



«УТВЕРЖДАЮ»

ВРИО директора Института физики
микроструктур РАН,
д-р физ.-мат. наук, профессор

В.И. Гавриленко

« 09 » февраля 2021 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Института физики микроструктур РАН – филиала Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» на диссертацию Сахарова Валентина Константиновича «Спин-волновые возбуждения в микроструктурах на основе поликристаллических магнитных плёнок», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Использование спиновых волн в качестве переносчиков информации лежит в основе такого направления радиофизики, как магноники, и потенциально может повысить энергоэффективность устройств обработки, хранения и передачи информации. В этой связи уделяется большое внимание исследованию эффектов возбуждения и распространения спиновых волн в различного рода тонкопленочных волноведущих (магنونных) структурах. Основными требованиями, предъявляемыми к структурам магноники, являются: обеспечение малых потерь и возможности управления спектром спиновых волн, а также совместимость технологий получения магنونных структур с существующими КМОП технологиями. В качестве одного из подходов к получению структур, отвечающих этим требованиям, рассматривается технология ионно-лучевого распыления на полупроводниковые и диэлектрические подложки пленок железоиттриевого граната (ЖИГ) –одного из основных материалов магноники. При этом для определения перспектив применения таких структур в магнонике необходимо решить ряд важных радиофизических задач, направленных, в частности, на обнаружение эффектов распространения спиновых волн; изучения связи дисперсионных и диссипативных свойств с параметрами структуры; обнаружение эффектов гибридизации спиновых волн с упругими волнами, поддерживаемыми структурой пленка ЖИГ-подложка. Кроме того, вакуумные технологии осаждения магнитных пленок, в отличие от метода жидкофазной эпитаксии, позволяют осаждать пленки на подложки с заданным

рельефом поверхности и формировать многокомпонентные латеральные периодические структуры. Исследование свойств спиновых волн в таких 3D и 2D магнитных структурах представляет интерес как с точки зрения развития новых подходов к управлению спектром и затуханием спиновых волн, так и разработки 3D архитектуры магнитных устройств. С учетом сказанного, диссертационная работа Сахарова В.К., посвященная исследованию особенностей спин-волновых возбуждений в интегральных микроструктурах на основе поликристаллических плёнок ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением, и в микроструктурах на основе плёнок кобальта и пермаллоя представляется **актуальной**.

Структура и объём диссертационной работы.

Диссертационная работа Сахарова В.К. имеет общий объём 222 страницы, в том числе, содержит 100 рисунков, 6 таблиц, список литературы из 290 наименований, список сокращений и условных обозначений. Основные результаты диссертационной работы изложены в четырёх разделах (главах).

В **первом разделе** приводятся результаты исследования распространения магнитостатических волн (МСВ) в поликристаллических плёнках ЖИГ субмикронной толщины, полученных ионно-лучевым распылением на подложках кремния со слоем окисла (ЖИГ/Si). Для изучаемых образцов измеряются структурные и магнитные параметры. Отмечается, что характерной чертой пленок ЖИГ/Si является наличие магнитного буферного слоя ЖИГ, толщиной 100-150 нм на границе с подложкой. На основе сравнительного анализа спектров ферромагнитного резонанса (ФМР) и спектров СВ нормально и касательно намагниченных пленок ЖИГ/Si демонстрируется проявление двухмагнитного рассеяния на межзеренных границах, кристаллитах и структурных дефектах поверхности. Приводится описание технологии изготовления микроантенн (МА) на поверхности исследуемых образцов, методика измерения комплексных S-параметров МСВ с помощью полученных интегрированных МА, СВЧ-зондовой станции и векторного анализатора цепей, проводится оценка эффективности возбуждения МСВ изготовленными МА.

Впервые экспериментально радиофизическими методами демонстрируется распространение спиновых волн в структурах ЖИГ/Si на примере поверхностных МСВ (ПМСВ). Приводятся результаты измерения частотной зависимости действительной (k') части волнового числа ПМСВ и оценка мнимой части (k''). Показано, что длина пробега

ПМСВ в пленках ЖИГ/Si составляет $2\pi/k'' > 100$ мкм при выполнении условия $k'' \ll k'$,

отвечающего распространяющимся волнам.

Экспериментально показывается, что невязимость уровней сигнала АЧХ для ПМСВ, распространяющихся в противоположных направлениях, превосходит уровень невязимости, ожидаемый из свойств ПМСВ и МА, дисперсионные характеристики, определяемые из набега фаз, имеют существенное несовпадение с кривыми, построенными по модели однослойной свободной плёнки феррита. Указанные особенности объясняются влиянием буферного слоя на распространение ПМСВ и анализируются на основе модели двухслойной обменно - связанной плёнки феррита с закреплением спинов по границам разделов.

Рассматриваются особенности развития параметрических процессов в диссипативных структурах ЖИГ/Si. Показывается, что значения параметра затухания МСВ в 6×10^{-3} приводят к проявлению эффектов динамического размагничивания и нагрева образцов. За счёт данных эффектов зона прохождения ПМСВ сдвигается в область меньших частот, и в области частот, меньших частоты, соответствующей максимуму прохождения ПМСВ, на кривых зависимости амплитуды коэффициента прохождения от входной мощности формируются аномальные участки роста. Показывается, что эффекты динамического размагничивания и нагрева требуют уточнения подходов к определению порогов параметрической неустойчивости.

Для изучаемых структур оцениваются магнитоупругие свойства. На основе метода широкополосного ФМР для образцов ЖИГ/Si рассматривается влияние деформации растяжения, которая приводит к сдвигу частоты, соответствующей максимуму потерь в спектре прохождения. Из величины данного сдвига в приближении изотропии рассчитаны магнитоупругие постоянные и константы магнитострикции, величина которых позволяет наблюдать АЧХ и дисперсиях ПМСВ серии эквидистантных осцилляций, соответствующих резонансному взаимодействию ПМСВ с упругими сдвиговыми модами структуры ЖИГ/Si.

Во втором разделе описываются результаты исследования распространения МСВ в поликристаллических плёнках ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением на подложках гадолиний-галлиевого граната (ГГГ)(структуры ЖИГ/ГГГ). Приводятся результаты измерений структурных и магнитных параметров. На основе измерений

угловых зависимостей спектра ФМР показывается влияние эффекта двухмагнетонного рассеяния, наличие текстуры (111) и присутствие кубической кристаллографической анизотропии.

С помощью интегрированных МА исследуются особенности возбуждения и распространения ПМСВ и обратных объёмных МСВ (ОМСВ). Показывается, что невзаимность АЧХ для ПМСВ в коротковолновой области достигает 40 дБ и сопровождается невзаимностью дисперсионных характеристик. Полученные особенности объясняются на основе модели неоднородного распределения намагничённости по толщине. Использование той же модели для ОМСВ также даёт хорошее соответствие с экспериментом, где наблюдаются взаимные АЧХ и дисперсии.

Показывается взаимодействие ПМСВ с упругими волнами в рассматриваемых поликристаллических образцах ЖИГ/ГТГ, приводящее к образованию в АЧХ и дисперсионных характеристиках ПМСВ эквидистантных осцилляций, которые могут сосуществовать с дипольно-обменными резонансами.

Рассматривается влияние упругих деформаций растяжения, смещающих пик поглощения ФМР в область больших частот при поле, ориентированном вдоль микрополосковой антенны, и в область меньших частот при поле, направленном поперёк антенны. По величине частотного сдвига в приближении изотропии оцениваются магнитоупругие постоянные и константы магнитострикции.

Исследуется влияние входной мощности на характеристики распространения ПМСВ, показывается, что преобладающую роль в сдвиге зоны прохождения оказывает нагрев структуры.

В **третьем разделе** приводятся результаты исследования спин-волновых возбуждений в двухкомпонентных магнетонных кристаллах на основе кобальта и пермаллоя (ДМК-Со/Ру), их магнитных (петли гистерезиса) и транспортных (магнитосопротивление) свойств, описана методика изготовления структур.

Показывается, что спектры ФМР исследуемых структур характеризуются двумя основными особенностями: 1) сдвигом отклика квазиоднородной прецессии намагничённости при изменении угла между осями симметрии структуры и касательно приложенным внешним полем; 2) формированием серий дополнительных откликов малой интенсивности (квантованием спектра) за счёт резонансов ПМСВ по ширине элементов пермаллоя. С помощью микромагнитного моделирования объясняется наблюдаемое отличие в величине сдвига основного отклика с разворотом приложенного поля в спектрах ФМР структур ДМК-Со/Ру и решёток из отдельных элементов кобальта и пермаллоя, а также рассмотрены особенности квантования спектров ФМР.

Из анализа измеренных петель гистерезиса для ДМК-Co/Pu показывается, что в образцах формируется магнитная анизотропия с лёгкой осью, направленной вдоль эффективных микрополосок структуры.

Исследование транспортных свойств образцов ДМК-Co/Pu показывает, что зависимости сопротивления структур от приложенного магнитного поля обуславливаются эффектом анизотропного магнитосопротивления (АМС). При этом максимальное относительное изменение сопротивления аналогично плёнкам пермаллоя, а ширина пиков – плёнкам кобальта. Демонстрируется возможность управления величиной магнитосопротивления за счёт перехода от одномерной к двумерной структуре и варьирования геометрических размеров элементов. Рассмотрено влияние естественных окислов Co, Fe, Ni на вид кривых АМС.

На основе структуры из двумерной решётки кобальтовых частиц на поверхности сплошной плёнки пермаллоя показывается возможность квантования спектра ФМР, обусловленного латеральными резонансами в пермаллое, только за счёт полей от микрочастиц кобальта без микроструктурирования плёнки пермаллоя. Данные подтверждаются хорошим соответствием результатов микромагнитного моделирования и спектров, полученным с помощью магнитооптического эффекта Керра.

Четвёртый раздел посвящён описанию результатов экспериментального и численного исследования спин-волновых возбуждений в профилированных плёнках ЖИГ и пермаллоя. Приводится технология изготовления профилированных плёнок пермаллоя и технология изготовления микроантенн на профилированных плёнках ЖИГ.

Показывается, что спектры ФМР и прохождения ПМСВ в профилированных плёнках демонстрируют эффекты квантования, обусловленные резонансами ПМСВ или ООМСВ по ширине горизонтальных областей структуры. При этом для характеристик прохождения ПМСВ эффекты квантования проявлялись как для конфигурации Лауэ для поля и волнового вектора, так и для конфигурации Брэгга, где они могли маскировать проявление брэгговских резонансов. В конфигурации Лауэ проявляется эффект дискретной дифракции в виде формирования широкого провала в спектре прохождения с увеличением расстояния между входной и выходной антеннами с соответствующим ростом потерь для ПМСВ с длинами волн, больших половины периода структуры. Показывается применимость модели эффективной среды для оценки положения длинноволновой границы ПМСВ в профилированных плёнках.

В этом разделе также рассмотрены особенности петель гистерезиса и кривых магнитосопротивления профилированных плёнок пермаллоя в зависимости от типа микрорельефа подложки и геометрических размеров элементов. Показывается, что за счёт

периодического рельефа подложки возможно управлять величиной магнитосопротивления.

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

- Наблюдение эффектов распространения спиновых и магнитоупругих волн в субмикронных поликристаллических плёнках ЖИГ, полученными ионно-лучевым распылением на подложки кремния и гадолиний-галлиевого граната. Показано, что особенности структуры пленок, полученных ионно-лучевым распылением, приводят к усилению эффекта невзаимности распространения поверхностных магнитостатических волн.

- Наблюдение и объяснение эффектов квантования поверхностных магнитостатических волн (ПМСВ) в магнитных плёнках с пространственно - модулированной поверхностью и в двухкомпонентных магнетонных кристаллах на основе кобальта и пермаллоя .

- Наблюдение влияния мощности волны накачки на распространение поверхностных магнитостатических волн, обусловленные эффектами динамического размагничивания и нагрева плёнки. Указанные эффекты необходимо учитывать при определении порогов параметрической неустойчивости.

По содержанию диссертационной работы Сахарова В.К. имеются следующие **замечания**:

1. В первой главе не указано, как соотносится неоднородное уширение линии ФМР, обусловленное поликристаллической структурой образцов, с вкладом в уширение двухмагнетонного рассеяния.

2. При рассмотрении влияния буферного слоя на эффект невзаимности поверхностных спиновых волн в структуре ЖИГ/Si никак не обсуждается возможное влияние параметров подложки Si на данный эффект. Кроме того, не комментируется корректность применимости модели двухслойной обменно-связанной магнитной пленки ЖИГ к исследуемой структуре.

3. В четвёртой главе при описании кривых магнитосопротивления указывается, что вклад от доменных стенок при определённых углах подмагничивания может быть определяющим и превосходить вклад от эффекта анизотропного магнитосопротивления. Хотелось бы видеть разъяснение сделанному заключению.

Однако отмеченные недостатки не являются принципиальными и не снижают общего положительного впечатления о диссертационной работе.

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

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

1. в субмикронных поликристаллических плёнках ЖИГ на кремнии и ГГГ, полученных ионно-лучевым распылением:

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

1.2. определено влияние буферного слоя и неоднородности распределения намагниченности 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 спиновых волн и квантования спектра в профилированных плёнках на основе ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением 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 спиновых волн, дифракции Брэгга и дискретной дифракции. Рассмотрена применимость модели эффективной среды для описания длинноволновой области дисперсионных характеристик ПМСВ в таких структурах.

3. Для двухкомпонентных магнетонных кристаллов на основе кобальта и пермаллоя, а также для профилированных плёнок на основе пермаллоя экспериментально и с помощью микромагнитного моделирования исследованы зависимости спектров спиновых волн, процессов перемагничивания и анизотропного магнитосопротивления (АМС) от характера микроструктурирования образцов.

Полученные в диссертационной работе результаты имеют **практическое значение**, заключающееся в том, что рассматриваемые в работе структуры являются перспективными для использования в устройствах магноники, СВЧ-устройствах (перестраиваемых фильтров, вентилях, направленных ответвителей, циркуляторов, линий задержки), устройств спиновой логики, устройств с акустической накачкой, датчиков магнитного поля.

Рекомендации по использованию материалов работы. Полученные в диссертации результаты рекомендуются к использованию в научно-исследовательских и производственных организациях, образовательных учреждениях, сферой деятельности которых являются исследования спиновых и магнитостатических волн в различных структурах, а также производство устройств, работающих с их использованием: Институт физики микроструктур РАН (г. Н. Новгород), ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина)» (г. Санкт-Петербург), ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (г. Санкт-Петербург), МГУ имени М.В. Ломоносова (г. Москва), ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского» (г. Саратов), ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет» (г. Ульяновск), ФГБУН ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Москва), ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Фрязино), СФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (г. Саратов), ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (г. Екатеринбург), ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» (г. Ростов-на-Дону), ОАО «Завод Магнетон» (г. Санкт-Петербург), АО «НПП Фаза» (г. Ростов-на-Дону), АО «НПП "Исток" им. Шокина» (г. Фрязино).

Достоверность и обоснованность 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.

Личный вклад автора в работах, выполненных в соавторстве, подробно и четко сформулирован и не вызывает сомнений.

Полнота изложения материалов диссертации в публикациях и апробация. По результатам работы имеется 38 публикаций, из которых 13 – статьи 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. Результаты работы широко апробированы на международных и всероссийских конференциях, симпозиумах, школах-семинарах.

Заключение.

Таким образом, можно заключить, что диссертация Сахарова Валентина Константиновича представляет собой законченную научно-квалификационную работу с высоким уровнем научной новизны и значимости полученных результатов. Тема и содержание диссертации соответствует специальности 01.04.03 – «Радиофизика». Автореферат полно и правильно отражает её содержание. Сахаров В.К. является высококвалифицированным специалистом в области радиофизики, имеющим навыки экспериментального исследования, теоретического анализа и численного моделирования.

Диссертационная работа Сахарова В.К. удовлетворяет требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении учёных степеней» (утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г.), предъявляемых к кандидатским диссертациям, а её автор, Сахаров Валентин Константинович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Доклад Сахарова Валентина Константиновича по материалам диссертационной работы был представлен и обсужден в ходе научного семинара по физике твёрдого тела, проведённого в Институте физики микроструктур РАН 28 декабря 2020 года.

Отзыв составлен заведующим отделом магнитных наноструктур, г.н.с., д-ром физ.-мат. наук Фраерманом Андреем Александровичем на основе изучения текстов диссертации, автореферата и основных публикаций, в которых представлены результаты работы.

Отзыв утверждён на заседании отдела магнитных наноструктур, протокол №1 от 28 декабря 2020 г.

Заведующий отделом магнитных
наноструктур Института физики
микроструктур РАН, г.н.с.,
д-р физ.-мат. наук по
специальности 01.04.07



Фраерман Андрей Александрович

Фактический адрес: 603087, Нижегородская обл., Кстовский р-н, д. Афоново,
ул. Академическая, д. 7
Институт физики микроструктур РАН
Телефон: (831) 417-94-51
Электронный адрес:andr@ipmras.ru

Подпись Фраермана А.А. заверяю,
учёный секретарь ИФМ РАН,
к.ф.-м.н.



Д.М.Гапонова