

ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ им. К. А. ВАЛИЕВА
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК



*Посвящается 35-летию
Физико-технологического института им. К.А. Валиева
Российской академии наук*

ТРУДЫ **ФТИАН**

Основаны в 1991 году
Главный редактор
член-корреспондент РАН В.Ф. ЛУКИЧЁВ

МОСКВА НАУКА 2024

ТРУДЫ
ФТИАН

Том 32

**КВАНТОВЫЕ КОМПЬЮТЕРЫ,
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА**
физика, технология, диагностика
и моделирование

Ответственный редактор
доктор физико-математических наук
К.В. РУДЕНКО

Рецензенты:

*член-корреспондент РАН В.Ф. Лукичёв,
доктор технических наук П.П. Мальцев*

Труды Физико-технологического института / гл. ред. В.Ф. Лукичёв ; Физико-технологич. ин-т им. К.А. Валиева РАН. — М. : Наука, 1991 — . — ISSN 0868-7129.

Т. 32: Квантовые компьютеры, микро- и наноэлектроника : физика, технология, диагностика и моделирование / отв. ред. К.В. Руденко. — 2024. — 483 с. — ISBN 978-5-02-041043-5.

Том 32 Трудов ФТИАН посвящен 35-летию Института и предваряется кратким очерком истории становления и развития Института как ведущей научной организации в области микро- и наноэлектроники, твердотельных устройств для квантовых вычислений. Сборник содержит результаты по актуальным научным направлениям, полученным лабораториями как Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН, так и Ярославского филиала ФТИАН. Представлены работы в области квантовых вычислений, физики и технологии приборов наноэлектроники, МЭМС, изготовления микро- и наноструктур, моделирования приборов и технологических процессов.

Для широкого круга специалистов в области квантовых информационных технологий, микро- и наноэлектроники, а также студентов и аспирантов, обучающихся по соответствующим специальностям.

ISBN 978-5-02-041043-5

- © Физико-технологический институт им. К.А. Валиева РАН, 2024
- © Российская академия наук и издательство «Наука», продолжающееся издание «Труды ФТИАН» (разработка, оформление), 1991 (год основания), 2024
- © ФГБУ Издательство «Наука», редакционно-издательское оформление, 2024

УДК 538.975

О.С. ТРУШИН¹, И.С. ФАТТАХОВ¹, А.А. ПОПОВ¹, Л.А. МАЗАЛЕЦКИЙ^{2, 1},
А.А. ЛОМОВ, Д.М. ЗАХАРОВ, Р.А. ГАЙДУКАСОВ, А.В. МЯКОНЬКИХ,
Л.А. ШЕНДРИКОВА³

УПРАВЛЯЕМОЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ НАКЛОННОГО НАПЫЛЕНИЯ

¹ Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН

² Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Методом электронно-лучевого испарения получены тонкие пленки Со на наклонных подложках Si(001). Установлено, что при углах падения испаряемого материала на подложку более 80° (скользящее напыление) на поверхности подложки формируются массивы отдельно стоящих наноколонн Со с сечением ~ 25 нм и аспектным отношением (длина/поперечный размер) не менее 15. При этом магнитная легкая ось пленки ориентируется вдоль оси наноколонн, что приводит к появлению нормальной компоненты вектора намагничивания к поверхности пленки. При включении вращения подложки формируется массив наноспиралей. При быстром вращении подложки (30 об/мин) магнитная легкая ось приближается к нормали к поверхности пленки. При низкой скорости вращения подложки (0.6 об/мин) формируется массив наноспиралей, придающий пленке выраженные хиральные свойства.

Введение

Прогресс в области микроэлектроники во многом обусловлен совершенствованием технологии получения тонких пленок. Управляя параметрами текстуры пленок в процессе их роста, можно направленно изменять свойства пленок, достигая тем самым требуемых функциональных характеристик. Перспективным методом формирования пленок с особыми свойствами является их наноструктурирование в процессе роста. Формирование однородных и хорошо упорядоченных массивов наноструктур на поверхности позволяет существенно изменять электрофизические, магнитные и оптические свойства пленок [1]. Один из известных технологических приемов, позволяющих обеспечить рост

наноструктур, – напыление под углом. Это относительно недорогая технология, которая легко реализуется в условиях массового производства. Данный метод получения пленок привлек к себе в последнее время значительный интерес и ему посвящено множество работ [2, 3]. Известно, что этим методом можно получать наноструктуры разной формы и размера – от наклонных нанопроволок и наноспиралей до вертикальных наноколонн [3]. Установлено, что причиной наноструктурирования пленок в условиях наклонного напыления является эффект затенения, состоящий в том, что кристаллиты, получившие случайное преимущество в росте на начальных этапах, подавляют в дальнейшем рост соседей, перехватывая поток падающих на поверхность атомов и тем самым формируя поры. Схематическая иллюстрация «эффекта затенения» представлена на рис. 1.

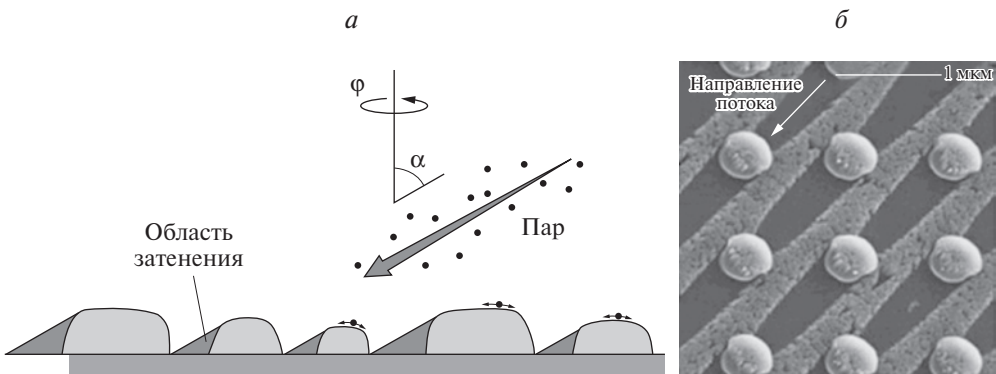


Рис. 1. Схематическая иллюстрация «эффекта затенения»

Данный эффект убедительно воспроизводится в рамках компьютерного моделирования методами Монте-Карло [4] и молекулярной динамики [5].

К одной из важных функциональных характеристик магнитных пленок относится их магнитная анизотропия. Магнитные пленки, у которых ось магнитной анизотропии направлена под углом к поверхности, представляют значительный интерес для совершенствования технологии записи информации на жесткий диск [6]. В ряде работ [7–10] была продемонстрирована возможность изменения магнитной анизотропии тонких пленок кобальта, получаемых при наклонном напылении.

Цель настоящей работы – нахождение оптимальных условий наноструктурирования пленок Co на кремниевой подложке в условиях наклонного напыления и формирования массивов наноколонн с высоким аспектным отношением. Такие наноколонны должны обеспечить необходимые свойства магнитной анизотропии пленки и ориентацию легкой оси под углом к подложке. Кроме того, в рамках данной работы изучались условия получения массивов наноспиралей при включении вращения подложки в процессе роста. Создание таких наноструктур является перспективным для получения хиральных пленок, проявляющих оптическую активность при отражении света.

1. Методика эксперимента

Подходящей технологией для экспериментов по наклонному напылению является электронно-лучевое испарение. Этот метод сочетает достаточно высокий рабочий вакуум и однородный поток распыляемого материала. Упрощенная схема эксперимента приведена на рис. 2.

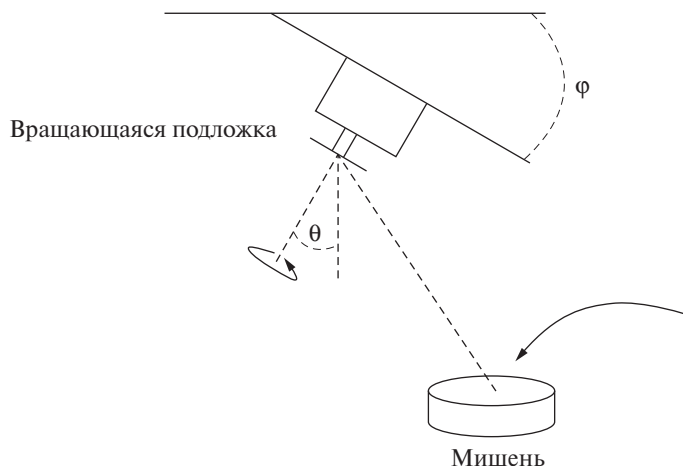


Рис. 2. Схема эксперимента по наклонному напылению

Ранее данным методом нами были получены наноструктурированные пленки Al на кремниевой подложке [11]. В настоящей работе эксперименты по напылению пленок кобальта на наклонную подложку проводили на установке электронно-лучевого испарения Оратория-9. Условия напыления были следующие: базовый вакуум $4 \cdot 10^{-6}$ Тор, напряжение электронного луча 8 кВ, ток 0.5 А. В качестве подложки использовался кусок стандартной пластины монокристаллического кремния с ориентацией (001) со слоем термического окисла толщиной 300 нм прямоугольной формы, размером $20 \cdot 15$ мм. Чтобы обеспечить одинаковые условия напыления для разных углов наклона подложки, была изготовлена специальная оснастка, позволяющая одновременно располагать 6 образцов с варьируемыми углами наклона. Расстояние от испарителя до подложки составляло около 1 м. Такое значительное удаление от источника напыляемого материала обеспечивало высокий уровень однородности потока. За одно напыление было получено 6 образцов с разными углами напыления в диапазоне от 50 до 85° . Кроме того, держатель обеспечивал возможность вращения подложки с варьируемыми скоростями. Все эксперименты проводились при комнатной температуре. Скорость роста пленок при этом варьировалась в диапазоне от 0.9 до 1.5 нм/с при изменении угла наклона подложки. Время напыления было одинаковым для всех образцов и составляло 5 мин. Получаемые в этих условиях пленки обладали хорошей адгезией и имели гладкую поверхность, характеризующуюся металлическим блеском.

Полученные таким образом пленки далее подвергались различным видам анализов. Морфология и структура получаемых пленок были исследованы

методом сканирующей электронной микроскопии (Supra 40). Рентгеноструктурный анализ выращенных пленок был выполнен на дифрактометре SmartLab (Rigaku, Япония) с вращающимся Cu (9 кВт) анодом, СВО оптикой (параболическое зеркало Гёбеля). Перед детектором устанавливалась щель Соллера с угловым разрешением 0.114° . Магнитные характеристики пленок измерялись на магнитометре с вибрирующим образцом фирмы «LakeShore», модель 7407 (США). Измерения проводились при комнатной температуре в полях до 1.6 Тл. Петли гистерезиса измерялись при различных ориентациях магнитного поля относительно плоскости образцов. Оптические характеристики определялись на спектральном эллипсометре M-2000X (J.A. Woollam Co, USA) при угле падения 65° , в диапазоне длин волн 248–1000 нм.

2. Результаты исследований

Морфология и текстура получаемых пленок

Полученные экспериментальные образцы далее подвергались различным видам анализа. Исследования морфологии поверхности полученных пленок проводились методами сканирующей электронной микроскопии (Supra 40) и атомно-силовой микроскопии (СММ-2000). Полученные результаты показаны на рис. 3, где представлены микроскопические изображения пленки сверху и поперечного среза.

Проведенные исследования показали, что для углов наклона подложки выше 70° наблюдается процесс наноструктурирования пленки, сопровождаемый увеличением пористости. При этом степень пористости растет с ростом угла наклона. Кроме того, наклон нановолокон к нормали увеличивается, и толщина пленки снижается.

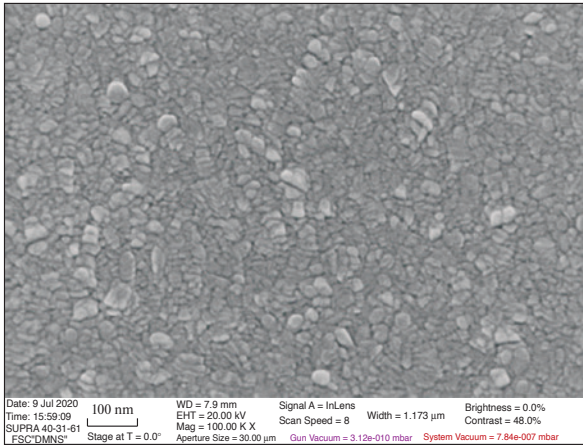
Усредненные характеристики данных пленок (толщина и наклон кристаллических зерен) представлены на рис. 4 как функции угла наклона подложки в процессе роста.

По данным рис. 4 видно, что с увеличением угла наклона подложки уменьшается толщина пленки. Это объясняется снижением эффективной площади захвата напыляемого материала. С другой стороны, на рис. 4, б показано, что с ростом наклона подложки угол наклона зерен также увеличивается и далее выходит на насыщение.

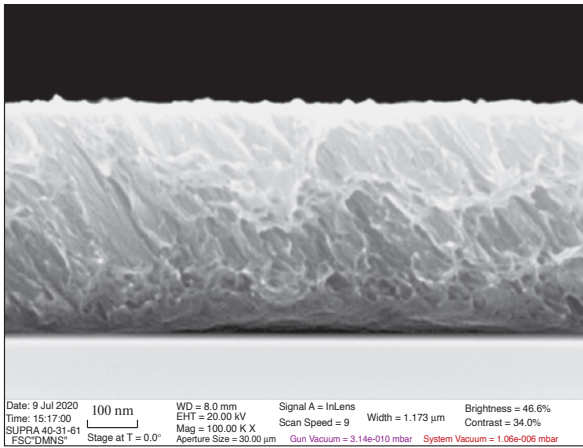
По результатам данных исследований установлено, что оптимальные условия наноструктурирования получаемых пленок достигаются при максимальном установленном угле наклона подложки 85° [12]. Оптимальными в данном контексте являются условия напыления, обеспечивающие наиболее четко выраженное наноструктурирование, когда пленка состоит из отдельных нановолокон, разделенных порами. На рис. 5 приведены SEM-изображения скола пленочной структуры и вид сверху на ее поверхность, полученные методом электронной микроскопии. Данный образец пленки получен в оптимальных условиях (угол наклона подложки $\theta = 85^\circ$) без включения вращения.

Видно, что в данных условиях формируется наклонная волокнистая структура, состоящая из нанокolonн длиной несколько сотен нанометров и диаметром менее 30 нм. Их наклон к нормали составляет около 60° .

a



b



в

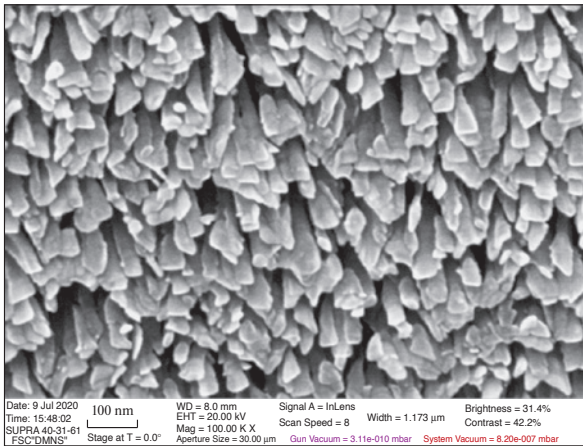
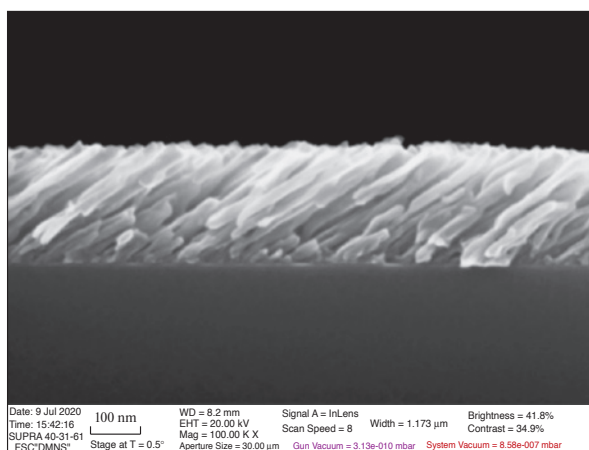
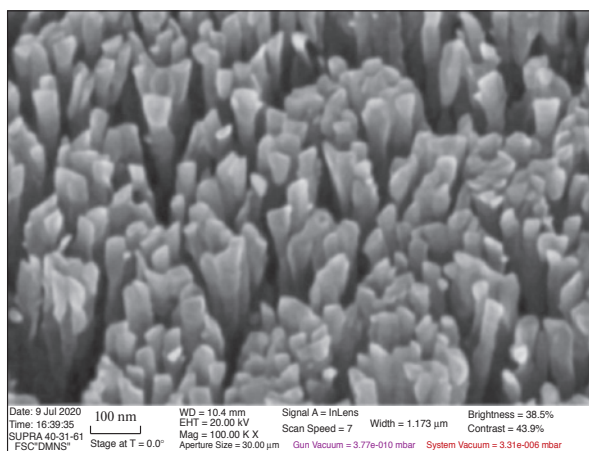


Рис. 3. SEM-изображения морфологии и текстуры (поперечный срез) получаемых пленок при разных углах наклона подложки: $\alpha = 50^\circ$ (*a*, *b*); $\alpha = 75^\circ$ (*в*, *г*); $\alpha = 80^\circ$ (*д*, *e*)

2



d



e

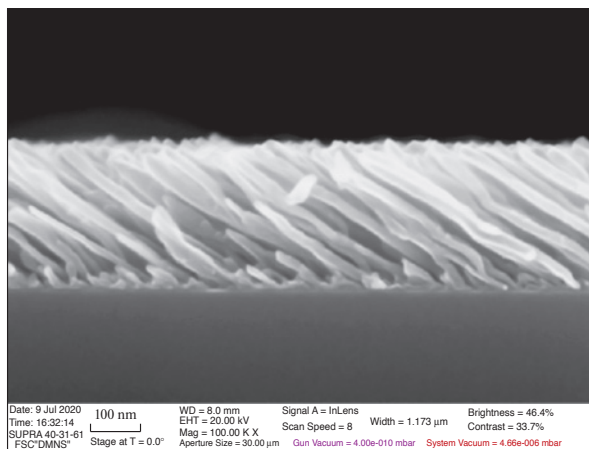


Рис. 3 (Окончание)

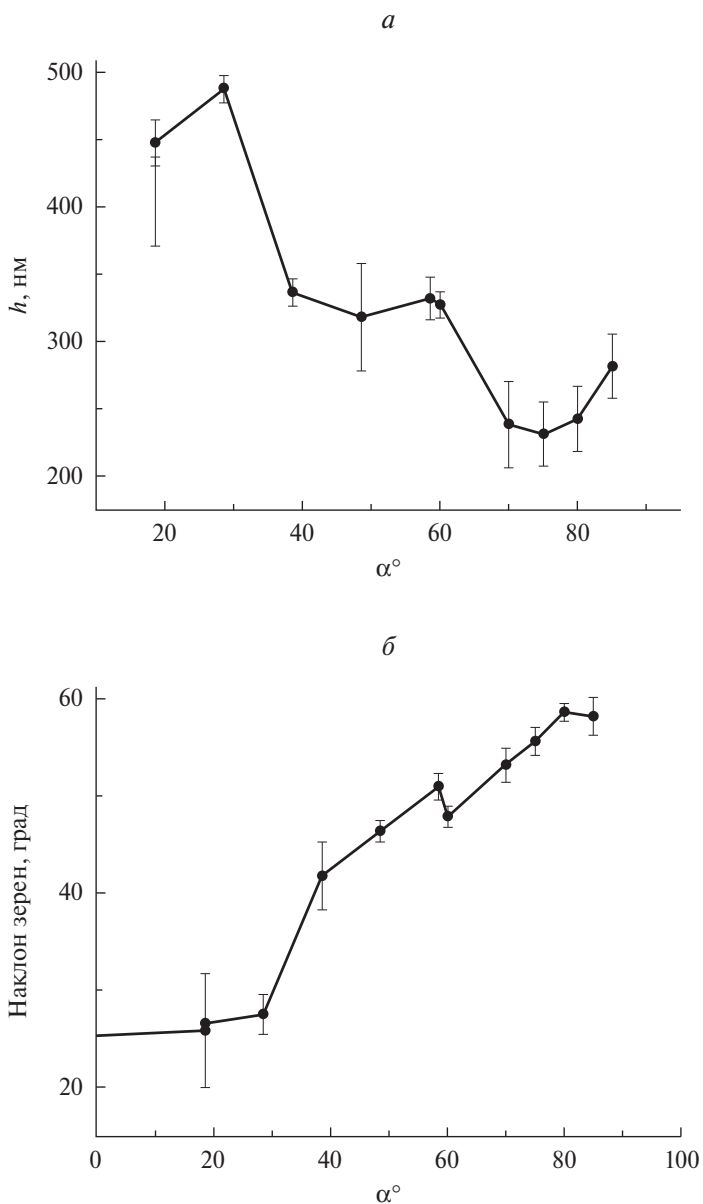
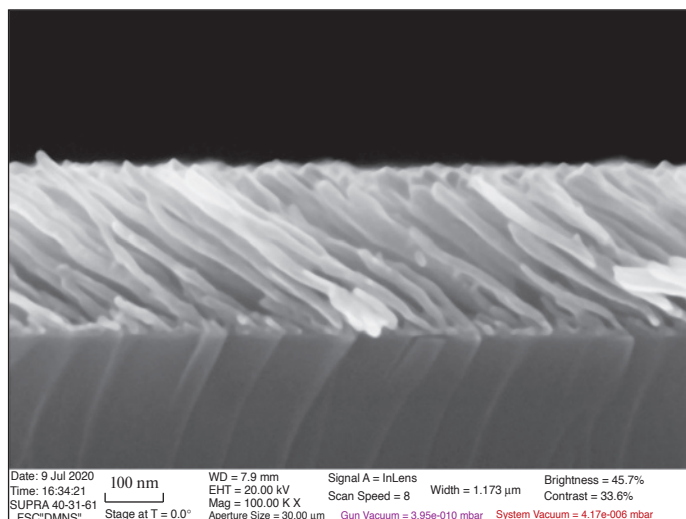


Рис. 4. Зависимости толщины (*a*) и наклона зерен (*b*) от угла наклона подложки

Более полное представление о морфологии пленки дает вид сверху на ее поверхность (рис. 5, *b*). Из анализа данных рисунка можно заключить, что отдельные волокна кобальта имеют форму узких плоских нанополосок шириной меньше 30 нм и толщиной до 5 нм. Эти нанополоски разделены большим объемом пор.

Данные наблюдения также подтверждают результаты атомно-силовой микроскопии, представленные на рис. 6.

a



b

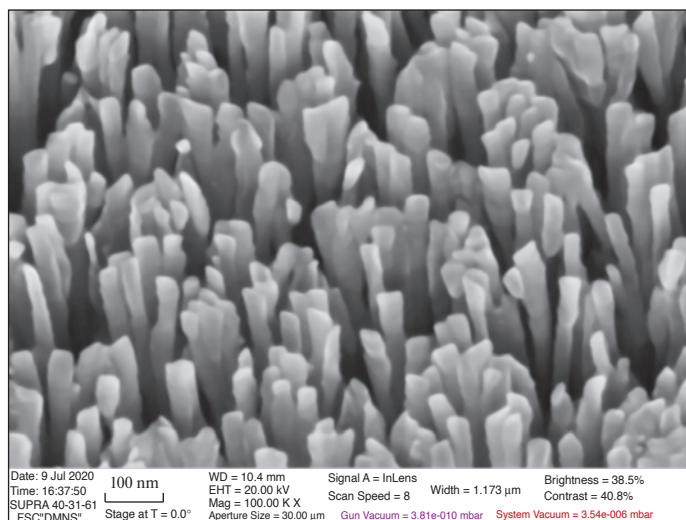


Рис. 5. SEM-изображение поперечного среза пленки Co (*a*) и вид сверху на ее поверхность (*b*), полученной напылением под углом $\alpha = 85^\circ$ без вращения

Анализ данных показывает, что поверхность пленок кобальта представляет совокупность наклонных нанозерен, разделенных большим количеством пор. Из-за специфики методики атомно-силовой микроскопии (в процессе сканирования зонд может совершать только вертикальные смещения) полученное изображение поверхности образца несколько отличается от того, что дает сканирующая электронная микроскопия. В частности, на рис. 6 несколько зерен сливаются в единый конгломерат и размер зерен несколько больше, чем на рис. 5. Однако общий характер картины роста вполне согласуется.

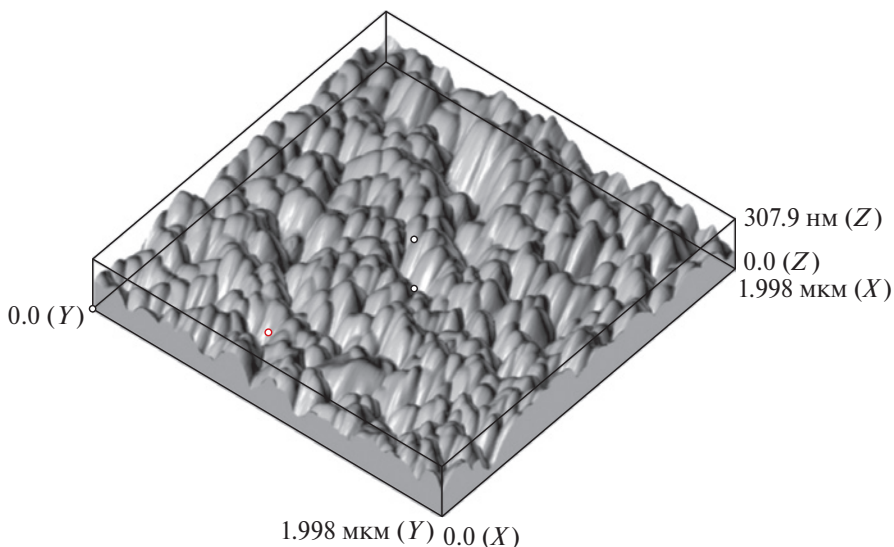


Рис. 6. Изображение поверхности пленки кобальта, полученное методом атомно-силовой микроскопии. Размер скана в плоскости 2 мкм

Картина роста сильно изменится, если оставить тот же угол наклона подложки, но начать менять ее ориентацию по отношению к падающему на нее потоку вещества. Для этого необходимо включить вращение подложки вокруг ее нормали к плоскости. Схематическое изображение механизма формирования наноспиралей при включении вращения подложки вокруг ее нормали к плоскости представлено на рис. 7.

Данные эксперименты по напылению пленок кобальта на наклонную подложку с включением вращения были также проведены. Картины роста пленок при различных скоростях вращения подложки и угле наклона $\theta = 85^\circ$ можно проследить на SEM-изображениях, представленных на рис. 8.

Как видно из анализа данных этих рисунков, при включении вращения подложки в процессе роста пленки формируется массив наноспиралей (геликонов). При изменении скорости вращения изменяется шаг спирали и ее радиус. При скорости 0.6 об/мин шаг спирали составляет около 250 нм и радиус около 150 нм, при скорости 1.6 об/мин шаг спирали составляет около 150 нм и радиус около 100 нм, при скорости 30 об/мин шаг спирали практически неразличим. Как видно на рис. 8, в, при высоких скоростях вращения формируются практически вертикальные нанокolonны с уширением кверху.

Таким образом, данные эксперименты показывают возможность эффективно управлять текстурой роста путем изменения условий напыления.

Структурные особенности пленок

Полученные пленки были исследованы методом рентгеноструктурного анализа. На рис. 9 представлены дифрактограммы, полученные в симметричной геометрии ($2\theta/\omega$ -сканирование, кривая 1) и при скользящем угле падения 0.5° рентгеновского луча на поверхность образца (2θ -сканирование, кривая 2).

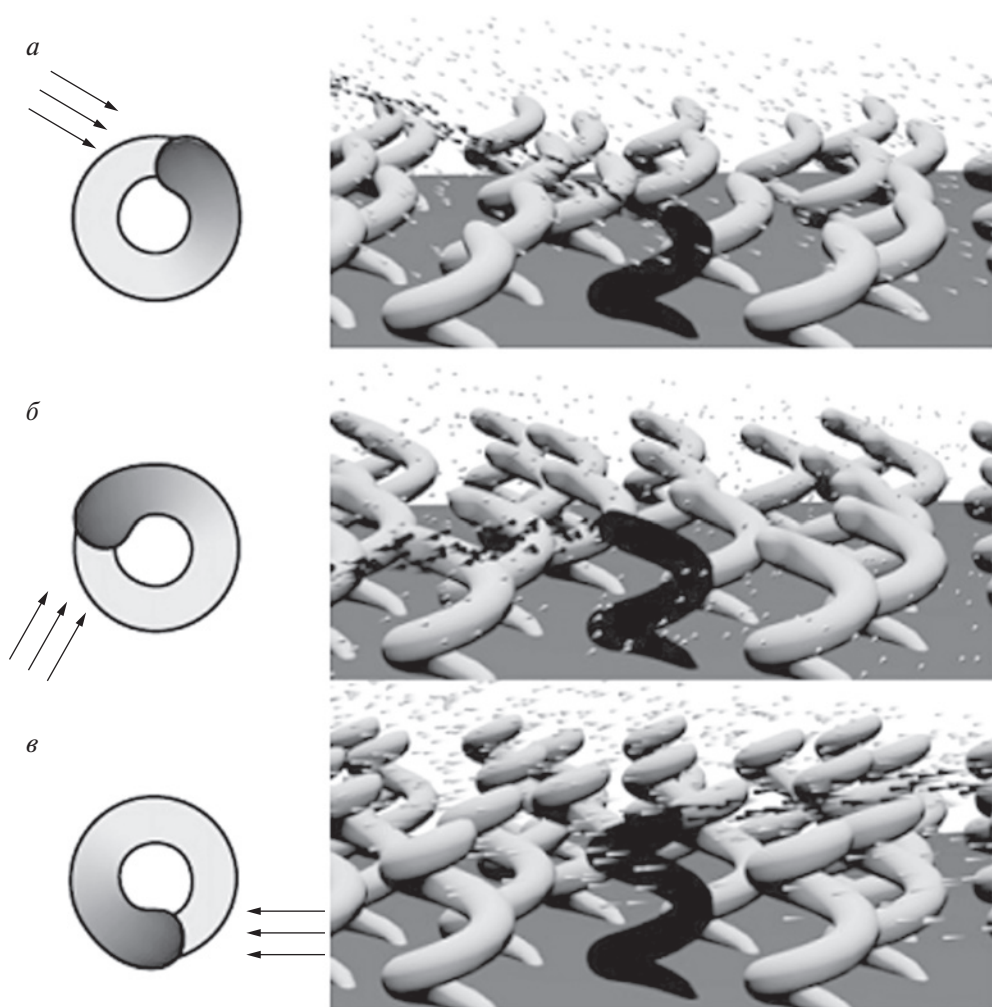
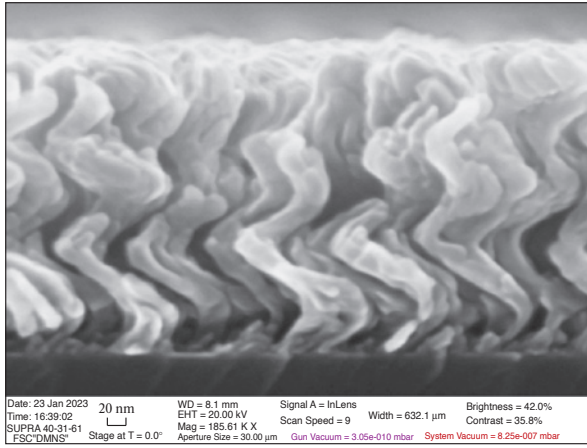


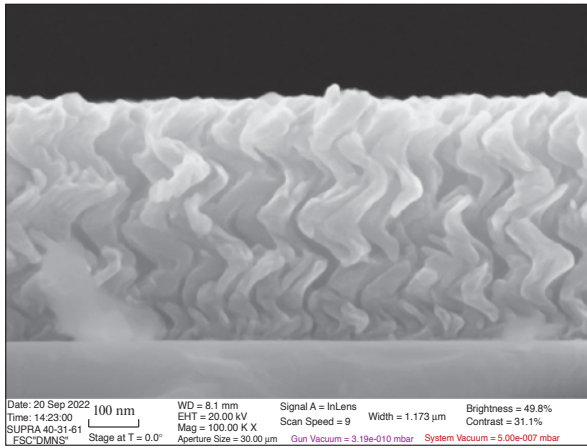
Рис. 7. Схематическое изображение механизма формирования наноспиралей при включении вращения подложки вокруг ее нормали к плоскости; на рис. *a*, *б*, *в* показаны последовательные стадии формирования зоны роста при вращении подложки

Угловое положение дифракционных максимумов на обеих дифрактограммах от пленки кобальта с наноспиральями (внешний вид этого образца показан на рис. 8, *в*) соответствует гексагональной фазе кобальта с параметрами кристаллической решетки, $a = b = 0.2505$ нм, $c = 0.407$ нм (номер карточки PDXL 01-077-7453). В то же время соотношение интенсивностей наблюдаемых трех характерных максимумов 100, 002 и 101 заметно отличается от соотношения интенсивностей для модели рассеяния от сильно разупорядоченных кристаллитов или «порошка». Самый интенсивный максимум 002 на дифрактограмме (рис. 9, *1*) от пленки с наноспиральями в ~ 10 раз превышает интенсивность отражений 100 и 101 в отличие от базы данных ICDS, где интенсивность отражения 101 составляет 100% против отражений 100 (26.5%) и 002 (27.8%). Этот результат свидетельствует о присутствии в пленке с наноспиральями ярко

a



б



в

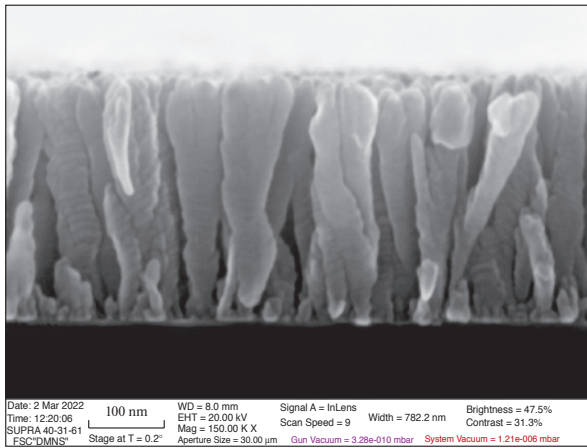


Рис. 8. SEM-изображения поперечных срезов пленок Co, полученных напылением под углом $\alpha=85^\circ$ с разными скоростями вращения подложки: 0.6 об/мин (*a*); 1.6 об/мин (*б*); 30 об/мин (*в*)

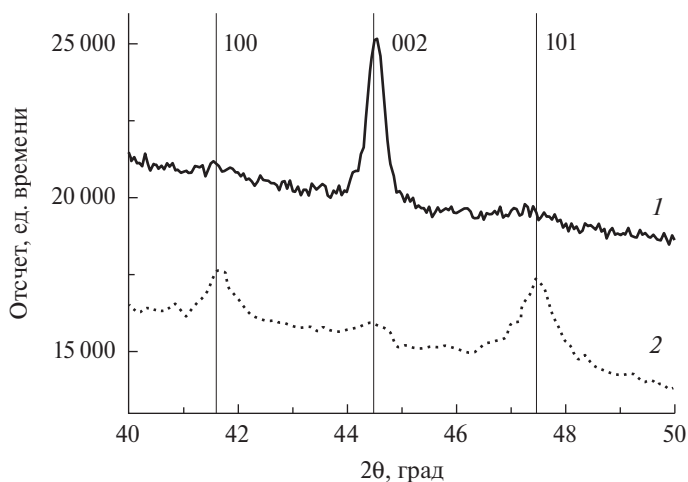


Рис. 9. XRD дифрактограммы кобальтовой пленки с наноспиральями на подложке Si(001), выращенной при 30 об/мин, в симметричной геометрии (1) и при фиксированном угле скольжения $\varphi = 0.5^\circ$ (2).

выраженной текстуры в [001] направлении. Для подтверждения этого вывода рассмотрим дифрактограмму (рис. 9, 2), полученную при скользящем падении рентгеновского луча на образец. На ней видно, что интенсивность максимума 002 уменьшилась до 20% против максимума 101.

Таким образом, рентгеноструктурные исследования показали наличие в пленках гексагональной фазы кобальта с выраженной текстурой в [001] направлении.

Магнитная анизотропия

Как было показано выше, наноструктурирование пленок кобальта при отсутствии вращения приводит к формированию массивов наклонных нановолокон с высоким аспектным отношением. Известно, что наноразмерные магнитные волокна характеризуются осью легкого намагничивания, направленной вдоль образующей. Это обусловлено эффектом анизотропии формы. Можно ожидать, что для пленок, состоящих из массивов таких нановолокон, легкая ось также будет ориентироваться вдоль волокон.

Проведенные нами измерения магнитных характеристик этих пленок подтвердили обнаруженную ранее [3] тенденцию изменения ориентации легкой оси намагничивания с ростом угла наклона подложки. При больших углах наклона она ориентируется вдоль оси нановолокон, обеспечивая тем самым наклон вектора намагничивания к поверхности пленки.

Для носителей магнитной записи оптимальным является перпендикулярная ориентация легкой оси магнитной анизотропии. Для этого необходимо ориентировать нановолокна перпендикулярно подложке. Как было показано выше, одним из способов достижения такого результата является увеличение скорости вращения подложки в процессе роста. В этих условиях формируются наноспиральи с очень малым шагом (рис. 8, в).

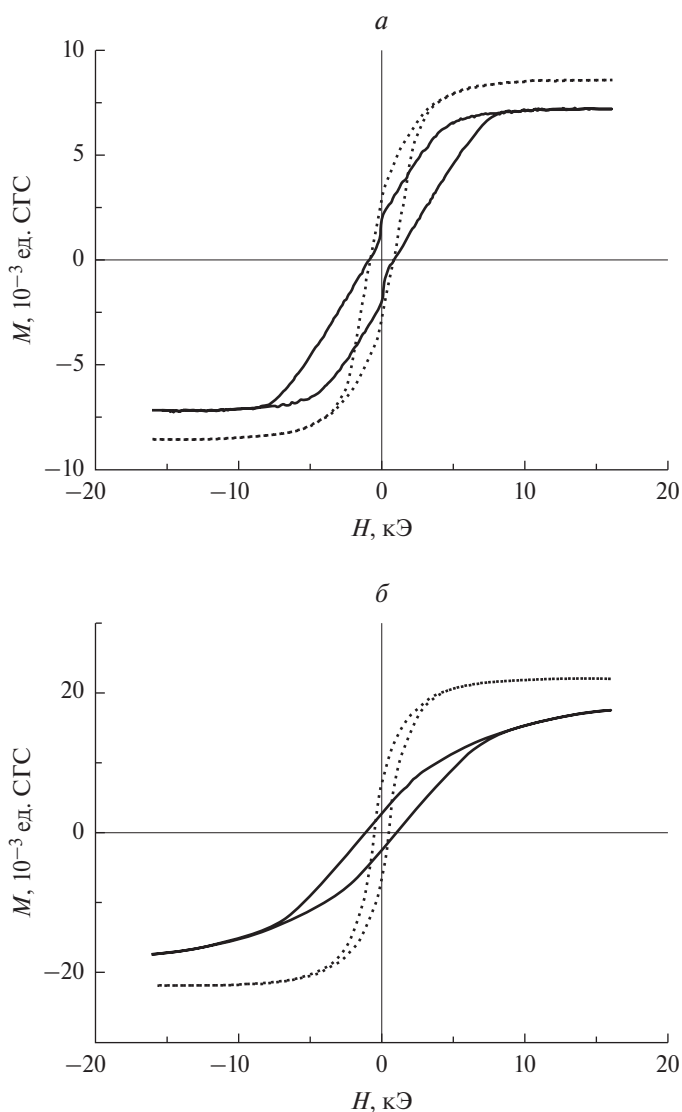


Рис. 10. Кривые перемангничивания для двух образцов наноструктурированных пленок: *a* – наноспираль (скорость вращения 30 об/мин); *б* – наклонные нановолокна (без вращения); сплошная линия – по нормали к плоскости, пунктирная линия – в плоскости

Имея это в виду, были проведены сравнительные измерения кривых перемангничивания пленок, состоящих из вертикальных наноспиралей и наклонных нановолокон. Измерения проводились на магнитометре с вибрирующим образцом (vibrating sample magnetometer – VSM). Для каждого образца проводилось несколько измерений кривых перемангничивания при различных ориентациях внешнего магнитного поля – перпендикулярно плоскости пленки и вдоль плоскости пленки при двух ориентациях образца. Типичные результаты представлены на рис. 10.

Как видно из приведенных зависимостей, вертикально стоящие наноспираль (нанокolonны) характеризуются ориентацией легкой оси ближе к нормали. Об этом свидетельствуют начало формирования ступеньки в области малых полей на петле гистерезиса (сплошная кривая на рис. 10, *a*) и выход на насыщение. Однако для улучшения функциональных характеристик (достижение отчетливо выраженной перпендикулярной магнитной анизотропии) требуется дальнейшая работа по оптимизации технологии [12].

Таким образом, проведенные эксперименты показали, что, меняя технологические условия напыления, можно управлять направлением магнитной анизотропии пленки.

Оптические характеристики

На основании вышеизложенного следует: при включении вращения подложки в процессе роста пленки происходит формирование массива наноспиралей. Все эти наноспираль закручены в одну и ту же сторону, что определяется направлением вращения образца. Такая морфология роста приводит к нарушению симметрии в плоскости пленки по отношению к зеркальным отражениям. Это свойство получило название хиральность. Исходя из общих соображений симметрии, можно ожидать, что хиральность поверхности может проявиться в оптических явлениях отражения, так как световая волна может обладать круговой поляризацией. В определенных условиях свет, обладающий, например, правой циркулярной поляризацией, будет по-разному взаимодействовать с наноспиралью, закрученными направо и налево. Поэтому разумно предположить, что этот эффект проявит себя при отражении циркулярно-поляризованного света от хиральной поверхности. При этом можно ожидать, что геометрические размеры наноспираль (величина шага и ее радиус) должны влиять на поляризационные свойства структуры.

Для проверки этих предположений были проведены эллипсометрические исследования полученных образцов. Использован спектральный эллипсометр М-2000Х (J.A. Woollam Co, USA). Для каждого образца были проведены комплексные измерения векторов Стокса в диапазоне длин волн 248–1000 нм при угле падения (и отражения), равном 65° . В результате были рассчитаны элементы матрицы Мюллера [13]. По этим данным проводился анализ поляризационных свойств полученных структур. Изложенные выше предположения вполне подтверждаются полученными экспериментальными данными [14].

На рис. 11 приведены зависимости степени поляризации отраженного излучения для двух видов падающей циркулярно-поляризованной волны (правой и левой) от длины волны для двух разных образцов, полученных при разных скоростях вращения.

Как видно из анализа данных рис. 11, *a*, степень поляризации по-разному изменяется при изменении длины волны для правой и левой поляризации для образца, полученного на самой медленной скорости вращения (0.6 об/мин). По-видимому, этот факт можно понять, сравнив длину волны и геометрические размеры наноспираль (шаг спирали и ее радиус). Для данного образца, как видно на рис. 8, *a* (SEM-изображение), шаг спирали составляет около 250 нм, что сравнимо с длиной волны используемого при измерениях излучения. Именно в области малых длин волн происходит существенная деполяри-

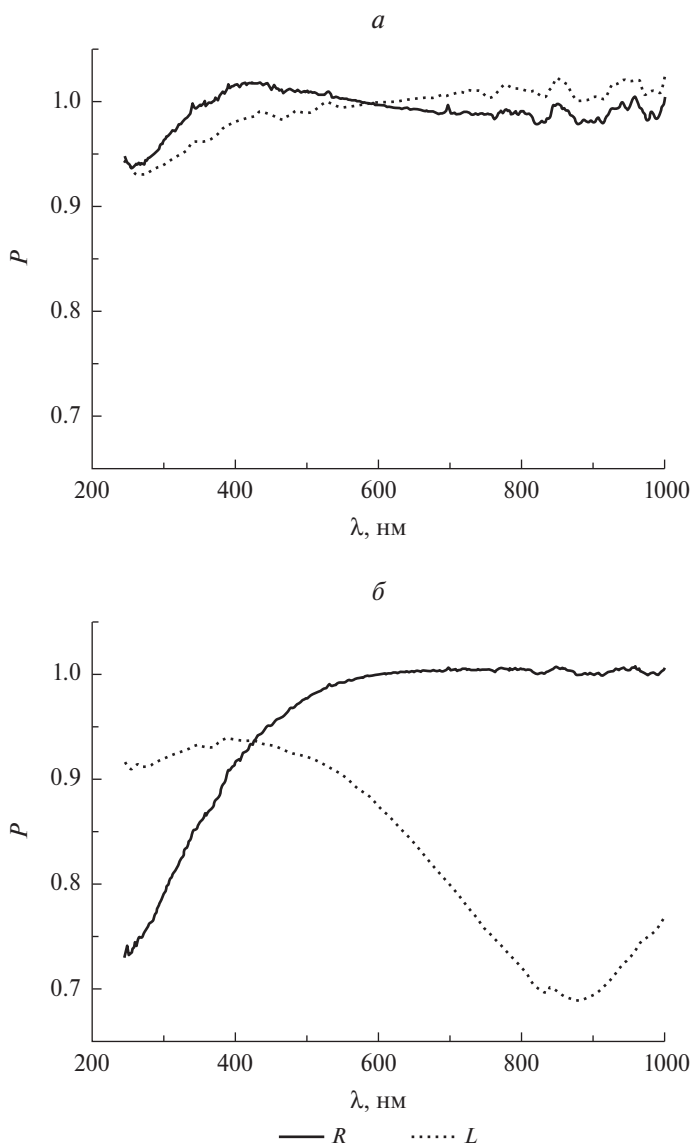


Рис. 11. Зависимость степени поляризации отраженной волны от длины волны используемого излучения для двух видов падающих циркулярно-поляризованных волн (правой R и левой L): для образца с вращением 0.6 об/мин (a) и 1.6 об/мин (b)

зация (снижение степени поляризации на 30%) одного из видов циркулярной волны (R).

С одной стороны, для другого вида поляризации (L) снижение степени поляризации имеет место в области более длинных волн (900 нм). Это может происходить за счет сбоя фазы при отражении или поглощении света металлическими наноструктурами. С другой стороны, для образца, полученного при

большей скорости вращения (1.6 об/мин), зависимости степени поляризации от длины волны для двух видов поляризации мало отличаются. Для этого образца шаг спирали и ее радиус меньше и эффект деполяризации менее выражен. Таким образом, варьируя скорость вращения образца в процессе роста, можно изменять поляризационные свойства получаемой пленки.

Выводы

В результате проведенных экспериментов установлено, что при больших углах наклона подложки (более 70°) происходит наноструктурирование пленки кобальта. Оптимальные условия наноструктурирования (когда нанополоски отчетливо разделены) достигаются при угле наклона подложки 85° . При этом формируется наклонная волокнистая структура с размерами волокон до 30 нм. Проведенные нами измерения магнитных характеристик этих пленок подтвердили тенденцию изменения ориентации легкой оси намагничивания с ростом угла наклона подложки. При больших углах наклона она ориентируется вдоль оси нановолокон, обеспечивая тем самым наклон вектора намагничивания к поверхности пленки. При включении вращения подложки формируется массив наноспиралей. Варьируя скорость вращения подложки, можно получать наноспирали с разными геометрическими размерами (шаг закручивания, радиус спирали).

Необходимо отметить, что все наноспирали закручены в одну и ту же сторону, что придает пленке свойства хиральности. Это, в частности, приводит к асимметрии оптических характеристик при отражении (право и лево) циркулярно-поляризованного света. Данная морфология может быть перспективной для применения в области наносенсорики и нанокатализа, а также для создания оптически активных поверхностей и в качестве среды высокоплотной магнитной записи информации.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по темам № FFNN-2022-0018 и № FFNN-2022-0019. Рентгенодифракционные эксперименты были выполнены в Национальном исследовательском технологическом университете (МИСИС) на кафедре физического материаловедения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Амиров И.И., Селюков Р.В., Наумов В.В., Горлачев Е.С.* Влияние условий нанесения и ионно-плазменной обработки тонких пленок кобальта на их электросопротивление // Микроэлектроника 2021. Т. 50. № 1. С. 3.
2. *Barranco A., Borrás A., Gonzalez-Elipé A.R., Palmero A.* Perspective on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices // Prog. Mat. Sci. 2016. Vol. 76. P. 59.
3. *Hawkeye M.M., Taschuk M.T., Brett M.J.* Glancing angle deposition of thin films. London: John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2014. 299 p.
4. *Bouaouina B., Mastail C., Besnard A., Mareus R., Nita F., Michel A., Abadias G.* Nanocolumnar TiN thin film growth by oblique angle sputter-deposition: Experiments vs. simulations // Mater. Design. 2018. Vol. 160, P. 338.

5. *Hubartt B.C., Liu X., Amar J.G.* Large-scale molecular dynamics simulations of glancing angle deposition // *J. Appl. Phys.* 2013. Vol. 114. P. 083517.
6. *Piramanayagam S.N.* Perpendicular recording media for hard disk drives // *J. Appl. Phys.* 2007. Vol. 102. P. 011301.
7. *Bubendorff J.L., Zabrocki S., Garreau G., Hajjar S., Jaafar R.* et al. Origin of the magnetic anisotropy in ferromagnetic layers deposited at oblique incidence // *Europhys. Lett.* 2006. Vol. 75. N 1. P. 119.
8. *Kondorsky E.I., Denisov P.P.* On the origin of oblique-incidence anisotropy in evaporated cobalt films // *IEEE Trans. Magnet.* 1970. Vol. 6. N 2. P. 167.
9. *Lisfi A., Lodder J.C., Wormeester H., Poelsema B.* Reorientation of magnetic anisotropy in oblique sputtered metallic thin films // *Phys. Rev. B.* 2002. Vol. 66. P. 174420.
10. *Tang F., Liu D.-L., Ye D.-X., Zhao Y.-P., Lu T.-M., Wang G.-C., Vijayaraghavan A.* // *J. Appl. Phys.* 2003. Vol. 93. N 7. P. 4194.
11. *Трушин О.С., Попов А.А., Пестова А.Н., Мазалецкий Л.А., Акулов А.А.* Наноструктурирование при наклонном напылении алюминия // *Письма в ЖТФ.* 2021. Т. 47. В. 12. С. 31.
12. *Трушин О.С., Попов А.А., Пестова А.Н., Мазалецкий Л.А., Акулов А.А., Ломов А.А.* Наноструктурирование при наклонном напылении // *Изв. РАН. Сер. Физическая.* 2022. Т. 86. № 5. С. 650.
13. *Fujiwara H.* Spectroscopic ellipsometry principles and applications. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
14. *Трушин О.С., Фаттахов И.С., Попов А.А., Мазалецкий Л.А., Ломов А.А., Захаров Д.М., Гайдукасов Р.А., Мяконьких А.В., Шендрикова Л.А.* Управление магнитной анизотропией и оптическими характеристиками наноструктурированных пленок кобальта методом наклонного напыления // *ФТТ.* 2023. Т. 65. Вып. 6б. С. 996–1001.