ОТЗЫВ

официального оппонента 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»

Актуальность темы диссертации

В настоящее время большой интерес исследователей в России и за рубежом к нанокристаллическим тонким магнитным пленкам связан, в первую очередь, с возможностью создания на их основе новой элементной базы микро- и наноэлектроники. В частности, требуются магнитные материалы, обладающие достаточно высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на сверхвысоких частотах. Такие материалы перспективны для их использования в качестве активных сред в планарных конструкциях СВЧ устройств с электрически управляемыми характеристиками. На их основе может быть построена новая магнитоэлектронная элементная база для систем связи, радиолокации, радионавигации и специальной радиоаппаратуры. Однако практическая реализация СВЧ устройств на основе нанокристаллических магнитных пленок требует решения ряда проблем, главная из которых связана с установлением фундаментальной связи между наноструктурой и магнитными поведением таких материалов. Поэтому диссертационная работа Изотова А.В., направленная на развитие фундаментальных знаний о природе магнитного состояния нанокристаллических тонких пленок и изучение возможностей создания на их основе магнитных компонентов электронных устройств с требуемыми для СВЧ-приложений характеристиками, является, безусловно, актуальной.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Представленная диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, двух приложений и списка используемых источников, включающего 346 наименований. Общий объем работы составляет 296 страниц, включая 91 рисунок и 12 таблиц.

Во введении дана общая характеристика диссертации: обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, определена научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Первая глава носит обзорный характер и посвящена общим характеристикам СВЧ-магнитных материалов и предъявляемым к ним требованиям. Вторая глава диссертации посвящена экспериментальным методам исследования магнитных характеристик нанокристаллических тонких пленок в СВЧ-диапазоне. В третьей главе представлены разработанные численные методы и программа для ЭВМ, предназначенные для изучения статических и высокочастотных свойств нанокристаллических тонких магнитных пленок. Четвертая глава диссертации посвящена установлению связи между размером кристаллитов и магнитными свойствами нанокристаллических тонких пленок. В пятой главе теоретически и экспериментально исследована природа формирования магнитной анизотропии нанокристаллических тонких пленок под воздействием неоднородных упругих напряжений и деформаций. Шестая глава посвящена изучению влияния текстуры подложки и наклонного осаждения атомов на формирование магнитных свойств нанокристаллических пленок. В седьмой главе диссертации рассмотрены вопросы оптимизации параметров новой конструкции магнитометра слабых магнитных полей, построенной на основе резонансной микрополосковой структуры с нанокристаллическими тонкими магнитными пленками. В заключении сформулированы основные результаты работы.

Каждая глава диссертационной работы является, по сути, самостоятельным исследованием, содержащим соответствующий обзор литературы, постановку проблемы и цели, а также научный результат. Вместе с тем, необходимо отметить неразрывную связь между главами диссертации и ее внутреннее единство, что позволяет квалифицировать работу как законченное научное исследование. Выводы, сделанные автором из полученных данных, представляются вполне обоснованными и четко сформулированными.

Оценка новизны и достоверности научных положений и результатов диссертации

Анализ диссертационной работы показывает, что в ней содержится ряд новых результатов, имеющих важное научное и прикладное значение. К наиболее существенным, на мой взгляд, можно отнести следующие:

– Разработана дискретная микромагнитная модель нанокристаллического ферромагнетика, которая позволила реализовать новые эффективные методы и алгоритмы расчета статических и высокочастотных свойств нанокристаллических тонких магнитных пленок. В частности, соискателем впервые была решена проблема сходимости и устойчивости алгоритма минимизации функционала энергии нанокристаллического ферромагнетика для определения равновесной намагниченности в нем. Кроме того, для расчета динамики намагниченности на основе системы линеаризованных дифференциальных уравнений Ландау – Лифшица соискатель предложил новый подход, который позволил значительно сократить число неизвестных переменных в численной модели и, как следствие, объем затрачиваемой памяти ЭВМ и время проведения расчетов.

– В нанокристаллических тонких магнитных пленках с размером кристаллитов, превышающим некоторое пороговое значение, впервые с помощью численного моделирования обнаружен, а затем экспериментально подтвержден эффект резкого уширения и смещения линии ФМР на определенной частоте, зависящей от параметров пленок. Дано объяснение обнаруженного эффекта, а также получено выражение для порогового размера кристаллитов, выше которого в пленках возникает этот эффект.

– В работе экспериментально продемонстрировано новое физическое явление – возникновение однонаправленной магнитной анизотропии в нанокристаллической тонкой пермаллоевой пленке под воздействием неоднородных деформаций. Показано, что эта однонаправленная анизотропия является проявлением флексомагнитного эффекта.

Все полученные результаты являются новыми и оригинальными и вносят существенный вклад в понимание природы формирования магнитной анизотропии и высокочастотных свойств нанокристаллических тонких магнитных пленок, а также в развитие приборов и техники СВЧ-магнитоэлектроники. Новизна результатов исследований подтверждается публикациями автора в ведущих научных журналах, а также патентами России на изобретения. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнения и подтверждается использованием современных методик (часть из которых разработана впервые), сопоставлением экспериментальных данных, полученных различными методами, а также хорошим согласием теории и эксперимента.

Помимо безусловной научной значимости результатов работы следует также отметить их практическую ориентированность. Во-первых, результаты работы нашли свое непосредственное применение при разработке уникального экспериментального оборудования, в частности, сканирующего и широкополосного спектрометров ФМР. Во-вторых, результаты исследований легли в основу реализации новой конструкции магнитометра слабых магнитных полей, востребованного реальным сектором экономики, в частности, предприятием АО «НПП «Радиосвязь» (г. Красноярск).

Оформление диссертации соответствует требованиям, установленным Министерством науки и высшего образования РФ. Автореферат полностью соответствует ее содержанию и структуре. Изложение материалов диссертации выстроено последовательно и логично, термины и определения, используемые автором, являются понятными и общепринятыми в научной и научно-технической литературе. Содержание работы соответствует специальности, по которой она представлена.

Материалы диссертации достаточно полно опубликованы в печати и изложены на международных научных конференциях. По теме диссертации опубликовано 43 статьи в рецензируемых журналах, включенных в Перечень ВАК, получено 8 патентов РФ и 9 свидетельств государственной регистрации программ для ЭВМ в Роспатенте.

Замечания по работе

Как и любая большая работа, представленная диссертация не лишена недостатков. Отмечу следующие из них:

1) Во второй главе диссертации рассмотрена предложенная соискателем методика определения магнитных параметров тонких пленок из измеренных угловых зависимостей поля ФМР. Эта методика построена на основе теоретической модели однородно намагниченной, т.е. однодоменной, пленки. В то же время в представленных в диссертации экспериментах для возбуждения ФМР, как правило, использовалась относительно небольшая частота переменного поля и, как следствие, небольшая величина внешнего постоянного магнитного поля. По этой причине экспериментальные образцы могли находиться в ненасыщенном состоянии и иметь доменную магнитную структуру, а сама методика приводить 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 диссертационной работе приводится большое количество примеров использования программы численного микромагнитного моделирования «MultiLayers», которые убедительно демонстрируют эффективность разработанных автором численных методов. Однако было бы весьма интересно оценить возможности этой программы в сравнении с другими используемыми в научной среде программами микромагнитного моделирования. Для сравнения, например, можно было бы использовать очень популярные среди исследователей математические пакеты OOMMF, MagPar и/или MuMax^3, которые хорошо себя зарекомендовали и находятся в свободном открытом доступе сети Интернет. Вероятно, у программы «MultiLayers» имеются преимущества, о которых пока мало что известно;

3) 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;

4) В разделе 4.2 представлены экспериментальные результаты изучения структурных и магнитных свойств пленок пермаллоя толщиной 40 нм. В то время, как в микромагнитном моделировании были рассмотрены пленки толщиной от 12 до 100 нм, не ясно, почему для

эксперимента была выбрана единственная толщина 40 нм. В итоге все эксперименты были проведены всего на двух образцах – на не отожженном и отожженном при температуре 350 °С. Для построения зависимостей свойств и сравнения с результатами моделирования данных явно недостаточно;

5) 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.

Указанные недостатки не носят принципиального характера и не затрагивают основного содержания диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения ВАК

Резюмируя, можно констатировать, что диссертация Изотова Андрея Викторовича посвящена актуальной теме, содержит ряд новых, важных в научном и прикладном плане результатов, которые вносят значительный вклад в понимание природы формирования магнитной анизотропии и высокочастотных свойств нанокристаллических тонких магнитных пленок. Диссертационная работа является завершенным научным исследованием, которое может быть квалифицировано как новое крупное научное достижение в области физики магнитных явлений.

Считаю, что представленная работа «Магнитная анизотропия и динамика намагниченности нанокристаллических тонких пленок для СВЧ-приложений» удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к докторским диссертациям (см. пункты 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней от 24.09.2013 г. № 842), а ее автор Изотов Андрей Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Официальный оппонент:

Самардак Александр Сергеевич,
доктор физико-математических наук, доцент, проректор по научной работе, профессор Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоемких технологий и передовых материалов ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

«05» мая 2023 г.

_____________ / А.С. Самардак /

Подпись официального оппонента Самардака Александра Сергеевича ЗАВЕРЯЮ:

Начальник отдела кадрового делопроизводства ДВФУ ______________ Н.А. Бондаренко

«05» мая 2023 г.

М.П.

федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»
Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
Телефон: 8 (423) 265-24-29
Адрес электронной почты: rectorat@dvfu.ru
Адрес сайта: https://www.dvfu.ru/

Сведения об официальном оппоненте

Самардак Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук (специальность 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния»), доцент, проректор по научной работе, профессор Департамента общей и экспериментальной физики Института наукоемких технологий и передовых материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный федеральный университет».

Адрес: 690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10.

Тел.: +7(423)265-24-29; +7(902)489-92-92,

Факс: +7 (423)243-23-15

e-mail: samardak.as@dvfu.ru

Список работ по теме диссертации за последние пять лет

1. Narita H., Kawarazaki R., Kan D., Shiota Y., Moriyama T., Shimakawa Y., Ognev A.V., Samardak A.S., Ono T. Field-free superconducting diode effect in noncentrosymmetric superconductor/ferromagnet multilayers // Nature Nanotechnology, 2022, Vol. 17, P. 823.

2. He W., Wan C., Zheng C., Wang Y., Wang X., Ma T., Wang Y., Guo C., Luo X., Stebliy M.E., Yu G., Liu Y., Ognev A.V., Samardak A.S., Han X.F. Field-free spin-orbit torque switching enabled by interlayer Dzyaloshinskii-Moriya interaction // Nano Letters, 2022, Vol.22, №17, P. 6857.

3. Park J., Kim T., Kim G.W., Bessonov V., Telegin A., Iliushin I.G., Pervishko A.A., Yudin D., Samardak A.Yu., Ognev A.V., Samardak A.S., Cho J., Kim Y.K. Compositional gradient induced enhancement of Dzyaloshinskii–Moriya interaction in Pt/Co/Ta heterostructures modulated by Pt–Co alloy intralayers // Acta Materialia, 2022, Vol. 241, P. 118383.

4. Yang W.L., Yan Z.R., Xing Y.W., Cheng C., Guo C.Y., Luo X.M., Zhao M.K., Yu G.Q., Wan C.H., Stebliy M.E., Ognev A.V., Samardak A.S., Han X.F. Role of an in-plane ferromagnet in a T-type structure for field-free magnetization switching // Applied Physics Letters, 2022, Vol. 120, № 12, P. 122402.

5. Shiota Y., Noda K., Hirata Y., Kuwano K., Funada S., Hisatomi R., Moriyama T., Stebliy M., Ognev A.V., Samardak A.S., Ono T. Temperature dependence of domain wall creep motion in ferrimagnetic Tb/CoFeB/MgO microwires // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2022, Vol. 553, P. 169251.

6. Самардак А.С., Колесников А.Г., Давыденко А.В., Стеблий М.Е., Огнев А.В. Топологически нетривиальные спиновые текстуры в тонких магнитных пленках // Физика металлов и металловедение, 2022, Т. 123, № 3, С. 260-283.

7. Wan C.H., Stebliy M.E., Wang X., Yu G.Q., Han X.F., Kolesnikov A.G., Bazrov M.A., Letushev M.E., Ognev A.V., Samardak A.S. Gradual magnetization switching via domain nucleation driven by spin–orbit torque // Applied Physics Letters, 2021, Vol. 118, № 3, P. 032407.

8. Shiota Y., Hisatomi R., Moriyama T., Samardak A.S., Ono T. Inhomogeneous magnetic properties characterized by simultaneous electrical and optical detection of spin-torque ferromagnetic resonance // Applied Physics Letters, 2021, Vol. 119, № 19, P. 192409.

9. Schäfer R., Oppeneer P.M., Ognev A.V., Samardak A.S., Soldatov I.V. Analyzer-free, intensity-based, wide-field magneto-optical microscopy // Applied Physics Reviews, 2021, Vol. 8, № 3, P. 031402.

10. Kolesnikov A.G., Stebliy M.E., Davydenko A.V., Kozlov A.G., Osmushko I.S., Korochentsev V.V., Ognev A.V., Gerasimenko A.V., Sadovnikov A.V., Gubanov V.A., Nikitov S.A., Wang X., Wan C.H., Fang C., Zhao M., Han X.F., Samardak A. Magnetic properties and the interfacial Dzyaloshinskii-Moriya interaction in exchange biased Pt/Co/NixOy films // Applied Surface Science, 2021, Vol. 543, P. 148720.

11. 8. Kim T., Cha I.H., Kim Y.J., Kim G.W., Stashkevich A., Roussigné Y., Belmeguenai M., Chérif S.M., Samardak A.S., Kim Y.K. Ruderman–Kittel–Kasuya–Yosida-type interfacial Dzyaloshinskii–Moriya interaction in heavy metal/ferromagnet heterostructures // Nature Communications, 2021, Vol. 12, № 1, P. 3280.

12. Ognev A.V., Kolesnikov A.G., Kim Y.J., Cha I.H., Sadovnikov A.V., Nikitov S.A., Soldatov I.V., Talapatra A., Mohanty J., Mruczkiewicz M., Ge Y., Kerber N., Dittrich F., Virnau P., Kläui M., Kim Y.K., Samardak A.S. Magnetic Direct-Write Skyrmion Nanolithography // ACS Nano, 2020, Vol. 14, № 11, P. 14960-14970.

13. 12. Ermakov K.S., Samardak A.Yu., Kolesnikov A.G., Stebliy M.E., Ognev A.V., Chebotkevich L.A., Samardak A.S. Crystal structure and magnetic properties of wafer-size Co nanostrip arrays self-organized on a step-bunched surface of Si(111)-5.55 × 5.55-Cu/(Cu, Cu2Si, W-O) buffers // Materials Characterization, 2020, Vol. 160, P. 110077.

14. Balashev V.V., Ermakov K.S., Samardak A.Yu., Ognev A.V., Samardak A.S., Komogortsev S.V., Volochaev M.N., Tarasov A.S., Korobtsov V.V. Crystal texture-dependent magnetic and magnetotransport properties of half-metallic Fe_3O_4 films grown on oxidized Si substrates by reactive deposition // Journal of Alloys and Compounds, 2020, Vol. 815, P. 152398.

15. Zheng C., Zhu K., Cardoso de Freitas S., Chang J.-Y., Davies J.E., Eames P., Freitas P.P., Kazakova O., Kim C., Leung C.-W., Liou S.-H., Ognev A., Piramanayagam S.N., Ripka P., Samardak A., Shin K.-H., Tong S.-Y., Tung M.-J., Wang S.X., Xue S., Yin X., Pong P.W.T. Magnetoresistive Sensor Development Roadmap (Non-Recording Applications) // IEEE Transactions on Magnetics, 2019, T. 55, № 4, C. 1-30.

доктор физико-математических наук, доцент, проректор

по научной работе, профессор Департамента общей и

экспериментальной физики Института наукоемких

технологий и передовых материалов ФГАОУ ВО

«Дальневосточный федеральный университет» ____________ / А.С. Самардак /

«05» мая 2023 г.

Подпись официального оппонента Самардака Александра Сергеевича ЗАВЕРЯЮ:

Начальник отдела кадрового делопроизводства ДВФУ ____________ Н.А. Богданова

«05» мая 2023 г.

М.П.