

ОТЗЫВ официального оппонента

Ринкевича Анатолия Брониславовича на диссертационную работу Изотова Андрея Викторовича «Магнитная анизотропия и динамика намагниченности нанокристаллических тонких пленок для СВЧ-приложений», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12. «Физика магнитных явлений»

Диссертационная работа Изотова А.В. посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию природы магнитного состояния нанокристаллических тонких металлических пленок и изучению возможности создания на их основе компонентов электронных устройств для СВЧ-приложений. Нанокристаллические тонкие магнитные пленки в настоящее время являются актуальным объектом исследований и рассматриваются как перспективные материалы, привлекающие своеобразием магнитных свойств и новыми возможностями их использования. Актуальность исследования нанокристаллических пленок обусловлена, прежде всего, востребованностью магнитомягких материалов с малыми потерями в СВЧ диапазоне для их использования при конструировании устройств электроники с перестраиваемыми характеристиками, а также в относительно новых развивающихся в настоящее время направлениях микро- и наноэлектроники: спинтроники и магноники. Помимо экспериментальных исследований, существует необходимость разработки аналитических и микромагнитных методов описания свойств нанокристаллических пленок. В этой связи диссертационная работа соискателя является, безусловно, интересной, важной и актуальной.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, двух приложений и списка цитируемой литературы. Общий объем диссертационной работы составляет 296 страниц, в том числе 91 рисунок и 12 таблиц.

Во введении показана актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, приведены защищаемые положения, определены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

Первая глава носит обзорный характер и посвящена анализу характеристик СВЧ-магнитных материалов и предъявляемых к ним требованиям.

Во второй главе диссертации, посвященной экспериментальным высокочастотным методам исследования нанокристаллических тонких пленок, приводится описание двух разработанных спектрометров ФМР. Описана

методика определения параметров магнитной анизотропии и других характеристик пленок из угловых зависимостей резонансного поля.

В третьей главе рассмотрены разработанные соискателем численные методы расчета структуры и характеристик магнитных пленок, а также представлена программа для ЭВМ, позволяющая изучать статические и высокочастотные свойства нанокристаллических тонких магнитных пленок. Проанализированы достоинства и недостатки этих методов, а также особенности их применения.

Четвертая глава диссертации посвящена изучению связи между размером кристаллитов и магнитными свойствами нанокристаллических тонких пленок. Приводятся результаты экспериментального исследования эффекта резкого уширения и смещения линии ФМР в нанокристаллических пленках пермаллоя и проводится сопоставление с результатами микромагнитного моделирования.

В пятой главе теоретическими и экспериментальными методами исследовано влияние неоднородных упругих напряжений и деформаций на магнитную анизотропию нанокристаллических тонких пленок. Представлены результаты исследований обнаруженной в нанокристаллической тонкой пленке пермаллоя однонаправленной магнитной анизотропии, индуцированной неоднородными деформациями.

Шестая глава посвящена изучению влияния периодической текстуры подложки и наклонного осаждения атомов на магнитную анизотропию и СВЧ-свойства нанокристаллических пленок. Продемонстрированы возможности нового оригинального метода изготовления пленок с периодически модулированной структурой за счет формирования алмазным резцом параллельных рисок на поверхности подложки.

Седьмая глава посвящена разработке новой конструкции магнитометра слабых переменных магнитных полей на основе микрополоскового преобразователя с нанокристаллической тонкой магнитной пленкой. Показана возможность значительного улучшения характеристик магнитометра за счет оптимизации параметров нанокристаллических пленок. В конце каждой главы приводятся краткие выводы. В заключении сформулированы основные результаты работы.

В целом, материал диссертации изложен на высоком научном уровне. Работа хорошо структурирована, текст диссертации написан ясным и понятным языком. Автореферат полностью отражает содержание и структуру диссертации. Анализ диссертационной работы и публикаций автора свидетельствуют об обоснованности научных положений, выносимых автором на публичную защиту, а также выводов, сделанных автором по результатам исследований.

В работе получен ряд новых важных в научном и прикладном плане результатов. На мой взгляд, некоторые из них имеют существенное значение и представляют особый интерес, а именно:

1. С помощью микромагнитного моделирования был выявлен, а затем экспериментально обнаружен эффект резкого уширения и смещения линии ФМР, возникающий в нанокристаллических пленках с размером кристаллитов, превышающим некоторое пороговое значение.
2. Получена и решена система из двух связанных нелинейных уравнений, определяющих условие равновесия намагниченности и условие ФМР однородно намагниченной в плоскости анизотропной магнитной пленки.
3. Разработана микромагнитная модель нанокристаллического ферромагнетика, которая позволяет рассчитывать статические и динамические свойства. Разработана феноменологическая модель магнитной анизотропии тонкой пленки в виде разложения в ряд Фурье по азимутальному углу намагниченности. Реализована методика определения параметров модели из измеренных угловых зависимостей резонансного поля.
4. Изучены двухмагنونные процессы рассеяния, в том числе в пленках со специально внесенными неоднородностями. Предложен метод создания периодической текстуры на поверхности подложки с периодом до 5 мкм с помощью алмазного резца.
5. Разработан магнитометр слабых квазистационарных и высокочастотных полей, который отличается высокой чувствительностью, широким динамическим и частотным диапазоном измеряемых магнитных полей, надежностью и небольшим энергопотреблением.

Новизна полученных результатов и научных положений, выносимых на защиту, не вызывают сомнения. Достоверность полученных в работе результатов подтверждается согласием теории и эксперимента, а также согласием с ранее опубликованными данными. В работе представлено теоретическое обоснование предлагаемых моделей, методов и алгоритмов расчета. Экспериментальные исследования проведены с использованием современных и апробированных методик на высокоточных приборах и установках. Эксперименты тщательно спланированы и выполнены, их интерпретация хорошо аргументирована.

Результаты работы имеют большое практическое значение для различных областей микроэлектроники, особенно связанных с созданием новых магнитоэлектронных устройств в диапазоне СВЧ. Был разработан и запатентован

магнитометр слабых квазистационарных и высокочастотных полей, который в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства внедрен в производство на предприятии АО «НПП «Радиосвязь» г. Красноярск. Разработана компьютерная программа для определения локальных магнитных параметров тонких магнитных пленок, которая вошла в состав программного обеспечения разработанного в ИФ СО РАН уникального сканирующего спектрометра ФМР.

Результаты работы можно рекомендовать для использования в организациях, занимающихся как разработкой новых тонкопленочных магнитных материалов, так и ведущих исследования в области материаловедения, магнитной памяти, магнитных сенсоров, спинтроники, магноники, таких как МГУ им. М. В. Ломоносова (г. Москва), Сибирский, Дальневосточный и Уральский федеральные университеты, Томский, Новосибирский и Тверской государственные университеты, Институт Физики им. Л.В. Киренского СО РАН (г. Красноярск), Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (г. Москва), Институт теоретической и прикладной электродинамики РАН (г. Москва).

Вместе с тем по диссертации необходимо сделать ряд замечаний.

1. В диссертации изучается магнитная проницаемость пленок в разных условиях, в том числе в магнитном поле, а также в анизотропных средах. Не учитывается, что в этих случаях магнитная проницаемость является тензорной величиной.
2. При описании величины параметра затухания в пленках с нанесенной системой периодических неоднородностей на стр.190,191 присутствует явная путаница. Сначала из данных рис.6.9 делается вывод, “что уменьшение периода текстуры подложки приводит к пропорциональному снижению уровня затухания магнитных колебаний”. Затем приводятся данные рис.6.10 и делается противоположный вывод: “Из рисунка видно, что чем меньше период модуляции l , тем выше общий уровень затухания в пленке”. Там же дается пояснение, что так и должно быть, так как чем больше неоднородностей, тем больше должно быть затухание. Далее в тексте автор возвращается к первому заключению, что “наблюдается снижение параметра затухания с уменьшением l ”, т.е. периода. Что же происходит на самом деле? Очень неплохо было бы на рис.6.10 представить данные для пленки вообще без периодических неоднородностей.

3. В главе 7 дается краткий обзор характеристик и особенностей датчиков слабых магнитных полей. Это полезно и позволяет определить область применения микрополоскового датчика, описанного в диссертации. К сожалению, в этом кратком обзоре не говорится о датчиках Холла и датчиках на гигантском магниторезистивном эффекте. А ведь эти датчики по массогабаритным характеристикам и простоте устройств питания датчика имеют преимущества над многими другими типами.
4. На стр.14 утверждается, что “в низкочастотном диапазоне вплоть до $\sim 10^5$ – 10^6 Гц поведение магнитных материалов, как правило, не зависит от частоты внешнего переменного магнитного поля”. Разумеется, существует много примеров, когда это утверждение неверно.
5. В тексте есть неудачно написанные фразы. Вот несколько примеров.

“Рост частоты ФМР f_0 приводит к снижению статической магнитной проницаемости μ_s , и наоборот”. Конечно, статическая магнитная проницаемость зависит от состава, температуры, термообработки и др. Ее нельзя изменить частотой ФМР.

“Планарное магнитное поле, создаваемое кольцами Гельмгольца”. Вообще-то кольцами Гельмгольца создается магнитное поле с высокой однородностью, а не “планарное”.

“Магнитная проницаемость полученных образцов была измерена с помощью широкополосного спектрометра ФМР”. Спектрометр ФМР напрямую не измеряет магнитную проницаемость.

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

Таким образом, диссертационная работа Изотова А.В. представляет собой полностью законченную научно-квалификационную работу, выполненную на актуальную тему. Диссертационная работа обладает внутренним единством и содержит новые научные результаты и положения, совокупность которых можно классифицировать как крупное достижение в области физики магнитных явлений. Автором получен целый ряд важных для науки и техники новых научных результатов, а также предложены и внедрены новые технические решения. Соискатель в полной мере проявил свою широкую научную эрудицию и высокую квалификацию как в экспериментальных, так и теоретических исследованиях.

В целом, диссертационная работа «Магнитная анизотропия и динамика намагниченности нанокристаллических тонких пленок для СВЧ-приложений» по своей актуальности, научному уровню, объему решаемых задач, целостности и завершенности исследований отвечает всем критериям, предъявляемых к докторским диссертациям согласно пп. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. Содержание диссертации соответствует отрасли физико-математических наук пунктам 2–7 паспорта специальности 1.3.12. «Физика магнитных явлений».

Считаю, что соискатель Изотов Андрей Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Ринкевич Анатолий Брониславович

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, старший научный сотрудник, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник лаборатории квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук.

Адрес: 620108, РФ, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18.

Тел.: +7 (343) 374-02-30; +7 922 60 777 08,

Факс: +7 (343) 374-52-44,

e-mail: rin@imp.uran.ru

« 24 » апреля 2023 г.



/Ринкевич А.Б./

Подпись главного научного сотрудника лаборатории квантовой наноспинтроники ФГБНУ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, д.ф.-м.н., член-корреспондента РАН Ринкевича Анатолия Брониславовича ЗАВЕРЯЮ:

Ученый секретарь ФГБНУ Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН



/Арапова И.Ю. /

Сведения об официальном оппоненте

Ринкевич Анатолий Брониславович, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния, старший научный сотрудник, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник лаборатории квантовой наноспинтроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, 620108, Российская Федерация, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, д. 18; тел.: +7 (343) 374-02-30; +7 922 60 777 08, факс: +7 (343) 374-52-44, e-mail: rin@imp.uran.ru

Ринкевич А.Б. является специалистом в области физики конденсированного состояния вещества, магнетизма и нанотехнологий, и имеет следующие основные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за 2019-2023 гг.:

1. Микроволновой гигантский магниторезистивный эффект, ферромагнитный и спин-волновой резонансы в наноструктурах (CoFe)/Cu / В. В. Устинов, А. Б. Ринкевич, И. Г. Важенина, М. А. Миляев // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 158. – № 1(7). – С. 139-150.
2. Enhancement of microwave giant magnetoresistance effect in reflected wave / A. B. Rinkevich, D. V. Perov, E. A. Kuznetsov [et al.] // Applied Physics Letters. – 2022. – Vol. 120. – № 23. – P. 233502.
3. Microwave Giant Magnetoresistance in [CoFe/Cu]_n Superlattices with Record-High Magnetoresistance / A. B. Rinkevich, Ya. A. Pakhomov, E. A. Kuznetsov [et al.] // Technical Physics Letters. – 2019. – Vol. 45. – № 3. – P. 225-227.
4. Microwave refraction coefficient of composite with flakes of Fe-Si -Nb-Cu-B alloy / A. B. Rinkevich, Y. I. Ryabkov, D. V. Perov, O. V. Nemytova // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2021. – Vol. 529. – P. 167901.
5. Nemytova O. V. AC magnetic susceptibility of nanocomposites with Co-Pd particles / O. V. Nemytova, A. B. Rinkevich, D. V. Perov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2022. – Vol. 546. – P. 168902.
6. Rinkevich A. B. Transmission, Reflection and Dissipation of Microwaves in Magnetic Composites with Nanocrystalline Finemet-Type Flakes / A. B. Rinkevich, D. V. Perov, Y. I. Ryabkov // Materials. – 2021. – Vol. 14. – № 13. – P. 3499.
7. Микроволновой гигантский магниторезистивный эффект в сверхрешетках [CoFe/Cu]_n с рекордным магнитосопротивлением / А. Б. Ринкевич, Я. А. Пахомов, Е. А. Кузнецов [и др.] // Писма в журнал технической физики. – 2019. – Т. 45. – № 5. – С. 42.

8. Микроволновой магниторезистивный эффект в сверхрешетке (CoFe/Cu) с отверстиями микронных размеров / А. Б. Ринкевич, М. А. Миляев, Е. А. Кузнецов [и др.] // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – № 4. – С. 608.
9. Невзаимность в распространении микроволн в системе [(CoFe)/Cu]/(glass) / А. Б. Ринкевич, Д. В. Перов, М. А. Миляев, Е. А. Кузнецов // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – № 12. – С. 1919.
10. Перов Д. В. Динамическая магнитная проницаемость композитных сред с несферическими ферромагнитными частицами / Д. В. Перов, А. Б. Ринкевич // Физика металлов и металловедение. – 2022. – Т. 123. – № 2. – С. 151-157.
11. Перов Д. В. Частотная зависимость микроволнового гигантского магниторезистивного эффекта в магнитных металлических наноструктурах / Д. В. Перов, А. Б. Ринкевич // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120. – № 4. – С. 360-365.
12. Прохождение микроволн через магнитные металлические наноструктуры / А. Б. Ринкевич, Е. А. Кузнецов, М. А. Миляев [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2020. – Т. 121. – № 12. – С. 1239-1270.
13. Ринкевич А. Б. Ферромагнитный резонанс и межслоевое обменное взаимодействие в сверхрешетках (Fe/Cr)_n / А. Б. Ринкевич, М. А. Миляев, Л. Н. Ромашев // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120. – № 3. – С. 266-272.
14. Ринкевич А. Б. Магнитная восприимчивость нанокompозитных редкоземельных титанатов в переменных полях / А. Б. Ринкевич, Д. В. Перов // Физика твердого тела. – 2020. – Т. 62. – № 12. – С. 2062.
15. Ринкевич А. Б. Определение эффективной магнитной проницаемости нанокompозитных сред / А. Б. Ринкевич, Д. В. Перов // Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки. – 2021. – Т. 499. – № 1. – С. 22-24.

Не является членом экспертного совета ВАК.

« 24 » апреля 2023 г.

Ученый секретарь ФГБНУ Институт физики

металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН

/ Арапова И.Ю. /

