

Утверждаю:

Заместитель директора по научной работе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Кандидат физ.-мат. наук
Денис Васильевич Фатеев



_____ марта 2022 г.

Утверждаю:

Проректор по научной работе и цифровому развитию ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», доктор физ.-мат. наук, профессор
Алексей Александрович Короновский



_____ марта 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и Саратовского филиала Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

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

Тема диссертационной работы утверждена приказом ректора СГУ от 17.02.2021 № 14.1-Д.

Соискатель **Селезнев Михаил Евгеньевич** окончил в 2017 году Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по направлению «Электроника и наноэлектроника» с присвоением квалификации «Магистр».

Справка об обучении № 10.1-2022 выдана 24 марта 2022 года Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

В период подготовки диссертации с 2017 и по настоящее время соискатель обучается в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по направлению подготовки 11.06.01 «Электроника, радиотехника и системы связи», а также в период с 2018 по 2021 год работал инженером, а с 2021 года – работает младшим научным сотрудником в лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Научный руководитель – **Филимонов Юрий Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, директор Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, заведующий кафедры технологии материалов на базе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», утвержденный приказом ректора от 17 февраля 2021 года № 14.1-Д, представил положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на объединенном научном семинаре кафедр технологии материалов на базе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, электроники, колебаний и волн, нелинейной физики и физики открытых систем института физики

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» и Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

На заседании присутствовали:

1. Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедры технологии материалов на базе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», директор Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
2. Дудко Галина Михайловна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
3. Хивинцев Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
4. Высоцкий Сергей Львович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
5. Сахаров Валентин Константинович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;

6. Никулин Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
7. Кожевников Александр Владимирович, старший научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН;
8. Гришин Сергей Валерьевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой электроники, колебаний и волн института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
9. Титов Алексей Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
10. Титов Владимир Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроники, колебаний и волн института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
11. Бегинин Евгений Николаевич, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой нелинейной физики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
12. Морозова М.А. кандидат физико-математических наук, доцент кафедры нелинейной физики института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
13. Садовников Александр Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
14. Грачев Андрей Андреевич, кандидат физико-математических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Метаматериалы» института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
15. Ишбулатов Юрий Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры динамического моделирования и

- биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
16. Боровкова Екатерина Игоревна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
 17. Безручко Борис Петрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
 18. Караваев Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
 19. Пономаренко Владимир Иванович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;
 20. Навроцкая Елена Владимировна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

Докладчику были заданы вопросы от Бегинина Е.М., Садовникова А.В., Гришина С.В., Титова В.Н., Морозовой М.А.

Рецензенты диссертации:

Караваев Анатолий Сергеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры динамического моделирования и биомедицинской инженерии института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»;

Хивинцев Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории магнитоэлектроники СВЧ Саратовского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

По итогам обсуждения диссертации единогласно принято следующее заключение:

Заключение

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

Диссертация Селезнева М.Е. посвящена исследованию механизмов детектирования бегущих спиновых волн в планарных магнитных микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb и их сопоставлению.

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

1. Разработка и отработка технологий создания интегральных микроструктур на основе пленок YIG, Cu, Pt и n-InSb, позволяющих совмещать осаждение таких тонких пленок и изготовление индукционных микроантенн.
2. Исследование распространения спиновых волн и эффектов генерации ЭДС в микроструктурах YIG/Pt и YIG/ n-InSb в линейном режиме и условиях параметрической неустойчивости.
3. Исследование влияния дипольно-обменных и магнитоупругих резонансов на распространение ПМСВ и генерацию ЭДС в микроструктурах YIG/ Pt и YIG/ n-InSb.

4. Сопоставление механизмов генерации ЭДС с полученными результатами. 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. Расчет фокусирующих спиновые волны микроантенн, отработка технологии создания фокусирующих антенн на поверхности YIG и интеграции с Pt и n-InSb микроструктурами.
6. Исследование 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 на частотах гибридизации ПМСВ с обменными модами пленки ЭДС в структурах YIG/Pt 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 заключается в том, что в ней получены новые знания о механизмах детектирования бегущих спиновых волн в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb, а также результаты, которые развивают и дополняют представления об особенностях распространения спиновых волн в таких микроструктурах.

Практическая значимость состоит в том, что:

1. Разработаны 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 фазу спиновой волны в электрический сигнал.

Личный вклад соискателя.

Исследуемые в диссертации микроструктуры YIG/Pt и YIG/n-InSb с интегрированными медными антеннами изготавливались соискателем и членами лаборатории СФ-4 ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Все представленные результаты экспериментов в диссертации получены лично соискателем, за исключением измерений отрицательного и Спин-Холл магнитосопротивления, микромагнитного моделирования распространения СВ в условиях фокусировки и распределения намагниченности по толщине пленки YIG в окрестности дипольно-обменного резонанса.

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 школах и конференциях:

1. Всероссийская научная школа молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратовский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Саратов 2018, 2019, 2020)
2. Международный симпозиум «Нанofизика и наноэлектроника» XXXIII, XXXIV, XXXV и XXXVI (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)

Материалы диссертации были использованы при выполнении грантов:

1. Исследование механизмов детектирования спинового тока в структурах феррит-металл и феррит-полупроводник с целью создания детекторов спинового тока для элементной базы магноники и спинтроники. Грант Российского фонда фундаментальных исследований №19-37-90099 (руководитель – д.ф.-м.н., профессор Филимонов Ю.А.)
 2. Разработка технологии создания и исследование детекторов спинового тока, генерируемого бегущими спиновыми волнами в структурах феррит-металл и феррит-полупроводник. Грант Российского фонда фундаментальных исследований №20-07-00968 (руководитель – к.ф.-м.н. Никулин Ю.В.)
 3. Разработка физико-технологических принципов построения двумерных магнонных сетей на основе ферромагнитных пленочных микроволноводов для применений в устройствах обработки информации и спиновой логики. Грант Российского научного фонда №17-19-01673 (руководитель – д.ф.-м.н., профессор Филимонов Ю.А.)
 4. Тонкопленочные структуры на основе железоиттриевого граната, выращенного ионно-лучевым распылением, для энергоэффективной элементной базы информационных систем на принципах магноники. Грант Российского фонда фундаментальных исследований №20-57-00008 (руководитель к.ф.-м.н. Кожевников А.В.)
- Государственные задания «Спинтроника» и «Купер»

Публикации

По результатам диссертационной работы опубликованы 24 работы, из них 4 статьи в рецензируемых научных изданиях из перечня 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:

1. Никулин Ю. В., Селезнев М. Е., Веселов А. Г., Филимонов Ю. А. Влияние величины и направления тока инжекции на спиновую аккумуляцию и термоЭДС в латеральной спинвентильной структуре NiCo-InSb-NiCo. // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2018. - Т.10. - С. 373-380.
2. Nikulin Y. V., Seleznev M. E., Khivintsev Y. V., Sakharov V. K., Pavlov E. S., Vysotskii S. L., A.V. Kozhevnikov, Filimonov, Y. A. EMF Generation by Propagating Magnetostatic Surface Waves in Integrated Thin-Film Pt/YIG Structure // Semiconductors. 2020. - Т. 54. - № 10. - P. 1721-1724.
3. Селезнев М. Е., Никулин Ю. В., Сахаров В. К., Хивинцев Ю. В., Кожевников А. В., Высоцкий С. Л., Филимонов Ю. А. (2021). Влияние резонансного взаимодействия поверхностных магнитостатических волн с обменными модами на генерацию ЭДС в структурах YIG/Pt // Журнал технической физики. 2021. - Т. 91. - № 10. - С. 1504-1508.
4. Никулин Ю. В., Кожевников А. В., Хивинцев Ю. В., Селезнёв М. Е., Филимонов Ю. А. (2021). Отрицательное магнитосопротивление в структуре n-InSb/ЖИГ // 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, Бюл. 30. 2 С.

В работе Селезнева М.Е. не содержится материал или отдельные результаты без ссылок на авторов и источники заимствования.

Итоговое заключение.

Диссертационная работа «Детектирование спиновых волн в магнитных микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb» Селезнева Михаила Евгеньевича является логически законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной в области электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники.

Основные положения и результаты диссертации в полной мере опубликованы в научных статьях и материалах конференций. Тема и содержание диссертации соответствуют специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств. Диссертация удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Диссертация «Детектирование спиновых волн в магнитных микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb» Селезнева Михаила Евгеньевича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

Заключение принято на объединенном научном семинаре кафедр технологии материалов на базе Саратовского филиала ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, электроники, колебаний и волн, нелинейной физики и физики открытых систем института физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и Саратовского филиала ФГБУН института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. На заседании присутствовало 20 человек, из них 4 доктора наук и 16 кандидатов наук по профилю диссертации.

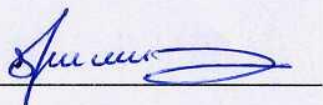
Результаты открытого голосования: «за» – 20 чел., «против» – нет, воздержались – нет (протокол объединенного научного семинара № 1299 от 24 марта 2022 г.).

Председательствующий

кандидат физико-математических наук,

заведующий кафедры электроники, колебаний и волн

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»



410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83

Тел.: 8(8452)21-07-26

e-mail: sergsh@yandex.ru

Гришин Сергей Валерьевич

Подпись <u>С.В. Гришин</u>	удостоверяю
Ученый секретарь <u>И.В. Федусенко</u>	И.В. Федусенко
доцент	
"30" 03 2022	