

**Отзыв официального оппонента на диссертацию Никитченко Андрея Игоревича  
«Электрически индуцированная спиновая динамика  
в ферромагнитных гетероструктурах  
с электрочувствительной магнитной анизотропией»,  
представленной к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических  
наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»**

**Актуальность темы диссертации.** Электрический контроль спиновых состояний в твердом теле является в настоящее время предметом активных исследований. Вызван такой интерес не только фундаментальными вопросами теории спиновых явлений, но и привлекательностью промышленных приложений спинтроники. Для генерации спиновой динамики и транспорта магнитных возбуждений применяются такие электрические методы, как пропускание через ферромагнетик спинового тока. Однако вне зависимости от природы этого тока, его создание сопровождается рассеянием значительной мощности, что ограничивает возможности спинтронных приборов.

В последние годы наибольший интерес вызывают гетероструктуры вида ферромагнетик-диэлектрик, в которых электрическое поле внутри диэлектрика модифицирует интерфейсную магнитную анизотропию ферромагнетика. В таких структурах открывается возможность эффективного управления спиновой степенью свободы без существенных энергетических потерь. Диссертационное исследование А.И. Никитченко направлено на теоретическое изучение электрически индуцированной спиновой динамики в ферромагнитных гетероструктурах с электрочувствительной магнитной анизотропией. В своей работе А.И. Никитченко решает актуальные задачи динамики намагниченности, а также сопровождающего ее транспорта заряда и спина. **Таким образом, актуальность темы кандидатской диссертации А.И. Никитченко не вызывает сомнений.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения.

Во *введении* приведено обоснование актуальности темы исследования, перечислены решаемые задачи, описаны подходы к их решению, изложены результаты работы и сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

*Первая глава* содержит обзор литературы по теме диссертации. Приводится изложение наиболее значимых эффектов, наблюдаемых в ферромагнитных гетероструктурах, описываются основные модели, в рамках которых происходит теоретическое изучение электрически индуцированной спиновой динамики.

*Вторая глава* посвящена исследованию магнитной динамики в магнитных туннельных контактах  $\text{CoFeB/MgO/CoFeB}$ , подключенных как к источнику постоянного тока, так и радиочастотного электрического напряжения. Описывается теоретически предсказанный динамический спин-ориентационный переход, являющийся результатом совместного действия спин-перенесенного вращающего момента и электрочувствительной магнитной анизотропии. Приводится детальный расчет зарядовых и спиновых токов, протекающих в структуре  $\text{CoFeB/Au}$ , а также сгенерированных электрических напряжений на гранях слоя Au. Важной частью главы является описание нелинейной спиновой динамики в туннельной гетероструктуре  $\text{CoFeB/MgO/CoFeB}$  при создании переменного электрического поля внутри диэлектрика MgO. Приведенные расчеты вместе с данными численного моделирования показывают, что предложенная структура

CoFeB/MgO/CoFeB/GaAs может быть использована как эффективный спиновый инжектор в полупроводник с умножением частоты спинового сигнала.

В *третьей главе* описываются результаты микромагнитного моделирования электрического возбуждения и контроля спиновых волн. В частности, показано, что в структуре W/CoFeB/MgO возможна непараметрическая генерация спиновых волн радиочастотным напряжением, локально модифицирующим электрочувствительную магнитную анизотропию. Интересно, что теоретически предсказанное в этой главе усиление спиновых волн постоянным электрическим током, текущим через слой W, подтверждается появившимися позже экспериментальными данными. Описывается переключение направления распространения спиновых волн в исследуемой гетероструктуре, что имеет большое значение для разработки магнанных приборов. В последнем разделе главы приводятся результаты маршрутизации спиновых волн, сгенерированных переменным током, текущим через поверхностные состояния топологического изолятора BiSe. Показано, что спиновые волны можно направлять в один из выходов ферромагнитной гетероструктуры путем локального изменения электрочувствительной магнитной анизотропии.

В *четвертой главе* исследуется электрический контроль нелинейных магнитных объектов: солитонов и доменных стенок. Показано, что в структуре MgO/Fe/MgO наносекундные импульсы электрического напряжения, приложенного к одному из слоев MgO, могут создавать магнитные капельные солитоны в ультратонком слое Fe. Благодаря электрочувствительной магнитной анизотропии такая генерация солитонов не сопровождается протеканием токов и осуществляется без компенсации эффективного магнитного затухания. Приводятся результаты микромагнитного моделирования, показывающие, что путем приложения градиента электрического напряжения можно управлять траекторией магнитных капельных солитонов, направляя их к одному из считывающих выходов устройства. Проведен аналитический анализ движения доменных стенок в электрически созданном градиенте перпендикулярной анизотропии при наличии интерфейсного взаимодействия Дзялошинского-Мории. Определена роль этого взаимодействия в динамике доменных стенок, а также проведено моделирование, предсказывающее микрометровую дальность распространения стенки в материале с относительно маленьким параметром затухания Гилберта.

Из вышеперечисленного следует, что **полученные в ходе диссертационного исследования результаты обладают новизной.**

**Достоверность основных полученных результатов и выводов** не вызывает сомнений. В работе применяются хорошо верифицированные современные теоретические модели, а также проверенные путем воспроизведения результатов решения стандартных задач программы численного моделирования. Отдельно стоит упомянуть, что некоторые из предсказанных теоретически результатов подтверждены появившимися позже экспериментальными данными.

Работа безусловно обладает **научной и практической значимостью.** Полученные результаты интересны с точки зрения фундаментальной физики, а также имеют высокий потенциал применения в разработке магнанных и спинтронных устройств.

Диссертационная работа А.И. Никитченко написана грамотно, простым языком и представляет собой серьезное академическое исследование. Общее впечатление о работе положительное. Тем не менее, по работе имеются следующие **замечания:**

1) В диссертации проведено численное исследование уравнений движения намагниченности в рамках приближения макроспина, а также результаты микромагнитных расчетов. Не приводится аналитическое исследование уравнений движения современными методами теории колебаний и волн, например, с помощью формализмов Лагранжа или Гамильтона, часто использующихся в области физики магнитных явлений.

2) В данной теоретической диссертации в автореферате не приведено ни одной формулы!

3) Не приводится оценок влияния термических эффектов и нагрева образцов при протекании тока через магнитные структуры.

Перечисленные замечания не умаляют научную значимость и высокую оценку диссертационной работы.

### Заключение

Считаю, что диссертационная работа Никитченко Андрея Игоревича «Электрически индуцированная спиновая динамика в ферромагнитных гетероструктурах с электрочувствительной магнитной анизотропией» 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

Официальный оппонент:

Кандидат технических наук, доцент,  
старший научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки «Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук»

Адрес места работы:

125009, г. Москва, ул. Моховая, 11, стр.7

Контактные данные:

Тел.: +79060656045

E-mail: [arsafin@gmail.com](mailto:arsafin@gmail.com)

Сафин Ансар Ризаевич  
«25» декабря 2023 г.