

На правах рукописи



САХАРОВ Валентин Константинович

**СПИН-ВОЛНОВЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В МИКРОСТРУКТУРАХ
НА ОСНОВЕ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ПЛЁНОК**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов – 2020

Работа выполнена в Саратовском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН)

Научный руководитель: **Филимонов Юрий Александрович**, доктор физико-математических наук, профессор, директор СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Официальные оппоненты: **Устинов Алексей Борисович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры физической электроники и технологии федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Калашникова Александра Михайловна, кандидат физико-математических наук (Doctor, Radboud University, Nijmegen, The Netherlands), исполняющий обязанности ведущего научного сотрудника – заведующий лабораторией физики ферроиков Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Ведущая организация: Институт физики микроструктур РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афонино, ул. Академическая, д. 7

Защита состоится «25» марта 2021 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.01 при ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, Х корпус, ауд. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов, ул. Университетская, 42) и на сайте <https://www.sgu.ru/research/dissertation-council/d-212-243-01/kandidatskaya-dissertaciya-saharova-valentina>.

Автореферат разослан «__» января 2021 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д. 212.243.01,
канд. физ.-мат. наук, доцент



Слепченков
Михаил Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования, степень её разработанности

Одним из возможных путей решения проблемы энергоэффективности устройств хранения, обработки и передачи информации является использование *спиновых волн (СВ)* в качестве переносчика информации вместо токов заряженных частиц. Этот принцип лежит в основе *магноники* [1] и обуславливает интенсивное изучение магнитных колебаний и волн в микро- и наноструктурах. При этом в качестве волноводов СВ наиболее широко используют плёнки железо-иттриевого граната (ЖИГ), выращенные методом высокотемпературной жидкофазной эпитаксии на подложках гадолиний-галлиевого граната (ГГГ), плёнки пермаллоя ($\text{Py} = \text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$), соединения $\text{Co}_x\text{Fe}_{80-x}\text{B}_{20}$ и полуметаллические сплавы Гейслера на основе кобальта (Co_2MnSi , $\text{Co}_2\text{Fe}_x\text{Mn}_{1-x}\text{Si}$) [2].

Актуальной задачей магноники является интеграция физико-технологических платформ магноники и других областей радиоэлектроники, а также разработка методов формирования и управления дисперсионными свойствами СВ. В частности, один из подходов к интеграции магнонных и полупроводниковых технологий связывается с разработкой методов вакуумного осаждения поликристаллических плёнок ЖИГ на подложки различного типа, включая полупроводниковые [3]. Применительно к структурам ЖИГ/Si было показано [3], что плёнки ЖИГ демонстрируют магнитные свойства и эффекты резонансного роста магнитной восприимчивости на частотах, соответствующих возбуждению СВ. Однако эффекты распространения СВ в структурах ЖИГ/Si с использованием индукционных *микроантенн СВ (МА)* до сих пор не исследовались.

Магнитные периодические структуры, получившие название *магнонных кристаллов (МК)*, позволяют осуществлять эффективную перестройку спектра СВ [2, 4]. Эффекты распространения СВ исследуются в МК, полученных модуляцией намагниченности ($4\pi M$), толщины (d) и ширины волноводов СВ; в МК, полученных нанесением на поверхность плёночных волноводов металлической решётки; в МК на основе решёток из магнитных микрочастиц. Спин-волновые возбуждения в *двухкомпонентных МК (ДМК)* на основе плёнок с различными $4\pi M$ [4], а также в МК, сформированных за счет осаждения магнитных плёнок на подложки с развитым периодическим рельефом, глубина которого превышает толщину наносимой плёнки (*профилированные плёнки (ПП)*) [5], изучены менее подробно. Между тем, исследование таких структур представляет интерес с точки зрения расширения функциональных возможностей МК. Действительно, указанные структуры могут быть использованы для магниторезистивных датчиков [6, 7]. Кроме того, ПП рассматриваются для технологий микроэлектромеханических систем [8] и магнитной памяти [9]. В данной работе рассмотрены два варианта реализации МК: ПП на основе ЖИГ и Py, и ДМК на основе чередующихся областей кобальта (Co) и Py (ДМК-Co/Py).

С учётом сказанного, **цель диссертационной работы** состояла в определении особенностей спин-волновых возбуждений в интегральных микроструктурах на

основе плёнок ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением (ИЛР), а также в периодических микроструктурах на основе плёнок Co и Ru.

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

1. Обнаружить распространение СВ в поликристаллических плёнках ЖИГ, полученных ИЛР на подложки SiO₂/Si и ГГГ (далее: ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ).

2. Выявить особенности эффекта невзаимного распространения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в плёнках ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ.

3. Определить особенности развития параметрической неустойчивости ПМСВ в плёнках ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ.

4. Оценить эффективность магнитоупругого взаимодействия в плёнках ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ и показать возможность эффективного взаимодействия СВ с упругими волнами в структурах ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ.

5. Определить особенности спектра ферромагнитного резонанса (ФМР) образцов ПП на основе ЖИГ и Ru, спектра распространяющихся ПМСВ в ПП на основе ЖИГ. Проанализировать применимость модели эффективной (мелкослоистой, субволновой) среды к ПП на основе ЖИГ.

6. Определить влияние типа микроструктуры и геометрических размеров элементов на спектр спин-волновых возбуждений, основное состояние и вид полевых зависимостей сопротивления $R(H)$ в ДМК-Co/Ru, а также в ПП на основе Ru.

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

1. в субмикронных поликристаллических плёнках ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ, полученных ИЛР:

1.1. обнаружены и исследованы эффекты распространения спиновых и магнитоупругих волн;

1.2. определено влияние буферного слоя и неоднородности распределения $4\pi M$ по толщине плёнки на дисперсию и проявление эффекта невзаимности ПМСВ;

1.3. показана необходимость учёта влияния эффектов динамического размагничивания и нагрева структур СВЧ-мощностью при исследовании параметрической неустойчивости ПМСВ;

1.4. проведена оценка магнитоупругих постоянных и констант магнитострикции.

2. Экспериментально изучены эффекты распространения СВ и квантования спектра в ПП на основе ЖИГ, полученных ИЛР и характеризующихся шириной w , периодом $P=2w$ и глубиной h (такими, что $h \gg d$; $w \gg h$). Обнаружены и исследованы особенности частотных зависимостей коэффициента прохождения ПМСВ, связанные с механизмами квантования спектра СВ, дифракции Брэгга и дискретной дифракции. Рассмотрена применимость модели эффективной среды для описания длинноволновой области дисперсионных характеристик ПМСВ в таких структурах.

3. Для ДМК-Co/Ru, а также для ПП на основе Ru экспериментально и с помощью микромагнитного моделирования исследованы зависимости спектров СВ, процессов перемагничивания и анизотропного магнитосопротивления (АМС) от характера микроструктурирования ДМК и ПП.

Научная значимость работы заключается в том, что в ней получены новые знания о свойствах СВ в субмикронных поликристаллических плёнках ЖИГ, выращенных ИЛР, а также результаты, которые развивают и дополняют представления об особенностях спектров СВ в микроструктурированных образцах на основе плёнок ЖИГ и ферромагнитных металлов.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Проведённые исследования структур на основе плёнок ЖИГ, полученных ИЛР, показывают принципиальную возможность использования таких структур для создания устройств магноники и их интеграции с КМОП технологией.

2. Обнаруженный эффект увеличения невзаимности распространения ПМСВ в поликристаллической плёнке ЖИГ с буферным слоем и плёнке ЖИГ с неоднородным распределением $4\pi M$ по толщине возможно использовать для построения СВЧ-вентилей, циркуляторов, направленных ответвителей, линий задержки и логических элементов.

3. Наличие магнотстрикционных свойств, приводящих к формированию гибридных магнитоупругих волн (МУВ), в структурах на основе плёнок ЖИГ, полученных ИЛР, даёт возможность использования данных структур для создания устройств с акустической спиновой накачкой, устройств стрейнтроники.

4. Рассмотренные ПП на основе ЖИГ могут выступать в качестве базового элемента для последующей трёхмерной архитектуры устройств магноники.

5. Зависимость эффекта АМС от типа микроструктурирования и геометрических размеров элементов исследуемых микроструктур на основе Со и Ру даёт возможность управления величиной данного эффекта. Это может быть использовано при проектировании, например, датчиков магнитного поля.

Положения, выносимые на защиту:

1. В плёнках ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением на подложки кремния со слоем окисла, наличие буферного слоя ЖИГ может усиливать (на ≈ 10 дБ) эффект невзаимности распространения поверхностных магнитостатических волн и приводить к появлению дополнительных откликов в спектре ферромагнитного резонанса.

2. В плёнках ЖИГ с параметром затухания спиновых волн $\alpha > 10^{-2}$ эффекты динамического размагничивания и нагрева плёнки СВЧ-мощностью волны сдвигают спектр поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в область меньших частот (сдвиг до ≈ 50 МГц), что приводит к качественным отличиям зависимостей амплитуды коэффициента прохождения от входной мощности для различных положений частоты ПМСВ относительно частоты, соответствующей максимуму прохождения ПМСВ. Указанные эффекты необходимо учитывать при определении порогов параметрической неустойчивости.

3. Интеграция микроантенн с субмикронными поликристаллическими плёнками ЖИГ, полученными ионно-лучевым распылением на подложки кремния и гадолиний-галлиевого граната, позволяет наблюдать эффекты распространения спиновых и магнитоупругих волн в данных структурах.

4. Спектры ферромагнитного резонанса и коэффициента прохождения поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в магнитных плёнках на подложках с решёткой из вытравленных канавок с периодом P и глубиной, превышающей толщину плёнки, демонстрируют эффекты квантования. В конфигурации Лауэ могут проявляться эффекты дискретной дифракции ПМСВ, приводящие к росту потерь ПМСВ с длиной волны $> P/2$. Длинноволновая граница спектра ПМСВ в таких структурах может быть описана в рамках модели эффективной среды.

5. В спектрах ферромагнитного резонанса планарных периодических структур на основе тонких (50 нм) плёнок кобальта и пермаллоя с микронными размерами элементов могут наблюдаться линии поглощения, отвечающие латеральным резонансам спиновых волн в элементах из пермаллоя.

Достоверность полученных экспериментальных результатов определяется их воспроизводимостью, применением современных средств и методов измерений, соответствием с численными расчётами. Достоверность результатов расчётов обеспечивается использованием адекватных математических моделей, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя численных методов исследования. Достоверность также подтверждается отсутствием противоречий с известными опубликованными работами.

Апробация работы. Результаты работы представлялись на следующих конференциях, симпозиумах, семинарах, научных школах: VII Euro-Asian symposium "Trends in Magnetism" (Екатеринбург, 2019); Moscow international symposium on magnetism (MISM 2011, MISM 2017), (Москва, 2011, 2017); International symposium "Spin Waves", (Санкт-Петербург, 2011, 2015, 2018); 26-th International symposium "Nanostructures: Physics and technology" (Минск, 2018); 20-th International conference on magnetism (Барселона, 2015); International workshop Brillouin and microwave spectroscopy of magnetic micro- and nanostructures (BrilMics 2014), (Саратов, 2014); XVIII, XIX, XX, XXIII Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» (Н. Новгород, 2013, 2014, 2015, 2016, 2019); VI, VII, XI, XII, XIII Всероссийская конференция молодых учёных «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (Саратов, 2011, 2012, 2016, 2017, 2018, 2020); XI Международная школа-конференция «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2016), (Саратов, 2016); 19-я Всероссийская молодёжная научная школа-семинар «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники» (Ульяновск, 2016); IEEE International conference on microwave magnetism (Кайзершляутерн, 2012); International conference "Days on Diffraction 2012" (Санкт-Петербург, 2012).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 38 работ, из них 13 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК (и/или входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и/или Scopus), 6 статей в сборниках трудов конференций, 19 тезисов докладов на конференциях, симпозиумах и школах-семинарах. Список работ приведён в заключении.

Личный вклад соискателя. Исследуемые в работе структуры на основе плёнок ферромагнитных металлов, МА на поверхности структур на основе плёнок ЖИГ

изготавливались непосредственно соискателем. Все приводимые в диссертации результаты экспериментов получены лично соискателем, за исключением спектров магнитооптического эффекта Керра, спектров широкополосного ФМР при воздействии изгибной деформации и дифрактограмм. Микромагнитное моделирование дисперсионных характеристик в плёнках ЖИГ с неоднородным распределением $4\pi M$ по толщине, в ПП на основе ЖИГ; спектров собственных колебаний в ПП на основе ЖИГ, в ДМК и микрорешётках из Co и Ru проводилось лично соискателем. Численное моделирование эффекта АМС, перемагничивания магнитных структур, расчёт спектров СВ в двуслойных плёнках ЖИГ, расчёт амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) ПМСВ в ПП на основе ЖИГ, измерения спектров широкополосного ФМР при воздействии изгибной деформации, интерпретация результатов экспериментов проводились в соавторстве.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы из 290 наименований. Работа содержит 100 рисунков, 6 таблиц; полный объём диссертации составляет 222 страницы.

Соответствие направления диссертационного исследования специальности.

В диссертационной работе исследуются особенности линейных и нелинейных процессов распространения волн, что соответствует формуле специальности и п. 2 раздела «области исследований» паспорта специальности по шифру «01.04.03 Радиофизика».

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

1-я глава посвящена исследованию распространения магнитостатических волн (МСВ) в поликристаллических плёнках ЖИГ/Si, полученных ИЛР.

В разделе 1.2 приводятся результаты измерения структурных параметров образцов с помощью методов атомно-силовой микроскопии (АСМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Образцы А и В состояли из буферного (I) и основного (II) слоёв ЖИГ с толщинами: $d_{AI} \approx 100$ нм, $d_{AII} \approx 1050$ нм, $d_{BI} \approx 170$ нм, $d_{BII} \approx 900$ нм (Рис. 1б). Поверхность образцов имела зернистую структуру с диаметром зерна $D_{зep} \leq 225$ нм и шероховатостью $R_{шер} \approx 20$ нм на фоне мозаичных блоков размерами до 20 мкм со встречающимися дефектами роста диаметром $D_{деф} \approx 5$ мкм и глубиной ≈ 50 нм (Рис. 1в).

В разделе 1.3 обсуждаются спектры ФМР изучаемых образцов (Рис. 1г), зависимости резонансных полей ($H_{рез}$) и ширины линии ФМР (ΔH) от угла подмагничивания, из которых даётся оценка $4\pi M$ слоёв плёнки: $4\pi M_{AI} \approx 1280$ Гс, $4\pi M_{AII} \approx 1500$ Гс; $4\pi M_{BI} \approx 1325$ Гс, $4\pi M_{BII} \approx 1370$ Гс. Анализируется возможность влияния на ΔH процессов двухмагнетонного рассеяния на дефектах роста, мозаичной и мелкозернистой структуре. Влияние рассеяния прослеживается в уменьшении ΔH при переходе от

касательного (ΔH_{\parallel}) к нормальному (ΔH_{\perp}) намагничиванию образцов, с разницей до $\Delta H_{\parallel} - \Delta H_{\perp} \approx 70$ Э. При этом $\Delta H_{\parallel A} \approx 110$ Э, $\Delta H_{\perp A} \approx 40$ Э, $\Delta H_{\parallel B} \approx 45$ Э, $\Delta H_{\perp B} \approx 25$ Э.

В разделе 1.4 описывается технология изготовления МА на поверхности плёнок ЖИГ (Рис. 1а), методика измерения комплексных S-параметров МСВ с помощью СВЧ-зондовой станции и векторного анализатора цепей (Рис. 1д), проведена оценка эффективности используемых МА.

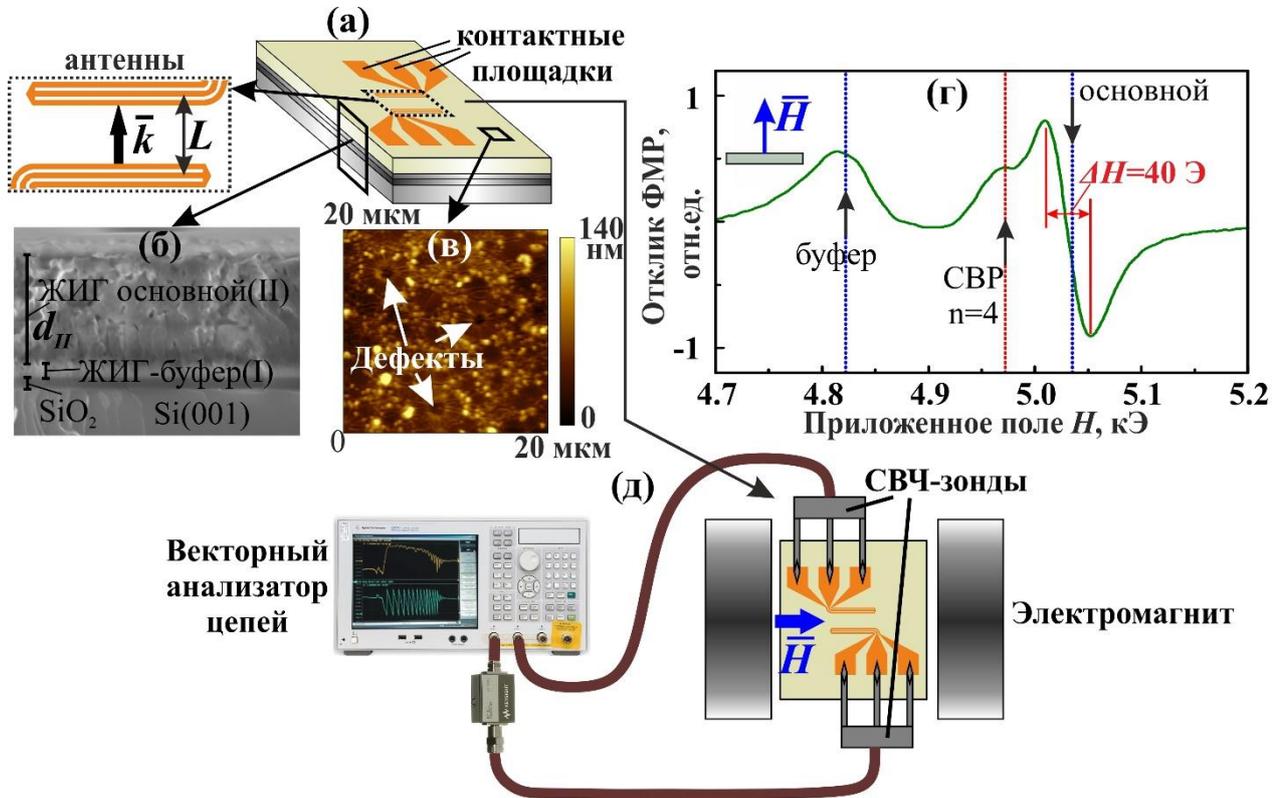


Рис. 1 – Схематичный вид изучаемой структуры (а), где L – расстояние между МА; СЭМ-изображение скола торца (б), АСМ-изображение поверхности (в), спектр ФМР, где стрелкой «вверх» отмечены дополнительные отклики (от буферного слоя и спин-волнового резонанса (СВР) в основном слое) (г), схематичный вид установки для измерения S-параметров (д)

В разделе 1.5 рассмотрены особенности АЧХ, фазо-частотных характеристик (ФЧХ) и дисперсионных характеристик МСВ в изучаемых образцах. Для построения дисперсионных зависимостей $f=f(k')$ ($k=k'-ik''$ – волновое число, $k'=\text{Re}(k)$, $k''=\text{Im}(k)$) брался участок ФЧХ, где уровень полезного сигнала коэффициента прохождения ($S_{21}(f)$) значимо (>10 дБ) превышал уровень электромагнитной наводки. Экспериментальная зависимость $f=f(k')$ (кривая 1 на Рис. 2б) существенно расходится с кривой $f=f(k')$, построенной в рамках модели [10] для однослойной плёнки (кривая 2 на Рис. 2б) и даёт значения групповой скорости $V_g \approx 1.2-1.6 \times 10^6$ см/с на частотах максимума $S_{21}(f)$. По соотношению [11]

$$k'' = (S_{21}(L_1) - S_{21}(L_2)) / (-8.68 [L_1 - L_2]) \quad (1)$$

оценены величины k'' (параметр L показан на Рис. 1а). Показано, что МА с шириной проводящих линий $w_s=7$ мкм позволяют наблюдать ПМСВ с $k' \approx 1500-1800$ рад/см, $k'' \approx 280-370$ рад/см, а в случае $w_s=3$ мкм – $k' \approx 4000-4500$ рад/см, $k'' \approx 875-1060$ рад/см. Отмечается, что для исследуемых ПМСВ соблюдается условие $k'' \ll k'$, соответствующее распространяющимся волнам. При этом длина пробега СВ $\zeta < 100$ мкм.

В разделе 1.6 обсуждается невзаимность распространения ПМСВ (определяемая как $\delta S = S_{21} - S_{12}$), которая существенно (на ≈ 10 дБ) превосходит уровень невзаимности, обусловленный свойствами ПМСВ и преобразователей (Рис. 2а). Показано, что указанное расхождение, а также несовпадение дисперсионных кривых 1 и 2 (Рис. 2б), появление дополнительных линий поглощения в спектре ФМР (Рис. 1г) можно объяснить на основе модели двуслойной обменносвязанной плёнки феррита с закреплёнными спинами на границах раздела.

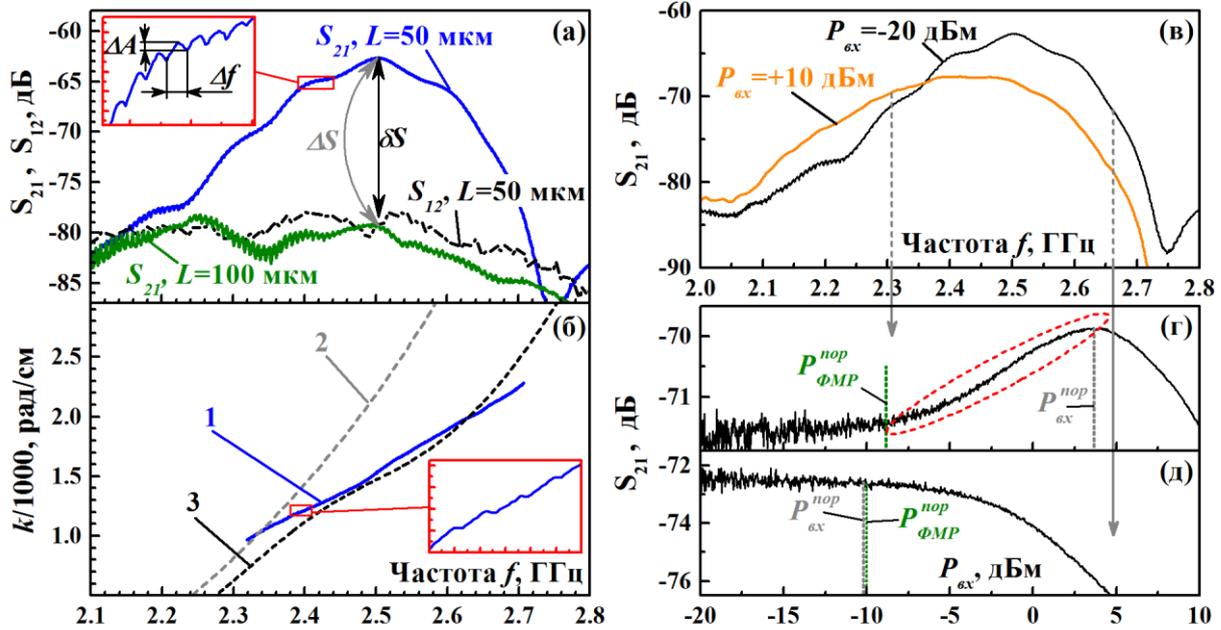


Рис. 2 – АЧХ коэффициента прохождения (S_{21} и S_{12}) для ПМСВ, распространяющихся в ЖИГ/Si в противоположных направлениях при $L = 50$ и 100 мкм (а); дисперсии ПМСВ: экспериментальная (кривая 1), рассчитанные по модели однослойной плёнки [10] (кривая 2) и двуслойной обменносвязанной плёнки (кривая 3) (б); АЧХ сигнала ПМСВ при нескольких уровнях входной мощности (в); зависимости S_{21} от входной мощности на фиксированных частотах, указанных пунктирными прямыми на (в) и стрелками (г, д)

В разделе 1.7 рассмотрены особенности развития параметрической неустойчивости ПМСВ по отношению к процессам трёхмагنونного распада, которые обусловлены значениями параметра затухания СВ ($\alpha \approx 6 \times 10^{-3}$) и $\Delta H \approx 40$ Э, на два порядка больших типичных значений для эпитаксиальных плёнок ($\alpha \approx 7 \times 10^{-5}$, $\Delta H \approx 0.5$ Э [2]). Происходящий в результате этого рост порогов параметрической неустойчивости ($P_{\text{вх}}^{\text{пор}} \approx -5$ дБм) приводит к проявлению динамического размагничивания и нагрева плёнки СВЧ-мощностью волны, смещающих АЧХ $S_{21}(f)$ в область меньших частот на величину $\Delta f_{\text{ПМСВ}}$ с ростом входной мощности $P_{\text{вх}}$ (Рис. 2в), и формированию аномальных участков (выделены пунктирной кривой на Рис. 2г) на кривых $|S_{21}(P_{\text{вх}})|$ для фиксированных значений частоты, меньших частоты f_{max} , соответствующей максимуму прохождения ПМСВ при низком уровне $P_{\text{вх}}$ (≈ -20 дБм). Приводится оценка сдвига спектра ПМСВ. На основе сравнения с пороговой мощностью ($P_{\text{ФМР}}^{\text{пор}}$), определённой из данных ФМР (Рис. 2г, д), показывается, что указанные эффекты требуют уточнения подходов к определению порогов параметрической неустойчивости.

Результаты измерений магнитоупругих свойств образцов ЖИГ/Si приведены в разделе 1.8. С помощью метода широкополосного ФМР показано, что при деформации плёнки происходит сдвиг частоты Ω , отвечающей максимуму потерь в $S_{21}(f)$, на величину $\Delta\Omega$. В приближении изотропии из величины $\Delta\Omega$ были рассчитаны магнитоупругая постоянная $B \approx 0.8 \times 10^6$ эрг/см³ и константа магнитоупругости $\lambda_{cm} \approx -0.34 \times 10^{-6}$, составившие $\approx 16\%$ от значений B и λ_{cm} для эпитаксиальных плёнок ЖИГ микронных толщин.

Экспериментально показано, что в АЧХ и дисперсионных кривых ПМСВ в ЖИГ/Si могут проявляться серии эквидистантных осцилляций $\Delta f_{MVB} \approx 6.4$ МГц, соответствующих возбуждению МУВ на частотах резонансного взаимодействия ПМСВ с упругими сдвиговыми модами волноведущей структуры «плёнка ЖИГ – подложка кремния» (см. вставки к Рис. 2а, 2б).

Во **2-ой главе** описываются результаты исследования распространения МСВ в поликристаллических плёнках ЖИГ/ГГГ, полученных ИЛР.

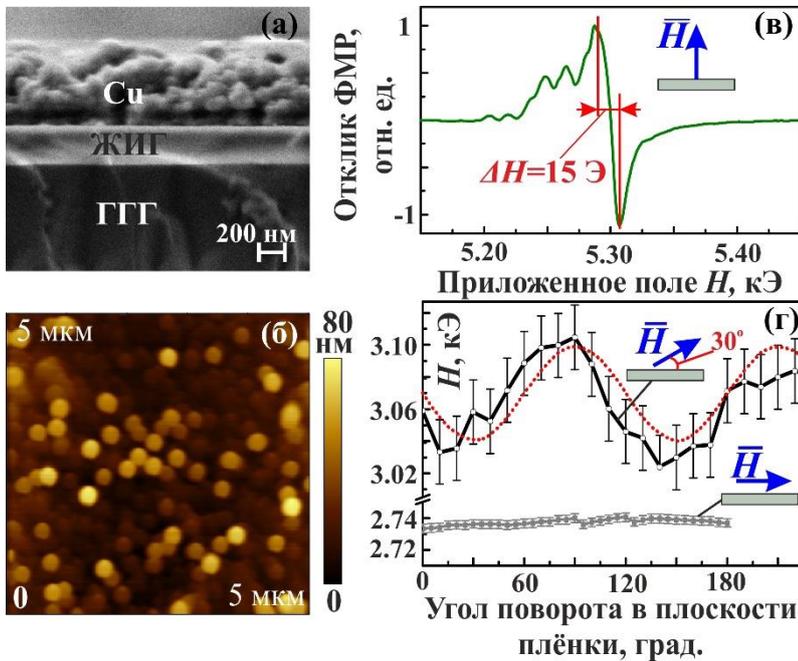


Рис. 3 – СЭМ-изображение скола торца (а), АСМ-изображение поверхности (б), спектр ФМР (в), ориентационные зависимости отклика ФМР (г) для ЖИГ/ГГГ

В разделе 2.3 из результатов ФМР (Рис. 3в), ориентационных зависимостей $H_{рез}$ и ΔH , делается заключение о влиянии двухмагнного рассеяния, подтверждается текстура (111) плёнок ЖИГ (Рис. 3г). На основе измеренных данных определяются $4\pi M$, потери, константы анизотропии ($K_{куб}$) образцов: $4\pi M_C = 1.765$ кГс, $\Delta H_{\parallel C} \approx 20$ Э, $\Delta H_{\perp C} \approx 15$ Э, $K_{кубC} = 3 \times 10^3$ эрг/см³; $4\pi M_D = 1.720$ кГс, $\Delta H_{\parallel D} \approx 15$ Э, $\Delta H_{\perp D} \approx 5$ Э, $K_{кубD} = 4.5 \times 10^3$ эрг/см³.

По аналогии со структурами ЖИГ/Si в разделе 2.4 рассмотрены особенности АЧХ и ФЧХ $S_{21}(f)$ для случаев ПМСВ и обратных объёмных МСВ (ООМСВ).

Для ПМСВ $\zeta > 200$ мкм, $k'_{max} \approx 1.5 \times 10^4$ рад/см для МА с $w_s = 7$ мкм и $k'_{max} \approx 2 \times 10^4$ рад/см – для $w_s = 3$ мкм. Типичные АЧХ представлены на Рис. 4а. По выражению (1) оценены k'' : на частотах максимума прохождения $k'' \approx 55-270$ рад/см

В разделе 2.2. на основе данных АСМ и СЭМ демонстрируется, что исследуемые образцы С и D имеют плоские границы с подложкой без видимого размытия интерфейсной области, без буферных слоёв (Рис. 3а), оцениваются толщины: $d_C \approx 330$ нм, $d_D \approx 780$ нм. Поверхность имела мелкозернистую структуру (Рис. 3б) с $D_{зер} \leq 260$ нм и $R_{шер} \approx 7$ нм, имелись дефекты роста в виде колец с $D_{def} \approx 1.5-2.5$ мкм и высотой 15-30 нм.

(при $k' \approx 3 \times 10^3$ рад/см) для МА с $w_s = 7$ мкм; $k'' \approx 240-530$ рад/см (при $k' \approx 5-6 \times 10^3$ рад/см) для МА с $w_s = 3$ мкм. Невзаимность АЧХ ПМСВ в коротковолновой области достигает 40 дБ (Рис. 4а) и сопровождается невзаимностью в дисперсионных характеристиках (Рис. 4б).

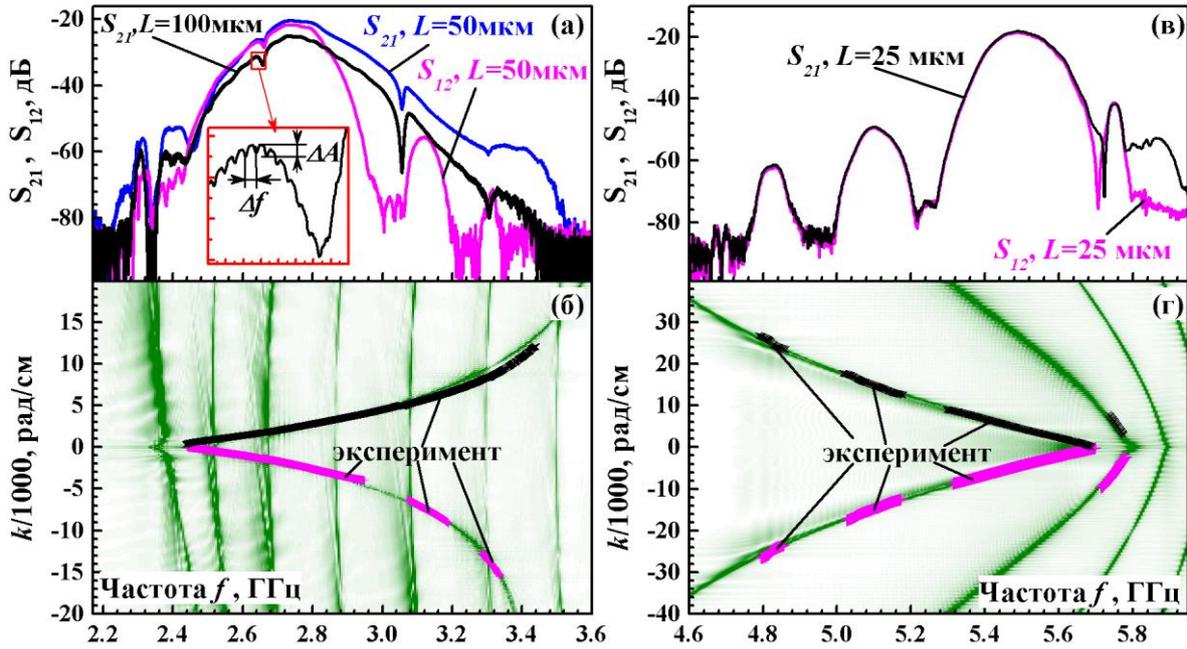


Рис. 4 – АЧХ (а, в) и дисперсии (б, г) ПМСВ (а, б) и ООМСВ (в, г), распространяющихся в ЖИГ/ГТГ при $H=320$ Э (а, б) и $H=1330$ Э (в, г). Экспериментальные дисперсии на (б, г) подписаны, другие кривые – результат численного расчёта дисперсий в плёнке толщиной 660 нм с линейным распределением $4\pi M$ по толщине от 1700 до 2020 Гц

В случае ООМСВ $\zeta > 100$ мкм, $k'_{max} \approx 2.7 \times 10^4$ рад/см, оценки по (1) дают $k'' \approx 30$ рад/см. При этом в АЧХ наблюдается 3-5 зон прохождения, обусловленных селективными свойствами МА (Рис. 4в). Как АЧХ, так и дисперсионные характеристики ООМСВ взаимны (Рис. 4в, г).

Взаимодействие ПМСВ и упругих волн рассмотрено в разделе 2.5. Показано, что оно приводит к образованию в АЧХ и дисперсионных характеристиках ПМСВ резонансных особенностей с интервалом $\Delta f_{МУВ} \approx 3$ МГц, соответствующих возбуждению МУВ (см. вставку к Рис. 4а). Показывается возможность одновременного существования МУВ с дипольно-обменными резонансами.

Исследовано влияние упругих деформаций растяжения, смещающих пик поглощения ФМР на $\Delta\Omega$. При этом $\Delta\Omega > 0$ при поле H_0 , приложенном вдоль микрополосковой антенны, и $\Delta\Omega < 0$ при поперечном намагничивании. По $\Delta\Omega$ в приближении изотропии определяются значения $B \approx 2.6 \times 10^6$ эрг/см³ и $\lambda_{cm} \approx -1.11 \times 10^{-6}$ ($\approx 53\%$ от значений для эпитаксиальных плёнок ЖИГ микронных толщин).

В разделе 2.6 исследовано влияние $P_{вх}$ на характеристики распространения ПМСВ, оцениваются сдвиги $\Delta f_{ПМСВ}$, и показывается, что превалирующую роль в $\Delta f_{ПМСВ}$ оказывает нагрев входной мощностью.

В разделе 2.7 методом микромагнитного моделирования [12] показано, что особенности дисперсионных характеристик МСВ, распространяющихся в плёнках

ЖИГ с неоднородным распределением намагниченности по толщине, хорошо согласуются с результатами экспериментальных кривых $f(k')$ (Рис. 4б, г).

В 3-ей главе описываются технология изготовления и результаты исследования ДМК-Со/Ру (Рис. 5а).

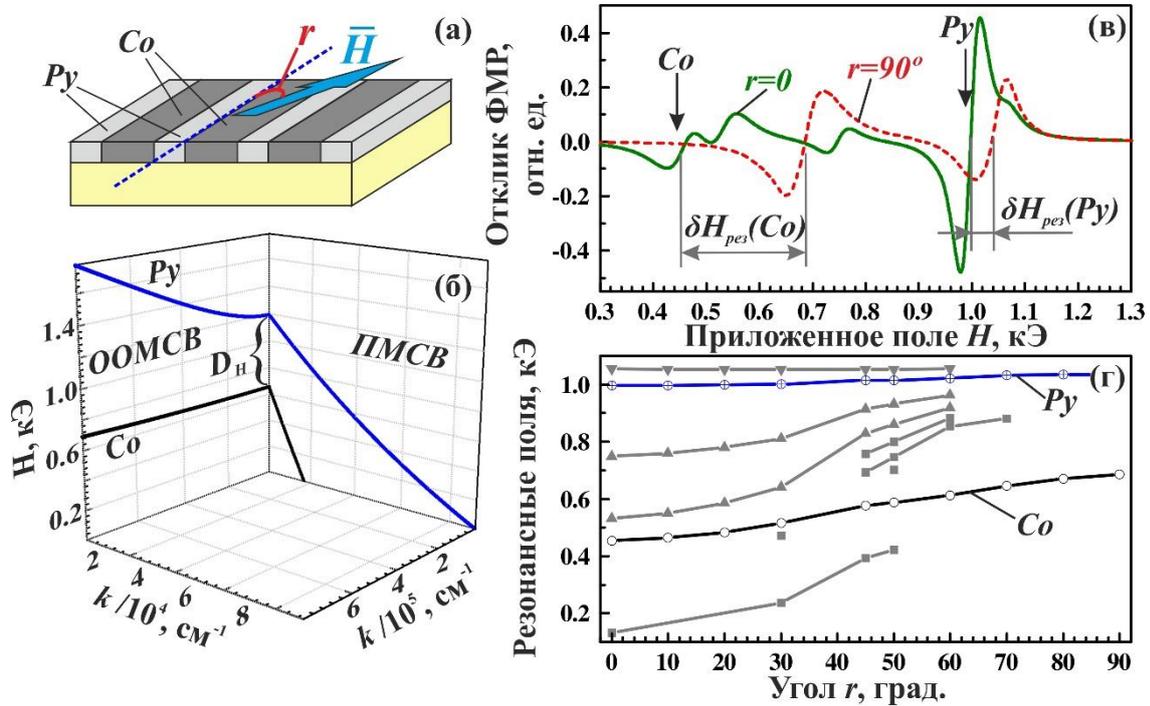


Рис. 5 – Схематическое изображение ДМК-Со/Ру с обозначением угла r (а), дисперсионные зависимости $H(k)$ для ПМСВ и ООМСВ в плёнках Со и Ру (б), вид спектров ФМР (в) и угловые зависимости резонансных полей (г) в ДМК-Со/Ру

В разделе 3.2 описан процесс изготовления ДМК-Со/Ру, а также микрорешётки из отдельных элементов Ру и Со с теми же геометрическими размерами, что у соответствующих элементов в ДМК-Со/Ру, приводятся данные АСМ.

В разделе 3.3 показано, что спектры ФМР микрорешёток характеризуются двумя основными особенностями: 1) сдвигом $\delta H_{рез}$ основного (квазиоднородного) отклика ФМР $H_{рез0}$ с изменением направления внешнего приложенного поля, касательного плоскости плёнки, вследствие анизотропии формы; 2) формированием серий дополнительных откликов малой интенсивности (квантованием спектра ФМР), соответствующих модам стоячих МСВ по ширине микрополосок: при H_0 вдоль микрополосок формируются моды ПМСВ в диапазоне полей $H < H_{рез0}$; при H_0 поперёк микрополосок серия резонансов образуется при $H > H_{рез0}$ и соответствует модам ООМСВ.

В спектрах ФМР ДМК-Со/Ру наблюдались аналогичные особенности: сдвиг $\delta H_{рез}$ с изменением угла подмагничивания и квантование спектра (Рис. 5в, г). Однако $\delta H_{рез}$ для элементов Ру в 4 раза меньше случая решётки отдельных микрополосок Ру, а для элементов Со величина $\delta H_{рез}$ аналогична случаю решётки микрополосок Со. Квантование спектра ФМР происходит преимущественно в диапазоне полей D_H (Рис. 5б), соответствующих отсутствию вырождения спектров МСВ в плёнках Ру и Со.

В разделе 3.4 методом микромагнитного моделирования для ДМК и микрорешёток объясняется наблюдаемая в эксперименте разница в $\delta H_{рез}$ для элементов Ру в

данных структурах, подтверждается формирование дополнительных серий резонансов, обусловленных модами ПМСВ и ООМСВ по ширине элементов структуры.

В разделе 3.5 на основе ориентационных зависимостей коэрцитивной силы (H_c) и остаточной намагниченности ($4\pi M_r$), определённых из петель гистерезиса, показывается, что в ДМК-Со/Ру формируется одноосная магнитная анизотропия с лёгкой осью, соответствующей направлению микрополосок структур. Доменная структура, визуализированная методом магнитосиловой микроскопии, имела неупорядоченный вид с элементами полосовой доменной структуры для образцов с чётко выделяемой одноосной анизотропией.

Зависимости $R(H)$ рассматриваются в разделе 3.6. Для ДМК-Со/Ру кривые $R(H)$ обуславливаются эффектом АМС и совмещают особенности кривых $R(H)$ сплошных плёнок Ру и Со: максимальные значения ($\approx 0.5\%$) аналогичны плёнкам Ру, тогда как ширина пиков (≈ 10 Э) обусловлена элементами Со. Показывается, что за счёт перехода от одномерной (1D) к двумерной (2D) структурам и изменения геометрических размеров элементов можно управлять величиной $R(H)$. С изменением угла между осями симметрии структур и H_0 кривые АМС могут содержать несколько максимумов и минимумов. С помощью низкотемпературных изменений показывается низкое влияние естественных оксидов Со, Fe и Ni на вид кривых АМС.

В разделе 3.7 показано, что размещение 2D решётки микрочастиц Со на поверхности плёнки Ру (Рис. 6а) приводит к эффектам квантования спектра ФМР (Рис. 6в), обусловленных формированием в плёнке Ру областей с пониженными значениями эффективного магнитного поля («потенциальных ям») за счёт полей, наведённых частицами Со. Показано хорошее соответствие результатов микромагнитного моделирования (Рис. 6б, г) с результатами измерений спектров ФМР (Рис. 6в) и релаксационных колебаний (Рис. 6б), полученных методом магнитооптического эффекта Керра с пространственно-временным разрешением.

В 4-ей главе рассматриваются свойства ПП на основе ЖИГ и Ру (Рис. 7а).

В разделе 4.2 приводится описание технологии изготовления ПП на основе Ру и технологии изготовления МА на ПП на основе ЖИГ. Рассматриваются плёнки ЖИГ с $d \approx 200$ нм, глубиной рельефа подложки $s \approx 1.5$ мкм, периодом повторения $P = 20$ мкм, шириной выступов $w = 10$ мкм. Для плёнок Ру: $d \approx 50$ нм, $s \approx 450$ нм, $w = 3.5$ - 26 мкм, $P = 10$ и 15 мкм.

В разделе 4.3 показано, что ПП на основе ЖИГ и Ру демонстрировали особенности спектров ФМР, аналогичные микрорешёткам: 1) сдвиг $\delta H_{рез}$ с изменением угла подмагничивания за счёт анизотропии формы; 2) квантование спектра, обусловленное формированием по ширине элементов стоячих мод ПМСВ и ООМСВ (Рис. 7).

С помощью микромагнитного моделирования [12] в разделе 4.4 показано, что в дисперсиях ПМСВ (Рис. 8а) в ПП на основе ЖИГ на частотах брэгговских резонансов расталкивание мод меньше разрешения по f (5 МГц); наблюдалась обменная щель ($f \approx 2.85$ ГГц), обусловленная дипольно-обменным резонансом. Показано, что преимущественный вклад в обогащение спектра вносят резонансы ПМСВ и

ООМСВ по ширине участков $P1$ и $P3$ (Рис. 7а). При H_0 поперёк канавок распределение амплитуд по образцу оказывается модулированным коротковолновыми возбуждениями (см. вставки к Рис. 8г), образуемыми в области $P2$ и $P4$ (Рис. 7а) с пониженным значением эффективного поля и трансформирующимися по механизму Шлёмана [13] в ближайшие собственные значения волновых чисел из «сетки» дисперсионных кривых ООМСВ (Рис. 8в).

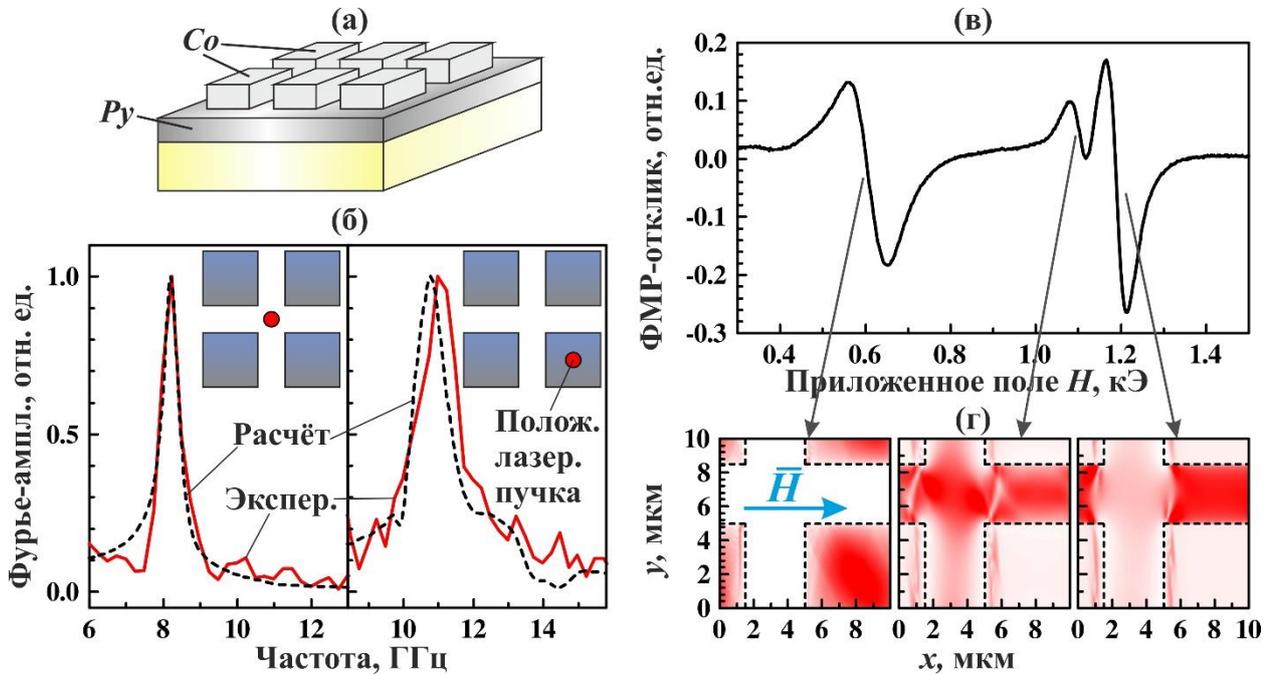


Рис. 6 – Схематическое изображение исследуемой структуры (а); отклики от локальных участков структуры (показаны на вставках), полученные экспериментально с помощью магнитооптического эффекта Керра и с помощью микромагнитного моделирования (б); экспериментальный спектр ФМР (в); распределения интенсивностей, соответствующие откликам в спектре, полученные микромагнитным моделированием (г)

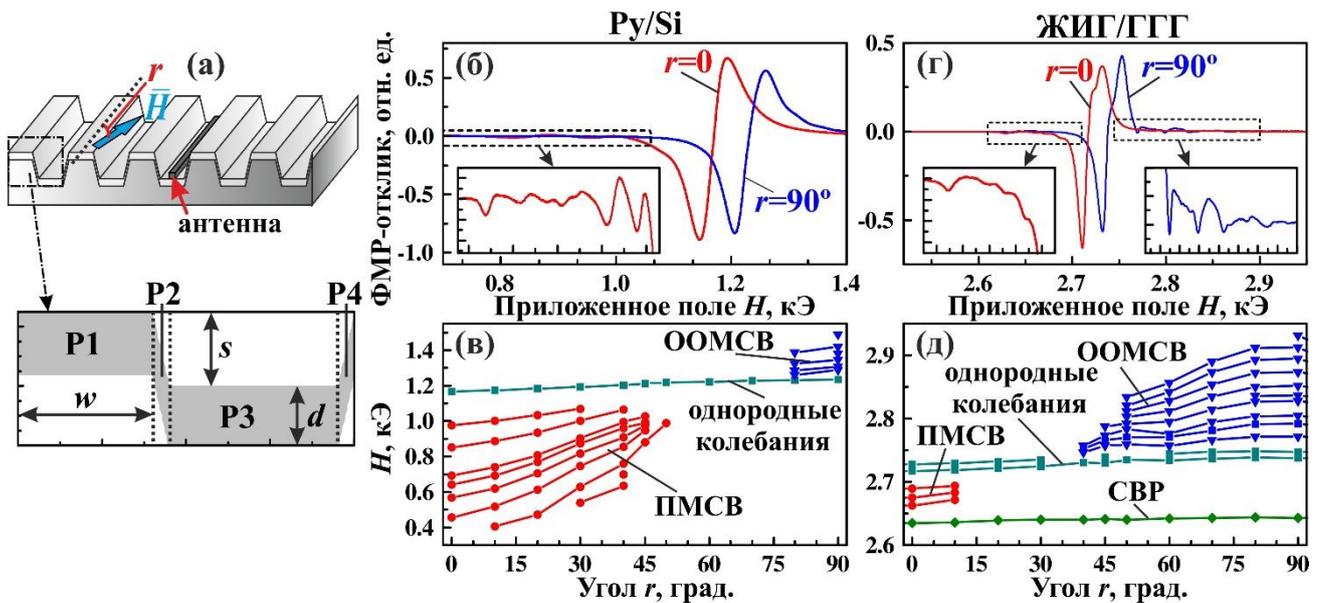


Рис. 7 – Схематическое изображение профилированных плёнок (а), спектры ФМР при двух углах подмагничивания (б, г) и угловые зависимости резонансных полей (в, д) для ПП на основе Py (б, в) и ЖИГ (г, д)

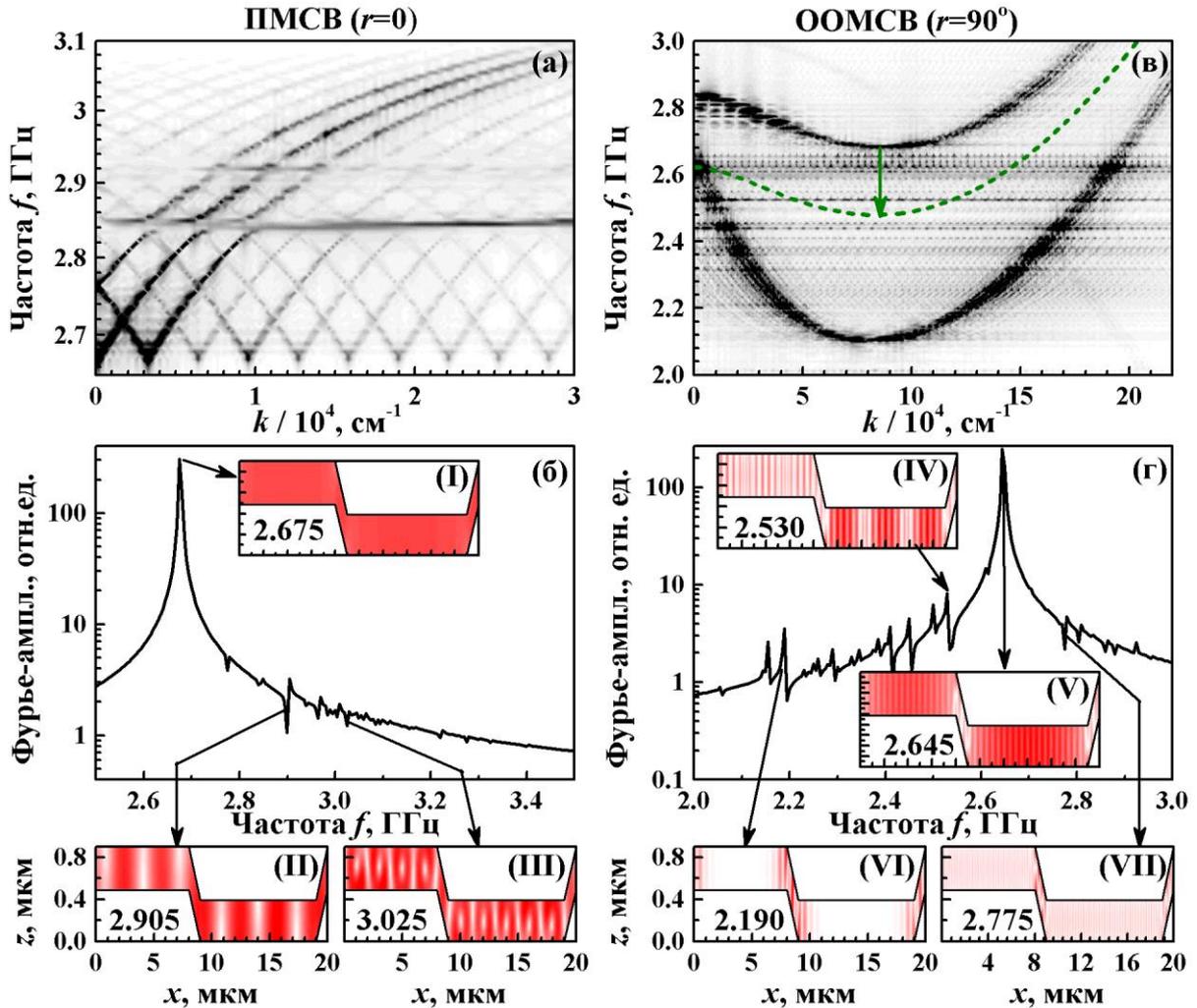


Рис. 8 – Дисперсионные кривые (а, в) и спектры собственных колебаний (б, г) в ПП на основе ЖИГ для поля $H=550$ Э и углов r (см. Рис. 7а): $r=0$ (а, б) и $r=90^\circ$ (в, г). На вставках (I)-(VII) показаны пространственные распределения откликов (частоты подписаны на вставках). Пунктирной линией на (в) показана 2-я мода ООМСВ при $H=480$ Э, демонстрирующая образование пространственной модуляции распределения интенсивностей откликов на (IV)-(VII)

В разделе 4.5 показано, что ПП на основе ЖИГ проявляет эффекты квантования спектра при двух конфигурациях: а) H_0 вдоль полосок, а распространение ПМСВ – поперёк (конфигурация Брэгга); б) H_0 поперёк полосок, а распространение ПМСВ – вдоль (конфигурация Лауэ). В конфигурации Брэгга квантование проявляется в виде осцилляций АЧХ $S_{21}(f)$ и $S_{11}(f)$ (Рис. 9а, б) с экстремумами, соответствующими стоячим резонансам ПМСВ в участках $P1$ и $P3$ (Рис. 7а), маскирующих проявление брэгговских резонансов. Таким образом, в этой геометрии изучаемая структура ведёт себя как система связанных резонаторов, сформированных участками $P1$ и $P3$ (Рис. 7а). В случае конфигурации Лауэ квантование выражалось в виде формирования ширинных мод ООМСВ (Рис. 9г) в спектре прохождения ПМСВ. Воздействие дискретной дифракции проявлялось в виде формирования провала в АЧХ с увеличением L (Рис. 9г) и роста потерь ПМСВ с длиной волны $\lambda > P/2$ (Рис. 9д). Показана применимость модели эффективной среды для описания дисперсионных характеристик ПМСВ в длинноволновой области ($\lambda \gg P$) и положения длинноволновой границы (f_0) ПМСВ, распространяющихся в данных структурах (Рис. 9в, е).

В разделе 4.6 из ориентационных зависимостей H_c показано, что микрорельеф поверхности подложек приводит к формированию одноосной магнитной анизотропии у ПП. Доменная структура в ПП на основе Ру в размагниченном состоянии имела неупорядоченный вид с элементами полосовой доменной структуры.

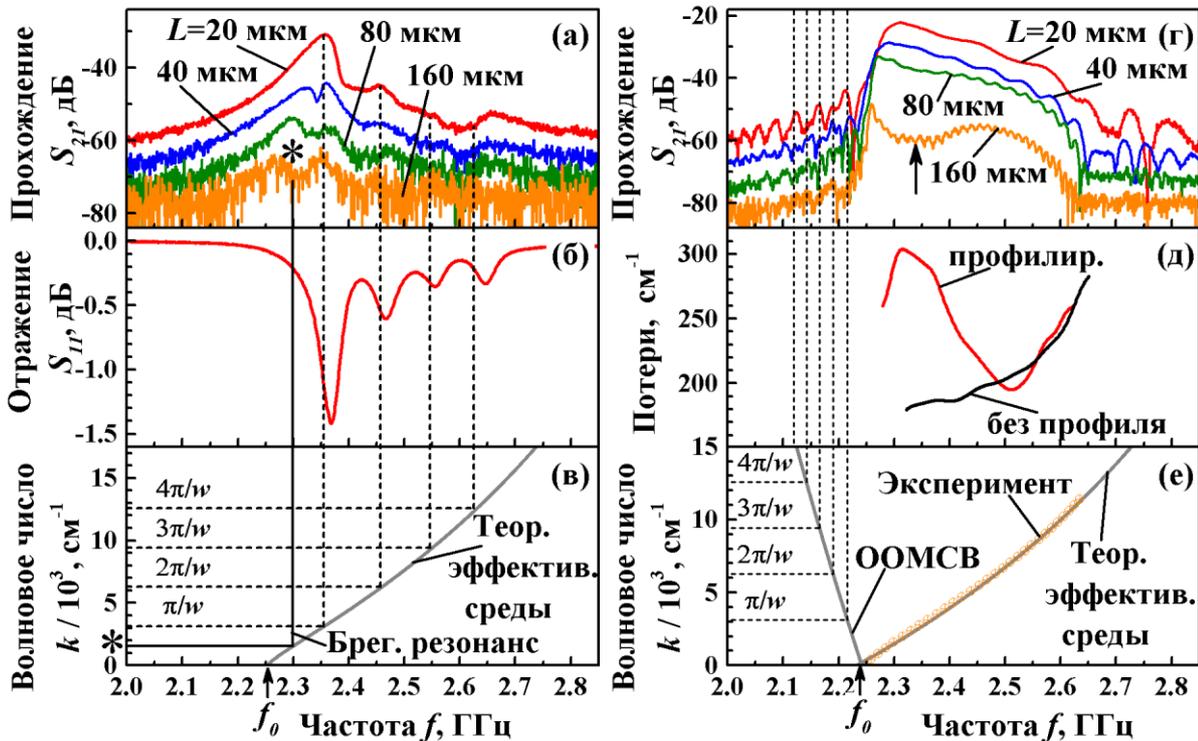


Рис. 9 – АЧХ коэффициента прохождения (а, г) и отражения (б), дисперсионные характеристики (в, е) и потери (д) ПМСВ, распространяющейся в ПП на основе ЖИГ поперёк канавок (а-в) и вдоль канавок (г-е). Стрелкой на (г) показан провал АЧХ, обусловленный дискретной дифракцией. На (в) и (е) отмечены дисперсии ПМСВ, а на оси частот стрелками показаны положения границы f_0 , рассчитанные по модели эффективной среды

В разделе 4.7 показано, что в зависимостях $R(H)$ преобладающим механизмом является АМС. Рассматривается влияние на $R(H)$ типа микрорельефа подложки, геометрических размеров элементов топологии. Продемонстрировано, что переход от 1D к 2D структурам и увеличение размеров элементов уменьшает максимальные значения АМС с ≈ 0.4 до $\approx 0.2\%$. Рельеф подложки приводит к спаду максимальных значений АМС (в 1.3-2.2 раза) и увеличению ширины пика (в 4.5-8 раз) по сравнению с плёнкой Ру на гладкой подложке. Моделирование перемагничивания и эффекта АМС в разделе 4.8 показывает качественное соответствие с экспериментальными данными.

В заключении указываются **основные результаты и выводы диссертационной работы**, в которой было показано, что:

1. Интеграция микроантенн СВ с субмикронными плёнками ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ, полученными ИЛР, позволяет реализовать в данных структурах эффекты, обусловленные возбуждением, распространением и приёмом СВ.

2. Наличие буферного слоя с закреплением спинов на его границах в структурах ЖИГ/Si может приводить к существенной невзаимности потерь при распространении ПМСВ в противоположных направлениях, изменению наклона

дисперсионной характеристики и возникновению дополнительных откликов в спектрах ФМР.

3. Учёт обменного взаимодействия в двуслойных плёнках ЖИГ не запрещает появления внутренних ПМСВ, локализованных на интерфейсе.

4. Ширина линии ФМР изучаемых поликристаллических плёнок ЖИГ в $\Delta H \approx 20-40$ Э приводила к увеличению порогового уровня для параметрических процессов (по сравнению с эпитаксиальными плёнками ЖИГ) и проявлению эффектов динамического размагничивания и нагрева плёнки мощностью волны.

5. Магнитоупругие постоянные (B) и константы магнитострикции (λ_{cm}) плёнок ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ, изготовленных ИЛР, составляют: $B(\text{ЖИГ/Si}) \approx 0.8 \times 10^6$ эрг/см³, $\lambda_{cm}(\text{ЖИГ/Si}) \approx -0.34 \times 10^{-6}$, $B(\text{ЖИГ/ГГГ}) \approx 2.6 \times 10^6$ эрг/см³, $\lambda_{cm}(\text{ЖИГ/ГГГ}) \approx -1.11 \times 10^{-6}$.

6. Для плёнок ЖИГ/Si и ЖИГ/ГГГ, изготовленных ИЛР, впервые наблюдались эффекты гибридизации ПМСВ с упругими модами.

7. В субмикронных поликристаллических плёнках ЖИГ, полученных ИЛР, различие в значениях ширины линии ФМР при касательном (ΔH_{\parallel}) и нормальном (ΔH_{\perp}) намагничивании вызвано эффектами двухмагнотного рассеяния на элементах структуры и дефектах, которые дают существенный вклад в ΔH_{\parallel} .

8. Спектры СВ в изготовленных планарных 1D и 2D ДМК-Co/Pu с размерами элементов от 3.5 до 26 мкм демонстрируют эффекты латерального квантования в элементах Pu.

9. Величина эффекта АМС в ДМК-Co/Pu близка случаю сплошных плёнок Pu, а область полей изменения АМС определяется элементами Co. Величиной АМС можно управлять за счёт выбора типа микроструктуры и её геометрических размеров. Анизотропия формы периодической микроструктуры приводит к формированию одноосной магнитной анизотропии с лёгкой осью намагничивания, совпадающей с направлением микрополосок в структурах.

10. При распространении ПМСВ в ПП на основе ЖИГ в конфигурации Брэгга (распространение ПМСВ поперёк периодического рельефа подложки) спектры прохождения ПМСВ проявляют эффекты квантования в виде осцилляций АЧХ и ФЧХ на частотах $f > f_0$.

11. В конфигурации Лауэ (распространение ПМСВ вдоль периодического рельефа подложки) спектры прохождения ПМСВ в ПП на основе ЖИГ проявляют эффекты квантования в виде осцилляций АЧХ и ФЧХ на частотах $f < f_0$; эффекты дискретной дифракции в виде провала в АЧХ и роста потерь на частотах эффективной связи между волноводами структуры, соответствующей длинам волн $\lambda > P/2$ (P – период структуры).

12. Дисперсионная кривая в длинноволновой области ($\lambda \gg P$) и положение длинноволновой границы ПМСВ в ПП на основе ЖИГ могут быть описаны в рамках модели эффективной среды. При этом структура рассматривается сперва, как система из чередующихся микрополосок, а затем как однородная среда с эффективным тензором магнитной проницаемости.

13. Поведение АМС в ПП на основе Pu , как с 1D, так и 2D периодическим микрорельефом с глубиной травления в ≈ 450 нм и размерами элементов от 3.5 до 26 мкм существенно определяется типом периодического микрорельефа подложки и размерами его элементов. При этом вдоль направления микроканалов рельефа формируются оси лёгкого намагничивания, определяющие характер поведения зависимостей АМС, H_c и спектра ФМР от угла между осью симметрии ПП и направлением магнитного поля.

Публикации по теме диссертационного исследования

Статьи в журналах, включённых в Перечень ВАК РФ и/или в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и/или Scopus

1. Spin waves in meander shaped YIG film: Toward 3D magnonics / **V.K. Sakharov**, E.N. Beginin, Y.V. Khivintsev, A.V. Sadovnikov, A.I. Stognij, Y.A. Filimonov, S.A. Nikitov // Appl. Phys. Letters – 2020. – Vol. 117. – 022403, [1-5].

2. Магнитоупругие свойства пленок железо-иттриевого граната, полученных ионно-лучевым распылением на подложках Si и GaAs / С.Л. Высоцкий, Ю.В. Никулин, А.В. Кожевников, Ю.В. Хивинцев, **В.К. Сахаров**, А.С. Джумалиев, Ю.А. Филимонов, А.И. Стогний, С.А. Никитов // Журн. техн. физики. – 2020. – Т. 90, Вып. 7. – С. 1221-1226.

3. Collective and localized modes in 3D magnonic crystals / E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov, **V.K. Sakharov**, A.I. Stognij, Y.V. Khivintsev, S.A. Nikitov // J. magnetism and magnetic materials. – 2019. – Vol. 492. – P. 165647, [1-7].

4. Влияние деформаций на спектр ферромагнитного резонанса субмикронных пленок железо-иттриевого граната, полученных ионно-лучевым распылением / С.Л. Высоцкий, Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, **В.К. Сахаров**, Ю.А. Филимонов, А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, С.А. Никитов // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 12. – С. 1202-1211.

5. Route toward semiconductor magnonics: Light-induced spin-wave nonreciprocity in a YIG/GaAs structure / A.V. Sadovnikov, E.N. Beginin, S.E. Sheshukova, Yu.P. Sharaevskii, A.I. Stognij, N.N. Novitski, **V.K. Sakharov**, Yu.V. Khivintsev, S.A. Nikitov // Phys. Rev. B. – 2019. – Vol. 99. – P. 054424, [1-6].

6. Микромагнитное моделирование спин-волновых возбуждений в гофрированных плёнках ЖИГ / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, Г. М. Дудко, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов // Физика твёрдого тела. – 2019. – Т. 61, вып. 9. – С. 1652-1658.

7. 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 // Журн. техн. физики. – 2018. – Т.88, вып.7. – С. 1060-1066.

8. Enhanced nonreciprocity of magnetostatic surface waves in yttrium-iron-garnet films deposited on silicon substrates by ion-beam evaporation / **V.K. Sakharov**, Y.V. Khivintsev, S.L. Vysotskii, A.I. Stognij, Y.A. Filimonov // IEEE Magnetic Letters. – 2017. – Vol. 8. – 3704105, [1-5].

9. Влияние мощности входного сигнала на распространение поверхностных магнитостатических волн в плёнках железо-иттриевого граната на подложках

кремния / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, А.И. Стогний, Г.М. Дудко, Ю.А. Филимонов // Известия ВУЗов. Прикладная нелинейная динамика. – 2017. – Т. 25, №1. – С. 35-51.

10. Магноника – новое направление спинтроники и спин-волновой электроники / С. А. Никитов, Д. В. Калябин, И. В. Лисенков, А. Н. Славин, Ю. Н. Барабаненков, С. А. Осокин, А. В. Садовников, Е. Н. Бегинин, М. А. Морозова, Ю. П. Шараевский, Ю. А. Филимонов, Ю.В. Хивинцев, С. Л. Высоцкий, **В. К. Сахаров**, Е. С. Павлов // Успехи физ. наук. – 2015. – Т. 185, № 10. – С. 1099–1128.

11. Standing spin waves in magnonic crystals / M. Mruczkiewicz, M. Krawczyk, **V.K. Sakharov**, Yu.V. Khivintsev, Yu.A. Filimonov, S.A. Nikitov // J. Appl. Phys. – 2013. – Vol. 113. – P. 093908, [1-12].

12. Исследование свойств спин-волновых возбуждений в одномерных двухкомпонентных магнонных кристаллах на основе ферромагнитных металлов методом ферромагнитного резонанса / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, Ю.А. Филимонов, С.А. Никитов // Гетеромагнитная микроэлектроника : сб. науч. тр. под ред. проф. А. В.Ляшенко. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2012. – Вып. 13: Гетеромагнитная микро- и наноэлектроника. Методические аспекты физического образования. Экономика в промышленности. – С. 16-24.

13. Сахаров, В.К. Магнитные микроструктуры на основе плёнок пермаллоя на профилированных подложках кремния / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, Ю.А. Филимонов // Нелинейный мир. – 2011. – Т.9, №1. – С. 35-37.

Статьи в сборниках трудов международных конференций

1. Spin-wave excitations in YIG films grown on corrugated substrates / **V.K. Sakharov**, Y.V. Khivintsev, A.I. Stognij, S.L. Vysotskii, Y.A. Filimonov, E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov, S.A. Nikitov // J. Physics: Conf. Series. – 2019. – Vol. 1389. – P. 012140, [1-5].

2. Спин-волновые возбуждения в гофрированных пленках ЖИГ / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, Г.М. Дудко, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов // Тр. XXIII междунар. симп. «Нанопизика и наноэлектроника», г. Н. Новгород, 11-14 марта 2019 г. – Н. Новгород : Изд-во Нижегород. госун-та, 2019. – С. 274-275.

3. Влияние упругих деформаций на спектр ферромагнитного резонанса субмикронных пленок ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением / С.Л. Высоцкий, Ю.В. Хивинцев, А.В. Кожевников, **В.К. Сахаров**, Ю.А. Филимонов, А.И. Стогний, Н.Н. Новицкий, С.А. Никитов // Тр. XXIII междунар. симп. «Нанопизика и наноэлектроника», г. Н. Новгород, 11-14 марта 2019 г. – Н. Новгород: Изд-во Нижегород. госун-та, 2019. – С. 158-159. – ISBN 978-5-91326-499-2.

4. Spin waves in ion-beam sputtered submicrometer YIG films / Y.V. Khivintsev, **V.K. Sakharov**, S.L. Vysotskii, A.V. Kozhevnikov, Y.A. Filimonov, A.I. Stognij, N.N. Novitskii // Proc. of 26-th Intern. symp. "Nanostructures: Physics and technology", June 18-22 2018, Minsk, Rep. of Belarus. – Minsk: Kovcheg press, 2018. – P. 243-244.

5. Субмикронные спиновые волны в интегральных структурах на основе плёнок железоиттриевого граната и планарных микроантенн / Ю.В. Хивинцев, **В.К. Сахаров**, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов, R. Huber, T. Schwarze, D. Grundler, M. Heath, V. Kruglyak, В.Г. Шадров, А.И. Стогний, С.А. Никитов // Тр. XIX

Международ. симп. «Нанозфизика и нанозлектроника», 10-14 марта 2015 г., Н. Новгород. – Н. Новгород : Изд-во Нижегород. госун-та им. Н.И.Лобачевского, 2015. – Т. 1. – С. 224-225.

6. Спинволновые резонансы в магнетонных кристаллах на основе кобальта и пермаллоя / **В.К. Сахаров**, М. Мрушкевич, Ю.В. Хивинцев, М. Кравчик, Ю.А. Филимонов, С.А. Никитов // Тр. XVIII Международ. симп. «Нанозфизика и нанозлектроника», 11-15 марта 2013 г., Н. Новгород. – Н. Новгород : Тип. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – Т. 1. – С. 183.

Тезисы, материалы докладов международных и всероссийских конференций, симпозиумов, семинаров, научных школ

1. Особенности дисперсионных характеристик магнетостатических волн в плёнках железоиттриевого граната с линейным распределением намагнетичности по толщине / **В.К. Сахаров**, Г.М. Дудко, Ю.В. Хивинцев, Ю.А. Филимонов // тез. докл. XV Всерос. конф. молодых учёных «Нанозлектроника, нанозфотоника и нелинейная физика», г. Саратов, 8-10 сент. 2020 г. – Саратов : Техно-Декор. – 2020. – С. 229-230.

2. Магнетоупругие волны в субмикронных поликристаллических плёнках ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением на подложках ГГГ / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, А.И. Стогний, Ю.А. Филимонов // Тез. докл. XII Всерос. конф. молодых учёных «Нанозлектроника, нанозфотоника и нелинейная физика», г. Саратов, 5-7 сент. 2017 г. – Саратов : Техно-Декор. – 2017. – С. 235-236.

3. Magnetoelastic waves in ion-beam sputtered submicron polycrystalline YIG films on GGG substrates / **V. Sakharov**, Y. Khivintsev, S. Vysotskii, A. Stognij, Y. Filimonov // Bk. of abstr. Moscow intern. symp. on magnetism (MISM), 1-5 July 2017, Moscow. – М.: PrintLeto, 2017. – P. 225.

4. Spin waves spectroscopy of yttrium iron garnet films grown by ion beam evaporation / **V. Sakharov**, Y. Khivintsev, A. Stognij, S. Vysotskii, Y. Filimonov // Bk. of abstr. Moscow intern. symp. on magnetism (MISM), 1-5 July 2017, Moscow. – М.: PrintLeto, 2017. – P. 439.

5. Спиновые волны в структурах ЖИГ/Si / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов // Материалы 19-й Всерос. молодёж. науч. шк.-семинара «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники», г. Ульяновск, 6-8 дек. 2016 г. – Ульяновск: УЛГТУ, 2016. – С. 190-191. – ISBN 978-5-9795-1584-7.

6. Параметрические процессы в плёнках железо-иттриевого граната на подложках кремния / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, С.Л. Высоцкий, Ю.А. Филимонов, А.В. Кожевников, А.И. Стогний // Материалы XI Международ. шк.-конф. «Хаотические автоколебания и образование структур» (ХАОС-2016), 3-8 окт. 2016, Саратов. – Саратов : Наука – С. 52-53. – ISBN 978-5-9999-2695-1.

7. Spin wave propagation in yttrium iron garnet films grown on gadolinium gallium garnet and silicon substrates by ion beam evaporation / **V. Sakharov**, Y. Khivintsev, S. Vysotsky, V. Shadrov, A. Stognij, Y. Filimonov // Bk. of abstr. 20th intern. conf. on magnetism, Barcelona, 5-10 July, 2015. – P. 1550.

8. MSSW in submicron YIG films deposited by oxygen ion beam evaporation on gadolinium gallium garnet and silicon substrates / **V. Sakharov**, Yu. Khivintsev, S. Vysotsky, V. Shadrov, A. Stognij, Y. Filimonov // Spin Waves 2015. Intern. Symp. Abstr. bk. Ioffe Phys.-Techn. Inst., St. Petersburg, Russia. June 7-13. – 2015. – P. 112.

9. Spin waves in yttrium iron garnet structures with incorporated microantennas for advanced microwave applications / Y. Khivintsev, **V. Sakharov**, S. Vysotsky, Y. Filimonov, R. Huber, F. Heimbach, D. Grundler, M. Heath, V. Kruglyak, V. Shadrov, A. Stognij, and S. Nikitov // Spin Waves 2015. Intern. Symp. Abstr. bk. Ioffe Phys.-Techn. Inst., St. Petersburg, Russia. June 7-13. – 2015. – P. 71.

10. Kerr microscopy and FMR spectroscopy investigation of cobalt 2D periodic structure on Permalloy film / **V.K. Sakharov**, C. Davies, V.V. Kruglyak, Yu.A. Filimonov // Bk. of abstr. "International workshop Brillouin and microwave spectroscopy of magnetic micro- and nanostructures" (Brilmics 2014), 3-6 Aug., 2014, Saratov. – Saratov : Nauka, 2014. – P. 30.

11. Спектры ферромагнитного резонанса одно- и двумерных двухкомпонентных магнетонных кристаллов на основе кобальта и пермаллоя / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, Ю.А. Филимонов, С.А. Никитов // Материалы VII конф. молодых ученых «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», Саратов, 24 - 26 сент. 2012 г. – С. 125-126.

12. Standing spin waves in 1D Co/Pu magnonic crystals / M. Mruczkiewicz, M. Krawczyk, **V.K. Sakharov**, Yu.V. Khivintsev, Yu.A. Filimonov, S.A. Nikitov // Abstr. of IEEE intern. conf. on microwave magnetics 2012. Kaiserslautern, Aug. 26-29, 2012. P. 91.

13. FMR investigation of magnonic crystals based on cobalt and Permalloy / **V.K. Sakharov**, Y.V. Khivintsev, S.A. Nikitov, Y.A. Filimonov // Intern. conf. "Days on Diffraction 2012", Abstr., St. Petersburg, May 28 - June 1, 2012. – P. 166-167.

14. Micromagnetic 3D modeling of anisotropic magnetoresistance of Permalloy films on patterned substrates / G.M. Dudko, **V.K. Sakharov**, Yu.V. Khivintsev, Yu.A. Filimonov // "Functional Materials": Intern. conf., Ukraine, Crimea, Partenit, Oct. 3-8, 2011. – P. 150.

15. Магнитные свойства периодических микроструктур на основе кобальта и пермаллоя / **В.К. Сахаров**, Ю.В. Хивинцев, Ю.А. Филимонов, С.А. Никитов // «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика»: тез. докл. VI Всерос. конф. молодых учёных. Саратов, 13-15 сент. 2011 г. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2011. – С. 50.

16. Fabrication and characterization of NiFe films on patterned Si substrates / **V. Sakharov**, Y. Khivintsev, S. Nikitov, Y. Filimonov // Сб. тез.: Моск. междунар. симп. по магнетизму (MISM): Москва, МГУ им. М.В.Ломоносова, физ. фак., 21-25 авг. 2011 г. – М.: МАКС Пресс, 2011. – P. 397.

17. Magnetoresistance and domain structure in patterned microstructures based cobalt and permalloy films / **V.K. Sakharov**, Y.V. Khivintsev, S.A. Nikitov, Y.A. Filimonov // Intern. symp. "Spin Waves 2011", Ioffe Phys.-Techn. Inst., St.-Petersburg, Russia, June 5-11, 2011. – P. 118.

18. Magnetic structures based on periodically alternating cobalt and permalloy stripes / **V.K. Sakharov**, Y.V. Khivintsev, S.A. Nikitov, Y.A. Filimonov // Intern. symp. "Spin Waves 2011", Ioffe Phys.-Techn. Inst., St.-Petersburg, Russia, June 5-11, 2011. – P. 117.

19. Хивинцев, Ю.В. Магнитные микроструктуры на основе плёнок пермаллоя на профилированных подложках кремния / Ю.В. Хивинцев, **В.К. Сахаров**, Ю.А. Филимонов // Тез. докл. 5-ой конф. молодых учёных «Нанoeлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», 6-8 сент. 2010 г., Саратов, Россия. – С. 94-95.

Список цитированных источников

1. Kruglyak, V.V. Magnonics. / V.V. Kruglyak, S.O. Demokritov, D. Grundler // J. Phys. D.: Appl. Phys. – 2010. – Vol. 43. – P. 264001, [1-14].
2. Chumak, A.V. Magnonic crystals for data processing / A.V. Chumak, A.A. Serga, B. Hillebrands // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2017. – Vol. 50. – P. 244001, [1-20].
3. Growth and spin-wave properties of thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films on Si substrates / A.I. Stognij, L.V. Lutsev, V.E. Bursian, N.N. Novitskii // J. Appl. Phys. – 2015. – Vol.118. – P. 023905, [1-7].
4. Krawczyk, M. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure / M. Krawczyk, D. Grundler // J. Phys.: Condens. Matter. – 2014. – Vol. 26. – P. 123202, [1-32].
5. Spin wave steering in three-dimensional magnonic networks / E.N. Beginin, A.V. Sadovnikov, A.Yu. Sharaevskaya, A.I. Stognij, S.A. Nikitov // Appl. Phys. Letters. – 2018. – Vol. 112. – P. 122404, [1-5].
6. Briones, J. Local magnetic anisotropy induced by a nano-modulated substrate and application to two-dimensional magnetic sensors / J. Briones, F. Montaigne, D. Lacour // Appl. Phys. Express. – 2010. – Vol.3. – P. 073002, [1-3].
7. Magnetoresistance behavior of bi-component antidote nanostructures / X.M. Liu, J. Ding, N. Singh, M. Kostylev, A.O. Adeyeye // Europhysics Letters – 2013. – Vol. 103, N.6. – P. 67002, [1-6].
8. Micro-patterning of NdFeB and SmCo magnet films for integration into micro-electro-mechanical-system / A. Walther, C. Marcoux, B. Desloges, R. Grechishkin, D. Givord, N.M. Dempsey // JMMM. – 2009. – Vol. 321. – P. 590-594.
9. Multilevel magnetic media in continuous and patterned films with out-of-plane magnetization / V. Baltz, S. Landis, B. Rodmacq, B. Dieny // JMMM. – 2005. – Vol. 290-291. – P. 1286-1289.
10. Damon, R.W. Magnetostatic modes of ferromagnet slab / R.W. Damon, J.R. Eshbach // J. Phys. Chem. Solids. – 1961. – Vol. 19, N 3/4. – P. 308-320.
11. Гуревич, А.Г. Магнитные колебания и волны / А.Г. Гуревич, Г.А. Мелков. – М.: Наука, 1994. – 462 с.
12. Donahue, M. J. OOMMF User's Guide, Version 1.0. / M.J. Donahue, D.G. Porter. // NISTIR 6376. – 1999. – National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
13. Schlömann, E. Generation of spin waves in nonuniform magnetic fields. I. Conversion of electromagnetic power into spin-wave power and vice versa / E. Schlömann // J. Appl. Phys. – 1964. – V. 35. – P. 159-166.