

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 наноэлектроники, квантовых устройств.

Уменьшение размеров полупроводниковых элементов и увеличение плотности компоновки устройств обработки, хранения и передачи информации сопровождается не только ростом затрат и усложнением технологических процессов их изготовления, но и снижением энергоэффективности. В этой связи ведется поиск возможных путей разработки физико-технологических принципов построения компонентной элементной базы информационных технологий, не использующих в качестве логических переменных электрические заряды. Одними из возможных подходов к решению данных проблем являются технологии на базе спинтроники и магноники, где в качестве логических «0» и «1» предлагается использовать спин электрона, что, потенциально, позволяет существенно уменьшить джоулевы потери. В качестве основополагающих задач рассматриваются эффекты взаимных преобразований электрических и спиновых токов на границе феррит/проводник и в объеме проводника. С этой точки зрения актуальность диссертационной работы Селезнева Михаила Евгеньевича, посвященной изучению детектирования спиновых волн в магнитных микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb, не вызывает сомнений.

Диссертация включает в себя введение, шесть глав, список сокращений и условных обозначений, библиографический список. Общий объем диссертации – 179 страниц, включая 193 рисунка, 3 таблицы, 4 страницы списка сокращений и условных обозначений, 22 страниц библиографического списка из 186 наименований.

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, методология и методы исследования. Излагается структура диссертации, краткое содержание глав и разделов диссертации.

Первая глава носит вводный характер. Приводится обзор литературы по свойствам поверхностных (ПМСВ) и обратных объемных (ОМСВ) магнитостатических волн (МСВ), с которыми выполняются основные эксперименты. Рассматривается влияние на свойства дипольных МСВ эффектов резонансного взаимодействия с обменными и упругими волнами тонкопленочной ферритовой структуры, а также особенности развития трехмагнонных (3М) и четырехмагнонных (4М) процессов параметрической неустойчивости МСВ. Приводится обзор состояния исследований детектирования спиновых волн в микроструктурах YIG/Pt за счет «интерфейсного» обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ) и «объемного» эффекта увлечения электронов МСВ в микроструктурах YIG/полупроводник. Отмечается, что связь ОСЭХ в условиях спиновой накачки с сингулярностями Ван Хофа в функции плотности состояний магнонов экспериментально не изучалась. Излагается технология изготовления микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb, методы измерения характеристик МСВ, генерируемой ЭДС. Приводятся результаты измерения параметров микроструктур и делается вывод об их соответствии задачам диссертации.

Вторая глава посвящена изучению детектирования линейных МСВ в микроструктурах YIG/Pt. Доказывается, что пленка Pt не меняет характер дисперсии ПМСВ, и обосновывается использование функции плотности состояний спиновых волн изолированных пленок YIG для анализа ОСЭХ при спиновой накачке в структурах YIG/Pt. Показано соответствие максимумов ЭДС в структурах YIG/Pt сингулярностям Ван Хофа в плотности состояний СВ в пленке YIG. Приводятся результаты эксперимента по спиновой накачке

быстрыми магнитоупругими волнами, образующимися на частотах резонансного взаимодействия ПМСВ и сдвиговых волн структуры «пленка YIG -подложка GGG». Показано, что на частотах магнитоупругих резонансов величина ЭДС падает, что связывается с перекачкой энергии из спиновой подсистемы в упругую, которая не отслеживается платиной. В случае распространения ООМСВ показана зависимость величины генерируемой ЭДС от топологии контактов к пленке Pt.

В **третьей** главе приводятся результаты исследования эффекта увлечения в микроструктурах YIG/n-InSb, и проводится сопоставление с механизмом спиновой накачки для структур YIG/Pt.

Четвертая глава содержит результаты исследования влияния 3М и 4М процессов параметрической неустойчивости на детектирование ПМСВ в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb. Показано, что развитие 4М и 3М процессов при распространении ПМСВ в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb приводит к снижению эффективности детектирования ПМСВ на частотах, отвечающих коротковолновой части спектра. При этом для структур YIG/Pt эффективность детектирования СВ на частотах вблизи длинноволновой границы спектра ПМСВ за порогом развития параметрической неустойчивости остается практически неизменной и демонстрирует близкий к линейному рост ЭДС с увеличением падающей СВЧ мощности. Показано, что такое поведение вольт-ваттной чувствительности в случае 3М процессов распада объясняется заселением области спектра анизотропных дипольно-обменных СВ, содержащих сингулярности Ван Хофа, вторичными СВ, рожденными в результате беспороговых процессов слияния параметрических СВ.

В **пятой** главе исследуется детектирование сфокусированных пучков ПМСВ в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb. С помощью микромагнитного моделирования исследовано влияние хроматической абберации фокусирующей входной антенны ПМСВ на положение фокуса относительно ближайшего к антенне края чувствительного элемента из пленки Pt или InSb.

Показана возможность существенного роста сигнала ЭДС на частотах при которых положение фокуса находится под пленкой Pt или n-InSb.

В **шестой** главе обсуждается возможное применение полученных результатов для разработки электронной компонентной базы на принципах магнонной спинтроники. Предлагается способ повышения чувствительности детектора спинового тока на основе микроструктур YIG/Pt. Демонстрируется возможность использования микроструктур YIG/Pt для детектирования результатов интерференции ПМСВ, и с помощью микромагнитного моделирования обосновывается возможность построения логического ключа большинства на основе интерференции каустик ПМСВ.

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

С моей точки зрения, к наиболее **значимым результатам** стоит отнести следующее:

1. В микроструктурах YIG/Pt на основе «толстой» пленки YIG генерируемая за счет распространения ПМСВ ЭДС характеризуется двумя пиками вблизи длинноволновой и коротковолновой границ спектра, что отвечает максимумам в функции плотности состояний;

2. В микроструктурах YIG/Pt на основе «тонкой» пленки YIG на частотах дипольно-обменных резонансов величина генерируемой ЭДС увеличивается в несколько раз, что связано с формированием сингулярностей Ван Хофа в плотности состояний ПМСВ;

3. В микроструктурах YIG/Pt на основе «толстой» пленки YIG эффект усиления генерации ЭДС 3М процессами связан с заселением вторичными магнонами спектра анизотропных дипольно-обменных спиновых волн, в которых присутствуют участки дисперсии, отвечающие сингулярностям Ван Хофа;

4. В микроструктурах YIG/n-InSb и YIG/Pt эффект фокусировки ПМСВ приводит к росту величины генерируемой ЭДС относительно случая прямолинейной антенны на тех частотах, на которых положение фокуса

находится под детектирующим элементом. В ином случае, величина ЭДС уменьшается.

Результаты, полученные в диссертационной работе, обладают несомненной **научной** и **практической** значимостью. В частности, для микроструктур YIG/Pt установлена связь эффективности спиновой накачки с плотностью состояний в спектре спиновых волн структуры YIG/Pt, что может использоваться для повышения эффективности устройств магнонной спинтроники. Предложены технологии изготовления интегральных микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb с вольт-ваттной чувствительностью $4 \cdot 10^2$ В/Вт и подходы к ее повышению как за счет выбора топологии чувствительного элемента, так и формы антенны спиновых волн. Показана возможность построения логического элемента «ключ большинства» на основе интерференции каустик спиновых волн.

Научная новизна полученных результатов в диссертационной работе состоит в том, что в ней впервые показана прямая связь эффективности детектирования спиновых волн с сингулярностями Ван Хофа в плотности состояний, продемонстрировано, что частотная зависимость ЭДС, генерируемая в микроструктурах YIG/Pt за счет дипольной ПМСВ, достигает максимумов вблизи длинноволновой и коротковолновой границ спектра ПМСВ. В работе установлено, что в микроструктурах YIG/Pt на частотах дипольно-обменных резонансов сигнал ЭДС увеличивается в несколько раз, показано влияние резонансного взаимодействия акустических мод структуры GGG/YIG/Pt на генерацию ЭДС, в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb изучены особенности детектирования ПМСВ, возбуждаемых за счет фокусирующих преобразователей и исследовано влияние развития трехмагنونных и четырехмагنونных процессов параметрической неустойчивости на эффективность 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.

В то же время, к диссертационной работе имеется несколько **замечаний**:

1. Во второй главе обсуждается влияние проводимости проводника на дисперсию и затухание спиновых волн. Отмечается, что кроме омических потерь пленка Pt может вносить потери, обусловленные процессами электрон-магнитного рассеяния и делается оценка такого вклада в пространственный декремент ПМСВ. Однако попытки выделить этот вклад из результатов эксперимента по измерению пространственного декремента ПМСВ в структурах YIG/Pt в работе не были проведены;

2. В главе 3 с использованием известных выражений для ЭДС увлечения делается оценка вольт-ваттной чувствительности детектора на основе микроструктуры YIG/n-InSb, которая затем сопоставляется с оценкой, полученной из эксперимента. Однако подобное не проводится для микроструктур YIG/Pt, несмотря на то, что в главе 1 приводятся выражения для расчета ЭДС, генерируемой при спиновой накачке в структуре YIG/Pt;

3. В диссертации присутствуют орфографические ошибки, на некоторых рисунках, в частности на рисунке 4.11, нет буквенных обозначений, хотя в подписях они присутствуют.

Стоит отметить, что 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

Кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой формирования
и обработки радиосигналов
Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский университет "МЭИ"»

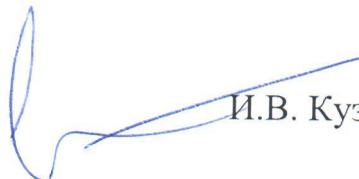
Сафин Ансар Ризаевич

Подпись А.Р. Сафина заверяю

Ученый секретарь Ученого совета НИУ «МЭИ»



 И.В. Кузовлев

Реквизиты организации

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (ФГБОУ ВО НИУ «МЭИ»), Радиотехнический факультет, кафедра Формирования и обработки радиосигналов

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, дом 14.

Тел. +7(495)362-70-01

Факс: +7 495 362-89-38

Эл. Почта: SafinAR@mpei.ru

Сайт: <http://mpei.ru>