

В диссертационный совет Д 212.243.01 на базе
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный
исследовательский государственный
университет имени Н.Г. Чернышевского»

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Устинова Алексея Борисовича

на диссертационную работу 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».

В настоящее время для совершенствования, миниатюризации, увеличения плотности компоновки устройств обработки, хранения и передачи информации ведётся активный поиск возможных путей повышения их энергоэффективности, под которой понимают уменьшение тепловыделения (главным образом, обусловленного джоулевыми потерями), снижение затрат на переключение состояний элементов памяти, оптимизацию алгоритмов вычислений и др. Одним из подходов для реализации перечисленных методов повышения энергоэффективности выступает использование спиновых волн в качестве носителей информации. При этом особый интерес представляет исследование спиновых волн в магнитных микроструктурах, допускающих интеграцию с полупроводниковыми КМОП структурами. С этой точки зрения **актуальность темы диссертационной работы** Сахарова Валентина Константиновича, посвященной изучению спин-волновых возбуждений в микроструктурах на основе поликристаллических магнитных плёнок, полученных вакуумными методами осаждения на полупроводниковые и диэлектрические подложки, не вызывает сомнений.

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы. Общий объем диссертации – 222 страницы, включая 100 иллюстраций, 6 таблиц, 3 страницы списка сокращений и условных обозначений, 19 страниц списка литературы из 290 наименований.

Во **введении** автор описывает актуальность темы исследования, цель проведенной работы, основные задачи, обосновывает научную новизну работы, её практическую значимость, достоверность полученных результатов, характеризует свой личный вклад. Здесь же описывается методология и методы исследования, формулируются положения, выносимые на защиту, приводятся сведения об апробации и краткое содержание работы.

В **первой** главе приводятся результаты исследования особенностей спин-волновых возбуждений в поликристаллических плёнках железо-иттриевого граната (ЖИГ), полученных ионно-лучевым распылением на подложки кремния со слоем окисла. Измерения распространяющихся магнитостатических волн (МСВ) проводились с помощью антенн микронных размеров, интегрированных на поверхности образцов. Рассматривается влияние ростовых дефектов, мелкозернистой структуры поверхности на ширину откликов ферромагнитного резонанса (ФМР) за счёт механизма двухмагнетонного рассеяния. С помощью интегрированных антенн на примере поверхностных МСВ (ПМСВ) впервые радиофизическими методами продемонстрировано прохождение спиновых волн в структуре ЖИГ/кремний. Экспериментально и с помощью численного

расчёта показывается влияние буферного слоя ЖИГ на эффект невязности, дисперсионные характеристики ПМСВ, спектры ФМР в рассматриваемых образцах. Исследуется влияние мощности входного сигнала на вид зоны прохождения, показывается проявление эффектов динамического размагничивания и нагрева плёнки СВЧ-мощностью волны. Из данных широкополосного ФМР проводится оценка магнитоупругих постоянных и констант магнитострикции. Демонстрируется проявление магнитоупругих резонансов в спектре прохождения ПМСВ.

Во **второй** главе рассматриваются особенности спин-волновых возбуждений в плёнках ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением на подложки гадолиний-галлиевого граната (ГГГ). Проводится анализ спектров ФМР, на основе которого оцениваются константы магнитной анизотропии (вследствие формирования кристаллической текстуры), показывается проявление двухмагнетонного рассеяния за счёт дефектности плёнок. С помощью нанесённых на поверхности образцов антенн микронных размеров рассматриваются характеристики прохождения ПМСВ и обратных объёмных МСВ (ООМСВ). С использованием микромагнитного моделирования показывается влияние неоднородного распределения намагниченности по толщине, результаты соотносятся с данными измерений. Демонстрируется возможность изучаемых структур поддерживать магнитоупругие резонансы и их сосуществование с дипольно-обменными резонансами. Из эксперимента по влиянию деформации растяжения на спектр широкополосного ФМР проводится оценка магнитоупругих постоянных и констант магнитострикции для поликристаллических плёнок ЖИГ на ГГГ. Исследуется влияние мощности входного сигнала на распространение ПМСВ в структурах ЖИГ/ГГГ.

Третья глава посвящена изучению планарных двухкомпонентных периодических структур на основе плёнок кобальта и пермаллоя. Полученные результаты сравниваются с данными измерений для решёток из отдельных элементов кобальта и пермаллоя с теми же геометрическими размерами, что и у соответствующих элементов в двухкомпонентных структурах. На основе экспериментальных результатов и данных микромагнитного моделирования проводится сравнение особенностей спектров ФМР в изучаемых образцах – сдвига откликов с изменением угла между приложенным полем и осью симметрии структур и квантования спектров, обусловленного установлением стоячих колебаний спиновых волн по ширине элементов структуры. Рассматриваются характеристики основного состояния образцов на основе результатов измерений петель гистерезиса, особенности кривых магнитосопротивления в зависимости от геометрических размеров элементов и перехода от 1D к 2D типу микроструктурирования. В этом же разделе приводятся результаты экспериментального исследования и моделирования спин-волновых возбуждений в структурах из двумерной решётки кобальтовых микрочастиц на поверхности сплошной плёнки пермаллоя.

В **четвертой** главе приводятся результаты исследования свойств профилированных плёнок ЖИГ и пермаллоя, под которыми понимаются плёнки, нанесённые на подложки с системой заранее вытравленных канавок с глубиной травления, превышающей толщину наносимых плёнок. Рассматриваются особенности экспериментальных спектров ФМР изучаемых образцов. На основе микромагнитного моделирования анализируются спектры собственных колебаний и дисперсии ПМСВ и ООМСВ в профилированных плёнках ЖИГ. С помощью интегрированных антенн рассматривается проявление эффектов квантования, брэгговской дифракции и дискретной дифракции на экспериментальные спектры прохождения ПМСВ в профилированных плёнках ЖИГ, показывается применимость модели эффективной среды для оценки положения длинноволновой границы ПМСВ в

данных структурах. Для профилированных плёнок пермаллоя анализируется влияние геометрических размеров элементов топологии и переход от 1D к 2D типу микрорельефа на петли гистерезиса, доменную структуру и кривые магнитосопротивления.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Среди наиболее значимых можно выделить следующие результаты исследования.

1. Наличие буферного слоя, обменносвязанного с основным слоем и с закреплением спинов на его границах, в структурах ЖИГ/кремний может приводить к существенной невзаимности потерь при распространении ПМСВ в противоположных направлениях, изменению наклона дисперсионной характеристики и возникновению дополнительных откликов в спектрах ФМР.

2. Были определены магнитоупругие постоянные (B) и константы магнитострикции (λ_{cm}) плёнок ЖИГ/кремний и ЖИГ/ГТГ, изготовленных ионно-лучевым распылением, которые составили: $B(\text{ЖИГ/Si}) \approx 0.8 \times 10^6$ эрг/см³, $\lambda_{cm}(\text{ЖИГ/Si}) \approx -0.34 \times 10^{-6}$, $B(\text{ЖИГ/ГТГ}) \approx 2.6 \times 10^6$ эрг/см³, $\lambda_{cm}(\text{ЖИГ/ГТГ}) \approx -1.11 \times 10^{-6}$.

3. При распространении ПМСВ в профилированных плёнках ЖИГ в конфигурации Брэгга (распространение ПМСВ поперёк периодического рельефа подложки) спектры прохождения ПМСВ проявляют эффекты квантования в виде осцилляций амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик на частотах, больших длинноволновой границы ПМСВ.

Результаты, описанные в диссертационной работе, обладают несомненной **научной и практической значимостью**. В частности, была показана принципиальная возможность использования структур на основе поликристаллических плёнок ЖИГ, полученных ионно-лучевым распылением, для создания устройств магноники и их интеграции с КМОП технологией. Обнаруженное в работе усиление невзаимности уровней сигналов ПМСВ, распространяющихся в противоположных направлениях, за счёт влияния буферного слоя и неоднородного распределения намагничённости по толщине возможно использовать для построения логических элементов, а также ряда СВЧ-приборов, таких как: СВЧ-вентили, циркуляторы, направленные ответвители, линии задержки. Формирующиеся гибридные магнитоупругие волны в рассматриваемых структурах дают возможность их использования для создания устройств с акустической спиновой накачкой и устройств стрейнтроники. Исследуемые структуры с заданным периодическим профилем подложки могут выступать в качестве базового элемента для последующей трёхмерной архитектуры устройств магноники. Показанная возможность управления величиной эффекта анизотропного магнитосопротивления в микроструктурах на основе плёнок кобальта и пермаллоя может быть использована при проектировании датчиков магнитного поля.

Научная новизна полученных в диссертационной работе **результатов** состоит в том, что в ней впервые для субмикронных поликристаллических плёнок ЖИГ на подложках кремния и ГТГ были обнаружены и исследованы эффекты распространения спиновых и магнитоупругих волн, определено влияние буферного слоя и неоднородного распределения намагничённости по толщине плёнки на дисперсию и проявление эффектов невзаимности распространения МСВ, показано влияние эффектов динамического размагничивания и нагрева структур СВЧ-мощностью волны, проведена оценка магнитоупругих постоянных и констант магнитострикции. В работе впервые экспериментально изучены эффекты распространения МСВ и квантования спектра спиновых волн в профилированных плёнках ЖИГ – микроструктурах в виде плёнок ЖИГ,

нанесённых на подложки с заранее вытравленной периодической решёткой канавок, характеризующихся шириной w , периодом $P = 2w$ и глубиной h , такими что $h \gg d$, $w \gg h$. Для подобного рода структур обнаружены и исследованы особенности частотных зависимостей коэффициента прохождения ПМСВ, связанные с механизмами квантования спектра спиновых волн, брэгговской дифракции и дискретной дифракции, а также рассмотрена применимость модели эффективной среды для описания длинноволновой области дисперсионных характеристик ПМСВ в таких структурах. Для двухкомпонентных периодических структур на основе кобальта и пермаллоя, а также для профилированных плёнок пермаллоя впервые экспериментально и с помощью микромагнитного моделирования исследованы зависимости спектров спиновых волн, процессов перемагничивания и магнитосопротивления от характера микроструктурирования.

Степень обоснованности научных положений, научная новизна и значимость полученных в диссертации результатов не вызывает сомнений.

Достоверность и обоснованность полученных результатов, сформулированных положений и сделанных выводов обеспечивается использованием современных средств и методов проведения измерений, соответствием экспериментальных результатов и численных расчётов. Достоверность результатов расчётов обеспечивается адекватностью применённых моделей, корректностью исходных и упрощающих допущений, использованием уравнений, методов и подходов, широко апробированных и хорошо зарекомендовавших себя. Достоверность результатов также подтверждается их соответствием с современными представлениями о процессах, происходящих в магнитных микроструктурах, отсутствием противоречий с известными данными, широкой апробацией полученных результатов на конференциях и публикациями в рецензируемых изданиях.

Недостатки и замечания по работе:

1. При описании методики изготовления антенн не указано, почему была выбрана взрывная литография, хотя известно, что её использование приводит к худшей адгезии медной плёнки, чем последовательное применение методов нанесения медной плёнки, фотолитографии и травления.
2. На рисунке 1.20(б) промоделирован спектр спиновых волн в двухслойной структуре с динамическим закреплением поверхностных спинов. Остается непонятным, почему все моды взаимодействуют друг с другом, кроме одной. В тексте диссертации комментарии автора были бы желательны.
3. При обсуждении механизма дискретной дифракции не проводится сравнения полученных в диссертации результатов с результатами других работ по исследованию спектра спиновых волн в решетках связанных волноводов. Между тем, такой анализ был бы желателен, поскольку ранее, например, в работе М. Р. Kostylev, А. А. Stashkevich, and N. A. Sergeeva, Phys. Rev. B 69, 064408 (2004) обсуждалось влияние связи на спектр ФМР решеток из микрополосок пермаллоя.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными и не влияют на общую положительную оценку диссертации и не снижают значимости полученных результатов.

Диссертационная работа Сахарова В.К. является законченным самостоятельным научным исследованием, имеет логически выстроенную структуру, содержит достаточное

количество ссылок на предшествующие научные исследования, написана понятным языком и оставляет положительное впечатление. Диссертация соответствует специальности 01.04.03 – «Радиофизика» (физико-математические науки), удовлетворяя пп. 1-3 паспорта данной специальности.

Автореферат и научные публикации в полной мере отражают содержание диссертационной работы, её суть.

Достоверность результатов и личный вклад автора не вызывают сомнений.


Результаты диссертационной работы опубликованы в 38 научных работах, из которых 13 – статьи в рецензируемых научных журналах, включенных в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и/или индексируемых в базах данных Web of Science и/или Scopus; 6 – статьи в сборниках трудов конференций; 19 – тезисы и материалы докладов на конференциях, симпозиумах, научных школах.

Из всего перечисленного можно заключить, что диссертация Сахарова В.К. «Спин-волновые возбуждения в микроструктурах на основе поликристаллических магнитных плёнок» удовлетворяет требованиям пп. 9-11, 13 и 14 действующего «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор работы, Сахаров Валентин Константинович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 – «Радиофизика».

Официальный оппонент

Профессор кафедры физической электроники и технологии СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

д-р физ.-мат. наук, доцент

 Устинов Алексей Борисович

«26» февраля 2021 г.

Подпись Устинова А.Б. удостоверяю:

Ученый секретарь совета СПбГЭТУ «ЛЭТИ»



Т.Л. Русева

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)» (СПбГЭТУ «ЛЭТИ»)

Адрес: 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 5

Телефон: +7 812 234-99-83

E-mail: ustinov-rus@mail.ru

Специальность по диссертации: 01.04.03 – «Радиофизика»