

На правах рукописи



СЕЛЕЗНЕВ МИХАИЛ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СПИНОВЫХ ВОЛН В МАГНИТНЫХ
МИКРОСТРУКТУРАХ YIG/Pt И YIG/n-InSb**

2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и наноэлектроники,
квантовых устройств

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2022

Работа выполнена на кафедре технологии материалов на базе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» и в лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Научный руководитель: **Филимонов Юрий Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, директор Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, заведующий кафедрой технологии материалов на базе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Официальные оппоненты: **Фраерман Андрей Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела магнитных наноструктур института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр институт прикладной физики Российской академии наук»

Сафин Ансар Ризаевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Формирование и обработка радиосигналов» радиотехнического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»), Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, дом 5 литера Ф

Защита состоится «02» декабря 2022 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета 24.2.392.01 на базе ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, 10 корпус, аудитория 511).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» (Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://sgu.ru/research/dissertation-council/24-2-392-01/kandidatskaya-dissertaciya-selezneva-mihaila>

Автореферат разослан «__» сентября 2022 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.392.01,
доктор физ.-мат. наук, доцент



Сысоев
Илья Вячеславович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Одним из возможных путей решения проблемы энергоэффективности элементной базы устройств хранения, обработки и передачи информации является использование технологий магнонной спинтроники – магноники, где движущиеся заряды заменены динамическими объектами в виде когерентных и некогерентных *спиновых волн (СВ)* [1]. При этом важное место занимают исследования механизмов взаимной конверсии спинового и электрического токов в микроструктурах на основе пленок магнитных диэлектриков и проводников с сильным спин-орбитальным взаимодействием, ярким примером которых являются структуры на основе пленок железиттриевого граната (YIG) и платины (Pt). На основе структур YIG/Pt за счет спинового эффекта Холла могут быть построены управляемые постоянным током генераторы сверхвысоких частот (СВЧ) [2,3], основанные на преобразовании электрического тока в спиновую волну (или спиновый ток плотностью J_S), а с помощью обратного спинового эффекта Холла (ОСЭХ) можно осуществить преобразование спинового тока в электрический ток (детектирование СВ) [2].

Одна из ключевых задач «магнонной спинтроники» связана с разработкой подходов повышения эффективности генерации, детектирования и контроля спинового тока в условиях накачки бегущими (когерентными) СВ. С этой целью ведется поиск материалов с большими значениями угла Холла и оптимизация технологических процессов, существенно влияющих на эффективность взаимного преобразования спинового J_S и электрического J_C токов за счет обменного взаимодействия на интерфейсе [4]. Также существенное внимание уделяется влиянию типа спин-волновой накачки и ее параметров (частоты f и мощности P) на эффективность инжектируемого через интерфейс спинового тока J_S^p [5,6]. Эффективность принято характеризовать отношением (S) напряжения ($U \sim J_S^p$), генерируемого за счет ОСЭХ в пленке Pt, к падающей СВЧ мощности ($S=U/P$). Процесс закачки спинового тока через интерфейс обусловлен процессами рассеяния электронов на магнонах, что должно приводить к пропорциональности закачиваемого через интерфейс спинового тока J_S^p плотности состояний $g(f)$ в спектре СВ структуры ($J_S^p \sim g(f)$ [7]). С этой точки зрения особый интерес представляют частоты f^* , отвечающие сингулярностям Ван Хофа в плотности состояний СВ [8], где $g(f^*) \rightarrow \infty$. Однако в экспериментах по спиновой накачке бегущими СВ связь инжектируемого спинового тока J_S^p с плотностью состояний $g(f)$ оставалась неизученной.

Следует отметить, что для детектирования и контроля спинового тока в структурах YIG-проводник, помимо короткодействующего «интерфейсного» механизма, может быть использован дальнедействующий «объемный» механизм, связанный с увлечением электронов проводимости СВЧ полем бегущих СВ [9]. Такой механизм возможен в пленках полупроводников [10] или металлов [11], контактирующих с пленкой YIG, и обусловлен проникновением в слой проводящей пленки на глубину скин-слоя l_{sk} СВЧ полей спиновой волны и наведением СВЧ тока. Омические потери приводят к передаче импульса магнонов электронам

проводимости и генерации тока увлечения J_d (тока Вайнрайха [9-11]) или электродвижущей силы (ЭДС) увлечения ($U_d = J_d \cdot S_{сеч} \cdot R$, где $S_{сеч}$ и R – площадь поперечного сечения и сопротивление проводящей пленки). При этом сопоставление эффективности детектирования спинового тока S за счет «интерфейсного» и «объемного» механизмов до сих пор не проводилось.

С учётом сказанного, **цель** диссертационной работы, направленной на исследование механизмов детектирования бегущих спиновых волн в планарных магнитных микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb и их сопоставление, представляется актуальной и научно значимой.

Для достижения поставленной цели решались следующие **основные задачи**:

1. Разработка физических основ технологий создания интегральных микроструктур на основе пленок YIG, Cu, Pt и n-InSb, позволяющих формировать индукционные антенны и проводящие элементы для генерации ЭДС непосредственно на пленке YIG;

2. Исследование эффектов распространения спиновых волн и генерации ЭДС в микроструктурах YIG/Pt и YIG/ n-InSb в линейном режиме и условиях параметрической неустойчивости СВ;

3. Исследование влияния дипольно-обменных и магнитоупругих резонансов на распространение поверхностной магнитостатической волны (ПМСВ) и генерацию ЭДС в микроструктурах YIG/ Pt и YIG/ n-InSb;

4. Анализ полученных результатов, направленный на выделение вкладов локальных (связанных со спиновой накачкой на интерфейсе YIG/Pt и YIG/n-InSb) и нелокальных (связанных с эффектом увлечения электронов в объеме проводника за счет возникновения тока увлечения Вайнрайха) механизмов наведения ЭДС;

5. Формирование интегральных микроструктур YIG/Pt и YIG/ n-InSb с фокусирующими микроантеннами спиновых волн;

6. Изучение характеристик распространения спиновых волн и генерации ЭДС в структурах YIG/Pt и YIG/n-InSb в условиях фокусировки.

Научная новизна работы состоит в том, что в ней впервые:

1. Показана прямая связь эффективности детектирования бегущих спиновых волн в структурах YIG/Pt с сингулярностями Ван Хофа в плотности состояний в спектре спиновых волн пленки YIG;

2. Обнаружено, что в структурах YIG/Pt на основе «толстых» пленок YIG частотная зависимость ЭДС, генерируемая бегущими дипольными ПМСВ, достигает максимальных значений на частотах, отвечающих длинноволновой (f_0) и коротковолновой (f_s) границам спектра ПМСВ;

3. Продемонстрировано, что в структурах YIG/Pt ЭДС на частотах гибридизации ПМСВ с обменными модами пленки резонансно возрастает, что принципиально отличается от поведения ЭДС в структурах YIG/n-InSb;

4. Исследовано влияние резонансного взаимодействия ПМСВ с упругими модами структуры пленка YIG – подложка гадолиний галлиевого граната (GGG) на генерацию ЭДС в структуре YIG/Pt;

5. Изучены особенности детектирования сфокусированных волновых пучков СВ в структурах YIG/Pt и YIG/n-InSb;

6. Исследовано влияние процессов параметрической неустойчивости на детектирование бегущих спиновых волн в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb.

Научная значимость работы для развития электронной компонентной базы микро- и наноэлектроники заключается в том, что в ней получены новые знания о механизмах детектирования бегущих спиновых волн в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb, которые развивают и дополняют физические представления об особенностях распространения спиновых волн в таких микроструктурах.

Практическая значимость состоит в том, что:

1. Разработаны физические основы технологии получения интегральных микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb, демонстрирующих вольт-ваттную чувствительность $S \geq 10^{-3}$ В/Вт;

2. Показана возможность оптимизации вольт-ваттной чувствительности микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb за счет выбора топологии антенн спиновых волн, топологии чувствительного элемента (пленок Pt или n-InSb) и способа изготовления контактов к чувствительному элементу;

3. Выявленная связь эффективности спиновой накачки бегущими спиновыми волнами в структурах YIG/Pt с плотностью состояний в спектре спиновых волн пленки YIG позволяет оптимизировать параметры детекторов спинового тока на их основе;

4. Проведенный сравнительный анализ механизмов детектирования спинового тока в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb может служить основой выбора оптимального механизма для решения задачи детектирования бегущих спиновых волн;

5. Исследованные осцилляции напряжения ОСЭХ в зависимости от разности фаз между двумя интерферирующими спиновыми волнами демонстрирует возможность использования ОСЭХ в логическом ключе «большинства» на основе интерференции каустик спиновых волн для преобразования фазы спиновой волны в электрический сигнал.

Положения, выносимые на защиту:

1. Чувствительность детектирования S бегущих спиновых волн в структурах YIG/Pt достигает максимума на частотах, отвечающих сингулярностям Ван Хофа в плотности состояний в спектре спиновых волн, что принципиально отличается от структур YIG/n-InSb, где значения S пропорциональны волновому числу СВ.

2. В структурах YIG/Pt частотная зависимость ЭДС, генерируемой бегущими дипольными ПМСВ, достигает максимальных значений на частотах, отвечающих длинноволновой и коротковолновой границам спектра ПМСВ.

3. В структурах YIG/Pt на частотах гибридизации ПМСВ с обменными модами ЭДС резонансно возрастает, что принципиально отличается от поведения ЭДС в структурах YIG/n-InSb, где ЭДС снижается.

4. Чувствительность детектирования ПМСВ в структурах YIG/Pt снижается на частотах резонансного взаимодействия с упругими модами структуры пленка YIG – подложка гадолиний галлиевого граната из-за перераспределения мощности волны между спиновой и упругой подсистемами.

5. В условиях трехмагнетонного распада ПМСВ величина ЭДС в структурах YIG/Pt достигает максимальных значений в области магнитных полей, отвечающих максимальной заселенности спектра анизотропных дипольно-обменных волн вторичными спиновыми волнами.

6. В детекторах на основе структур YIG/Pt и YIG/n-InSb использование фокусирующих преобразователей СВ приводит к росту сигнала ЭДС относительно случая прямолинейных антенн на частотах, при которых положение фокуса находится под проводящей пленкой. В противном случае, наоборот, ЭДС падает.

Достоверность полученных экспериментальных результатов подтверждается их воспроизводимостью, использованием современных средств и методов измерений и соответствием с численными расчетами. Достоверность результатов расчетов обеспечивается использованием широко апробированных математических моделей. Достоверность также подтверждается отсутствием противоречий с известными опубликованными работами.

Апробация работы

Основные материалы работы докладывались на следующих научных конференциях:

1. Всероссийская научная конференция молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2018, 2019, 2020);
2. Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» XXXIII, XXXIV, XXXV (Нижний Новгород, 2019, 2020, 2021, 2022);
3. Международная конференция PhysicA.SPb (Санкт-Петербург, 2020, 2021);
4. 12-я международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (Саратов, 2019);
5. Всероссийская научная школа-семинар «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (Саратов, 2021);
6. 21-я и 22-я Всероссийская молодежная научная конференция «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (Ульяновск, 2018, 2019).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 24 работы, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, 19 тезисов докладов на конференциях, симпозиумах и 1 патент на изобретение.

Личный вклад соискателя. Исследуемые в диссертации микроструктуры YIG/Pt и YIG/n-InSb с интегрированными медными антеннами изготавливались соискателем совместно с сотрудниками лаборатории СФ-4 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН с.н.с, к.ф.-м.н. Ю.В. Никулиным и в.н.с., к.ф.-м.н. Ю.В. Хивинцевым. Измерения электрических параметров структур YIG/Pt и YIG/n-InSb выполнялись совместно с с.н.с. СФ-4, к.ф.-м.н. Ю.В. Никулиным. Микромагнитное моделирование эффекта фокусировки ПМСВ фокусирующим преобразователем, а также логического элемента «ключ большинства» выполнялось совместно с с.н.с. СФ-4, к.ф.-м.н. Г.М. Дудко. Микромагнитное моделирование спектра анизо-

тропных дипольно-обменных спиновых волн проводилось совместно с с.н.с. СФ-4, к.ф.-м.н. В.К. Сахаровым. Исследование эффектов интерференции встречно распространяющихся ПМСВ в структуре двухслойная пленка YIG-Pt выполнялось вместе с в.н.с. СФ-4, к.ф.-м.н. С.Л. Высоцким. Все остальные представленные результаты экспериментов в диссертации получены лично соискателем.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из Введения, шести глав, Заключения, Списка сокращений и условных обозначений и Списка литературы. В конце каждой главы приводится раздел «Выводы» с кратким перечислением основных результатов исследований, описанных в данной главе. Общий объем диссертационной работы составляет 179 страниц, включая 193 рисунка, 3 таблицы, список литературы из 186 наименований, список сокращений и условных обозначений на 4 страницах.

Соответствие направления диссертационного исследования специальности

В диссертационной работе исследуются механизмы генерации ЭДС бегущими спиновыми волнами в гетероструктурах из пленок магнитных диэлектриков и проводников, а также особенности генерации ЭДС, обусловленные параметрической неустойчивостью и фокусировкой спиновых волн, что соответствует формуле специальности и п. 2 раздела «области исследования» паспорта специальности по шифру 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели, задачи, практическая и научная значимости, перечислены положения, выносимые на защиту, указаны сведения об апробации работы, основных публикациях автора и структуре работы.

В **1-й главе** представлен обзор литературы по изучаемой проблеме, изложены методы изготовления и исследования детектирования спиновых волн в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb. Обсуждаются механизмы переноса спинового углового момента спиновыми волнами, дисперсионные характеристики поверхностных МСВ (ПМСВ) и обратных объемных МСВ (ООМСВ), особенности распространения дипольных МСВ, связанные с эффектами резонансного взаимодействия с обменными и упругими волнами. Рассмотрены условия, при которых возможны параметрические процессы первого и второго порядков с участием ПМСВ и ООМСВ. Обсуждаются механизмы генерации ЭДС за счет ОСЭХ и эффекта увлечения. Отмечается, что генерируемая за счет ОСЭХ плотность тока в Pt определяется векторным произведением $J_c \sim J_s^P \times \sigma(t)$ [1-6], где $\sigma(t)$ – единичный вектор спиновой поляризации, тогда как в случае структур YIG/n-InSb $J_d \sim k \cdot \mu_e \cdot k_{el}''$ [9-11], где k – волновой вектор СВ, μ_e – подвижность электронов в n-InSb, k_{el}'' – электронная составляющая пространственного декремента СВ в структуре YIG/n-InSb.

Отмечается, что особый интерес с точки зрения ОСЭХ представляют критические точки (сингулярности Ван Хова [8]) в функции плотности состояний

$g(f) = \frac{v_0}{ul} \sum \int_{s(f)} [\sum_{\xi=1}^l (\frac{\delta f(k)}{\delta k_{\xi}})^2]^{-\frac{1}{2}} ds \rightarrow \infty$, что реализуется при групповой скорости СВ $\frac{\delta f(k)}{\delta k_{\xi}} = \frac{\delta w(k)}{2\pi\delta k_{\xi}} \rightarrow 0$. Тогда как для ЭДС увлечения существенными параметрами являются волновое число СВ и подвижность электронов. Описывается методика измерений характеристик СВ и генерируемой ЭДС в структурах YIG/Pt и YIG/n-InSb.

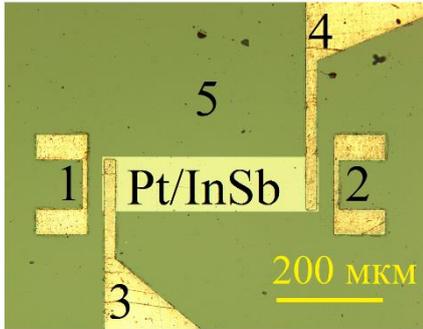


Рисунок 1 – Оптическое изображение микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb, где 1 и 2 – возбуждающие МСВ микроантенны, 3 и 4 – медные контакты для измерения генерируемой ЭДС, 5 – поверхность пленки YIG.

Излагаются этапы изготовления микроструктур, реализуемые на основе методов магнетронного и термического напыления, ионного травления и фотолитографии. Микроструктуры имели вид макетов линии задержки (ЛЗ) МСВ на основе микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb с интегрированными индукционными микроантеннами (1 и 2 рисунок 1). Антенны имели ширину 4 мкм и обеспечивали возбуждение МСВ с $k \leq 12000 \text{ см}^{-1}$ (с длиной волны до $\approx 5.24 \text{ мкм}$), что отвечало поставленным задачам как с точки зрения изучения влияния сингулярностей $g(f^*) \rightarrow \infty$ на эффективность ОСЭХ, так и эффективного увлечения электронов.

В разделе 1.5 показано, что используемая технология позволяет изготавливать структуры YIG/Pt с величиной спин-Холл магнитосопротивления $\approx 0.01\text{--}0.05\%$, типичной для таких структур.

В разделе 1.6 отмечено, что полученные пленки n-InSb характеризовались подвижностью электронов $\mu_e \approx 20000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, что отвечало поставленной задаче по исследованию эффекта увлечения электронов МСВ. Установлено, что пленки n-InSb при касательном намагничивании структуры YIG/n-InSb характеризуются отрицательным магнитосопротивлением $\approx 1\%$, что объясняется рассеянием электронов на магнитных ионах Fe, диффундирующих в пленку InSb при отжиге.

Глава 2 посвящена детектированию линейных СВ в макетах типа ЛЗ МСВ на основе микроструктур YIG/Pt.

В разделе 2.1 обсуждается влияние пленок Pt или n-InSb на характеристики ПМСВ, определяемое параметром спин-электронной связи $G = \frac{d}{k \cdot l_{sk}^2} \approx \frac{L \cdot d}{2\pi \cdot l_{sk}^2}$ [11]. Для параметров полученных микроструктур и диапазона частот измерений значение $G \leq 0.17$, что указывает на «полупроводниковый» характер влияния проводимости пленок Pt и n-InSb, когда дисперсионная зависимость $k(f)$ близка к случаю свободной пленки YIG. При этом величина электронной составляющей пространственного декремента k_{el}'' , связанная с омическими потерями, заметно превышает как магнитные k_m'' , так и потери, обусловленные процессами электрон-магнетонного рассеяния на интерфейсе [12].

Раздел 2.2 содержит результаты исследования распространения и детектирования дипольных ПМСВ в макете ЛЗ на основе «толстой» пленки YIG (рисунки 2а, б). Приводятся результаты измерения закона дисперсии и амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) коэффициента передачи, показывающие близость АЧХ макетов структур YIG/Pt (кривая 1) и YIG (кривая 3), что отвечало ранее проведенной оценке параметра G . Представленная на рисунке 2б генерируемая ЭДС $U(f)$ характеризовалась двумя пиками вблизи границ f_0 и f_s , что отвечало максимумам в функции плотности состояний $g(f)$ ПМСВ Дэймона-Эшбаха [13].

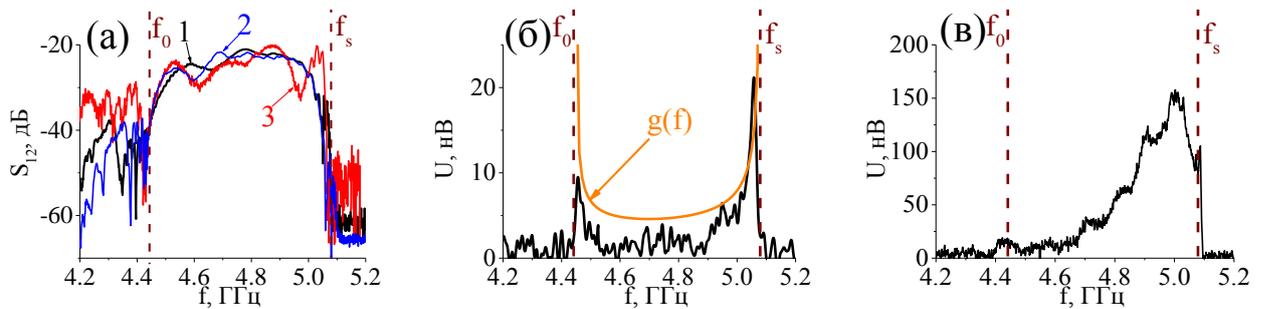


Рисунок 2 – (а) АЧХ коэффициента передачи для структур YIG/Pt (1), YIG/n-InSb (2) и YIG (3), измеренные при $P_{in} = -20$ дБм; (б) частотные зависимости генерируемой при $P_{in} = -10$ дБм ЭДС U и плотности состояний g в спектре ПМСВ Дэймона-Эшбаха [13] для структуры YIG/Pt; (в) частотные зависимости генерируемой при $P_{in} = -10$ дБм ЭДС U для структуры YIG/n-InSb.

На примере макетов типа ЛЗ СВ на основе «тонкой» пленки YIG, в разделе 2.3, рассмотрены распространение и детектирование дипольно-обменных СВ (рисунки 3а-в). В АЧХ коэффициента передачи СВ для структур YIG/Pt (кривая 1) и YIG (кривая 3) наблюдались провалы (отмечены «*»), обусловленные дипольно-обменными резонансами, на частотах которых формировались аномальные участки дисперсионной зависимости (рисунок 3б и вставка к нему), которые отвечали сингулярностям Ван Хофа. Было обнаружено, что на таких частотах генерируемая ЭДС в структурах YIG/Pt (рисунок 3в) увеличивалась в несколько раз.

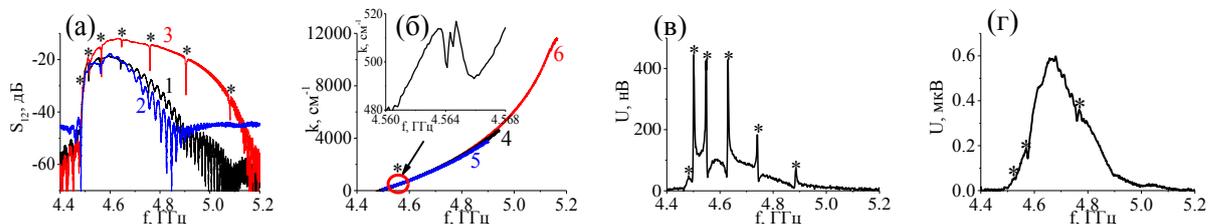


Рисунок 3 – (а) АЧХ коэффициента передачи, измеренные при $P_{in} = -20$ дБм для структур YIG/Pt (1), YIG/n-InSb (2) и YIG (3); (б) экспериментальные дисперсионные характеристики для структур YIG/Pt (4), YIG/n-InSb (5) и YIG (6), на вставке к рисунку показан аномальный участок $k(f)$; (в) частотная зависимость ЭДС, генерируемой при $P_{in} = -10$ дБм для структуры YIG/Pt; (г) частотная зависимость ЭДС, генерируемой при $P_{in} = -10$ дБм для структуры YIG/n-InSb; «*» отмечены частоты, отвечающие дипольно-обменным резонансам.

В разделе 2.4. обсуждается резонансное взаимодействие дипольно-обменной ПМСВ со сдвиговыми акустическими модами. Показано уменьшение значений коэффициента передачи ПМСВ (кривая 1) и генерируемой ЭДС (кривая

2) (рисунок 4а) на частотах магнитоупругих резонансов, при этом в дисперсионной характеристике (рисунок 4в) наблюдались аномальные участки, которые должны были способствовать росту плотности состояний СВ за счет падения групповой скорости магнитоупругой волны. Однако в данном случае имеет место резонанс возбуждений магнитной и упругой подсистем пленки YIG и подложки GGG. Часть энергии переходит в подложку и не участвует в процессах электрон-магнитного рассеяния.

Отмечается более существенное уменьшение коэффициента передачи ПМСВ и генерируемой U , когда положение магнитоупругих резонансов, определяемое как $f_N \approx N \times V_T / 2D$, попадает в полосу частот дипольно-обменных резонансов (рисунок 4б), что следует связать с большой эффективностью магнитоупругого взаимодействия акустических волн с обменными.

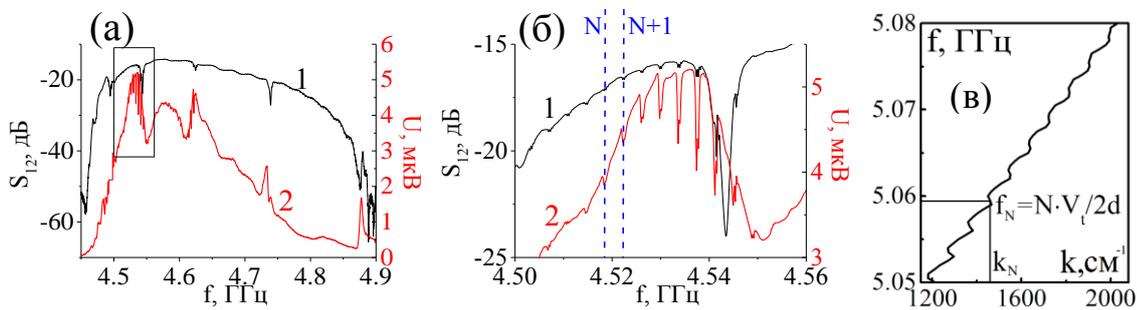


Рисунок 4 – (а) Частотные зависимости коэффициента передачи S_{12} (1) и ЭДС U (2), на (б) показан участок на частоте дипольно-обменного резонанса, обозначенный прямоугольником на (а), пунктирными линиями на (б) показаны положения магнитоупругих резонансов; (в) дисперсионная зависимость ПМСВ с магнитоупругими резонансами [14].

Особенности генерации ЭДС в случае распространения ООМСВ в структурах YIG/Pt обсуждаются в разделе 2.5. Отмечается, что генерируемая ЭДС $U(f)$ характеризуется одним пиком вблизи границы f_0 , что соответствует функции плотности состояний $g(f)$ для ООМСВ [13]. Отмечено, что в отличие от случая ПМСВ, при распространении ООМСВ знак генерируемой ЭДС может зависеть не только от направления поля подмагничивания H_0 , но и от геометрии контактов на Pt микрополоске.

Глава 3 содержит результаты экспериментального исследования детектирования линейных СВ в макетах типа ЛЗ СВ на основе микроструктур YIG/n-InSb.

В разделе 3.1 приведены результаты исследования распространения и детектирования дипольной ПМСВ для микроструктур YIG/n-InSb на основе «толстой» пленки YIG. Близость АЧХ коэффициента передачи ПМСВ (рисунок 2а) для структур YIG/n-InSb (кривая 2) и YIG (кривая 3) отвечает оценке спин-электронной связи G . Генерируемая ЭДС при этом увеличивается с ростом k (рисунок 2в), достигая максимума на частотах, отвечающих границе f_s ПМСВ, что принципиально отличается от случая YIG/Pt.

В разделе 3.2 показано, что в АЧХ коэффициента передачи ПМСВ (рисунок 3а кривая 2) в микроструктурах YIG/n-InSb на основе «тонкой» пленки YIG

наблюдались «провалы» (отмечены «*»), которым соответствовали аномальные участки дисперсии $k(f)$ (рисунок 3б кривая 5), что аналогично случаю YIG/Pt. При этом на частотах «*» значение генерируемой ЭДС (рисунок 3г), наоборот, снижалось, что обусловлено ростом магнитных потерь k''_{mag} .

В разделе 3.2.1 отмечено, что на основе результатов измерений k , μ_e , k''_{ei} проведена оценка чувствительности структуры, которая составила $S \approx 8$ В/Вт, что превышает экспериментальные значения более, чем на порядок.

Раздел 3.3 содержит результаты измерения ЭДС увлечения для случая ООМСВ. Показано, что знак ЭДС в этом случае противоположен знаку ЭДС для ПМСВ, что связано с отрицательным характером дисперсии ООМСВ.

В разделе 3.4 продемонстрировано, что знак генерируемой ЭДС в структурах YIG/n-InSb определяется направлением k как ПМСВ, так и ООМСВ, что указывает на доминирование механизма эффекта увлечения электронов МСВ.

В главе 4 обсуждается детектирование нелинейных СВ в макетах типа ЛЗ на основе микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb.

В разделе 4.1 приводятся результаты измерения пороговых уровней мощности P_{th} и амплитуды намагниченности m_{th} ПМСВ для трехмагнотных (3М) и четырехмагнотных (4М) процессов по возникновению отклонения передаточной характеристики структур от линейной. Отмечено, что полученные значения m_{th} почти на порядок выше оценок, выполненных в рамках теории Сулла для однородной накачки [15]. Отмечается, что расхождение может быть связано с поглощением части падающей мощности электронами Pt, ростом погрешности используемой методики для малых длин пробега ПМСВ, а также дифракционной расходимостью ПМСВ.

В разделе 4.2 обсуждается влияние 4М процессов на детектирование СВ. Установлено, что в случае микроструктуры YIG/Pt на основе «толстой» пленки YIG развитие 4М процессов приводило к смещению коротковолнового пика «вниз» по частоте и уменьшению эффективности детектирования S в 4-5 раз.

В случае микроструктур на основе «тонкой» пленки YIG показано, что развитие 4М процессов параметрической неустойчивости приводило к нарушению фазового синхронизма между дипольной ПМСВ и обменными модами. В случае YIG/Pt наблюдалось исчезновение пиков ЭДС (рисунки 5а, б отмечены «*»), что говорит о разрушении сингулярностей Ван Хова, а в случае YIG/n-InSb – «провалов» (рисунки 5 в, г отмечены «*»).

В разделе 4.3 представлены результаты по исследованию влияния 3М процессов на детектирование ПМСВ. В случае микроструктур YIG/Pt на основе «толстой» пленки YIG развитие 3М процессов приводило к ограничению мощности ПМСВ, что выражалось в уменьшении коэффициента передачи (рисунок 6а). При этом пик ЭДС на частоте f_s исчезал (рисунок 6б), в то время как на частоте f_0 наблюдался квазилинейный рост ЭДС с увеличением мощности ПМСВ (рисунок 6в). Такой рост получил название «усиление генерации спинового тока за счет 3М распадов» [5].

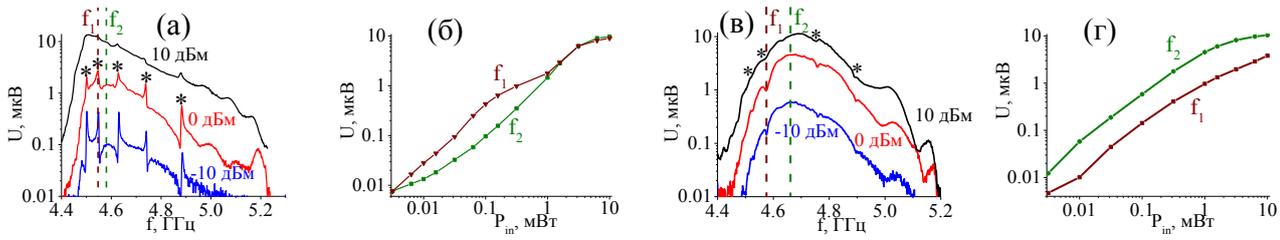


Рисунок 5 – (а) частотные зависимости ЭДС, измеренные для структуры YIG/Pt при значениях P_{in} , указанных на графике, «*» отмечены пики на частотах дипольно-обменных резонансов; (б) зависимости $U(P_{in})$ на частотах $f_1 \approx 4.546$ ГГц и $f_2 \approx 4.58$ ГГц, указанные на рисунке; (в) частотные зависимости ЭДС, измеренные для структуры YIG/n-InSb при значениях P_{in} , указанных на рисунке, «*» отмечены провалы на частотах дипольно-обменных резонансов; (г) зависимости $U(P_{in})$ на частотах $f_1 \approx 4.575$ ГГц и $f_2 \approx 4.661$ ГГц, указанные на рисунке (в);

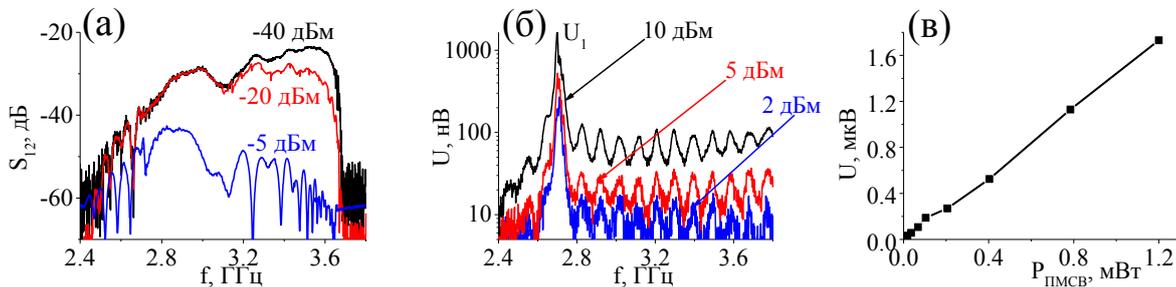


Рисунок 6 – Частотные зависимости коэффициента передачи S_{12} (а) и генерируемой ЭДС (б), измеренные при значениях P_{in} , указанных на графиках, и поле подмагничивания $H_0 \approx 428$ Э; (в) зависимость длинноволнового пика ЭДС U_1 (рисунок б) от мощности ПМСВ.

Отмечается, что зависимость ЭДС на частоте f_0 от магнитного поля H_0 (рисунок 7а) при мощности ПМСВ $P \gg P_{th}$ имеет вид, аналогичный зависимости из работ [5,6]. Приводятся результаты измерения спектра сигнала ПМСВ на выходной антенне, из которых следует, что максимуму ЭДС при $H_0^* \approx 464$ Э (рисунок 7а отмечено «*») соответствует наибольший «шумовой» пик вблизи частоты накачки f_p (рисунки 7б-г), формируемый вторичными спиновыми волнами (ВСВ). Отмечается, что в случае, когда шумовой пик формируется на частотах вдали от длинноволновой границы спектра f_0 , никакого «усиления» ЭДС 3М распадами не происходит. Предлагается механизм «эффекта усиления», связанный с заселением ВСВ области спектра анизотропных дипольно-обменных волн (рисунок 7д), которые в кубически анизотропных пленках YIG могут занимать полосу частот $\sim 300 - 400$ МГц вблизи f_0 (рисунки 7д, е). Причина максимума ЭДС при поле H_0^* связана с тем, что при таком поле полоса частот, в которой существуют сингулярности Ван Хофа в спектре анизотропных МСВ, оптимально перекрывается с полосой частот, где формируются наиболее интенсивные ВСВ.

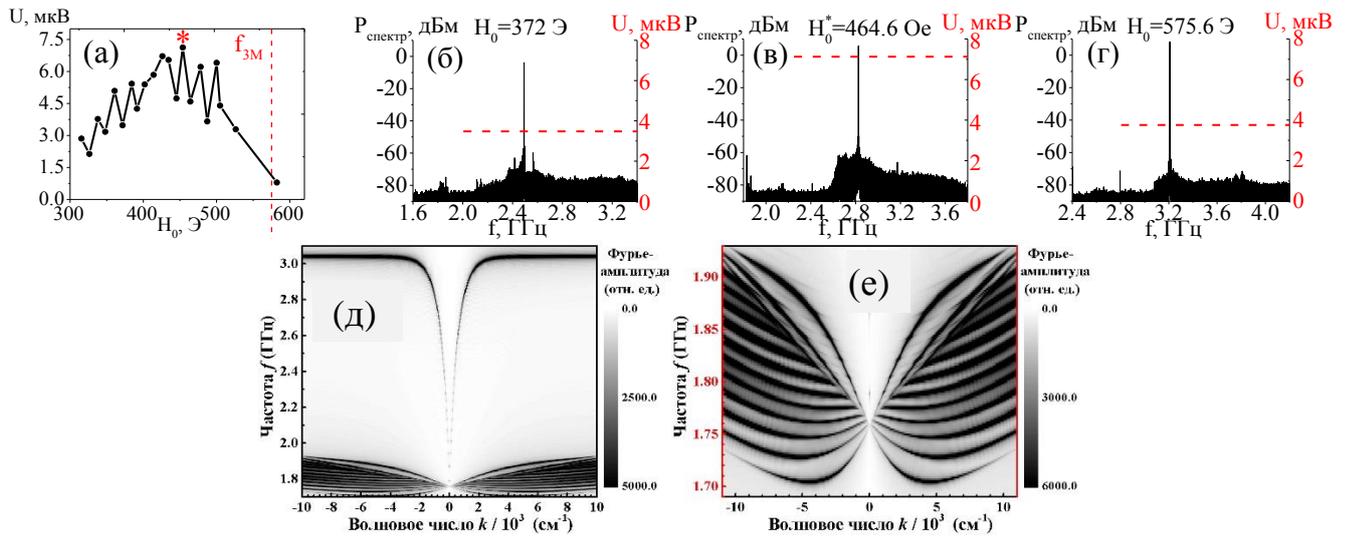


Рисунок 7 – (а) Зависимость ЭДС на частоте f_0 от магнитного поля H_0 , измеренная при $P_{in} \approx 10$ дБм и для диапазона значений поля подмагничивания $H_0 \approx 316..583$ Э для структуры YIG/Pt, вертикальной пунктирной линией отмечено положение граничного значения поля для 3М распадов в случае дипольного приближения без учета анизотропии; (б)-(г) спектр выходного сигнала и амплитуда длинноволнового пика ЭДС U для нескольких значений поля подмагничивания H_0 ; (д) Результат микромагнитного моделирования спектра дипольно-обменных СВ с учетом поля кубической анизотропии $H_A = -43$ Э, на рисунке (е) показана область вблизи границы f_0 .

В случае микроструктур на основе «тонких» пленок YIG 3М процессы распада приводили к нарушению фазового синхронизма дипольной ПМСВ с обменными модами пленки YIG и, соответственно, к разрушению сингулярностей Ван Хофа и исчезновению пиков ЭДС в случае YIG/Pt или провалов в случае YIG/n-InSb, что аналогично влиянию 4М процессов.

Глава 5 посвящена исследованию детектирования сфокусированных волновых пучков ПМСВ. Эксперименты выполнялись с макетами типа ЛЗ ПМСВ на основе микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb, где одна из антенн имела форму [16] фазового фронта ПМСВ при возбуждении точечным источником, см. рисунок 8а. С помощью микромагнитного моделирования показано, что из-за хроматической aberrации при возбуждении ПМСВ фокусирующей микроантенной (рисунок 8а) положение фокуса зависит от частоты ПМСВ.

Показано, что сигнал ЭДС в структурах YIG/n-InSb (рисунок 8б) и YIG/Pt (рисунок 8в) увеличивался на 10-20% при возбуждении ПМСВ фокусирующей антенной (кривая 1 на рисунках 8б, в) по сравнению со случаем прямолинейной антенны (кривая 2 на рисунках 8б, в) на тех частотах, при которых положение фокуса находилось под Pt или n-InSb микрополоской. В противном случае сигнал генерируемой ЭДС, наоборот, снижался.

Отмечается, что формирование каустик в структурах YIG/Pt, в отличие от структур YIG/n-InSb, может приводить к дополнительным особенностям в частотной зависимости $U(f)$, связанным с заселением каустиками участков спектра с высокой плотностью состояний.

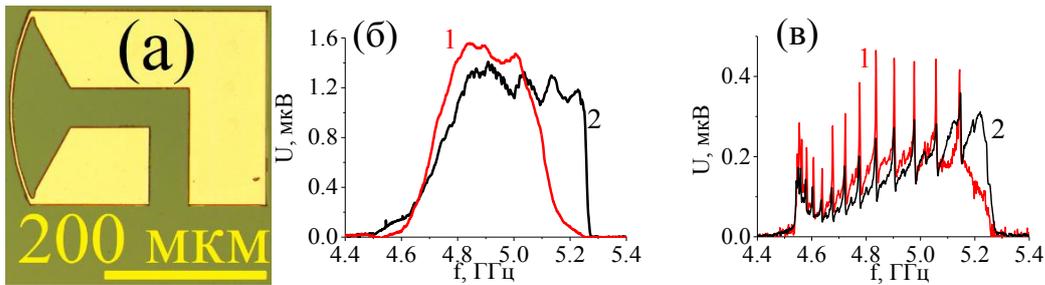


Рисунок 8 – (а) Изображение фокусирующей ПМСВ антенны; частотные зависимости ЭДС, генерируемые при $P_{in}=-10$ дБм в структурах YIG/n-InSb (б) и YIG/Pt (в) с фокусирующей (1) и прямолинейной (2) антеннами.

В главе 6 рассматривается возможное применение результатов исследований для построения электронной компонентной базы на принципах магноники и спинтроники.

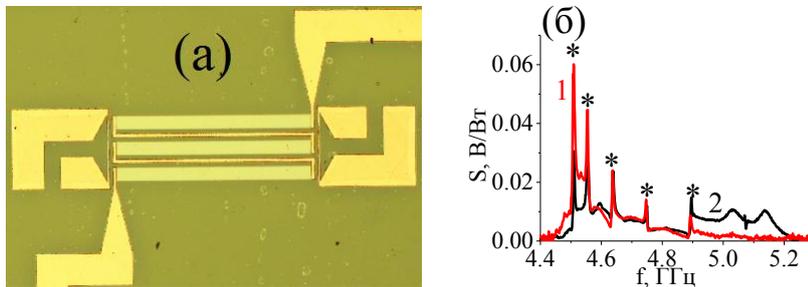


Рисунок 9 – (а) Изображение структуры YIG/Pt, состоящей из трех последовательно соединенных Pt микрополосок; (б) Сравнение частотных зависимостей чувствительности детектирования S , рассчитанных на основе измеренных ЭДС при $P_{in}=-10$ дБм.

Предложен способ повышения вольт-ваттной чувствительности микроструктур YIG/Pt за счет выбора топологии чувствительного слоя платины (рисунок 9а). Установлено, что на частотах, на которых длина волны ПМСВ существенно больше характерных геометрических параметров подводящих медных контактов, возможно увеличение чувствительности детектирования в 2-2.5 раза в структурах с 3 последовательно соединенными Pt микрополосками (рисунок 9б кривая 1) по сравнению со структурой с одной Pt микрополоской (рисунок 9б кривая 2).

Показана возможность детектирования интерференции двух встречно распространяющихся ПМСВ за счет ОСЭХ. Представлена зависимость сигнала ЭДС от сдвига фаз между сигналами, поступающие на входные антенны. С помощью микромагнитного моделирования показано, что на основе интерференции каустик может быть реализован логический ключ большинства. Предложен подход, при котором величина ЭДС с контактов к платине, позволяет определить фазу большинства входных сигналов.

В заключении диссертационной работы сформулированы основные результаты и выводы:

1. Разработаны технологии на основе магнетронного напыления, позитивной, негативной и взрывной фотолитографий и ионного травления, с помощью которых были изготовлены макеты линии задержки МСВ на основе микроструктур YIG/n-InSb и YIG/Pt с интегрированными индукционными микроантеннами, которые обеспечивали возбуждение МСВ с волновыми числами $k_{max} \approx 12000 \text{ см}^{-1}$ (с длиной волны λ до $\approx 5.24 \text{ мкм}$). Последнее обстоятельство играло существенную роль в случае YIG/Pt, так как обеспечивало возбуждение ПМСВ на частотах f_0 и f_s , отвечающих сингулярностям Ван Хова в плотности состояний СВ в спектре ПМСВ.
2. В структурах YIG/n-InSb был обнаружен эффект отрицательного магнитосопротивления величиной 1%, который может быть связан с диффузией ионов Fe и Y из пленки YIG в n-InSb при отжиге. Отмечено, что полученные пленки n-InSb характеризовались высокими значениями подвижности электронов, что необходимо для эффективного увлечения электронов полями МСВ.
3. Исследованы распространение и детектирование спиновых волн в микроструктурах YIG/Pt. В случае микроструктур на основе «толстых» пленок YIG возбуждение ПМСВ приводило к генерации ЭДС, характеризующейся длинноволновым (U_1) и коротковолновым (U_2) пиками, что отвечает распределению плотности состояний магнонов в спектре ПМСВ. Чувствительность S таких структур достигала значения $4 \cdot 10^{-4} \text{ В/Вт}$ на частотах пиков U_1 и U_2 . В случае микроструктур на основе «тонких» пленок YIG возбуждение ПМСВ приводило к генерации ЭДС практически на всем частотном диапазоне ПМСВ. Чувствительность детектирования МСВ S в этом случае достигала значений $3.5\text{--}4 \times 10^{-2} \text{ В/Вт}$. Также установлено, что знак генерируемой ЭДС в структурах YIG/Pt в геометриях ПМСВ и ООМСВ зависит только от направления внешнего магнитного поля, но не от направления волнового вектора МСВ, что соответствует механизму ОСЭХ.
4. Обнаружено увеличение генерируемой ЭДС на частотах дипольно-обменных резонансов, которые отвечают сингулярностям Ван Хова в плотности состояний в спектре СВ. В случае же резонансного взаимодействия ПМСВ с упругими модами в структуре Pt/YIG/GGG наблюдается уменьшение ЭДС, генерируемой за счет ПМСВ и, соответственно, снижение чувствительности детектирования СВ S . Это объясняется перекачкой части энергии из спиновой подсистемы в акустическую.
5. Исследованы распространение и детектирование спиновых волн в микроструктурах YIG/n-InSb. В случае микроструктур на основе «толстых» пленок YIG возбуждение ПМСВ приводило к генерации ЭДС, величина которой увеличивалась вместе с ростом k ПМСВ, что соответствовало эффекту увлечения и принципиально отличалось от структур YIG/Pt. Чувствительность таких структур достигала значений $4.5 \cdot 10^{-3} \text{ В/Вт}$. В случае микроструктур на основе «тонких» пленок YIG чувствительность S достигала значений $2.6 \cdot 10^{-2} \text{ В/Вт}$. Показано, что знак генерируемой ЭДС в структурах YIG/n-InSb зависит только от

- направления k ПМСВ и ООМСВ, что соответствует эффекту увлечения электронов.
6. Исследовано распространение и детектирование ПМСВ в условиях параметрической неустойчивости. Установлено, что развитие 4М процессов в микроструктурах YIG/Pt на основе «толстой» пленки YIG приводит к сдвигу коротковолнового пика, а также к падению эффективности детектирования S в 4-5 раз. В случае микроструктур на основе «тонкой» пленки YIG развитие как 4М, так и 3М процессов приводит к нарушению фазового синхронизма дипольной ПМСВ и обменных мод. Для YIG/Pt это приводило к исчезновению пиков ЭДС, что говорит о разрушении сингулярностей Ван Хофа. В то же время для YIG/n-InSb в частотных зависимостях ЭДС наблюдалось исчезновение «провалов».
 7. Для микроструктур YIG/Pt на основе «толстой» пленки YIG отмечено, что в условиях 3М распадов коротковолновый пик в генерируемой ЭДС исчезает, и сохраняется лишь длинноволновый. При этом показано, что эффект усиления генерации ЭДС 3М распадами связан с заселением вторичными спиновыми волнами, рожденные в результате процессов распада и беспороговых процессов слияния, спектра анизотропных дипольно-обменных волн, в которых присутствуют участки дисперсии, отвечающих сингулярностям Ван Хофа, и обнаружено, что максимальному значению ЭДС соответствует максимальная заселенность вторичными магнонами такого спектра.
 8. Проведено микромагнитное моделирование распространения ПМСВ, возбуждаемой криволинейным преобразователем, результаты которого показывают на каких частотах f положение фокуса ПМСВ приходится на область под Pt или n-InSb. Было обнаружено, что в условиях фокусировки ПМСВ сигнал генерируемой ЭДС увеличивается на 10-20% по сравнению со случаем без фокусировки на частотах, при которых положения фокуса находится под Pt или n-InSb микрополоской. При этом в случае структур YIG/Pt наблюдалось формирование дополнительных пиков ЭДС, которым могут соответствовать сингулярности Ван Хофа в спектре дипольно-обменных ПМСВ. Их заселению способствуют формируемые под углом каустики и двух- и четырехмагнонные процессы рассеяния.
 9. На основе проведенных исследований изготовлена микроструктура YIG/Pt, состоящая из трех последовательно соединенных Pt микрополосок и обеспечивающая повышение чувствительности в 2-2.5 раза в длинноволновой части спектра ПМСВ. Также в структурах YIG/Pt за счет ОСЭХ исследован эффект интерференции встречных ПМСВ. Показано, что величина ЭДС чувствительна к разности фаз встречных ПМСВ. Последнее может быть применено для «логического ключа большинства», для которого на основе микромагнитного моделирования продемонстрированы эффекты интерференции каустик.

Публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

1. Влияние величины и направления тока инжекции на спиновую аккумуляцию и термоЭДС в латеральной спинвентильной структуре NiCo-InSb-NiCo / Ю.В. Никулин, **М.Е. Селезнев**, А.Г. Веселов, Ю.А. Филимонов // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. – 2018. – Т.10. – С. 373-380.
2. EMF Generation by Propagating Magnetostatic Surface Waves in Integrated Thin-Film Pt/YIG Structure / Y.V. Nikulin, **М.Е. Seleznev**, Y.V. Khivintsev, V.K. Sakharov, E.S. Pavlov, S.L. Vysotskii, A.V. Kozhevnikov, Y.A. Filimonov // Semiconductors. – 2020. – Т. 54. – № 10. – P. 1721-1724.
3. Влияние резонансного взаимодействия поверхностных магнитостатических волн с обменными модами на генерацию ЭДС в структурах YIG/Pt / **М.Е. Селезнев**, Ю.В. Никулин, В.К. Сахаров, Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов // Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – № 10. – С. 1504-1508.
4. Отрицательное магнитосопротивление в структуре n-InSb/ЖИГ / Ю.В. Никулин, А.В. Кожевников, Ю.В. Хивинцев, **М.Е. Селезнёв**, Ю.А. Филимонов // Физика твердого тела. – 2021. – Т. 63. – № 9. – С. 1253-1257.

По результатам диссертационной работы зарегистрирован патент РФ: 2758000 С1 Пат. Российская федерация, МПК H03K 19/23 Мажоритарный элемент на спиновых волнах / Никитов С.А., Дудко Г.М., Кожевников А.В., Хивинцев Ю.В., Высоцкий С.Л., Никулин Ю.В., Сахаров В.К., **Селезнев М.Е.**, Филимонов Ю.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук. - № 20211113214; заявл. 21.04.2021; опубл. 25.10.2021.

Список тезисов, материалов докладов международных и всероссийских конференций, симпозиумов

1. **Селезнев М. Е.**, Никулин Ю. В. Спиновая инжекция в планарных спинвентильных структурах NiFe-InSb-NiFe на основе текстурированных пленок InSb (111) //Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. – 2018. – С. 266-267.
2. **Селезнев М. Е.**, Никулин Ю. В. Влияние величины и направления тока на спиновую инжекцию в планарных спинвентильных структурах NiFe-Cu-NiFe //Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. – 2018. – С. 264-265.
3. **Селезнев М. Е.**, Никулин Ю. В. Исследование спиновой инжекции в планарных спин-вентильных структурах NiFe-InSb-NiFe //Актуальные проблемы физической и функциональной электроники. – 2018. – С. 300-302.

4. Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., **Селезнев М. Е.**, Павлов Е. С., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю.А. Детекторы спиновых волн на основе структура YIG/InSb и YIG/Pt // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. – 2019. – С. 343-343.
5. Никулин Ю.В., **Селезнев М.Е.**, Филимонов Ю.А. Влияние величины и направления тока на спиновую инжекцию и аккумуляцию в латеральных спинвентильных структурах ферромагнитный металл-антимонид индия // Нанofизика и Нанoeлектроника, Труды XXIII Международного симпозиума. – 2019. – С. 254-255.
6. **Селезнев М. Е.**, Никулин Ю. В. Влияние теплопроводности подложки на подвижность электронов в пленках InSb, осаждаемых термическим распылением // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. – 2019. – С. 324-325.
7. Никулин Ю.В., Хивинцев Ю.В., **Селезнев М.Е.**, Сахаров В.К., Высоцкий С.Л., Павлов Е.С., Кожевников А.В. Исследование детектирования спиновых волн в интегральных тонкопленочных структурах Pt/ЖИГ // Нанofизика и Нанoeлектроника, Труды XXIV Международного симпозиума. – 2020. – С. 290-291.
8. Никулин Ю.В., Хивинцев Ю.В., **Селезнев М.Е.**, Сахаров В.К., Высоцкий С.Л., Павлов Е.С., Кожевников А.В, Филимонов Ю.А. Генерация ЭДС бегущими поверхностными магнитостатическими волнами в микроструктурах YIG/m-InSb и YIG/Pt // Нанofизика и Нанoeлектроника, Труды XXIV Международного симпозиума. – 2020. – С. 236-237.
9. Nikulin Y.V., **Seleznev M.E.**, Khivintsev Y.V., Sakharov V.K., Pavlov E.S., Vysotsky S.L., Y.A. Filimonov. Effect of strain on voltage generation in Pt-YIG thin film structure under spin wave pumping // 28th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology». – 2020.
10. Nikulin Y.V., **Seleznev M.E.**, Khivintsev Y.V., Sakharov V.K., Pavlov E.S., Vysotsky S.L., Y.A. Filimonov. EMF generation by propagating surface magnetostatic waves in integrated thin-film Pt/YIG structure // 28th Int. Symp. «Nanostructures: Physics and Technology». – 2020.
11. Никулин Ю. В., Хивинцев Ю.В., Высоцкий С.Л., **Селезнев М.Е.**, Сахаров В.К., Кожевников А.В. Генерация ЭДС бегущими поверхностными магнитостатическими волнами в интегральных тонкопленочных структурах InSb/YIG и Pt/YIG // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. – 2020. – С. 188-189.
12. **Селезнев М. Е.**, Никулин Ю. В., Хивинцев Ю. В., Сахаров В. К., Павлов Е. С., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А. Влияние параметрической неустойчивости на генерацию ЭДС поверхностными магнитостатическими волнами в интегральных структурах YIG-Pt // Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика. – 2020. – С. 231-232.
13. **Селезнев М.Е.**, Никулин Ю.В., Сахаров В.К., Хивинцев Ю.В., Кожевников А.В., Филимонов Ю.А. Генерация ЭДС за счет возбуждения спиновых волн в условиях существования дипольно-обменных и магнитоупругих резонансов в структуре Pt/YIG // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами. – 2021. – С. 261-265.

14. Дудко Г.М., Кожевников А.В., Сахаров В.К., **Селезнев М.Е.**, Хивинцев Ю.В., Никулин Ю.В., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А. Влияние фокусировки спиновых волн на генерацию ЭДС в структурах Pt/YIG // *Нанопизика и Наноэлектроника, Труды XXVI Международного симпозиума.* – 2022. – С. 351-352.
15. Дудко Г.М., Кожевников А.В., Сахаров В.К., **Селезнев М.Е.**, Хивинцев Ю.В., Никулин Ю.В., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А. Генерация ЭДС обратными объемными магнитостатическими волнами в структурах Pt/YIG // *Нанопизика и Наноэлектроника, Труды XXVI Международного симпозиума.* – 2022. – С. 353-354.
16. Дудко Г.М., Кожевников А.В., Сахаров В.К., **Селезнев М.Е.**, Хивинцев Ю.В., Никулин Ю.В., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А., Никитов С.А., Khitun A. Микромагнитное моделирование логического ключа «большинства» на основе интерференции каустик спиновых волн // *Нанопизика и Наноэлектроника, Труды XXVI Международного симпозиума.* – 2022. – С. 232-234.
17. Кожевников А.В., **Селезнев М.Е.**, Никулин Ю.В., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А. Исследование интерференции поверхностных магнитостатических волн с помощью обратного спинового эффекта Холла // *Нанопизика и Наноэлектроника, Труды XXVI Международного симпозиума.* – 2022. – С. 300-301.
18. Никулин Ю.В., Кожевников А.В., Сахаров В.К., **Селезнев М.Е.**, Хивинцев Ю.В., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А. Нелокальное влияние тока на генерацию ЭДС поверхностной магнитостатической волной в структуре InSb/ЖИГ // *Нанопизика и Наноэлектроника, Труды XXVI Международного симпозиума.* – 2022. – С. 302-303.
19. Дудко Г.М., Кожевников А.В., Сахаров В.К., **Селезнев М.Е.**, Хивинцев Ю.В., Никулин Ю.В., Высоцкий С.Л., Филимонов Ю.А. Влияние параметрической неустойчивости на эффективность детектирования спиновых волн в структурах YIG-Pt и YIG-InSb // *Нанопизика и Наноэлектроника, Труды XXVI Международного симпозиума.* – 2022. – С. 302-303.

Цитируемая литература

1. Magnon spintronics / A.V. Chumak, V.I. Vasyuchka, A.A. Serga, B. Hillebrands // *Nature Physics.* – 2015. – Т. 11. – N. 6. – P. 453-461.
2. Transmission of electrical signals by spin-wave interconversion in a magnetic insulator / Y. Kajiwara, K. Harii, S. Takahashi, J. Ohe, K. Uchida, M. Mizuguchi, H. Umezawa, H. Kawai, K. Ando, K. Takanashi, S. Maekawa, E. Saitoh // *Nature.* – 2010. – Т. 464. – N. 7286. – P. 262-266.
3. Full control of the spin-wave damping in a magnetic insulator using spin-orbit torque / A. Hamadeh, O. d'Allivy Kelly, C. Hahn, H. Meley, R. Bernard, A. H. Molpeceres, V. V. Naletov, M. Viret, A. Anane, V. Cros, S. O. Demokritov, J. L. Prieto, M. Muñoz, G. de Loubens, and O. Klein // *Phys. Rev. Lett.* – 2014. – Vol. 113. – P. 197203.
4. Althammer, M. Pure spin currents in magnetically ordered insulator/normal metal heterostructures / M. Althammer // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2018. – Vol. 51. – P. 313001.

5. Controlled enhancement of spin-current emission by three-magnon splitting / H. Kurebayashi, O. Dzyapko, V. E. Demidov, D. Fang, A.J. Ferguson, S.O. Demokritov // *Nature materials*. – 2011. – Vol. 10. – N. 9. – P. 660-664.
6. Sakimura, H. Nonlinear spin-current enhancement enabled by spin-damping tuning / H. Sakimura, T. Tashiro, K. Ando // *Nat. Commun.* – 2014. – Vol. – 5. P. – 1-7.
7. Bender, S.A. Electronic Pumping of Quasiequilibrium Bose-Einstein-Condensed Magnons / S.A. Bender, R.A. Duine, Y. Tserkovnyak // *Phys. Rev. Lett.* – 2012. – Vol. 108. – P. 246601.
8. Van Hove, L. The occurrence of singularities in the elastic frequency distribution of a crystal / L. Van Hove // *Physical Review*. – 1953. – Vol. 89. – N. 6. – P. 1189.
9. Schneider, B. Magnetostatic wave drag on electrons in a hybrid sample of YIG and InSb / B. Schneider // *physica status solidi (a)*. – 1974. – Vol. 23. – N. 1. – P. 187-196.
10. Гуляев, Ю. В. Теория эффекта увлечения электронов спиновой волной в слоистой среде / Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман, А.О. Раевский // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1979. – Т. 76. – P. 1593-1601.
11. Увеличение электронов магнитостатической волной в слоистой структуре феррит-металл / А.С. Бугаев, О.Л. Галкин, Ю.В. Гуляев, П.Е. Зильберман // *Письма в ЖТФ*. – 1982. – Т. 8. – В. 8. – С. 485-488.
12. Kapelrud, A. Spin pumping, dissipation, and direct and alternating inverse spin Hall effects in magnetic-insulator/normal-metal bilayers / A. Kapelrud, A. Brataas // *Phys. Rev.* – 2017. – Vol. 95. – P. 214413.
13. Damon, R.W. Magnetostatic modes of a ferromagnet slab / R.W. Damon, J.R. Eshbach // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 1961. – Vol. 19. – N. 3-4. – P. 308-320.
14. Магнитоупругие волны в субмикронных пленках ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением на подложках гадолиний-галлиевого граната / Ю.В. Хивинцев, В.К. Сахаров, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов, А.И. Стогний, С.А. Никитов. // *Журнал технической физики*. – 2018. – Т. 88. – В. 7. – С. 1060-1066.
15. Гуревич, А. Г. Магнитные колебания и волны / А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. – М.: Физматлит, 1994. – С. 464.
16. Формирование, отражение и преломление пучков магнитостатических волн / А.В. Вашковский, А.В. Стальмахов, Д.Г. Шахназарян // *Известия вузов. Физика*. – 1988. – № 11. – С. 57–75.