

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.228.01, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО НАУЧНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ «ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КРАСНОЯРСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК» (ФИЦ КНЦ СО РАН, КНЦ СО РАН), ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 26.05.2023 г. № 7
о присуждении Изотову Андрею Викторовичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Магнитная анизотропия и динамика намагниченности нанокристаллических тонких пленок для СВЧ-приложений» по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений принята к защите 17.02.2023 г. (протокол заседания № 2) диссертационным советом 24.1.228.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), 660036, Красноярск, Академгородок, д. 50, приказ Минобрнауки № 1513/нк от 25.11.2016.

Соискатель Изотов Андрей Викторович, 26 апреля 1974 года рождения, диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Исследование восприимчивости и магнитных неоднородностей тонких пленок методом ферромагнитного резонанса» по специальности 01.04.11 – «Физика магнитных явлений» защитил в 2004 году в диссертационном совете Д 003.055.02, созданном на базе Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН. Работает старшим научным сотрудником в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН), обособленное подразделение «Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФ СО РАН).

Диссертация выполнена в лаборатории электродинамики и СВЧ электроники ИФ СО РАН.

Научный консультант – доктор технических наук, профессор, *Беляев Борис Афанасьевич*, Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН, заведующий лабораторией электродинамики и СВЧ электроники.

Официальные оппоненты:

Ринкевич Анатолий Брониславович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории квантовой наноспинтроники;

Курляндская Галина Владимировна, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», профессор-исследователь кафедры магнетизма и магнитных наноматериалов;

Самардак Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет», проректор по научной работе, профессор Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоемких технологий и передовых материалов;

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН), г. Москва, в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук, ведущим научным сотрудником лаборатории магнитных явлений в микроэлектронике Коледовым Виктором Викторовичем и кандидатом физико-математических наук, заведующим лабораторией магнетонной спинтроники Калябиным Дмитрием Вла-

димировичем, утвержденным директором ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН, академиком РАН Никитовым Сергеем Аполлоновичем, указала, что диссертация А.В. Изотова выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную, научно-квалификационную работу, вносящую заметный вклад в развитие актуального научного направления, связанного с изучением свойств магнитомягких нанокристаллических пленок и возможностей их применения в качестве магнитных компонентов СВЧ-устройств.

Соискатель имеет 159 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 115 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 43 работы, в том числе: ФТТ – 5 (работ), Письма в ЖЭТФ – 3, Успехи современной радиоэлектроники – 2, Письма в ЖТФ – 1, ПТЭ – 1, Russ. Phys. J. – 10, Physica B – 4, J. Magn. Magn. Mater. – 3, Solid State Phenomena – 2, Phys. Rev. B – 1, J. Alloy. Compd. – 1, J. Phys. D: Appl. Phys. – 1, Phys. Status Solidi RRL – 1, IEEE Sens. J. – 1, J. Phys.: Condens. Matter. – 1, Mater. Res. Express – 1 и др. Также по теме диссертации имеется 8 патентов РФ и 9 свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ в Роспатенте. Все работы посвящены теоретическому и экспериментальному исследованию природы магнитного состояния нанокристаллических тонких магнитных пленок и изучению возможности создания на их основе компонентов электронных устройств для СВЧ-приложений. Общий объем работ, опубликованных в рецензируемых журналах 30 усл.-печ. л.

Наиболее значимые работы: 1. Izotov, A.V. Ferromagnetic resonance line broadening and shift effect in nanocrystalline thin magnetic films: Relation with crystalline and magnetic structure / A.V. Izotov, B.A. Belyaev, N.M. Boev, A.V. Burmitskikh, G.V. Skomorokhov, S.M. Zharkov, P.N. Solovev // J. Alloy. Compd. – 2022. – Vol. 900 – P. 163416. 2. Izotov, A.V. Tailoring the microwave properties of thin Permalloy films using a periodically grooved substrate / A.V. Izotov, B.A. Belyaev, N.M. Boev, A.V. Burmitskikh, A.A. Leksikov, G.V. Skomorokhov, P.N. Solovev // Physica B. – 2022. – Vol. 629 – P. 413654. 3. Izotov, A.V. Grain-size dependence of magnetic microstructure and high-frequency susceptibility of nanocrystalline thin films: A micromagnetic simulation study / A.V. Izotov, B.A. Belyaev, P.N. Solovev, N.M. Boev // J. Magn.

Magn. Mater. – 2021. – Vol. 529 – P. 167856. 4. Belyaev, B.A. Strain-gradient-induced unidirectional magnetic anisotropy in nanocrystalline thin permalloy films / B.A. Belyaev, A.V. Izotov, P.N. Solovev, N.M. Boev // Phys. Status Solidi RRL. – 2020. – Vol. 14, № 1. – P. 1900467. 5. Belyaev, B.A. Experimental study of the magnetic characteristics of nanocrystalline thin films: The role of edge effects / B.A. Belyaev, A.V. Izotov, G.V. Skomorokhov, P.N. Solovev // Mater. Res. Express. – 2019. – Vol. 6, № 11. – P. 116105. 6. Izotov, A.V. Numerical calculation of high frequency magnetic susceptibility in thin nanocrystalline magnetic films / A.V. Izotov, B.A. Belyaev, P.N. Solovev, N.M. Boev // Physica B. – 2019. – Vol. 556 – P. 42-47. 7. Бабицкий, А.Н. Магнитометр слабых полей на резонаторном микрополосковом преобразователе с тонкими магнитными пленками / А.Н. Бабицкий, Б.А. Беляев, Г.В. Скоморохов, А.В. Изотов, Р.Г. Галеев // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41, № 7. – С. 36-44. 8. Беляев, Б.А. Микромагнитный расчет равновесного распределения магнитных моментов тонких пленок / Б.А. Беляев, А.В. Изотов, Ан.А. Лексиков // ФТТ. – 2010. – Т. 52, № 8. – С. 1549-1556. 9. Belyaev, B.A. Magnetic imaging in thin magnetic films by local spectrometer of ferromagnetic resonance / B.A. Belyaev, A.V. Izotov, A.A. Leksikov // IEEE Sens. J. – 2005. – Vol. 5, № 2. – P. 260-266. 10. Беляев, Б.А. Особенность высокочастотной восприимчивости тонких магнитных пленок с одноосной анизотропией / Б.А. Беляев, А.В. Изотов, С.Я. Кипарисов // Письма в ЖЭТФ. – 2001. – Т. 74, № 4. – С. 248-252.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы (все положительные):

Ведущая организация (ИРЭ им. В.А.Котельникова РАН). Отзыв положительный. Замечания: 1) В третьей главе модель нанокристаллического ферромагнетика была построена на основе выражения энергии (3.1), в котором для описания локальной случайной анизотропии используется член одноосной магнитной анизотропии со случайным направлением ОЛН. В то же время беспорядочно ориентированные кристаллиты в ферромагнитных сплавах, как правило, характеризуются не одноосной, а кубической магнитокристаллографической анизотропией. Насколько оправдан выбор такой теоретической модели, и как изменятся результаты расчета при переходе от одноосной к кубической симметрии магнитной ани-

зотропии кристаллитов? 2) В разделе 5.2, при исследовании природы однонаправленной магнитной анизотропии в неоднородно деформированной нанокристаллической пермаллоевой пленке измерения проводились в относительно малых полях внешнего магнитного поля. По этой причине образец пленки потенциально мог находиться в не полностью насыщенном состоянии. Неоднородная намагниченность, а также возникающие из-за изгиба «магнитные заряды» на искривленной поверхности пленки могут служить потенциальным источником магнитной анизотропии, неучтенной в диссертационной работе. 3) В теоретической модели магнитной пленки на периодически текстурированной подложке (раздел 6.1.3) используется прямоугольная форма рисок (канавок). Насколько адекватно описывает рассмотренная в диссертации теоретическая модель свойства реальных, экспериментально полученных образцов?

Д.ф-м.н. Ринкевич А.Б. – официальный оппонент. Отзыв положительный.
Замечания: 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) 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. 3) 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.

Д.ф-м.н. Курляндская Г.В. – официальный оппонент. Отзыв положительный.
Замечания: 1) Практическое изложение работы оставляет желать лучшего. Материала слишком много (7 глав и 2 приложения). В ряде глав преобладает уклон в инженерный подход и стиль изложения, который допустим, но не является удачным.

Так, например, разработка и регистрация программы «MultiLayer» — это полезное дополнение, но не предмет для выводов в докторской диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12. «Физика магнитных явлений», а вывод «Предложен оригинальный метод создания с помощью алмазного резца параллельной периодической текстуры...» вызывает удивление для работы на соискание степени доктора физико-математических наук.

2) Фактически в работе нет методической главы (в каждой главе есть некоторые методические комментарии), поэтому нет и списка/таблицы использованных образцов с обоснованием выбора состава и особенностей геометрии. 3) Понятие «нанокристаллическая пленка» нигде точно не определено, как и понятие многослойной пленочной структуры — в том виде, как это обычно делается в работах по физике магнитных явлений. 4) В автореферате есть утверждение о том, что «достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается соответствием экспериментальным и теоретическим результатам, представленным в открытой печати другими исследователями». В тексте такие сравнения даны в крайне урезанном объеме.

Д.ф-м.н. Самардак А.С. — официальный оппонент. Отзыв положительный.

Замечания: 1) Во второй главе диссертации рассмотрена предложенная соискателем методика определения магнитных параметров тонких пленок. Методика построена на основе теоретической модели однородно намагниченной пленки. Однако экспериментальные образцы могли находиться в ненасыщенном состоянии и иметь доменную магнитную структуру, а сама методика приводит к неверным результатам. Считаю, что автору стоило бы более подробно остановиться на этом вопросе и аргументировано обосновать достоверность полученных с помощью этой методики результатов. 2) В Главе 4 представлены результаты микромагнитного моделирования нанокристаллических пленок, проведено сравнение с экспериментальными данными. Толщина изучаемых пленок ограничена наименьшим заданным размером зерна — 12 нм. Как известно, для широкого ряда практических применений в новом поколении электроники требуются магнитные слои субатомарных и атомарных толщин, поскольку на таких масштабах ярко проявляются спин-

зависимые эффекты и спин-волновые свойства. В диссертационной работе не удалось обнаружить объяснения такого ограничения по толщине. 3) Диссертационная работа имеет название «Магнитная анизотропия и динамика намагниченности нанокристаллических тонких пленок для СВЧ-приложений», подразумевая исследование тонких пленок из разных магнитных материалов, но по факту изучались только пленки пермаллоя с небольшой вариацией атомарного состава.

Д.ф-м.н. Вызулин С.А. Отзыв положительный. Замечания: 1) Во второй главе работы приводится описание разработанной соискателем методики определения магнитных параметров тонких пленок из угловых зависимостей резонансного поля ФМР. При этом автор ограничился рассмотрением только случая, когда вектор намагниченности лежит в плоскости пленки. Возникает закономерный вопрос. С чем связано такое ограничение, и можно ли использовать предложенную методику для внеплоскостных (out-of-plane) измерений? 2) В четвертой главе, посвященной изучению влияния размера кристаллитов на высокочастотные свойства нанокристаллических пленок, на рисунках 4(а) и 5(а) приводится зависимость «уширения линии ФМР» от резонансной частоты. Однако в тексте автореферата не раскрывается сам смысл понятия «уширения линии ФМР». 3) На рисунке 8 (а) схематично показано изображение устройства для создания контролируемой деформации подложки с пленкой. Однако не совсем понятно, как с помощью такого устройства обеспечить изгиб, т.е. смещение свободного края подложки всего на 140 мкм (как указано в автореферате)? С какой точностью можно обеспечить такой изгиб?

Д.ф-м.н. Семиров А.В. Отзыв положительный, замечаний нет.

Д.т.н. Дунаевский Г.Е. Отзыв положительный, замечаний нет.

Д.ф-м.н. Филимонов Ю.А. Отзыв положительный, замечаний нет.

Д.ф-м.н. Розанов К.Н., к.ф.-м.н. Маклаков С.С. Отзыв положительный, замечаний нет.

Д.ф-м.н. Камилов И.К. Отзыв положительный, замечаний нет.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается строгим соответствием направлений научных исследований, выполняемых оппонентами и реализуемых в ведущей организации, тематике представленной диссер-

тационной работы, наличием публикаций и высоких достижений в соответствующей области исследований.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- существенно усовершенствован метод расчета характеристик ферромагнитного резонанса анизотропных тонких пленок;
- разработана программная реализация дискретной микромагнитной модели нанокристаллического ферромагнетика, которая позволила выполнить расчеты статических и высокочастотных свойств нанокристаллических тонких магнитных пленок;
- установлено, что в нанокристаллических тонких магнитных пленках с размером кристаллитов выше порогового значения возникает эффект резкого уширения и смещения линии ферромагнитного резонанса, связанный с рассеянием спиновых волн на квазипериодической магнитной структуре – «ряби» намагниченности;
- доказана флексомагнитная природа однонаправленной магнитной анизотропии, впервые обнаруженной в неоднородно деформированной нанокристаллической тонкой пермаллоевой пленке;
- предложен способ управления магнитной анизотропией тонкой магнитной пленки за счет ее осаждения на текстурированные алмазным резцом подложки;
- разработана новая конструкция датчика слабых квазистационарных и высокочастотных магнитных полей, построенная на основе микрополоскового резонатора с многослойной тонкопленочной магнитной структурой.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что в нем реализованы новые методы расчета статических и высокочастотных свойств нанокристаллических тонких магнитных пленок; на основе численного моделирования и анализа двухмагнетонной модели рассеяния спиновых волн изучена природа формирования эффекта резкого уширения и смещения линии ферромагнитного резонанса; получены аналитические формулы для расчета планарного и ортогонального поля магнитной анизотропии тонкой пленки с пространственно модулированным периодическим профилем.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что разработанная для определения магнитных параметров тонких пленок программа «FMR-analysis» вошла в состав программного обеспечения сканирующего спектрометра ферромагнитного резонанса; разработанная программа «MultiLayers» используется в ИФ СО РАН для проведения численного моделирования и исследования магнитной микроструктуры, петель магнитного гистерезиса, а также высокочастотных свойств магнитных нано- и гетероструктур. Определены перспективы использования на практике способа управления магнитной анизотропией тонкой магнитной пленки за счет ее осаждения на текстурированные алмазным резцом подложки. Разработанный магнитометр слабых квазистационарных и высокочастотных полей в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства внедрен в производство на предприятии АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск).

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что в работе выполнено корректное, достаточно полное теоретическое обоснование всех предлагаемых моделей, методов и алгоритмов расчета; теоретические результаты и выводы носят ясный, непротиворечащий опубликованным работам характер. Экспериментальные исследования проведены с использованием современных и апробированных методик на высокоточных приборах и установках; достоверность полученных результатов подтверждается согласием теории и эксперимента; они не противоречат экспериментальным и теоретическим данным других исследователей, опубликованным в открытой печати.

Личный вклад соискателя состоит в постановке цели и задач исследования, разработке и реализации экспериментальной методики определения параметров магнитных тонких пленок, разработке численных методов и программы микромагнитного моделирования, создании теоретических моделей и проведении расчетов магнитной анизотропии наклонно осажденных тонких пленок, упруго-напряженных пленок, а также пленок, осажденных на периодически текстурированные подложки, формулировке основных выводов и положений, выносимых на защиту, подготовке результатов к публикации.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

На заседании 26 мая 2023 г. диссертационный совет сделал вывод о том, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая по совокупности полученных новых научных результатов и разработанных теоретических положений можно квалифицировать как крупное научное достижение в области физики магнитных явлений, и принял решение присудить Изотову Андрею Викторовичу ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 16 человек, из них 8 докторов физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений, участвовавших в заседании, из 20 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 16, против присуждения ученой степени – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель

диссертационного совета 24.1.228.01

д.ф.-м.н., академик РАН



Шабанов Василий
Филиппович

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.1.228.01

д.ф.-м.н., с.н.с.

Втюрин Александр
Николаевич

26 мая 2023 года