

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Селезнева Михаила Евгеньевича «**Детектирование спиновых волн в магнитных микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb**», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Диссертационная работа Селезнева М.Е. посвящена исследованию детектирования спиновых волн (СВ) в магнитных микроструктурах на основе пленок железиттриевого граната (YIG), платины (YIG/Pt) и полупроводника (YIG/n-InSb). Актуальность приведенных в данной работе исследований обусловлена фундаментальной и прикладной значимостью задачи повышения энергоэффективности электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники. Практическая значимость работы связана с поиском наиболее чувствительных методов регистрации спиновых волн. Помимо этого, в работе решается важная фундаментальная задача, направленная на обнаружение связи генерируемого напряжения с сингулярностями Ван Хофа в плотности состояний в спектре спиновых волн структуры YIG/Pt.

Диссертация имеет общий объем 179 страниц, в том числе содержит 193 рисунка, 3 таблицы, библиографический список из 186 наименований, список сокращений и условных обозначений в 4 страницы. Основные результаты изложены в 6 разделах (главах).

Во **введении** обосновываются актуальность темы и цель диссертации, поставленные задачи, научная новизна, практическая значимость, достоверность полученных результатов и характеризуется личный вклад автора. Приводятся сведения об апробации работы, положения, выносимые на защиту, методы исследования. Излагается структура диссертации, краткое содержание глав и разделов диссертации.

В **первой** главе приводятся данные о свойствах поверхностных (ПМСВ) и обратных объемных (ОМСВ) магнитостатических волнах (МСВ), детектирование которых исследуется в работе на макетах типа линии задержки на основе структур YIG/Pt и YIG/n-InSb. Обсуждаются результаты работ по изучению механизмов детектирования СВ за счет ОСЭХ на «интерфейсе» и эффекта увлечения электронов полями МСВ в «объеме» полупроводника. Отмечается, что связь величины ЭДС, генерируемой за счет ОСЭХ, и плотности состояний в спектре СВ структуры YIG/Pt ранее экспериментально не исследовалась. Описываются технологические процессы по изготовлению микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb и обосновывается соответствие полученных структур задачам

диссертационной работы, а также излагаются методики измерений характеристик распространения СВ и генерируемой ЭДС.

Второй и **третий** разделы посвящены детектированию линейных СВ в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb, соответственно. На основании оценки параметра спин-электронной связи в исследуемых структурах и результатов измерения дисперсионных зависимостей ПМСВ доказывается, что функция плотности состояний в спектре спиновых волн структур YIG/Pt соответствует «изолированным» пленкам YIG. Отмечается соответствие частот максимумов ЭДС частотам сингулярностей Ван Хофа в плотности состояний СВ в структуре YIG/Pt. Показывается, что взаимодействие ПМСВ со сдвиговыми волнами в структуре GGG/YIG/Pt уменьшает величину генерируемой ЭДС из-за перекачки энергии из спиновой подсистемы в упругую. В разделе 3 изучаются особенности механизма эффекта увлечения электронов в структурах YIG/n-InSb.

В **четвертом** разделе приводятся результаты детектирования ПМСВ в структурах YIG/Pt и YIG/n-InSb при высоких уровнях мощности, при которой бегущие ПМСВ порождают параметрические СВ за счет трехмагнонных (3М) и четырехмагнонных (4М) процессов. Показано, что эффективность детектирования ПМСВ на частотах, отвечающих коротковолновой области спектра, снижается в условиях развития 3М и 4М процессов как в микроструктурах YIG/Pt, так и в YIG/n-InSb. Помимо этого, развитие 3М и 4М процессов приводит к разрушению сингулярностей в плотности состояний СВ и, как следствие, исчезновению эффекта резонансного роста ЭДС на частотах дипольно-обменных резонансов в микроструктурах YIG/Pt. Один из основных результатов данного раздела заключается в объяснении механизма эффекта «усиления спиновой накачки при 3М распадах» на частотах вблизи длинноволновой границы спектра ПМСВ, за счет заселения сингулярностей Ван Хофа в спектре анизотропных дипольно-обменных ПМСВ вторичными СВ, рожденными в результате беспороговых процессов слияния параметрических СВ.

Пятый раздел содержит результаты исследования детектирования сфокусированных пучков ПМСВ. Для этих экспериментов брались макеты линии задержки ПМСВ на основе структур YIG/Pt и YIG/n-InSb, в которых одна из антенн спиновых волн имела арочную форму и формировала сфокусированный пучок ПМСВ. Показано, что если в качестве входной антенны использовать фокусирующий преобразователь, то сигнал ЭДС, по сравнению со случаем прямолинейной входной антенны, увеличивается на тех частотах, при которых положение фокуса находится под Pt или n-InSb микрополоской.

В **шестом** разделе обсуждается возможное применение результатов диссертационной работы. Предлагается способ повышения эффективности детектирования СВ в микроструктурах YIG/Pt за счет геометрии детектирующего Pt элемента. Показано,

что при интерференции двух встречных ПМСВ в структурах YIG/Pt величина ОСЭХ зависит не только от разности фаз ПМСВ, но и от соотношения длины волны ПМСВ платиновой микрополоски, что может оказаться существенным при создании логических ключей на основе СВ. Методом микромагнитного моделирования показана возможность построения «логического ключа большинства» на основе интерференции каустик спиновых волн.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Среди наиболее значимых результатов исследования можно выделить следующие:

1. Для микроструктур YIG/Pt показана связь ЭДС, генерируемой за счет бегущих СВ, с плотностью состояний в спектре СВ в пленке YIG;
2. В микроструктурах YIG/Pt рост сигнала ЭДС в несколько раз на частотах дипольно-обменных резонансов связан с формированием сингулярностей Ван Хофа в плотности состояний ПМСВ;
3. Проведено сравнение эффективности детектирования СВ за счет механизмов ОСЭХ и эффекта увлечения в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb, что может быть использовано для разработки электронной компонентной базы на принципах магноники и спинтроники;
4. Объяснен эффект усиления генерации ЭДС в микроструктурах YIG/Pt в условиях ограничения мощности ПМСВ 3М процессами – обусловлен заселением вторичными магнонами спектра анизотропных дипольно-обменных спиновых волн;
5. Показана возможность увеличения сигнала генерируемой ЭДС за счет возбуждения сфокусированных пучков ПМСВ в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb.

Результаты, полученные в диссертационной работе, обладают несомненной **научной и практической** значимостью. В частности, показана связь эффективности детектирования СВ с плотностью состояний в спектре СВ микроструктуры YIG/Pt, что может использоваться для разработки устройств на основе магноники и спинтроники. Продемонстрирована возможность интеграции возбуждающих МСВ микроантенн и детектирующих Pt и n-InSb элементов с вольт-ваттной чувствительностью до $4 \cdot 10^{-2}$ В/Вт. Предложена возможность управления амплитудой сигнала ЭДС за счет изменения разности фаз двух встречно распространяющихся ПМСВ.

Научная новизна полученных результатов в диссертационной работе состоит в том, что впервые обнаружена прямая связь эффективности детектирования спиновых волн с сингулярностями Ван Хофа в плотности состояний. Продемонстрировано влияние

дипольно-обменных и магнитоупругих резонансов на сигнал ЭДС в структуре GGG/YIG/Pt. Изучены особенности детектирования сфокусированных пучков ПМСВ в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb. Отмечено, что в микроструктурах YIG/Pt развитие 3М и 4М процессов параметрической неустойчивости ПМСВ может приводить как к усилению, так и к падению эффективности детектирования ПМСВ.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации результатов, сформулированных положений и сделанных выводов подтверждается использованием хорошо апробированных методов измерений и расчётов, использованием современной измерительной аппаратуры, адекватных применяемых в расчётах моделей, количественным и качественным соответствием расчётных и экспериментальных данных, отсутствием противоречий с известными опубликованными работами, апробацией полученных результатов на конференциях и публикациями в рецензируемых изданиях.

Недостатки и замечания по диссертационной работе:

1. Обзор литературы по электрической регистрации спиновых волн выглядит неполным без обсуждения работ по возникновению спиновой электродвижущей силы в проводящих ферромагнетиках с неоднородным и нестационарным распределением намагниченности (см. , например, работ S. Maekawa et al.);
2. Требуют дополнительного объяснения формулы (26), (27) для магнитосопротивления, которые содержат квадрат косинуса угла между током и намагниченностью. Тогда как классическая формула $\vec{j} \sim \vec{M}(\vec{E} \cdot \vec{M})$ включает косинус этого угла в первой степени?
3. Желательно дать качественное пояснение отсутствия особенностей Ван Хофа для механизма увлечения, ответственного за формирование сигнала в структурах YIG/n-InSb

Однако, указанные замечания не носят принципиального характера, не влияют на общую положительную оценку работы и не снижают значимость полученных результатов. В целом, диссертационная работа Селезнева М.Е. обладает логически выстроенной структурой, содержит достаточное количество ссылок на предшествующие научные исследования, написана понятным языком и оставляет впечатление законченного исследования. Диссертация соответствует специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств и соответствует пп. 2 паспорта данной специальности.

Автореферат полностью отражает содержание и основные результаты диссертационной работы.

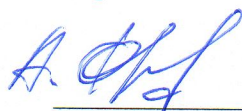
Личный вклад соискателя прямо указывается в диссертации и автореферате и не вызывает сомнений.

Публикации и апробация. Полученные в диссертационной работе основные результаты опубликованы в 4 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также в 19 тезисах докладов в сборниках и материалах конференций и получен 1 патент на изобретение РФ. Работа прошла широкую апробацию на международных и всероссийских конференциях.

Таким образом, можно заключить, что диссертация Селезнева М.Е. «Детектирование спиновых волн в магнитных микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb» является законченным научным исследованием, удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор работы, Селезнев Михаил Евгеньевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник отдела магнитных микроструктур Институт физики микроструктур РАН – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», доктор физико-математических наук, (специальность 01.04.07 – физика конденсированного состояния)



Фраерман Андрей Александрович

«3» ноября 2022 г.

Почтовый адрес 603087, Россия, академическая ул. 7, д. Афоново, Нижегородская обл., Кстовский район; телефон: +7(831) 417-94-51; e-mail andr@ipmras.ru

Подпись Фраермана А.А. заверяю:

Ученый секретарь ИФМ РАН

к.ф.-м.н.



Гапонова Дарья Михайловна