований электрически индуцированной спиновой динамики в гетероструктурах, а также могут найти применение при разработке устройств спинтроники и магноники.

В ходе обсуждения научного доклада А.И. Никитченко были заданы **следующие вопросы:**

- 1) Имеются ли экспериментальные данные, подтверждающие теоретические предсказания, сделанные в работе? Насколько теория согласована с экспериментом?
- 2) Движение какого типа доменных стенок было изучено? Зависит ли что-либо от того, рассматривается блоховская или неелевская стенка и какие реализуются на практике в рассматриваемых системах?
- 3) Какова причина движения магнитного каплевого солитона в слое Fe?
- 4) Каким образом проводилась оценка времени жизни магнитного каплевого солитона при наличии тепловых флуктуаций? Как эти оценки согласуются с современными методами, основанными на теории переходного состояния?
- 5) Какие преимущества дало использование самостоятельно разработанных программ численного моделирования спиновой динамики вместо имеющихся пакетов, таких как Mumax3 или OOMMF? Могут ли все результаты диссертации быть получены с помощью стандартных программ?

В качестве замечаний по работе можно отметить следующее:

- 1) Улучшить восприятие основных выносимых на защиту положений можно было бы конкретизацией условий наблюдения предсказанных явлений и сравнением с экспериментом там, где это возможно.
- 2) Несмотря на то, что в работе указан факт наличия критической величины интерфейсного взаимодействия Дзялошинского-Мории, при которой характер движения доменной стенки качественно меняется, конкретного значения этого параметра в диссертации не приведено. Численные значения важны для понимания возможности практической реализации эффектов.
- 3) Простого качественного объяснения наличия постоянной компоненты спинового тока при возбуждении структуры CoFeB/MgO/CoFeB радиочастотным напряжением, а также появления переменной компоненты спина при пропускании постоянного тока через такой контакт в диссертации нет. Это было бы полезно для реализации описанного в работе спинового инжектора.

Указанные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки диссертационной работы.

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

Заклучение

Диссертационная работа Никитченко Андрея Игоревича «Электрически индуцированная спиновая динамика в ферромагнитных гетероструктурах с электрочувствительной магнитной анизотропией», представляет собой самостоятельное законченное исследование, обладающее внутренним единством. Она отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор Никитченко Андрей Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Доклад Никитченко Андрея Игоревича по материалам диссертации был заслушан и обсуждён на заседании комиссии по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния Университета ИТМО (протокол № 7 от 18.12.2023). На заседании присутствовало 13 человек. На все вопросы, возникшие во время обсуждения, были получены ответы.

Отзыв ведущей организации подготовил:
доктор физико-математических наук,
профессор, ведущий научный сотрудник
Университета ИТМО
Тел.: 8(812)232-67-65
e-mail: valery.uzdin@metalab.ifmo.ru

Уздин
Валерий Моисеевич

Председатель заседания:
доктор физико-математических наук,
профессор, директор Института
перспективных систем передачи данных
Университета ИТМО

Романов
Алексей Евгеньевич

Сведения о ведущей организации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, литер А.

Тел.: +7(812)480-00-00

e-mail: od@itmo.ru