

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе
ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

д-р техн. наук, профессор

В.А. Тупик

ноября _____ 2022 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова» на диссертацию 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.

Использование спиновых волн (СВ) для обработки и передачи информации лежит в основе такого направления, как «магنونная спинтроника» и потенциально может использоваться для разработки энергоэффективной электронной базы информационных систем. В этой связи большое внимание уделяется изучению механизмов преобразования СВ в электрический сигнал. С этой точки зрения актуальность диссертационной работы Селезнева М.Е. не вызывает сомнений.

Структура и объём диссертационной работы.

Диссертационная работа изложена на 179 страницах, и состоит из введения, шести глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, библиографического списка, который включает в себя 186 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы и цель диссертационной работы, 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 и раскрывается содержание глав.

В **первой главе** делается обзор работ по исследованию свойств и механизмов детектирования СВ, а также излагается технология получения микроструктур. Рассматриваются свойства бегущих обратных объемных (ООМСВ) и поверхностных (ПМСВ) магнитостатических волн, с которыми проводились эксперименты в

микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb. Обсуждаются эффекты гибридизации дипольных ПМСВ с обменными и акустическими модами структуры «пленка YIG – подложка гадолиний галлиевого граната (GGG)», а также условия развития параметрических трехмагنونных (3М) и четырехмагنونных (4М) процессов и их влияния на свойства МСВ. Делается обзор состояния исследований по детектированию СВ за счет двух механизмов: обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ), проявляющегося на интерфейсе феррит-проводник, и эффекта увлечения электронов в объеме проводника. Отмечается, что связь сингулярностей Ван Хофа в плотности состояний в спектре СВ пленки феррита с ЭДС, генерируемой за счет ОСЭХ, ранее не показывалась. Приводятся методики измерения параметров бегущих МСВ и регистрации генерируемой ЭДС, технологические этапы изготовления микроструктур и результаты измерений параметров, которыми обосновывается применимость изготовленных структур YIG/Pt и YIG/n-InSb для решения задач диссертационной работы.

Во второй главе приводятся результаты измерений детектирования линейных МСВ в микроструктурах YIG/Pt. С помощью оценки спин-электронной связи, проводимой для исследуемых микроструктур, демонстрируется, что проводимость пленки Pt приводит к увеличению пространственного декремента затухания ПМСВ, но качественно не меняет вид дисперсии, что обосновывает использование функции плотности состояний ПМСВ для анализа ЭДС, генерируемой за счет ОСЭХ. Отмечается, что генерируемая при спиновой накачке ЭДС содержит максимумы, которые отвечают сингулярностям Ван Хофа в плотности состояний СВ в пленке YIG. Показывается, что возбуждение быстрых магнитоупругих волн, образующихся на частотах гибридизации ПМСВ и сдвиговых волн структуры GGG/YIG/Pt, приводит к уменьшению сигнала генерируемой ЭДС вследствие перекачки энергии из спиновой подсистемы в упругую.

В третьей главе исследуется эффект увлечения электронов линейными МСВ в микроструктурах YIG/n-InSb. Рассматриваются особенности эффекта увлечения электронов для случаев, когда в структуре YIG/n-InSb распространяются как преимущественно дипольные, так и дипольно-обменные ПМСВ. Проводится сопоставление эффективности детектирования в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb, а также отмечаются различия в механизмах детектирования для этих структур.

Четвертая глава посвящена детектированию СВ при уровнях мощности входного сигнала, больших пороговых значений трехмагنونных (3М) и четырехмагنونных (4М) процессов. Показано, что развитие 3М и 4М процессов приводит к снижению эффективности детектирования ПМСВ за счет механизмов ОСЭХ и эффекта увлечения на частотах, отвечающих коротковолновой области спектра. Отмечается, что развитие 3М и

4М процессов приводит к исчезновению пиков ЭДС, генерируемой за счет ОСЭХ, что связывается с разрушением сингулярностей в плотности состояний СВ. Для микроструктур YIG/Pt демонстрируется, что эффективность детектирования ПМСВ на частотах вблизи длинноволновой границы при уровне мощности входного сигнала, большей порога 3М процессов, остается практически неизменной, что связывается с эффектом усиления генерируемой ЭДС за счет заселения сингулярностей в области спектра анизотропных дипольно-обменных СВ вторичными магнонами, рожденные в результате беспороговых процессов слияния параметрических СВ.

В **пятой** главе исследуется детектирование сфокусированных пучков ПМСВ в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb. Эксперименты проводились с микроструктурами YIG/Pt и YIG/n-InSb, в которых одна из антенн имела форму близкую к дуге окружности. Для данной антенны с помощью микромагнитного моделирования показан эффект хроматической аберрации – зависимости положения фокуса относительно антенны от частоты ПМСВ. Показан рост сигнала ЭДС, генерируемого за счет сфокусированных пучков ПМСВ, относительно случая прямолинейной входной антенны на тех частотах, при которых положение фокуса находится под детектирующим Pt или n-InSb элементом.

В **шестой** главе рассматривается возможное применение результатов диссертационной работы. Предлагается способ повышения чувствительности детектирования СВ в микроструктурах YIG/Pt за счет использования нескольких Pt элементов. Приводятся результаты детектирования за счет ОСЭХ интерференции двух встречно распространяющихся ПМСВ и отмечается, что амплитуда сигнала ЭДС зависит не только от разности фаз ПМСВ, но и от соотношения длины волны с геометрическими параметрами Pt элемента. С помощью микромагнитного моделирования демонстрируется возможность построения устройства спиновой логики «логического ключа большинства» на основе интерференции каустик ПМСВ.

В **заключении** диссертации приведены основные результаты и выводы. К наиболее **значимым новым научным результатам**, полученным в данной работе, можно отнести следующие.

1. Показана связь ЭДС, генерируемой в микроструктурах YIG/Pt, с сингулярностями Ван Хофа в плотности состояний в спектре спиновых волн в пленке YIG.
2. Отмечено, что в микроструктурах YIG/Pt в условиях гибридизации ПМСВ с акустическими сдвиговыми модами структуры «подложка GGG – пленка YIG» величина сигнала ЭДС снижалась.
3. В микроструктурах YIG/Pt эффект усиления генерации ЭДС 3М процессами распада объясняется заселением спектра анизотропных дипольно-обменных волн,

содержащего сингулярности Ван Хова, вторичными магнонами, рожденными в результате беспороговых процессов слияния параметрических спиновых волн.

4. В микроструктурах YIG/n-InSb и YIG/Pt возбуждение сфокусированных пучков ПМСВ приводит к росту сигнала ЭДС относительно случая прямолинейной антенны на частотах, при которых положение фокуса находится под Pt или n-InSb детектирующим элементом.

Результаты, полученные в диссертационной работе, обладают несомненной **научной и практической** значимостью. В частности, разработан комплекс технологий по интеграции микроантенн и Pt и n-InSb элементов на поверхности пленки YIG для возбуждения и детектирования спиновых волн с волновыми числами до 12000 см^{-1} и чувствительностью детектирования до $4 \cdot 10^{-2} \text{ В/Вт}$. Для микроструктур YIG/Pt установлена связь эффективности детектирования спинового тока с плотностью состояний в спектре спиновых волн, что может использоваться для разработки энергоэффективной элементной базы на принципах магнонной спинтроники. Предложены подходы повышения эффективности детектирования спиновых волн за счет топологии возбуждающих спиновые волны микроантенн и чувствительных Pt и n-InSb элементов.

Научная новизна полученных результатов в диссертационной работе состоит в том, что в ней впервые показана прямая связь эффективности детектирования спиновых волн с сингулярностями Ван Хова в плотности состояний в спектре спиновых волн. Продемонстрировано, что частотная зависимость ЭДС, генерируемой за счет бегущих дипольных ПМСВ в микроструктурах YIG/Pt, достигает максимумов вблизи длинноволновой и коротковолновой границ спектра ПМСВ, что согласуется с функцией плотности состояний ПМСВ. Установлено, что в микроструктурах YIG/Pt на частотах гибридизации дипольной ПМСВ с обменными толщинными модами пленки YIG сигнал ЭДС увеличивается в несколько раз, что связано с формированием сингулярностей Ван Хова. Показано, что на частотах магнитоупругих резонансов сигнал ЭДС снижается, что связано с перекачкой энергии из спиновой подсистемы в упругую структуры «подложка GGG – пленка YIG». Отмечено, что в микроструктурах YIG/Pt развитие трехмагнонных и четырехмагнонных процессов может приводить как к разрушению сингулярностей Ван Хова и уменьшению сигнала генерируемой ЭДС, так и к эффекту усиления ЭДС 3М распадами.

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. Обнаруженный в работе эффект отрицательного магнитосопротивления в структурах YIG/n-InSb объясняется рассеянием электронов проводимости пленки n-InSb на ионах железа, диффундирующих из пленки YIG в процессе отжига. Однако доказательств в пользу данного объяснения не приводится. Было бы интересным исследовать состояние приповерхностных слоев на границе YIG/n-InSb.

2. В главах 2 и 3 исследуется детектирование ООМСВ в микроструктурах YIG/Pt. Однако утверждение о распространении «линейных» ООМСВ при указанных в работе значениях падающей мощности никак не обосновывается. Помимо этого, стоило бы добавить исследование влияния трехмагنونных и четырехмагنونных процессов на детектирование ООМСВ;

3. Результаты исследования детектирования сфокусированных пучков ПМСВ за счет механизмов эффекта увлечения и обратного спинового эффекта Холла представлены лишь на одном примере для каждой из микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb. Для более качественного анализа стоило бы добавить исследования детектирования сфокусированных пучков ПМСВ в других структурах;

4. В тексте диссертации встречаются опечатки и стилистические неточности.

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.

Отзыв составлен доктором физ.-мат. наук, профессором кафедры физической электроники и технологии ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» Устиновым Алексеем Борисовичем на основе изучения текста диссертации, автореферата и основных публикаций, в которых представлены результаты работы.

Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на заседании научного семинара кафедры физической электроники и технологии ФГАОУ ВО СПбГЭТУ «ЛЭТИ» 9 ноября 2022 года (протокол № 10)

Профессор кафедры физической
электроники и технологии, д-р физ.-мат наук

А.Б. Устинов

Заведующий кафедрой физической
электроники и технологии, д-р физ.-мат наук

А.А.Семенов

«11» ноября 2022 г.

Подпись А.Б. Устинова удостоверяю:
Ученый секретарь совета СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Т.Л. Русяева

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова»

Россия, 197022, Санкт-Петербург, л. Профессора Попова, дом 5 литера б

Телефон: +7 812 346-44-87

Факс: +7 812 346 27 58

Эл. почта: info@etu.ru

Сайт: <https://etu.ru/>