

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.392.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»,
МИНОБРНАУКИ РОССИИ,
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 02.12.2022 № 27

О присуждении **Селезневу Михаилу Евгеньевичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Детектирование спиновых волн в магнитных микро-структурах YIG/Pt и YIG/n-InSb», по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств принята к защите 16 сентября 2022 года (протокол заседания № 20) диссертационным советом 24.2.392.01, созданным на базе ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»), Минобрнауки России, 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, приказ Минобрнауки России о создании диссертационного совета от 15.02.2013 №75/нк; приказы об изменении состава совета от 15.12.2015 № 1598/нк-9, от 28.09.2016 №1180/нк-52, от 15.02.2017 № 116/нк-38, от 26.01.2018 № 92/нк-50, от 17.04.2018 № 431/нк-26, от 23.11.2018 №301/нк-66, от 24.09.2019 № 873/нк-26; приказ об установлении полномочий совета от 03.06.2021 № 561-нк (Приложение 1/597); приказ об изменении состава совета от 15.10.2021 № 1046/нк-33.

Соискатель Селезнев Михаил Евгеньевич, 1994 года рождения, окончил в 2017 году ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки России, по направлению 11.04.04 – Электроника и нанoeлектроника с присвоением квалификации «Магистр». В период подготовки диссертации с 2017 по 2022 соискатель обучался в очной аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ

имени Н.Г. Чернышевского», Минобрнауки России, по направлению 11.06.01 – Электроника, радиотехника и системы связи.

Диссертация выполнена на кафедре технологии материалов на базе Саратовского филиала ФГБУН Институт радиотехники и электроники (СФ ИРЭ) им. В. А. Котельникова РАН, институт физики ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», и в лаборатории магнитоэлектроники СВЧ СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Научный руководитель – Филимонов Юрий Александрович, доктор физико-математических наук (01.04.11 – Физика магнитных явлений), профессор, Саратовский филиал ФГБУН ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН, директор; ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», институт физики, кафедра технологии материалов на базе СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, заведующий.

Официальные оппоненты:

1. Фраерман Андрей Александрович, доктор физико-математических наук (01.04.07 – физика конденсированного состояния), Институт физики микроструктур РАН – филиал ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики РАН, отдел магнитных микроструктур, главный научный сотрудник;

2. Сафин Ансар Ризаевич, кандидат технических наук (05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения), доцент, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет “МЭИ”», Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова, кафедра формирования и обработки радиосигналов, заведующий кафедрой,

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет “ЛЭТИ” им. В.И. Ульянова (Ленина)» в своем положительном отзыве, подписанном Устиновым Алексеем Борисовичем, доктором физико-математических наук (01.04.03 Радиофизика), доцентом кафедры физической электроники и технологии, указала, что диссертация Селезнева М. Е. является законченным научным исследованием, выполненным на актуальную тему для разработки электронной компонентной базы микро- и наноэлектроники, квантовых устройств. Полученные соискателем результаты имеют практический потенциал применения и могут быть использованы для построения элементной базы на принципах магноники и спинтроники. Фундаментальный характер результатов позволяет ис-

пользовать их в научных исследованиях, посвященных детектированию спиновых токов за счет обратного спинового эффекта Холла как одного из направлений для разработки энергоэффективной электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств. Диссертация Селезнева М.Е. полностью удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, предъявляемых к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а её автор, Селезнев М. Е., заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 2.2.2. – Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств.

Соискатель имеет 24 опубликованные работы, все работы – по теме диссертации, из них 4 работы опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, а также 1 патент РФ на изобретение.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

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.

На автореферат диссертации поступило 8 положительных отзывов: из института физических проблем им П.Л. Капицы РАН г. Москва, от д.ф.-м.н. (01.04.09), члена-корреспондента РАН Смирнова А. П. и от к.ф.-м.н. (01.04.09; 01.04.11) Дровосекова А. Б.; из Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, от д.ф.-м.н. (01.04.07), члена-корреспондента РАН Ринкевича А. Б.; из МИРЭА – Российского технологического университета, г. Москва, от д.ф.-м.н. (01.04.11) Фетисова Ю. К., из Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону, от д.ф.-м.н. (01.04.03) Бабичева Р. К.; из Института естественных наук и математики «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» от д.ф.-м.н. (01.04.11) Курляндской Г. В.; из Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток, от д.ф.-м.н. (01.04.07) Самардака А. С. из «НПП “Исток” им. Шокина», г. Фрязино, от к.т.н. (05.27.02) Сергеева К. Л.; из Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе от PhD (кандидат физико-математических наук, 01.04.07), Калашниковой А. М.

В отзывах на автореферат содержатся замечания: а) *по отсутствию* обоснования выбора именно структур YIG/Pt и YIG/n-InSb для решения поставленных в работе задач, разъяснения терминов «толстая» и «тонкая» пленка YIG, критериев «оптимальности» перекрытия полос частот, оценки состояния интерфейса исследуемых структур, пояснений отличия в технологии изготовления микроструктур, использованные автором от уже существующих подходов; б) касающиеся стилистических особенностей текста.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией и наличием публикацией в признанных научным сообществом журналах в области разработки электронной компонентной базы, а также отсутствием совместных печатных работ с соискателем, что позволяет объективно определить и оценить научную и практическую значимость диссертационной работы. Выбор ведущей организации обосновывается ее статусом одной из ведущих научных организаций Российской Федерации в области разработки электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств, большим количеством публикаций сотрудников, работающих в направлениях, близких к теме диссертационной работы, а также отсутствием договорных отношений с соискателем. Выбор официальных оппонентов и ведущей организации удовлетворяет критериям, сформулированным в пп. 22 и 24 действующего «Положения о присуждении ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны технологии получения интегральных микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb, демонстрирующие вольт-ваттную чувствительность $S \geq 10^{-3}$ В/Вт;

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

показана возможность оптимизации вольт-ваттной чувствительности микроструктур YIG/Pt и YIG/n-InSb за счет выбора топологий антенн спиновых волн, чувствительного элемента (пленок Pt или n-InSb) и способа изготовления контактов;

проведен сравнительный анализ механизмов детектирования спинового тока в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb, который может быть использован для оптимального выбора механизма для решения задач по детектированию бегущих спиновых волн.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

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;

установлено, что на частотах гибридизации ПМСВ с обменными модами ЭДС резонансно возрастает, что связано с формированием сингулярностей Ван Хофа в плотности состояний в спектре спиновых волн пленки YIG;

отмечено, что на частотах резонансного взаимодействия ПМСВ с упругими модами структуры «пленка YIG – подложка гадолиний галлиевый гранат» чувствительность детектирования снижается, что связано с перераспределением мощности волны между спиновой и упругой подсистемами;

показано, что в условиях трехмагنونного 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.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:

определены перспективы практического использования структур YIG/Pt и YIG/n-InSb для электронной компонентной базы микро- и нанoeлектроники;

представлены примеры использования результатов исследования детектирования спиновых волн в микроструктурах YIG/Pt и YIG/n-InSb.

Исследования выполнялись в рамках грантов РФФИ (№ 17-19-01673 и № 20-57-00008), РФФИ (№ 19-37-90099 и № 20-07-00968) и Государственных

заданий «Спинтроника» (№ АААА-А19-119041990060-8) и «Купер» (№0026-2019-0024).

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

идея работы базируется на современных теоретических представлениях и экспериментальных результатах в области изучения детектирования спиновых волн;

использованы математические методы и подходы моделирования (пакеты программы ООММФ), которые апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований спиновой динамики в микроструктурах;

использовано современное технологическое и измерительное оборудование, обоснованы условия проведения экспериментов, показана воспроизводимость результатов исследования.

Личный вклад соискателя. Защищаемые положения и результаты получены лично соискателем. 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. Никулиным Ю.В. и зав. лаб. СФ-4, к.ф.-м.н. Хивинцевым Ю.В. Измерения электрических параметров структур YIG/Pt и YIG/n-InSb выполнялись совместно с с.н.с. СФ-4, к.ф.-м.н. Никулиным Ю.В. Микромагнитное моделирование эффекта фокусировки ПМСВ фокусирующим преобразователем, а также логического элемента «ключ большинства» выполнялись совместно с с.н.с. СФ-4, к.ф.-м.н. Г.М. Дудко. Микромагнитное моделирование спектра анизотропных дипольно-обменных спиновых волн проводилось совместно с с.н.с. СФ-4, к.ф.-м.н. Сахаровым В.К. Исследование эффектов интерференции встречно распространяющихся ПМСВ в структуре двухслойная пленка YIG-Pt выполнялось вместе с в.н.с., к.ф.-м.н. С.Л. Высоцким.

Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию в научных и производственных организациях, занимающихся исследованием физических явлений в магнитных микро- и наноструктурах: в Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Москва и его филиалах в г. Саратове и Фрязино; Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург; Институте физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург; Институте физики микроструктур РАН, г. Нижний Новгород; Российском квантовом центре, г. Москва, ОАО «Завод Магнетон», г. Санкт-Петербург, АО «НПП Фаза», г. Ростов-на-Дону, АО «НПП "Исток" им. Шокина», г. Фрязино; а также в высших учебных заведениях, ведущих подготовку специалистов по назван-

ному направлению: СГУ имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Ульяновский государственный университет, г. Ульяновск и др..

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

1. Об отсутствии оценки вклада процессов электрон-магнонного рассеяния в пространственный декремент спиновый волны;

2. Необходимо дать качественное пояснение отсутствия особенностей сингулярностей ван Хофа для механизма увлечения, с которым связана генерация сигнала в структурах YIG/n-InSb;

3. Обнаруженный в работе эффект отрицательного магнитосопротивления в структурах YIG/n-InSb объясняется рассеянием электронов проводимости пленки InSb на магнитных ионах Fe, диффундирующих из пленки YIG в процессе отжига, однако доказательства в пользу данного объяснения не приводятся;

4. Необходимо дать пояснения о причине такой формы фокусирующей антенны, а также каким образом происходило управление положением фокуса спиновых волн;

5. Каким образом пленки железоиттриевого граната характеризовались на «толстые» и «тонкие»;

6. О возможности использования исследуемых в диссертации структур в ТГц диапазоне частот;

7. В ходе защиты проводилось сравнение результатов чувствительности детектирования структур YIG/Pt и YIG/n-InSb, необходимо дать пояснения как проводилась оценка;

8. В ходе выступления на слайдах не были приведены уравнения дисперсионных характеристик, согласно которым могло оцениваться влияние сингулярностей ван Хофа на механизм обратного спинового эффекта Холла;

9. Каким образом определялись параметры подвижности, концентрации электронов и удельного сопротивления изготовленных пленок n-InSb;

Соискатель ответил на замечания, содержащиеся в отзывах ведущей организации и официальных оппонентов и на задаваемые ему в ходе заседания вопросы и дал необходимые пояснения:

1. Используемые в диссертационной работе подходы не позволяли разделить вклады процессами электрон-магнонного рассеяния и омических,

связанные с наведением СВЧ токов в металле, в пространственный декремент спиновых волн. Одна из причин может быть связана с тем, что омические потери спиновых волн на порядок больше потерь, связанных с процессами электрон-магнонного рассеяния, что было показано в диссертационной работе согласно расчетам и оценке, приведенной в литературе (работа A.Kapelrud, A.Brataas. Phys. Rev. Lett. – 2013);

2. Эффект увлечения является объемным механизмом, проявляется на глубине скин-слоя в полупроводнике и его эффективность, в частности, пропорциональна волновому числу спиновой волны. В то же время, на частотах, отвечающих сингулярностям ван Хофа, наблюдается рост плотности состояний в спектре спиновых волн, что влияет на процессы электрон-магнонного рассеяния и, соответственно, на интерфейсный эффект;

3. В диссертации не приводятся результаты исследования состояния приповерхностных слоев вблизи интерфейса YIG/n-InSb в силу отсутствия необходимого для этого оборудования. Одним из аргументов в пользу предложенного объяснения наблюдаемого эффекта связано с зависимостью от приложенного внешнего магнитного поля, которое приводит к изменению направления намагниченности, к которой диффундирующие в пленку n-InSb магнитные ионы железа чувствительны из-за эффекта магнитной близости;

4. Для изготовления фокусирующих спиновые волны микроантенн решалась обратная задача возбуждения точечным источником спиновых волн и рассматривался формируемый при этом фазовый фронт. Управление положения фокусом происходило за счет изменения частоты падающего на антенну сигнала;

5. В толстых пленках влияние обменного взаимодействия мало по сравнению с диполь-дипольным и в этом случае спектр спиновых волн близок к тому, что было показано в работе R.W. Damon, J.R. Eshbach, JPCS, 1961. В тонких пленках обменное взаимодействие приводит к снятию вырождения частоты отсечки обменных мод и формированию дипольно-обменных резонансов;

6. Для возбуждения спиновых волн в рассматриваемых структурах в ТГц диапазоне необходимо использовать поля подмагничивания более десятков кЭ. В этой связи логичнее использовать магнитные пленки на основе ферромагнетиков;

7. Чувствительность детектирования рассчитывалась как отношение генерируемого напряжения к падающей мощности и коэффициенту преобразования, который рассчитывался на основе характеристик отражения в условиях и без возбуждения спиновой волны;

