

На правах рукописи



Соловьев Платон Николаевич

**Магнитные свойства наклонно-осажденных и напыленных на
текстурированные подложки тонких пленок пермаллоя**

01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Красноярск 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет» (СФУ) и Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) обособленном подразделении «Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФ СО РАН)

Научный руководитель: Беляев Борис Афанасьевич, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты: Гаврилюк Алексей Александрович, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО Иркутский государственный университет (ИГУ), г. Иркутск, профессор.

Ринкевич Анатолий Брониславович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научной работе Института физики металлов УрО РАН, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Защита состоится:

«___»_____2017 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета Д 003.075.01 Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН, ИФ СО РАН) по адресу: 660036 г. Красноярск Академгородок, 50, строение № 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФ СО РАН и на сайте <http://ksc.krasn.ru>. Автореферат разослан «___»_____2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 003.075.01
доктор физико-математических наук



Втюрин Александр Николаевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Благодаря своим уникальным свойствам, связанным с размерными, структурными и интерфейсными эффектами, тонкие нанокристаллические магнитные пленки нашли широкое практическое применение в самых разнообразных приложениях [1]. На основе тонких пленок конструируются высокочувствительные датчики электрических и магнитных полей, головки чтения/записи, и другие устройства микроэлектроники. В последние годы, большой интерес исследователей к тонкопленочным магнитным структурам в том числе связан и с перспективами их использования в качестве активных сред в различных электрически управляемых сверхвысокочастотных устройствах [2, 3].

Для практического использования тонких магнитных пленок очень важно иметь возможность управлять их магнитными свойствами. Одним из методов, пригодных для решения такой задачи, является целенаправленный синтез структурно организованных на микронном и субмикронном масштабах магнитных сред. Такой подход позволяет в широких пределах изменять и осознанно контролировать как статические, так и высокочастотные магнитные характеристики получаемых тонкопленочных структур [4, 5]. В тоже время, проблема изучения и установления связи между технологией синтеза тонких пленок и их микроструктурой, а также между микроструктурой и магнитными свойствами получаемых образцов, относится к числу наиболее значимых и важных задач современной физики магнитных явлений [6].

Среди самых доступных способов получения тонких плёнок с predetermined микроструктурой можно выделить осаждение пленок на текстурированные подложки, и изготовление образцов методом наклонного осаждения атомов на подложку. В первом случае, в результате повторения пленкой топологии подложки с текстурой, на ее поверхностях формируются пространственные неоднородности, или возмущения («волны», «канавки» и т.д.) [7]. Во втором случае, возникающий при косом осаждении эффект самозатенения приводит к росту пленки с неоднородной столбчатой микроструктурой [8]. Исследования показывают, что с помощью таких подходов можно контролировать как статические магнитные параметры образцов, например, изменять величину, направление, и даже характер магнитной анизотропии, так и их магнитодинамические характеристики, в частности, процессы релаксации колебаний намагниченности [7-10].

Однако широкому использованию таких методов для создания образцов с необходимыми для приложений параметрами препятствует недостаточность знаний о природе физических процессов, определяющих формирование микроструктуры пленок, и связи этой структуры с магнитными характеристиками образцов. На магнитные параметры тонких пленок существенное влияние оказывает большое количество технологических факторов, что на практике приводит к серьезным трудностям при анализе и интерпретации большого разнообразия экспериментальных данных. По этой причине зачастую сложно выявить механизмы и установить их роли в формировании тех или иных магнитных параметров пленок.

Текущий прогресс в развитии экспериментальных и численных методов позволяет использовать их для проведения широкого круга исследований, направленных на установление связи между микроструктурой и магнитными параметрами образцов. Такие исследования могут включать изучение характера зависимостей магнитной конфигурации, магнитной анизотропии, процессов перемагничивания, и динамики намагниченности от пространственных неоднородностей в объеме или на интерфейсах пленки. Причем эти структурные неоднородности могут контролироваться, как уже сказано ранее, наклонным осаждением потока частиц на подложку или формированием пленки на подложке с искусственной текстурой.

Целью настоящей работы является экспериментальное и теоретическое исследование связи между структурными и магнитными характеристиками наклонно-осажденных и осажденных на текстурированные подложки тонких пленок пермаллоя.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Экспериментально и теоретически исследовать влияние искусственно сформированной на подложке текстуры на магнитные свойства тонких пленок пермаллоя (NiFe).
2. С помощью моделирования процессов осаждения и микромагнитного анализа объяснить поведение магнитной одноосной анизотропии в наклонно-осажденных пленках пермаллоя.
3. Установить влияние малого отклонения луча падающих атомов от нормали к подложкам в процессе напыления тонких пленок пермаллоя на их основные магнитные характеристики.
4. Изучить природу формирования магнитной анизотропии тонкой пермаллоевой пленки для случая, когда одноосная магнитная анизотропия, индуцированная наклонным осаждением, соразмерна и ортогональна одноосной анизотропии, наведенной внешним магнитным полем.

Научная новизна

1. Микромагнитным анализом модели тонкой пленки пермаллоя с периодическими микроканавками впервые показано, что наблюдаемые в эксперименте резкое уширение линии ФМР и возникновение максимумов поля резонанса при небольшом отклонении поля развертки от направления, ортогонального канавкам, обусловлены возбуждением двух нормальных мод колебания намагниченности и распределением их собственных резонансных полей.
2. Предложен новый подход для изучения связи между структурными и магнитными свойствами тонких пленок, основанный на совместном использовании двух методов компьютерного моделирования: моделирования процесса роста тонких пленок и последующего микромагнитного анализа полученных структур. С помощью данного подхода установлена взаимосвязь между эволюцией столбчатой микроструктуры с изменением угла осаждения и магнитной одноосной анизотропией в тонких наклонно-осажденных пленках пермаллоя.
3. Предложена модифицированная модель Нетзельмана, учитывающая неоднородное распределение плотности по толщине осажденных образцов. На

основе этой модели продемонстрирована возможность определения среднего наклона столбцов и эллиптичности их поперечных срезов при моделировании тонких наклонно-осажденных магнитных пленок пермаллоя, используя компоненты усредненного по объему образцов поля размагничивания.

4. Впервые обнаружен эффект компенсации одноосной магнитной анизотропии, и формирование анизотропии четвертого и шестого порядков в тонкой пленке пермаллоя, полученной напылением при наклонном падении молекулярного луча в присутствии магнитного поля.

Практическая значимость

Результаты диссертации могут использоваться при поиске и разработке методов и технологий синтеза ферромагнитных тонкопленочных структур с заданными статическими и динамическими магнитными характеристиками, отвечающими самым жестким требованиям микро и нанoeлектроники. Возможность целенаправленного синтеза магнитных тонкопленочных материалов имеет большое прикладное значение для применения последних в качестве активных сред в устройствах сверхвысокочастотной микроэлектроники и магнитоэлектроники, сенсорах, а также в ряде других приложений.

Разработанная программа моделирования процессов осаждения частиц на подложку может найти широкое применение в проведении теоретических исследований процессов формирования тонкопленочных структур.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1. Значительное уширение линии ферромагнитного резонанса и возникновение максимумов поля резонанса в тонкой пленке пермаллоя с микроканавками на подложке, наблюдаемые при небольшом отклонении направления поля развертки от направления, ортогонального канавкам, обусловлены угловой зависимостью собственных резонансных полей двух наиболее интенсивных нормальных мод колебания намагниченности, возбуждаемых в пленке.
2. Численным моделированием доказано, что основным механизмом, отвечающим за зависимость одноосной магнитной анизотропии пленок пермаллоя от угла их осаждения и за перестройку равновесной конфигурации намагниченности, является изменение магнитостатической энергии, связанное с эволюцией столбчатой микроструктуры пленок.
3. С помощью модели Нетзельмана определен средний наклон столбцов и эллиптичность их поперечных срезов при моделировании тонких наклонно-осажденных магнитных пленок пермаллоя, используя компоненты усредненного по объему образцов поля размагничивания. Предложенная модификация данной модели, учитывающая неоднородное распределение плотности упаковки по толщине наклонно-осажденных образцов, позволила уточнить получаемые структурные характеристики.
4. Природа обнаруженных эффектов компенсации одноосной магнитной анизотропии, а также формирование анизотропии четвертого и шестого порядков в тонкой пермаллоевой пленке, полученной напылением при наклонном падении

молекулярного луча в присутствии магнитного поля, связана с существованием в таких образцах двух обменно-взаимодействующих слоев с различными параметрами одноосной магнитной анизотропии.

Апробация работы

Основные результаты работы были представлены на следующих конференциях: Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы радиоэлектроники», Красноярск, 2013, 2015, 2016; V Euro-Asian Symposium “Trends in Magnetism”: Nanomagnetism (EASTMAG-2013), Vladivostok, Russia, 2013; Magnetic and Optics Research International Symposium (MORIS 2013), Saitama, Japan, 2013; Пятая Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики» (АПР 2013), Томск, 2013; International Siberian Conference on Control and Communications, (SIBCON 2013) Krasnoyarsk, 2013; Байкальская международная конференция «Magnetic Materials. New Technologies» (BICMM 2014), д. Большое Голоустное, Иркутская область, Россия, 2014; 2014 International Magnetism Conference (Intermag Europe 2014), Dresden, Germany, 2014; 10th European Conference on Magnetic Sensors and Actuators (EMSA 2014), Vienna, Austria, 2014; The International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics (HMM 2015), Iasi, Romania, 2015.

Публикации

Материалы диссертационной работы изложены в 15 печатных изданиях, в том числе в 9 статьях в сборниках трудов Всероссийских и международных конференций, и в 6 статьях в рецензируемых изданиях и журналах списка ВАК. Создана и зарегистрирована одна программа для ЭВМ.

Личный вклад автора заключается в постановке, совместно с научным руководителем, цели и задач исследования; планировании эксперимента; в экспериментальном исследовании образцов методом ферромагнитного резонанса, и анализе и интерпретации результатов измерений. Автором построена модель осаждения тонкой пленки и проведен анализ морфологии полученных моделированием структур. Микромагнитное моделирование выполнялось автором совместно с к.ф.м.н. Изотовым А.В. Изготовление образцов, и их структурные исследования были выполнены Киреем Д.В., д.т.н. Лексиковым А.А., Скомороховым Г.В., к.ф.м.н. Жарковым С.М. Автор принимал активное участие в анализе и интерпретации всех экспериментальных данных, а также в подготовке и написании научных статей и тезисов докладов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, двух приложений, и списка цитированной литературы. Общий объем диссертации составляет 130 страниц, включая 41 рисунок, и список литературы из 180 наименований.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и указаны задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость результатов выполненной работы, представлены выносимые на защиту положения.

В первой главе представлен обзор публикаций, посвященных изучению тонких поликристаллических ферромагнитных пленок, в объеме или на поверхностях которых сформированы структурные или пространственные неоднородности. В первой части главы рассматриваются пленки, осажденные на подложки с искусственно сформированной на микронном и субмикронном уровне текстурой. Показана связь между структурными и магнитными статическими и динамическими характеристиками образцов. Во второй части главы содержится описание тонких пленок, полученных наклонным осаждением атомов магнитного материала на подложку. Обсуждаются физические механизмы, приводящие к возникновению неоднородной столбчатой микроструктуры, и рассматривается влияние этой структуры на магнитные параметры образцов.

Вторая глава диссертации посвящена описанию основных экспериментальных и численных методов, используемых в данной работе для проведения исследований магнитных свойств тонких пленок. Описывается автоматизированный сканирующий спектрометр ферромагнитного резонанса, приводятся его принцип действия и основные характеристики. В частности, отмечается, что в спектрометре в качестве СВЧ датчика используется миниатюрный микрополосковый резонатор. Вблизи пучности высокочастотного магнитного поля в экране резонатора проделано измерительное отверстие диаметром 1 мм, благодаря которому и обеспечивается локальность измерений. Основным достоинством сканирующего спектрометра является его высокая чувствительность [11]. Далее рассматривается методика определения из угловых зависимостей резонансного поля эффективной намагниченности, величины и направления планарной магнитной анизотропии произвольного порядка. В основе методики лежит разложение энергии планарной магнитной анизотропии в ряд Фурье по углу равновесного направления намагниченности [12].

Заключительная часть главы посвящена микромагнитному моделированию – мощному феноменологическому методу, позволяющему численно анализировать статику и динамику намагниченности на моделях ферромагнитных объектов произвольной формы. В настоящей работе использовалась программа микромагнитного моделирования, разработанная в лаборатории ЭДСВЧЭ Института Физики им. Киренского [13]. В данной программе для решения задач микромагнитного моделирования используются развитые численные алгоритмы линейной алгебры, позволяющие выполнять эффективные распределённые вычисления. В настоящей работе расчеты проводились на вычислительном кластере, построенном на базе многопоточного сопроцессора NVIDIA Tesla K40.

В третьей главе приводятся результаты исследований влияния периодических неоднородностей поверхности пленки пермаллоя на ее магнитные свойства.

Исследуемые образцы были получены осаждением пермаллоя на специальным образом обработанные подложки. На поверхности полированных стеклянных подложек размером $25 \times 10 \times 0.5$ мм алмазным резцом наносилась текстура - система параллельных микроканалов. На подложки, подогретые до 250°C , методом термического вакуумного испарения осаждались пленки $\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{75}$ толщиной 50 нм. При

изготовлении образцов в плоскости подложки было приложено параллельное рискам постоянное магнитное поле. На одной стеклянной подложке формировалось несколько участков с различным периодом текстуры a_0 .

На вставке рис. 1b показано изображение тонкой пленки $\text{Fe}_{25}\text{Ni}_{75}$, осажденной на подложку с $a_0 = 25$ мкм, полученное с помощью металлографического микроскопа. Видно, что в результате обработки подложки алмазным резцом на поверхности осажденной на нее пленки формируются параллельные канавки. Однако детальное исследование пленок атомно-силовой микроскопией показало, что профиль поперечного сечения канавок обладает достаточно сложным рельефом – он имеет по несколько выступов и впадин, с выраженными максимумом («отвалом» ≈ 93 нм) и минимумом («бороздой» ≈ 54 нм), суммарно занимающими полосу шириной около 5 мкм.

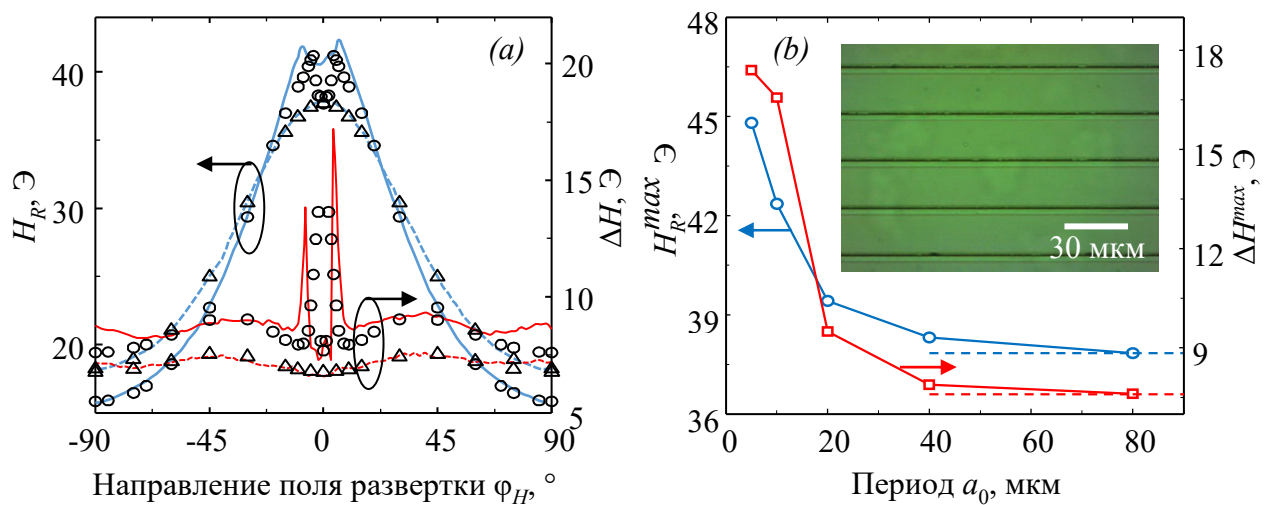


Рис. 1. (a) Зависимости резонансного поля H_R и ширины линии ФМР ΔH от угла направления поля развертки ϕ_H . Линии – эксперимент, маркеры – микромагнитный расчет. Сплошные линии и круглые маркеры – характеристики участка пленки с текстурой ($a_0 = 10$ мкм), штриховые линии и треугольники – гладкого участка. (b) Зависимости максимального резонансного поля H_R^{max} и максимальной ширины линии ФМР ΔH^{max} от a_0 . Штриховые линии - характеристики гладкого участка. На вставке показан снимок поверхности пленки с $a_0 = 25$ мкм.

Исследования магнитных параметров образцов проводились с помощью ФМР спектрометра. Внешнее поле H и ортогональное ему поле СВЧ-накачки с частотой $f = 1684$ МГц лежали в плоскости пленки. Было обнаружено, что наличие периодических неоднородностей на подложках приводит к возникновению особенностей (в сравнении с гладкими пленками) в угловых зависимостях резонансного поля $H_R(\phi_H)$ и ширины линии ФМР $\Delta H(\phi_H)$ (рис. 1a). Значение H_R для текстурированного участка достигает своего максимума не строго вдоль трудной оси (ОТН), ортогональной рискам, а при некотором отклонении от нее влево и вправо примерно на 7° . В то же время при отклонении внешнего поля от ОТН примерно на $\pm 5^\circ$ наблюдается резкий рост ΔH более чем в два раза. Измерения показали, что с увеличением периода текстуры a_0 связанные с неоднородностями эффекты ослабевают (рис. 1b). Оказалось также, что текстура на подложке слабо влияет на магнитную анизотропию образцов: отклонение от средней

величины поля анизотропии 11.2 Э не более чем на ± 2 Э для различных областей пленок.

Для объяснения природы наблюдаемых эффектов был выполнен микромагнитный расчет нормальных магнитных мод колебания намагниченности и спектра высокочастотного поглощения исследуемых объектов. Для описания тонкой магнитной пленки с текстурой, мы использовали упрощенную модель пленки, представляющую собой пластину толщиной $d = 50$ нм с периодически повторяющимися вдоль оси Ox «ступеньками» шириной $w = 2$ мкм и высотой $h = 7.7$ нм, $a_0 = 10$ мкм (рис. 2а). Магнитные параметры пленок: намагниченность насыщения $M_s = 1029$ Гс, константа обмена $A = 1.3 \times 10^{-6}$ эрг/см, поле одноосной анизотропии $H_k = 9.7$ Э. Параметры затухания для пленок с текстурой и без текстуры составили $6.3 \cdot 10^{-3}$ и $5.6 \cdot 10^{-3}$, соответственно.

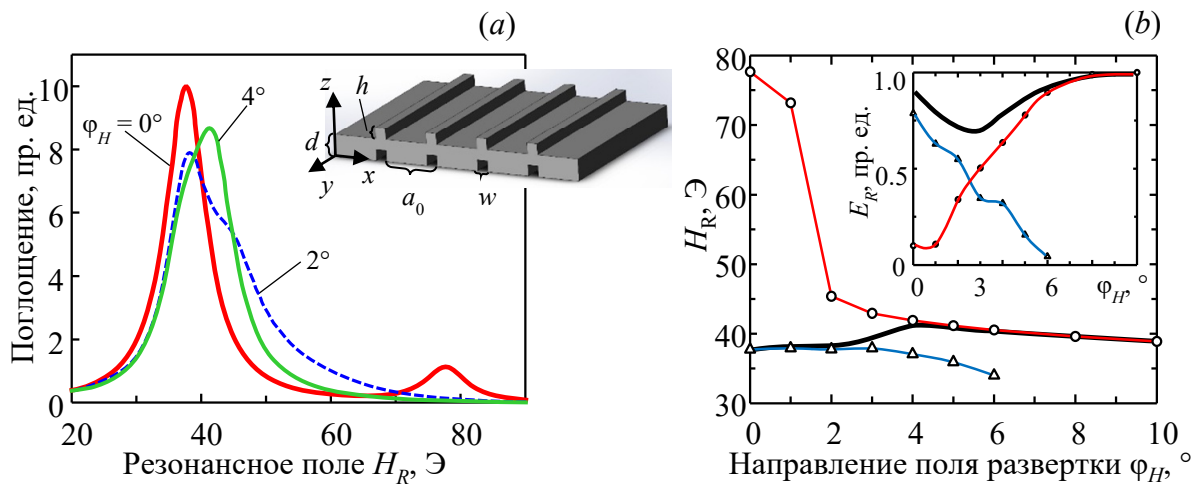


Рис. 2. (а) Спектры высокочастотного поглощения модели пленки с текстурой (показана на вставке), полученные микромагнитным моделированием для различных направлений внешнего поля φ_H . (б) Рассчитанные угловые зависимости резонансного поля H_R и амплитуды поглощения E_R (на вставке) для низкочастотного (треугольные) и высокочастотного (круглые маркеры) резонансных пиков, а также для их суммарного спектра (сплошная линия).

Анализ спектров высокочастотного поглощения пленок с текстурой показал, что в относительно узком диапазоне углов вблизи оси трудного намагничивания спектр обогащается дополнительными резонансными пиками. Оказалось, что наиболее интенсивно возбуждаются только две моды: низкополевая (высокочастотная) и высокополевая (низкочастотная), как это видно из рис. 2а, где показаны интегральные спектры поглощения для трех значений направления внешнего поля $\varphi_H = 0^\circ$, 2° и 4° . Более детальный анализ показал, что резонансное поле H_R и амплитуда поглощения E_R двух мод колебаний резко изменяются в зависимости от направления внешнего поля (см. рис. 2б), что и приводит к сложной результирующей зависимости H_R и ΔH от угла φ_H . На рис. 1а кружками показаны результаты расчета угловых зависимостей $H_R(\varphi_H)$ и $\Delta H(\varphi_H)$ для модели пленки со «ступеньками», а треугольниками – для гладкого образца.

Таким образом, экспериментально наблюдаемые особенности в угловых зависимостях резонансного поля и ширины линии ФМР пленок, осажденных на подложки с микроканавками, связаны с возбуждением дополнительных нормальных мод колебания намагниченности. Наличие микрорельефа на поверхности пленки приводит к возникновению неоднородных внутренних магнитных полей, обусловленных полями размагничивания. Эти поля создают условия для возбуждения различных типов колебаний намагниченности всего образца, а наблюдаемое расширение и сдвиг интегральной резонансной кривой объясняются распределением собственных частот (резонансных полей) этих колебаний.

В тоже время, уширение линии ФМР в этом случае можно также рассматривать в рамках теории диссипации энергии магнитных колебаний, связанной с пространственными неоднородностями. Расчеты спектра поглощения на основе теории двухмагнетонных процессов релаксации, недавно разработанной Миллсом и Ландеросом [14] для случая тонкой пленки с периодическими полосками на поверхности, показали качественное согласие с результатами эксперимента и микромагнитного моделирования.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию на основе двух различных методов численного моделирования связи между микроструктурными и магнитными характеристиками наклонно-осажденных магнитных пленок.

В первой части для последующего сравнения с результатами численного анализа приводятся данные экспериментальных исследований косо-осажденных пермаллоевых пленок. Пленки были изготовлены термическим вакуумным осаждением $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ на стеклянные подложки, установленные под различными углами к молекулярному лучу. Толщина образцов составляла около 50 нм. Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) среза пленки, осажденной под углом 45° показала, что образец обладает столбчатой микроструктурой, с диаметром отдельных столбцов около 3.5–6 нм (рис. 3а). Результаты измерений магнитной анизотропии пленок, полученные с помощью ФМР спектрометра, затем сравнивались с результатами численного моделирования.

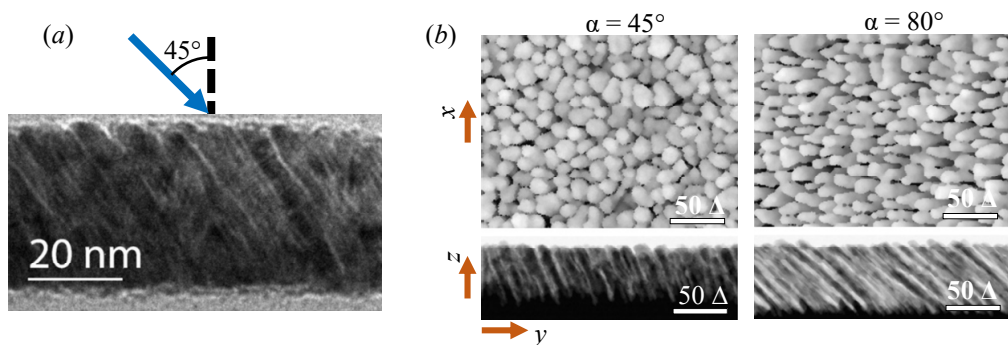


Рис. 3. (а) ПЭМ изображение поперечного среза пленки пермаллоя, осажденной под углом $\alpha = 45^\circ$. (б) Поверхности (x - y) и поперечные срезы (z - y) пленок, полученных моделированием.

В диссертационной работе теоретическое исследование зависимости морфологии пленок от угла падения потока атомов проводилось с помощью моделирования процесса осаждения методом Монте-Карло. На основе принципов, изложенных в работах М.

Сузуки и Ю. Тага [15], а также Т. Сми и др. [16], в пакете MATLAB была построена модель роста тонких пленок. В данной модели, частица в форме куба размером Δ^3 с произвольными плоскостными начальными координатами (x,y) отправляется под заданным углом α к заранее сгенерированной поверхности подложки по прямолинейной траектории. Движение прекращается, когда падающая частица оказывается вблизи ранее осажденных частиц. После этого к частице применяется алгоритм, имитирующий ограниченную диффузию [15]. Отметим, что начальные параметры модели подбирались так, чтобы рассчитанная магнитная анизотропия полученных моделированием пленок была наиболее близка к анизотропии экспериментальных пленок.

Структурные исследования проводились на полученных моделированием пленках размерами $256(x) \times 256(y) \times 80(z)$ Δ . Для увеличения достоверности получаемых результатов для каждого угла α было проведено по 10 независимых осаждений. На рис. 3b показаны изображения полученных моделированием пленок. Для анализа характера распределения столбцов в плоскости пленки мы использовали быстрое преобразование Фурье (БПФ). Рассчитанные для срезов в плоскости x - y и усредненные по толщине структур модули спектра Фурье имеют вид диффузных неоднородных колец (рис. 4a). Такое распределение подтверждает отсутствие дальнего порядка, но указывает на существование основного (доминантного) расстояния между столбцами, которое отражено в БПФ спектре в виде основной пространственной частоты (рис. 4a). При этом для $\alpha > 70^\circ$ форма колец изменяется от круглой к эллипсоидальной, что говорит о квазиупорядоченном распределении столбцов в плоскости пленки.

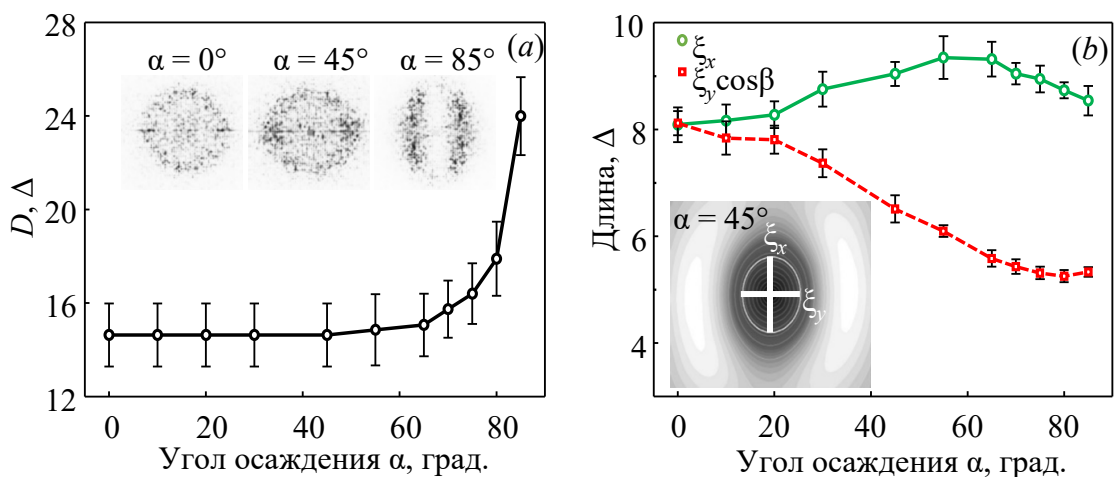


Рис. 4. (a) Зависимость среднего расстояния между столбцами в плоскости пленки D от угла осаждения α , полученная из БПФ спектров. На вставках показаны центральные части БПФ спектров. (b) Зависимость корреляционных длин ξ_x и $\xi_y \cos \beta$ от α . На вставке показана центральная часть поверхности автокорреляционной функции, рассчитанной для $\alpha = 45^\circ$.

На основе анализа усредненных по толщине структур двумерных автокорреляционных функций, была проведена оценка формы столбцов. Корреляционные длины ξ_x и ξ_y , равные ширине центрального максимума автокорреляционной функции на его полувысоте вдоль направлений x и y , позволяют определить средние размеры столбцов в плоскости x - y . Оказалось, что с ростом α

средние размеры столбцов в направлении x и y эволюционируют различно (рис. 4b). С увеличением α контур поперечного среза столбцов вытягивается в направлении x .

Изучение связи между микроструктурой и магнитными свойствами пленок было проведено с помощью микромагнитного моделирования. В микромагнитном анализе использовались полученные моделированием осаждения трехмерные матрицы. Каждая занятая частицей ячейка матрицы характеризовалась усредненным значением магнитного момента с намагниченностью насыщения M_s (для свободных ячеек $M_s = 0$). Магнитные параметры соответствовали характеристикам $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. Размер частицы Δ мы положили равным 0.5 нм.

Важнейшей характеристикой тонких пленок является их магнитная анизотропия. Для полученных структур она определялась двумя методами: с помощью расчета петель гистерезиса с использованием поля подмагничивания [17], и из магнитометрического тензора размагничивания исследуемых структур [18]. На рис. 5 представлены рассчитанные с помощью обоих методов зависимости поля одноосной анизотропии H_k от угла осаждения α . Отметим, что эта анизотропия обусловлена только магнитоэлектронным диполь-дипольным взаимодействием. На графике для сравнения также показаны данные экспериментальных измерений. Расчеты также показали, что по мере увеличения с ростом угла α наклона столбчатой структуры плоскость, в которой лежит легкая ось намагничивания, начинает отклоняться от плоскости пленки на угол θ (см. вставку на рис. 5).

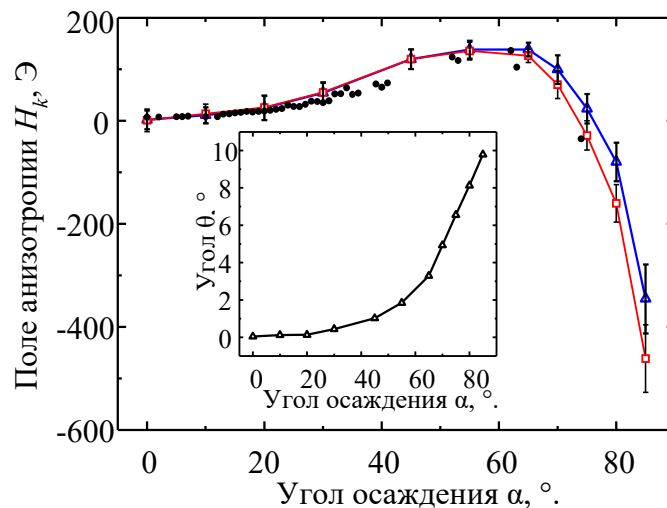


Рис. 5. Зависимость поля одноосной анизотропии H_k от угла осаждения α . Черные точки – эксперимент, квадратные маркеры – расчет из магнитометрического тензора, треугольные маркеры – расчет из петель гистерезиса с подмагничиванием. На вставке показана зависимость угла наклона «легкой» плоскости θ от угла осаждения α .

Нетзельман [19] предложил простую модель для описания магнитоэлектронной энергии гранулированных пленок, т.е. гетерогенных структур, состоящих из малых магнитных частиц, внедренных в немагнитную матрицу. В этой модели плотность энергии размагничивания представлена в виде комбинации энергий для двух предельных случаев: изолированной частицы с тензором размагничивания L^e , и

однородно намагниченного тела в форме магнитной пленки с тензором размагничивания N^t . Можно показать, что в этом случае магнитометрический тензор размагничивания всего образца

$$N = N^e + p(N^t - N^e), \quad (1)$$

где p – объемный фактор упаковки. Это выражение позволяет определить параметры размагничивания отдельной частицы N^e . Однако необходимо учитывать принятое в данном подходе приближение: распределение магнитных частиц внутри образца должно быть однородным. В тоже время, как показывает опыт, и результаты моделирования осаждения, фактор или плотность упаковки наклонно-осажденных пленок является функцией толщины, т.е. координаты слоя $p = p(z)$. В диссертации показано, что это обстоятельство можно учесть в модели Нетцельмана, разбив пленку на n слоев и заменив фактор упаковки p на некоторое эффективное значение $p_{eff} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i^2}{\sum_{i=1}^n p_i}$, где p_i – плотность упаковки i -го слоя пленки.

Приведение тензора размагничивания N^e к главным осям позволяет определить средний наклон столбчатой структуры образцов. На рис. 6а показаны зависимости определенных с помощью тензора N^e углов наклона столбцов β от угла осаждения α , рассчитанные с использованием модифицированной ($p = p_{eff}$) и оригинальной ($p = p_0$, p_0 – средняя плотность упаковки образца) модели Нетцельмана. На рисунке для сравнения также представлены углы β , полученные из структурного анализа образцов. В тоже время, зная параметры тензора N^e , с помощью аналитических выражений для размагничивающих факторов эллиптического цилиндра мы определили соотношения его поперечных размеров l_x/l_y (рис. 6б). Видно, что для обоих структурных характеристик расчет при $p = p_{eff}$ дает более точные значения по сравнению с оригинальной ($p = p_0$) моделью.

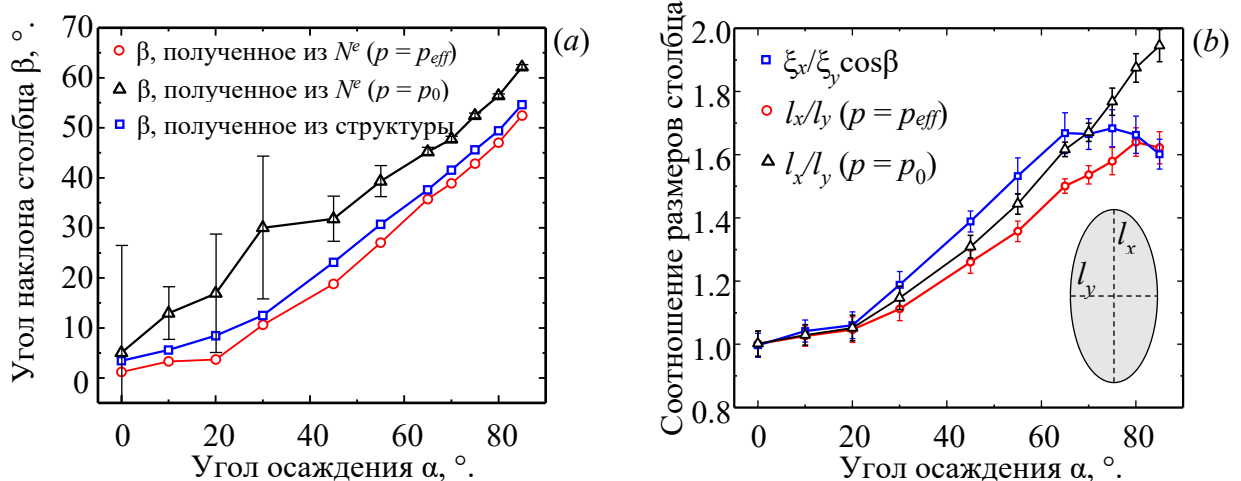


Рис. 6. (а) Зависимости угла наклона столбцов β от угла осаждения α , полученные с помощью автокорреляционного анализа структур, и из магнитометрического тензора N^e . (б) Зависимости от угла осаждения α соотношения размеров эллиптического столбца l_x/l_y , вычисленные на основе магнитометрического тензора N^e для $p = p_{eff}$ и $p = p_0$, и зависимость от α отношения корреляционных длин $\xi_x/\xi_y \cos\beta$.

На основе микромагнитного моделирования были изучены процессы перемагничивания большого набора наклонно-осажденных структур, сформированных методом Монте-Карло. Оказалось, что для углов осаждения $\alpha < 65^\circ$ перемагничивание осуществляется за счет когерентного вращения магнитных моментов. Однако для больших α в пленках начинает образовываться квазидоменная структура. При этом для углов осаждения ($\alpha > 75^\circ$) в пленках формируется конфигурация намагниченности, напоминающая страйп-структуру. Эти изменения в магнитной конфигурации образцов отражаются как на форме петель гистерезиса (рис. 7a), так и в поведении коэрцитивной силы и остаточной намагниченности (рис. 7b).

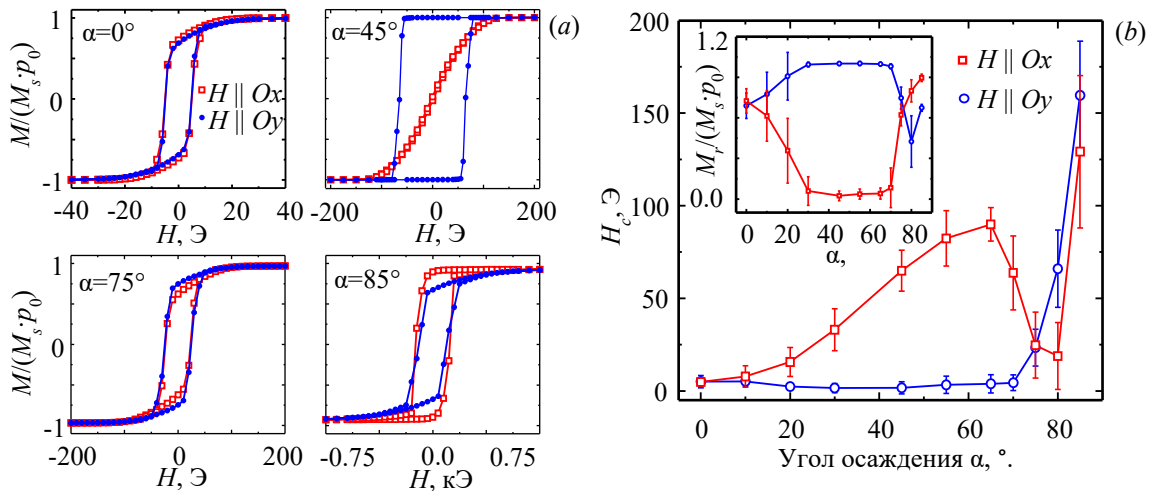


Рис. 7. (a) Петли гистерезиса, рассчитанные для полученных моделированием при различных α структур. (b) Зависимости коэрцитивной силы H_c и относительной остаточной намагниченности $M_r/(M_s \cdot P_0)$ (на вставке) от угла осаждения α .

В пятой главе приводятся результаты исследований влияния малого отклонения луча падающих атомов от нормали к подложкам в процессе напыления пленок на их магнитные характеристики.

В первой части методом локального ФМР изучаются серии наборов тонких пленок пермаллоя и анализируется корреляция между изменением угла осаждения и магнитными параметрами образцов. Магнитные пленки толщиной 50 нм синтезировались методом вакуумного термического испарения NiFe на стеклянные подложки размерами $12 \times 12 \times 0.5$ мм, которые размещались в специальной маске-держателе в виде прямоугольника 3×4 , с расстоянием между подложками 5 мм. Всего было изготовлено шесть таких серий. Состав всех пленок попадал в интервал от $\text{Ni}_{69}\text{Fe}_{31}$ до $\text{Ni}_{64}\text{Fe}_{36}$. Такое количество образцов в серии, размещенных на сравнительно большой площади, позволило проследить изменение их свойств в зависимости от пространственной вариации угла падения атомного пучка. Необходимо отметить, что для исследуемых образцов наблюдался достаточной большой разброс магнитных параметров, связанный как с отсутствием во время напыления ориентирующего магнитного поля, так и с дисперсией состава пленок. Приведем диапазоны, в которые

попадают магнитные характеристики всех исследуемых образцов: эффективная намагниченность насыщения $M_s = 915 \div 1165$ Гс, поле анизотропии $H_k = 4.8 \div 9.5$ Э, ширина линии ФМР $\Delta H = 6.4 \div 10.2$ Э.

Каждой локальной области пленки (~ 0.8 мм²), для которых проводились измерения, был сопоставлен рассчитанный угол осаждения α . Затем магнитные параметры локальных участков всех образцов, для которых α был примерно равен ($\pm 0.5^\circ$), усреднялись. На рис. 8 показаны полученные зависимости усредненных магнитных характеристик тонкопленочных образцов от угла осаждения. Для уменьшения погрешности, связанной с различием составов пленок разных серий, магнитные характеристики образцов, изготовленных в едином технологическом цикле, делились на средние значения для этой серии (правые оси ординат).

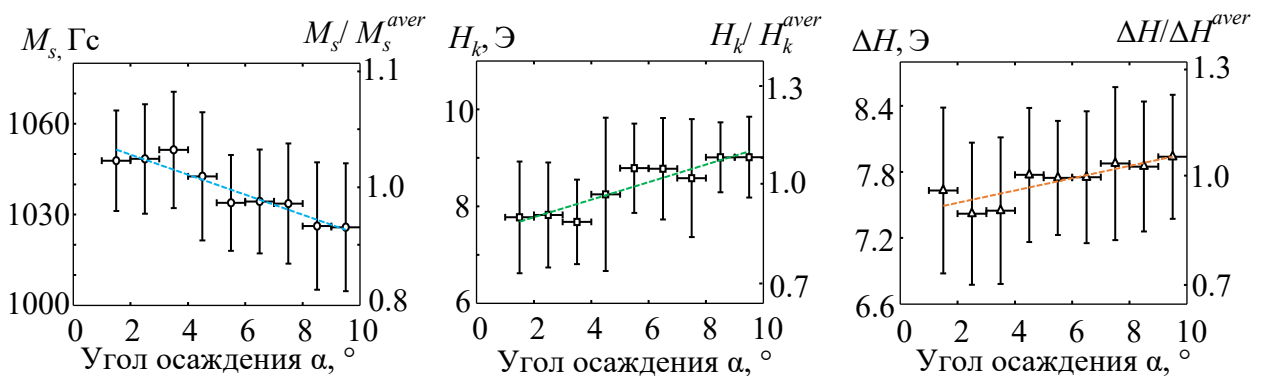


Рис. 8. Зависимость усредненных магнитных характеристик пленок пермаллоя от угла осаждения луча атомов α . Штриховые линии – линейные аппроксимации.

В диссертации показано, что наблюдаемое на рис. 8 увеличение поля анизотропии с ростом угла осаждения обусловлено существованием в косо-осажденных пленках внутренних напряжений. В тоже время, обнаруженное падение эффективной намагниченности насыщения пленок и одновременный рост ширины линии ФМР с увеличением α могут быть связаны с наличием в образцах структурных несовершенств, возникающих из-за эффекта самозатенения.

Во второй части главы исследована магнитная анизотропия локальных участков (~ 0.8 мм²) пермаллоевой ($\text{Ni}_{82}\text{Fe}_{18}$) пленки толщиной 50 нм, полученной вакуумным термическим напылением на подложку, наклоненную к молекулярному лучу, в присутствии плоскостного постоянного магнитного поля. Благодаря выбранной геометрии осаждения, угол падения атомов α плавно изменялся от 7° до 9.2° в пределах размера подложки вдоль ее плоскостной оси x . При этом планарное внешнее магнитное поле H прикладывалось при напылении так, чтобы наведенная полем магнитная одноосная анизотропия H_H^a была ортогональна одноосной анизотропии H_α^a , формируемой наклонным падением молекулярного луча (т.е. $H \parallel O_x$). Анализ угловых зависимостей резонансного поля, снятых с помощью ФМР спектрометра с локальных участков пленки вдоль Ox (рис. 9а) показал, что конкурентная «борьба» между двумя механизмами формирования анизотропии приводит не только к резкому уменьшению

результатирующей одноосной анизотропии, но и к возникновению анизотропий четвертого и шестого порядков. С помощью описанного ранее метода из угловых зависимостей $H_R(\varphi_H)$ были определены эффективные параметры этих анизотропий и их изменение с ростом угла осаждения, т.е. с ростом x (рис. 10).

Обнаруженный эффект компенсации одноосной магнитной анизотропии имеет вполне очевидную природу – он является результатом простого сложения двух взаимно-ортогональных и близких по своей величине одноосных магнитных анизотропий различной природы. В тоже время, наличие в результирующей магнитной анизотропии исследуемого образца составляющих высокого порядка H_4^a и H_6^a может свидетельствовать о существовании в пленке обменносвязанных областей или фаз с различными магнитными параметрами [20]. Мы предположили, что наклонно-осажденные пленки в первом приближении можно рассматривать в виде магнитной структуры, состоящей из двух обменносвязанных слоев: в первом (толщиной d_2) слое, существует только одноосная анизотропия, наведенная магнитным полем, а второй слой (толщиной d_1 , $d_2 = 0.2d_1$) характеризуется как анизотропией косога напыления H_α^a , так и анизотропией, наведенной магнитным полем H_H^a (рис. 9b).

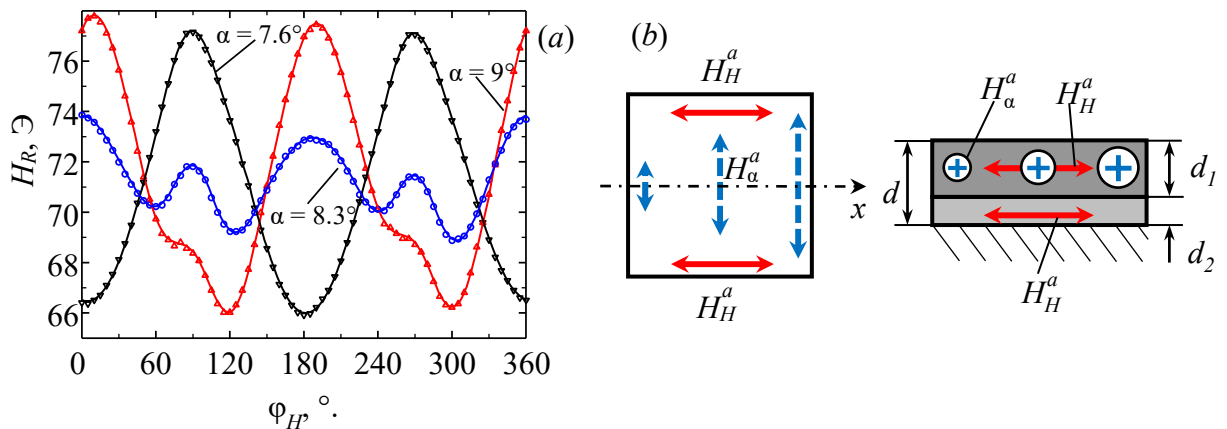


Рис. 9. (a) Зависимости поля резонанса H_R от направления поля развертки для локальных участков в точках $x = -2$ мм ($\alpha = 7.6^\circ$), $x = 1$ мм ($\alpha = 8.3^\circ$) и $x = 4$ мм ($\alpha = 9.0^\circ$). Маркеры – эксперимент, линии – расчет. (b) Двухслойная модель магнитной пленки с одноосными анизотропиями, наведенными магнитным полем H_H^a и наклонным осаждением H_α^a .

Правомерность выдвинутой гипотезы и хорошее соответствие двухслойной модели пленки реальному образцу подтверждают результаты исследования эффективной магнитной анизотропии рассматриваемой двухслойной структуры с помощью численного микромагнитного моделирования. Проведенные микромагнитные исследования позволили определить параметры теоретической модели, для которых рассчитанные характеристики наиболее близко соответствуют измеренным характеристикам реального образца. Рассчитанные эффективные параметры магнитных анизотропий представлены линиями на рис. 10.

Наблюдаемое в целом достаточно хорошее согласие результатов микромагнитного моделирования двухслойной структуры с экспериментальными данными доказывает правомерность выдвинутой гипотезы, объясняющей возникновение магнитной анизотропии высших порядков в наклонно осажденной пленке, находящейся при напылении в плоскостном магнитном поле. Однако необходимо отметить, что рассмотренная простая двухслойная модель не объясняет наблюдаемое в эксперименте снижение эффективного поля анизотропии четвертого порядка, наблюдаемое в эксперименте, но при «больших» углах падения атомов ($\alpha > 8.5^\circ$), и занижает экспериментально наблюдаемую величину поля анизотропии шестого порядка примерно в два раза.

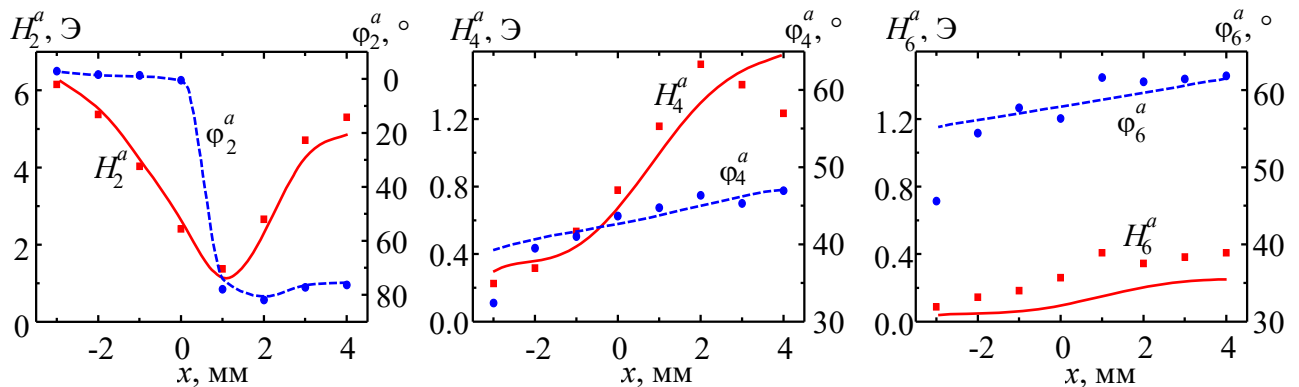


Рис. 10. Величины полей анизотропии второго, четвертого и шестого порядков $H_{2,4,6}^a$ и углов их осей легкого намагничивания $\phi_{2,4,6}^a$, вычисленные по угловым зависимостям поля ФМР для локальных участков вдоль оси образца (маркеры), и рассчитанные микромагнитным моделированием двухслойной структуры – линии.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Установлено, что наличие микрорельефа (системы параллельных канавок с периодом 5 – 80 мкм), сформированного на поверхности подложек тонких пленок NiFe, приводит к значительному уширению линии ферромагнитного резонанса и возникновению максимумов резонансного поля при небольшом отклонении ($\sim 5^\circ$) внешнего планарного поля развертки от направления, ортогонального канавкам.
2. Микромагнитным анализом модели тонкой пленки с периодическими канавками на поверхностях показано, что наблюдаемые в эксперименте эффекты связаны с возбуждением двух нормальных мод колебаний намагниченности. Установлено, что для определенного (близкого к экспериментальному) направления поля развертки относительно канавок, амплитуды и резонансные поля этих мод принимают такие значения, что резонансное поле и ширина линии интегральной кривой поглощения достигают максимума.
3. Численным моделированием доказано, что основным механизмом, отвечающим за зависимость одноосной магнитной анизотропии пленок пермаллоя от угла их осаждения и за перестройку равновесной конфигурации намагниченности,

является изменение магнитостатической энергии, связанное с эволюцией столбчатой микроструктуры пленок.

4. Продемонстрирована возможность определения с помощью подхода Нетцельмана среднего наклона столбцов и эллиптичности их поперечных срезов при моделировании тонких наклонно-осажденных магнитных пленок пермаллоя, используя компоненты усредненного по объему образцов поля размагничивания. Предложенная модификация данного подхода, учитывающая неоднородное распределение плотности упаковки по толщине наклонно-осажденных образцов, позволяет уточнить получаемые структурные характеристики.
5. Методом локального ФМР исследовано влияние наклонного осаждения на природу магнитных неоднородностей, а также их распределение по поверхности осаждаемых тонких пленок пермаллоя. Установлено, что даже небольшое отклонение луча атомов от нормали к подложке ($\sim 1^\circ$ - 3°) оказывает сильное влияние на основные магнитные характеристики тонких пленок.
6. Обнаружены эффекты компенсации одноосной магнитной анизотропии, а также формирование анизотропии четвертого и шестого порядков в тонкой пермаллоевой пленке, полученной напылением при наклонном падении молекулярного луча в присутствии магнитного поля. Показано, что наблюдаемые эффекты связаны с существованием в таких образцах двух обменно-взаимодействующих слоев с различными параметрами одноосной магнитной анизотропии.

Список основных публикаций по теме диссертации

1. Belyaev B.A., Izotov A.V., Solovev P.N. Competing magnetic anisotropies in obliquely deposited thin permalloy film // **Physica B**, Vol. 481, 2016. pp. 86-90.
2. Беляев Б.А., Изотов А.В., Соловьев П.Н. Исследование процесса роста и анализ структуры тонких, наклонно осаждаемых пленок // **Изв. вузов. Физика.**, Т. 59, № 2, 2016. С. 120-125.
3. Belyaev B.A., Izotov A.V., Solovev P.N. The effect of oblique deposition with small incidence on magnetic properties of thin magnetic films // **Solid State Phenomena**, Vol. 215, 2014. pp. 223-226.
4. Belyaev B.A., Izotov A.V., Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Lemberg K.V., Solovev P.N. Thin magnetic films with artificial texture on substrate: microwave properties // **Solid State Phenomena**, Vol. 215, 2014. pp. 233-236.
5. Беляев Б.А., Изотов А.В., Соловьев П.Н. Исследование влияния технологических условий вакуумного напыления тонких магнитных пленок на основные характеристики получаемых образцов // **Изв. вузов. Физика.**, Т. 56, № 8/2, 2013. С. 209-212.
6. Беляев Б.А., Изотов А.В., Лексиков А.А., Сержантов А.М., Соловьев П.Н., Лемберг К.В. Экспериментальное и теоретическое исследование влияния на высокочастотные свойства тонких магнитных пленок искусственной текстуры подложек // **Изв. вузов. Физика.**, Т. 56, № 8/2, 2013. С. 263-266.

7. Соловьев П.Н., Беляев Б.А. Двухмагنونные процессы релаксации в тонких пленках с периодически модулированной поверхностью // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Красноярск, 2016.
8. Соловьев П.Н., Беляев Б.А. Магнитные характеристики тонких пленок пермаллоя, изготовленных при небольшом отклонении потока осаждаемых атомов от нормали к подложкам // Современные проблемы радиоэлектроники: сб. науч. тр. Красноярск, 2016.
9. Solovev P., Izotov A., Belyaev B. Magnetic anisotropy of obliquely deposited thin films evaluated by micromagnetic modeling // The International Symposium on Hysteresis Modeling and Micromagnetics, Iasi, Romania, Abstract book, 2015. P. P34.
10. Свидетельство о гос. регистрации **программы для ЭВМ** № 2015660637 «MC Film Deposition» / П.Н. Соловьев, Б.А. Беляев, А.В. Изотов. – Зарегистрировано 5 октября 2015 г.
11. Solovev P., Izotov A., Belyaev B. Micromagnetic simulation of thin obliquely deposited films // European Conference on Magnetic Sensors and Actuators, Book of Abstract, Vienna, Austria, 2014. P. 204.
12. Solovev P., Belyaev B., Izotov A. Thin Permalloy films prepared by oblique deposition with small incidence // INTERMAG-2014 Conference digest, Dresden, 2014. pp. BR-15.
13. Изотов А.В., Соловьев П.Н., Беляев Б.А. Тонкие магнитные пленки с конкурирующими магнитными анизотропиями // ВИСММ-2014 тез. докл., Иркутск, 2014. С. 159.
14. Соловьев П.Н., Изотов А.В., Беляев Б.А. Анализ свойств тонких пермаллоевых наклонно осажденных пленок методами численного моделирования // ВИСММ-2014 тез. докл., Иркутск, 2014. С. 160.
15. Belyaev B.A., Izotov A.V., Leksikov A.A., Serzhantov A.M., Lemberg K.V., Solovev P.N. The effect of substrate artificial texture on high-frequency properties of thin magnetic films // EASTMAG-2013 Abstracts, Vladivostok, 2013. pp. 184.
16. Belyaev B.A., Izotov A.V., Solovev P.N. Influence the technological conditions of vacuum deposition of thin magnetic films on produced samples properties // EASTMAG-2013 Abstracts, Vladivostok, 2013. pp. 229.

Список цитируемой литературы

1. Heinrich B., Bland J.A.C. Ultrathin Magnetic Structures IV. Berlin: Springer, 2005.
2. Lagarkov A., Rozanov K. High-frequency behavior of magnetic composites // J. Magn. Magn. Mater., Vol. 321, 2009. pp. 2082–2092.
3. Krawczyk M., Grundler D. Review and prospects of magnonic crystals and devices with reprogrammable band structure // J. Phys.: Condens. Matter, Vol. 26, 2014. P. 123202.
4. Fassbender J., Strache T., Liedke M.O., Marko D., Wintz S., Lenz K., Keller A., Facsko S., Mönch I., McCord J. Introducing artificial length scales to tailor magnetic properties // New Journal of Physics, Vol. 11, 2009. P. 125002.
5. Gallardo R., Banholzer A., Wagner K., Körner M., Lenz K., Farle M., Lindner J., et al.

- Splitting of spin-wave modes in thin films with arrays of periodic perturbations: theory and experiment // *New Journal of Physics*, Vol. 16, 2014. P. 023015.
6. Sander D. The magnetic anisotropy and spin reorientation of nanostructures and nanoscale films // *J. Phys.: Condens. Matter*, Vol. 16, 2004. pp. R603–R636.
 7. Liedke M.O., Korner M., et al. Crossover in the surface anisotropy contributions of ferromagnetic films on rippled Si surfaces // *Phys. Rev. B.*, Vol. 87, 2013. P. 024424.
 8. Barranco A., Borrás A., et al. Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices // *Progr. Mat. Science*, Vol. 76, 2016. pp. 59-153.
 9. Barsukov I., Landeros P., Meckenstock R., Lindner J., Spoddig D., Li Z.A., et al. Tuning magnetic relaxation by oblique deposition // *Phys. Rev. B.*, Vol. 85, 2012. P. 014420.
 10. Quiros C., Peverini L., Diaz J., Alija A., Blanco C., Velez M., et al. Asymmetric grazing incidence small angle x-ray scattering and anisotropic domain wall motion in obliquely grown nanocrystalline Co films // *Nanotechnology*, Vol. 25, 2014. P. 335704.
 11. Belyaev B.A., Izotov A.V., Leksikov A.A. Magnetic imaging in thin magnetic films by local spectrometer of ferromagnetic resonance // *IEEE Sensors*, Vol. 5, No. 2, 2005. pp. 260-267.
 12. Belyaev B.A., Izotov A.V., Solovov P.N. Competing magnetic anisotropies in obliquely deposited thin permalloy film // *Physica B*, Vol. 481, 2016. pp. 86-90.
 13. Беляев Б.А., Изотов А.В. Микромагнитный расчет магнитостатических мод колебаний ортогонально намагниченного диска железо-иттриевого граната // *ФТТ*, Т. 55, № 12, 2013. С. 2370-2378.
 14. Landeros P., Mills D.L. Spin waves in periodically perturbed films // *Phys. Rev. B.*, Vol. 85, 2012. P. 054424.
 15. Suzuki M., Taga Y. Numerical study of the effective surface area of obliquely deposited thin films // *J. Appl. Phys.*, Vol. 90, 2001. P. 5599.
 16. Smy T., Vick D., et al. Three-dimensional simulation of film microstructure produced by glancing angle deposition // *J. Vac. Science Techn.*, Vol. 18, 2000. pp. 2507-2512.
 17. Weber W., Allenspach R., Bischof A. Determining magnetic anisotropies from hysteresis loops // *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 70, 1997. P. 520.
 18. Moskowitz R., Torre E.D. Theoretical aspects of demagnetization tensors // *IEEE Trans. Magn.*, Vol. MAG-2, No. 4, 1966. pp. 739-744.
 19. Netzelmann U. Ferromagnetic resonance of particulate magnetic recording tapes // *J. Appl. Phys.*, Vol. 68, 1990. P. 1800.
 20. Valvidares S.M., Alvarez-Prado L.M., Martín J.I., Alameda J.M. Inverted hysteresis loops in magnetically coupled bilayers with uniaxial competing anisotropies: theory and experiments // *Phys. Rev. B*, Vol. 64, 2001. P. 134423.