



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

Политехническая ул., 26, С.-Петербург, 194021
Телефон: (812) 297-2245 Факс: (812) 297-1017
post@mail.ioffe.ru http://www.ioffe.ru

ИНН 7802072267/КПП 780201001
ОКПО 02698463
ОГРН 1037804006998

ОТЗЫВ ОППОНЕНТА Калашниковой Александры Михайловны
на диссертационную работу Сахарова Валентина Константиновича
«Спин-волновые возбуждения в микроструктурах
на основе поликристаллических магнитных пленок»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.03 – «Радиофизика»

Диссертационная работа Сахарова В. К. посвящена изучению спин-волновых свойств ряда структур на основе поликристаллических пленок диэлектрика – железотитриевого гранта (ЖИГ) – и металлов Со и Ру (пермаллой). В работе, выполненной соискателем в Саратовском филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, представлены результаты изучения однородных магнитных возбуждений и магнитостатических волн в тонких поликристаллических пленках ЖИГ на полупроводниковых и диэлектрических подложках, а также в различных типах магнитных кристаллов и профилированных структур на основе ЖИГ и ферромагнитных металлов.

Оценка актуальности

Актуальность приведённых в данной диссертационной работе исследований обусловлена фундаментальной и практической значимостью решения проблемы создания структур для магноники на основе материалов, которые можно получать в относительно простых технологических циклах, не включающих эпитаксиальный рост. В частности, в работе большое внимание уделено проблеме использования поликристаллических пленок ЖИГ на различных подложках, в том числе на полупроводнике Si и на профилированном гадолиний-галлиевом гранате. Эпитаксиальные монокристаллические пленки ЖИГ – один из лучших материалов для магноники. Однако попытки интеграции его с полупроводниками приводят к получению поликристаллических пленок с существенно худшими магнитодинамическими свойствами. В работах соискателя, включенных в диссертацию, показано, что даже поликристаллические пленки позволяют наблюдать распространение спиновых волн, спин-волновые резонансы, эффекты невзаимности.

Структура и содержание работы

Диссертационная работа изложена на 222 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитированной литературы. Во *введении* приведена подроб-

ная информация о современном состоянии дел в области магноники, цели диссертационной работы, актуальности, научной и практической значимости работы, личном вкладе автора, апробации и достоверности полученных результатов. Убедительно обоснован выбор структур на основе поликристаллическим магнитных пленок для исследования спин-волновых свойств.

Главы с первой по четвертую являются оригинальными. *Первая глава* посвящена изучению распространения спиновых волн, возбуждаемых микроантеннами в двух поликристаллических пленках ЖИГ/Si, в которых магнитный слой состоит из буферного и основного слоев. Рассмотрены спектры ФМР этих пленок и определены, в частности, ширины линий ФМР, высказаны предположения о влиянии микроструктуры поликристаллических пленок на параметры ФМР. В главе подробно представлена методика нанесения микроантенн на указанные пленки, а также представлен обоснованный расчетами выбор параметров микроантенн. Представлены результаты детального экспериментального исследования и теоретического анализа распространения ПМСВ, их невязимости, определено влияние входной мощности на распространение ПМСВ и порогов параметрической неустойчивости. В последнем случае внимание уделено процедуре корректного определения пороговых мощностей для поликристаллических пленок ЖИГ/Si со значительным затуханием.

Во *второй главе* представлены результаты изучения ФМР, распространения магнито-статических волн в поликристаллических пленках ЖИГ на подложках ГГГ. Эти пленки рассматриваются соискателем как предельный по свойствам случай поликристаллических пленок, к которому можно стремиться при получении пленок ЖИГ на полупроводниковых подложках. В изучаемых в данной главе образцах наблюдалось распространение ПМСВ на большие расстояния (до 200 мкм), чем в случае ЖИГ/Si. Обнаружена существенная невязимость ПМСВ и на основе теоретического анализа показано, что она связана с неоднородностью состава пленки ЖИГ по толщине. Приведено подробное рассмотрение возникновения магнитоупругих волн в таких структурах.

Третья глава посвящена исследованию двухкомпонентных магнонных 1D и 2D кристаллов на основе различных ферромагнитных металлов Co и Ru и включает, в том числе, работы по изготовлению указанных магнонных кристаллов. В главе представлены результаты исследования ФМР спектров, определено соответствие особенностей в этих спектрах магнитным резонансам в элементах структур. Проведено детальное исследование процесса перемагничивания во внешнем магнитном поле и дано объяснение его особенностей с учетом независимой перестройки доменной структуры элементов. Определены величины анизотропного магнитосопротивления в таких структурах и предложена оптимальная конфигурация структуры для максимизации этого эффекта. Также рассмотрены спин-волновые свойства структуры, состоящей из пленки Ru с массивом микроэлементов Co на ней и показано наличие пространственной локализации спиновых волн в пленке Ru за счет модификации внутренних магнитных полей в ней, вызванной полями рассеяния от элементов массива.

В *четвертой главе* приведены результаты исследования структур на основе профилированных подложек ГГГ с нанесенными на них слоями ЖИГ и подложек Si с нанесенными на них слоями Ru. Изучены процессы перемагничивания, спектры ФМР, а также

распространение спиновых волн вдоль и поперек направления особенностей рельефа в структурах на основе ЖИГ/профилированный ГГГ. Изучено анизотропное магнетосопротивление в структурах $\text{Ru}/$ профилированный Si .

В конце диссертационной работы приведено *заключение*, в котором перечислены основные результаты работы, и список литературы, включающий 290 наименований.

Оценка новизны и достоверности

Все представленные в диссертационной работе экспериментальные результаты являются оригинальными и новыми на момент их опубликования соискателем в рецензируемых журналах, а их достоверность подтверждается, в том числе, детальным теоретическим (феноменологическим) анализом и микромагнитным моделированием, выполненным с использованием стандартных для таких задач пакетов OOMMF и MuMax. Среди новых результатов, полученных соискателем и представленных в диссертационной работе, следует выделить:

- Экспериментальное наблюдение распространения и значительной, до 20 дБ, взаимности ПМСВ в поликристаллических пленках ЖИГ/Si с магнитным слоем, состоящим из буферного и основного слоя, позволяющее утверждать, что подобные пленки имеют потенциал для применения в магنونике, несмотря на существенную ширину линии ФМР по сравнению с эпитаксиальными пленками ЖИГ.
- Корректное определение порогов параметрической неустойчивости ПМСВ в поликристаллических пленках ЖИГ/Si в условиях существенного влияния динамического размагничивания и СВЧ нагрева, что является важным методическим результатом.
- Выявление существенной взаимности для ПМСВ в поликристаллических пленках ЖИГ/ГГГ и установление ее связи с неоднородностью магнитных свойств таких пленок по толщине.
- Наблюдение пространственной локализации спиновых волн в пленке пермаллоя с двумерным упорядоченным ансамблем кобальтовых микроэлементов на ней.
- Демонстрация особенностей спин-волновых резонансов в относительно новом перспективном типе магнитных структур, представляющих собой профилированные подложки ГГГ с нанесенными на них магнитными пленками.

Следует также отметить большой объем работ, выполненных соискателем, по отработке технологий получения магнитных структур, использованных в некоторых из исследований.

Все результаты прошли апробацию и были представлены соискателем на российских и международных конференциях. По результатам исследований соискателя опубликовано 13 статей в рецензируемых научных журналах, включенных как в перечень ВАК и/или в международную базу Web of Science.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать к использованию в работе научных и учебных учреждений, в которых ведутся исследования по направлению магنونика, в том числе в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, СГУ, ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН,

Институте физики металлов УрО РАН, Институте физики микроструктур РАН, Российском квантовом центре, на физических факультетах МГУ им. М.В. Ломоносова, СПбГУ, ДВФУ, УрФУ и в других организациях.

Вопросы и замечания

К работе можно высказать следующие вопросы, замечания и рекомендации:

1. Во введении (стр. 5) указано, что в качестве преобразователей сигналов в спиновые волны, наиболее вероятно, будут использоваться индукционные микроантенны (МА). Однако сейчас активно исследуются альтернативные методы генерации спиновых волн, основанных, например, на интеграции микроволновых наноосцилляторов с магнитными структурами. Поэтому для обоснования сделанного предположения, соискателю следовало кратко обсудить преимущества и ограничения генерации спиновых волн с помощью МА по сравнению с другими методами.
2. В исследованиях, описанных в главе 1, объектами являлись два образца ЖИГ на кремниевых подложках с несколькими разными толщинами буферных и основных слоев, различной мозаичностью. Чем обусловлены указанные отличия?
3. На стр. 24 делается утверждение, что увеличение ширины линии ФМР для углов магнитного поля $60-70^\circ$ связано с «разбеганием» откликов основного и буферного слоев. На мой взгляд, это утверждение требует дополнительного пояснения относительно того, почему увеличение разницы между полями ФМР для двух слоев приводит к указанным изменениям ширины линии ФМР.
4. Наличие полупроводниковой подложки в структуре ЖИГ/Si может оказывать влияние на дисперсию спиновых волн, как отмечено на стр. 19. В то же время, при анализе эффекта невзаимности распространения спиновых волн в таких структурах соискатель не учитывает наличие полупроводниковой подложки. Насколько это обосновано? В работе использовалась подложка Si n-типа. Чем был обусловлен такой выбор?
5. При рассмотрении модели, описывающей эффект невзаимности ПМСВ в ЖИГ/Si (стр. 44-46), рассматривается ситуация, когда отсутствует закрепление поверхностных спинов на границе раздела ЖИГ/воздух, а закрепление на остальных границах раздела одинаково. Такая модель выбрана исключительно на основе наилучшего согласия с экспериментом, или есть физические основания сделать именно такое предположение?
6. В зависимости ширины линий ФМР от угла поля для поликристаллических пленок ЖИГ/ГГГ (рис. 2.4) обращает на себя внимание качественное отличие зависимостей при больших углах поля для двух изучаемых пленок. В частности, для образца Y4 наблюдается пик в ширине линии при углах поля $70-80^\circ$, а в образце Y3 такой пик полностью отсутствует. С чем могут быть связаны указанные отличия?
7. На основании каких критериев были выбраны размеры ячеек в микромагнитном моделировании динамики в ЖИГ/ГГГ, описанном в разделе 2.7? Как размеры ячеек соотносились с обменной длиной для ЖИГ?
8. На Рис. 3.21 представлены МСМ изображения структуры Co/Pu, полученные при разных внешних магнитных полях, соответствующих насыщению структуры и проме-

жуточным состояниям. На мой взгляд, необходимо пояснение, каким образом в МСМ детектировалась намагниченность полосок, ориентированная в плоскости. Использовался соответствующим образом намагниченный зонд? Также требует пояснения наличие контраста в МСМ изображениях между полосками Co и Pu в насыщении, и почему этот контраст наблюдается только в поле 49 Э , а в поле -47 Э отсутствует.

9. В разделе 3.7 рассматривается пространственная локализация спиновых волн в пленке Pu с упорядоченным ансамблем элементов Co . Какую роль в такой локализации играет геометрическая форма элементов Co ? Можно ли ожидать подобный эффект в случае эллиптической или сферической формы этих элементов?

10. В ряде исследованных структур на основе ферромагнитных металлов показано наличие анизотропного магнитосопротивления, величина которого не превышала 1%. Можно ли предложить подходы для увеличения эффекта в подобных структурах?

11. Можно высказать рекомендацию к представлению результатов. На многих рисунках в диссертации приведены данные для разных образцов, что обусловлено логикой описания полученных результатов. Однако соискателем выбран, на мой взгляд, не самый удачный подход к формированию подписей к рисункам и пояснительных надписей на рисунках, что несколько осложняет восприятие представленных данных. В частности, можно порекомендовать указывать название образца непосредственно на соответствующих панелях.

Перечисленные выше вопросы и замечания не снижают высокой оценки оппонентом научной ценности данной диссертационной работы и не ставят под сомнение достоверность приведенных в работе результатов и выводов.

Заключение

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, обладает четкой структурой, свидетельствует о личном вкладе автора в развитие науки. Значительный объем данных, представленных в диссертационной работе, получен в результате применения современных технологических методов изготовления магнитных структур, комбинации методов исследования их статических и динамических магнитных свойств, а также методов микромагнитного моделирования. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с основными концепциями, принятыми в настоящее время в физике спиновых волн.

В автореферате четко сформулированы цель и актуальность работы, описаны методы исследования, приведена информация о достоверности полученных результатов, изложены научная новизна и практическая значимость работы, приведена информация о личном вкладе соискателя, указаны научные положения, выносимые на защиту, приведена информация об апробации работы, описаны структура и объем диссертации, краткое содержание работы по главам, основные результаты и выводы диссертационной работы. Автореферат адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы имеют важное фундаментальное и практическое значение. Выводы и рекомендации достаточно обоснованы.

