

07;11;12

Морфология поверхности, оптические и магнитные свойства мультислойных наноразмерных пленок полиэлектролит/наночастицы магнетита

© Д.А. Горин,¹ А.М. Яценко,¹ Ю.А. Кокшаров,² А.А. Невешкин,¹ А.А. Сердобинцев,¹
Д.О. Григорьев,³ Г.Б. Хомутов²

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
119899 Москва, Россия

³ Макс Планк Институт коллоидов и поверхностей,
D14424 Потсдам, Германия
e-mail: Gorin DA@mail.ru; GorinDA@sgu.ru

(Поступило в Редакцию 18 сентября 2008 г.)

Методом полиионной сборки получены наноразмерные композитные покрытия полиэлектролит/наночастицы оксида железа, проведена их характеристика с помощью методов атомно-силовой микроскопии, электронного магнитного резонанса, эллипсометрии, вторично-ионной масс-спектрометрии. Проведенный комплекс исследований позволил установить зависимость между количеством слоев наночастиц магнетита в нанокompозитной пленке и ее показателем преломления, толщиной и шероховатостью поверхности. Обнаружена нелинейная зависимость интенсивности сигнала электронного магнитного резонанса от числа слоев магнитных наночастиц в пленке.

PACS: 68.35.B-, 68.35.-d, 75.70.-i, 78.66.-w

Введение

Поиск новых материалов для разработки и создания наноразмерных электронных и оптоэлектронных приборов, устройств и функциональных систем различного назначения является актуальной и практически важной задачей. В наши дни нанотехнология предлагает новые подходы для создания искусственных наноструктурированных сред, наиболее перспективным из которых является принцип самоорганизации молекул и наноразмерных компонентов. К методам, базирующимся на данном принципе, можно отнести метод Ленгмюра–Блоджетт [1,2], центрифугирование [3], метод напыления [4,5], полиионную сборку [6].

Среди перечисленных методов перспективным является метод полиионной сборки, который основан на последовательной адсорбции полиионных молекул и/или заряженных коллоидных частиц [7,8]. С помощью метода полиионной самосборки можно получать как полиэлектролитные мультислойные структуры, так и создавать нанокompозитные покрытия, в структуру которых могут быть введены наноразмерные компоненты различной природы [7,9–11]. Такие наноразмерные 2D-структуры представляют собой многофазную систему из полимерной матрицы и таких элементов, как, например, неорганические наночастицы различного состава и формы. Свойства включаемых нанообъектов порой значительно отличаются от свойств, которые наблюдаются в соответствующих объемных материалах [12,13].

Как известно, в случае полупроводниковых наночастиц наблюдается так называемый квантоворазмерный эффект [13]. Известно, что у магнитных наночастиц намагниченность и магнитная анизотропия может быть в несколько раз больше, чем у соответствующих объемных материалов, и, кроме того, на основе наночастиц созданы структуры, для которых обнаружено гигантское магнитосопротивление, магнитокалорический эффект и др. [14,15].

Магнитные оксиды железа (магнетит, маггемит) являются полупроводниковыми материалами, и это обстоятельство обуславливает важность и актуальность исследований в области создания и изучения свойств организованных наноструктур на основе нанокompозитных магнитных оксидов железа.

В работе [7] было показано, что для нанокompозитных покрытий на основе полидиметилдиаллилалламмония хлорида, содержащих наночастицы магнетита, спектр поглощения нанокompозитной пленки в ближней инфракрасной (ИК) области имеет окно прозрачности вблизи 1500 nm. Данная особенность нанокompозитных пленок открывает перспективы для использования таких систем в качестве покрытий с заданным коэффициентом отражения, которые применяются для создания интерференционных зеркал при конструировании полупроводниковых лазеров ИК-диапазона. Кроме того, нанокompозитные покрытия, в состав которых введены магнитные наночастицы, являются перспективным материалом для создания постоянных магнитов [15], сред для хранения информации, функциональных элементов в магнитных сенсорах [12], радиопоглащающих покрытий [16,17].

Свойства нанокompозитных материалов зависят от доли заполнения объема полимерной матрицы неорганическими наночастицами. Причем в зависимости от заполнения диэлектрической матрицы неорганическими наночастицами в свойствах таких нанокompозитов могут наблюдаться изменения в широких пределах с появлением квантоворазмерных эффектов [13]. При этом можно предположить, что на свойства нанокompозитов также будет влиять выбор полимерной матрицы, форма, размер и химический состав наночастиц. В работе [18,19] показано, что с увеличением числа слоев наночастиц магнетита наблюдается увеличение толщины, показателя преломления и шероховатости поверхности нанокompозитного покрытия.

Практическое применение данных систем подразумевает исследование не только их оптических, но и магнитных свойств. Кроме того, для изучения зависимости физических свойств нанокompозитных покрытий от объемной фракции наночастиц требуется применение методов, позволяющих определять и контролировать химический состав наноразмерных покрытий.

В связи с этим целью настоящей работы было комплексное исследование физических свойств нанокompозитных покрытий на основе полиаллиламингидрохлорида/наночастиц оксида железа в зависимости от объемной фракции наночастиц в нанокompозитных покрытиях. Для изучения полученных образцов использовались методы электронного магнитного резонанса и вторично-ионной масс-спектрометрии, эллипсометрия, атомно-силовая микроскопия.

1. Методика эксперимента

1.1. Материалы

Для получения нанокompозитных покрытий использовали 0.5 М NaCl водные растворы молекул полиаллиламингидрохлорида (РАН, $MW \sim 70\,000$), полиэтиленimina (PEI, $MW \sim 600\,000-1\,000\,000$) (рис. 1) производство фирмы „Sigma-Aldrich Co.“, с концентрацией 2 mg/ml [20]. Водные суспензии наночастиц оксида железа (Fe_3O_4) с концентрацией 3.2 mg/ml, производство фирмы „Berlin Heart“. Наночастицы были стабилизированы лимонной кислотой (Z -потенциал наночастиц в водном растворе $pH = 6.9 \pm 0.2$ составлял $-47.7\,mV$), средний размер наночастиц $\approx 10\,nm$ [21].

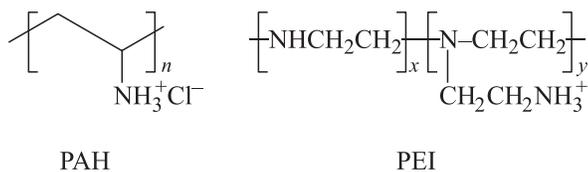


Рис. 1. Структурные формулы мономерных звеньев полиионных молекул.

В качестве подложек использовали химически очищенные пластины монокристаллического кремния с ориентацией (111). Обработка подложек проводилась путем кипячения в четыреххлористом углероде в течение 15 min. После этого пластины травили во фтористоводородной кислоте с последующей промывкой в дистиллированной воде. В результате данной обработки поверхность подложки приобретала отрицательный заряд в водной фазе при значении $pH = 5-7$ [22].

Для повышения эффективности формирования полиэлектролитной пленки и уменьшения ее шероховатости в качестве вещества для создания первого полимерного слоя использовали полиэтиленimina [23,24]. Последовательную чередующуюся адсорбцию РАН и наночастиц Fe_3O_4 на пластины кремния проводили на автоматизированной установке „Полион-1М“ (Саратов, Россия) [18]. Были созданы нанокompозитные пленки на подложках монокристаллического кремния следующего состава: $PEI/(Fe_3O_4/PAH)_N$, где $N = 6, 11, 16$.

1.2. Методы

Атомно-силовая микроскопия (АСМ)

АСМ-изображения нанокompозитных пленок были получены при комнатной температуре с помощью микроскопа NTEGRA SPECTRA (NT-MDT, Россия) в полуконтактном режиме (для исследований использовались кантеливеры с резонансной частотой 302–354 kHz и жесткостью 25–42 N/m). Для определения толщины локальная область нанокompозитного покрытия была механически удалена с последующим измерением разницы в высоте между подложкой в области удаленного покрытия и зонами не удаленной пленки.

Полученные АСМ-изображения нанокompозитных пленок были обработаны программным средством визуализации и анализа Gwyddion 2.9 для того, чтобы количественно определить шероховатость и толщину нанокompозитных пленок. Как известно, шероховатость характеризует неровность пленки в направлении к нормали поверхности раздела подложка/пленка. Среднее значение толщины нанокompозитных пленок определенного образца получали из анализа как минимум пяти профилей высоты.

Эллипсометрия

Оптические параметры и толщину нанокompозитных покрытий на пластинах монокристаллического кремния определяли методом эллипсометрии. Измерения поляризационных углов Ψ , Δ проводили с использованием нуль-эллипсометра ЛЭФ-3М (длина волны 632.8 nm) на воздухе при углах падения 60° и 70° . Показатель преломления (n) и толщину пленки (δ) определяли по экспериментально полученным поляризационным углам Ψ и Δ , используя модель „однослойная, изотропная, непоглощающая пленка–поглощающая изотропная подложка“ [18,25].

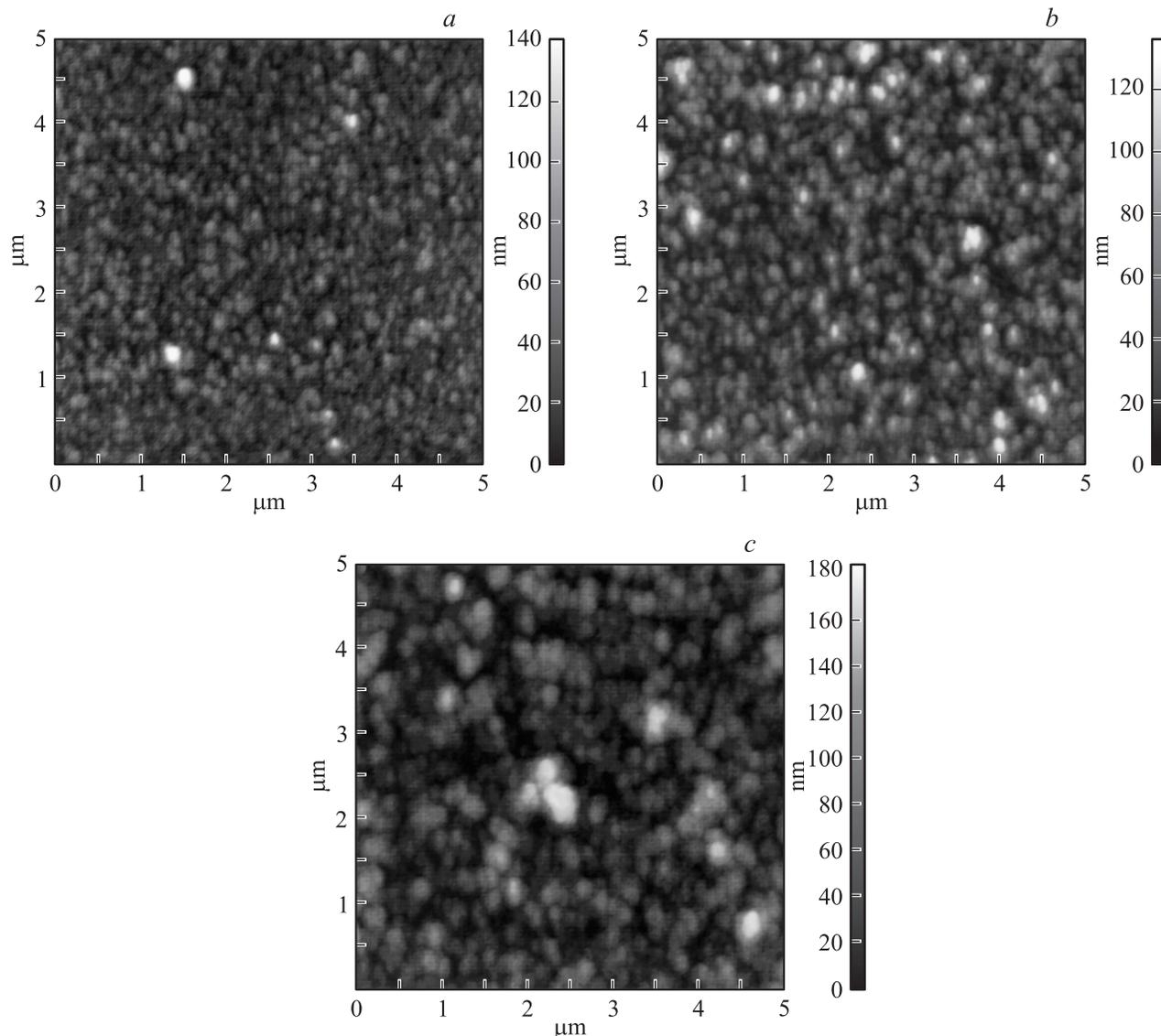


Рис. 2. Атомно-силовые изображения нанокomпозитных пленок: *a* — PEI/(Fe₃O₄/PAH)₆, *b* — PEI/(Fe₃O₄/PAH)₁₁, *c* — PEI/(Fe₃O₄/PAH)₁₆.

Вторичная ионная масс-спектрометрия

Исследование нанокomпозитных пленок методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) проводили на установке, созданной на базе масс-спектрометра МИ-1305 [26]. Пучок ионов, представляющий собой положительно заряженные ионы кислорода с энергией 4–8 keV, бомбардировал образец под углом 60° к нормали. Фокусирующая система установки позволяла получать пучок ионов диаметром 1 мм. Ток первичного пучка составлял 1–10 μA, при этих условиях нагрев подложек несуществен. Диапазон регистрируемых массовых чисел — от 1 до 240.

Электронный магнитный резонанс

Исследование нанокomпозитных пленок полиэлектролит/наночастицы магнетита методом электронного маг-

нитного резонанса (ЭМР) проводили на спектрометре Varian E-4 EPR X (9.2 GHz) при комнатной температуре. Образцы прямоугольной формы имели примерные размеры 4 × 10 mm.

2. Результаты и обсуждение

Изображения поверхности нанокomпозитных пленок, полученные методом АСМ, представлены на рис. 2. Среднее арифметическое значение шероховатости (R_a) исследуемых пленок от числа слоев наночастиц магнетита $N = 6, 11, 16$ составило соответственно $10 \pm 1, 15 \pm 1$ и 18 ± 2 nm. Нетрудно заметить, что полученные значения шероховатости соизмеримы или превышают средний размер наночастиц магнетита. Для нанокomпозитной пленки с числом слоев магнетита $N = 16$

Таблица 1. Значения объемной фракции наночастиц оксида железа в нанокompозитной пленке, рассчитанные с помощью приближений Максвелла–Гарнетта (МГ) и Бруггемана (Бр), и значения толщины нанокompозитных пленок, полученные методом эллипсометрии и методом атомно-силовой микроскопии.

Структура пленки	f магнетита (МГ)	f магнетита (Бр)	δ , nm (АСМ)	δ , nm (эллипсометрия)
PEI/(Fe ₃ O ₄ /PAH) ₆	0.13	0.12	58 ± 2	50 ± 3
PEI/(Fe ₃ O ₄ /PAH) ₁₁	0.25	0.24	84 ± 8	73 ± 1
PEI/(Fe ₃ O ₄ /PAH) ₁₆	0.55	0.53	111 ± 5	103 ± 2

значение шероховатости превышает размер наночастиц более чем вдвое. Увеличение шероховатости указывает на формирование кластеров или агрегатов из наночастиц, что также сказывается на дальнейшем увеличении неровности пленки при ее формировании.

Результаты определения толщины нанокompозитных пленок методом АСМ представлены в табл. 1, так же приведены данные о толщине, полученные методом эллипсометрии без учета поглощения в нанокompозитных покрытиях.

Зависимость показателя преломления нанокompозитных пленок как функция от числа адсорбированных слоев показана на рис. 3, там же приведены значения показателя преломления полиэлектролитных покрытий без наночастиц магнетита. Среднее значение показателя преломления ($n_a = 1.48$) и средняя толщина одного слоя ($\delta = 2.1 \pm 0.1$ nm) для пленок PEI/(PAH/PSS) и характер зависимости толщины пленки от числа адсорбированных слоев согласуются с результатами работы [27,28]. Толщина и показатель преломления нанокompозитных пленок изменяются с увеличением доли наночастиц магнетита в полиэлектролитной пленке. Использование наночастиц оксида железа для создания нанокompозитных покрытий приводит к возрастанию значения показателя преломления пленки и ее толщины при одинаковом количестве слоев.

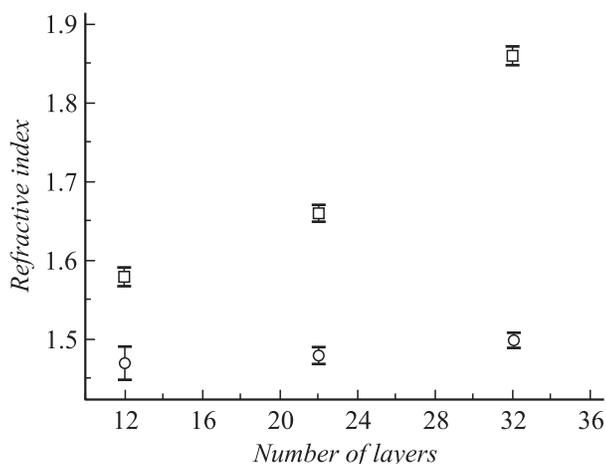


Рис. 3. Зависимость между показателем преломления наноразмерных пленок и числом адсорбированных слоев: кружки — PEI/(PAH/PSS); квадраты — PEI/(Fe₃O₄/PAH).

Оценка объемной фракции (f) наночастиц оксида железа в нанокompозитных пленках проводилась в рамках модели эффективной диэлектрической среды. В общем виде для основной среды (с диэлектрической проницаемостью ϵ_h) с двумя типами сферических включений, имеющих диэлектрические проницаемости ϵ_a , ϵ_b соответственно, эффективная диэлектрическая проницаемость ϵ_{eff} такого неоднородного нанокompозитного материала может быть вычислена с помощью выражения [29]:

$$\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_h}{\epsilon_{\text{eff}} + 2\epsilon_h} = f_a \frac{\epsilon_a - \epsilon_h}{\epsilon_a + 2\epsilon_h} + f_b \frac{\epsilon_b - \epsilon_h}{\epsilon_b + 2\epsilon_h} + \dots, \quad (1)$$

где f_a , f_b — объемные фракции компонентов с диэлектрическими проницаемостями ϵ_a , ϵ_b соответственно. Для исследуемых пленок использовали два приближения [29]:

— Максвелла–Гарнетта (МГ)

$$f_a = \left(\frac{\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_b}{\epsilon_{\text{eff}} + 2\epsilon_b} \right) \left(\frac{\epsilon_a + 2\epsilon_b}{\epsilon_a - \epsilon_b} \right), \quad (2)$$

— Бруггемана (Бр)

$$f_a = \frac{(\epsilon_{\text{eff}} - \epsilon_b) \left(\frac{2}{3} \epsilon_{\text{eff}} + \frac{1}{3} \epsilon_a \right)}{\epsilon_{\text{eff}}(\epsilon_a - \epsilon_b)}. \quad (3)$$

Полученные значения объемной фракции наночастиц магнетита в нанокompозитных пленках представлены в табл. 1. Анализ значений объемной фракции наночастиц оксида железа, вычисленных в рамках моделей Максвелла–Гарнетта и Бруггемана, позволяет утверждать, что с ростом объемной фракции наночастиц магнетита увеличивается показатель преломления нанокompозитного покрытия, что и наблюдается экспериментально. Полученные экспериментальные данные также хорошо согласуются с результатами работы [19].

Экспериментальные данные, полученные при исследовании нанокompозитных пленок методом вторично-ионной масс-спектрометрии, также могут служить в качестве подтверждения увеличения доли наночастиц магнетита в нанокompозитных покрытиях.

На рис. 4 (вставка) представлены участки масс-спектров чистой подложки и подложки с нанесенной пленкой, содержащей наночастицы оксида железа. На кривой, соответствующей подложке с пленкой, четко

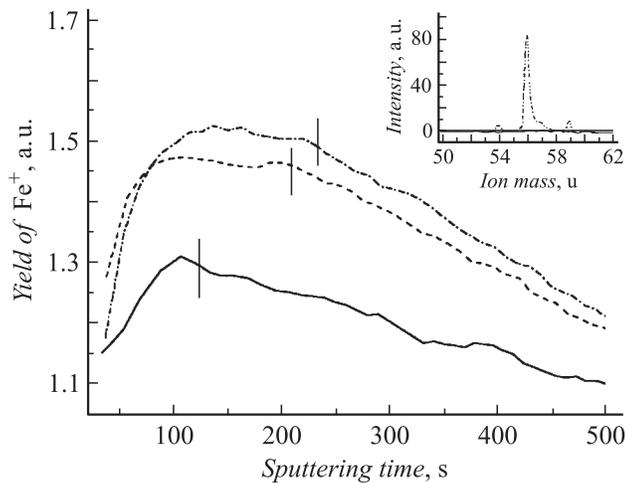


Рис. 4. Зависимость выхода вторичных ионов железа от времени воздействия ионного пучка на нанокomпозитные пленки: сплошная линия — PEI/(Fe₃O₄/PAN)₆, пунктир — PEI/(Fe₃O₄/PAN)₁₁, штрихпунктир — PEI/(Fe₃O₄/PAN)₁₆ (вертикальными линиями на кривых отмечено время полного протравливания пленки).

видны масс-пики железа (54, 56, 57 u), отсутствующие в случае чистой подложки. Данный факт подтверждает перенос наночастиц магнетита на подложки монокристаллического кремния при адсорбции методом полиионной сборки. На рис. 4 также показаны концентрационные профили нанокomпозитных пленок, полученные методом ВИМС. Скорость ионного пучка поддерживалась постоянной. Время, за которое нанокomпозитная пленка PEI/(Fe₃O₄/PAN)₆ протравлилась насквозь (начало участка спада кривых на рис. 4), существенно меньше времени протравливания для пленки PEI/(Fe₃O₄/PAN)₁₁. При этом время протравливания покрытия PEI/(Fe₃O₄/PAN)₁₆ сравнимо со временем протравливания для пленки PEI/(Fe₃O₄/PAN)₁. Так как количество атомов железа в пленке пропорционально числу адсорбированных слоев, из вышесказанного следует вывод о более высокой концентрации атомов железа в образце PEI/(Fe₃O₄/PAN)₁₆. Это, в свою очередь, подтверждает предположение о возрастании объемной доли наночастиц магнетита в пленке. Дальнейший спад концентрационного профиля для исследуемых объектов обусловлен эффектом кратера [30].

Нелинейный характер зависимости свойств изученных образцов от числа (*N*) слоев Fe₃O₄/PAN в пленке подтверждается также результатами, полученными методом ЭМР. Спектры ЭМР (рис. 5) всех изученных образцов (*N* = 6, 11, 16) содержат интенсивную асимметричную широкую линию (ΔH_{pp}) с шириной 500–700 Oe и эффективным фактором спектроскопического расщепления g_{eff} , зависящим от ориентации плоскости пленки по отношению к внешнему магнитному полю H_0 . При расчете эффективного *g*-фактора использовалась формула

$$g_{eff} = 2.0023(H_c/H_R), \quad (4)$$

где H_R — эффективное резонансное поле, определенное по методу „peak-to-peak“, H_e — резонансное поле, соответствующее *g*-фактору свободного электрона. При повороте плоскости пленки от положения, перпендикулярного внешнему полю, до положения, параллельного полю, значение g_{eff} изменяется, соответственно \approx от 1.4 до 2.7.

В табл. 2 приведены значения ширины линии ΔH_{pp} („peak-to-peak“) и интенсивности *I* сигнала магнитного

Таблица 2. Характеристики спектров ЭМР для образца двух ориентаций

Структура пленки	I_{\perp} , a.u.	I_{\parallel} , a.u.	$\Delta H_{pp\perp}$, Oe	$\Delta H_{pp\parallel}$, Oe
PEI/(Fe ₃ O ₄ /PAN) ₆	155	60	710 ± 10	660 ± 10
PEI/(Fe ₃ O ₄ /PAN) ₁₁	385	590	560 ± 10	570 ± 10
PEI/(Fe ₃ O ₄ /PAN) ₁₆	1345	2350	510 ± 10	570 ± 10

Примечание. \perp (\parallel) — внешнее магнитное поле перпендикулярно (параллельно) плоскости пленки. *I* — интенсивность микроволнового поглощения (на единицу площади пленки), ΔH_{pp} — ширина линии ЭМР.

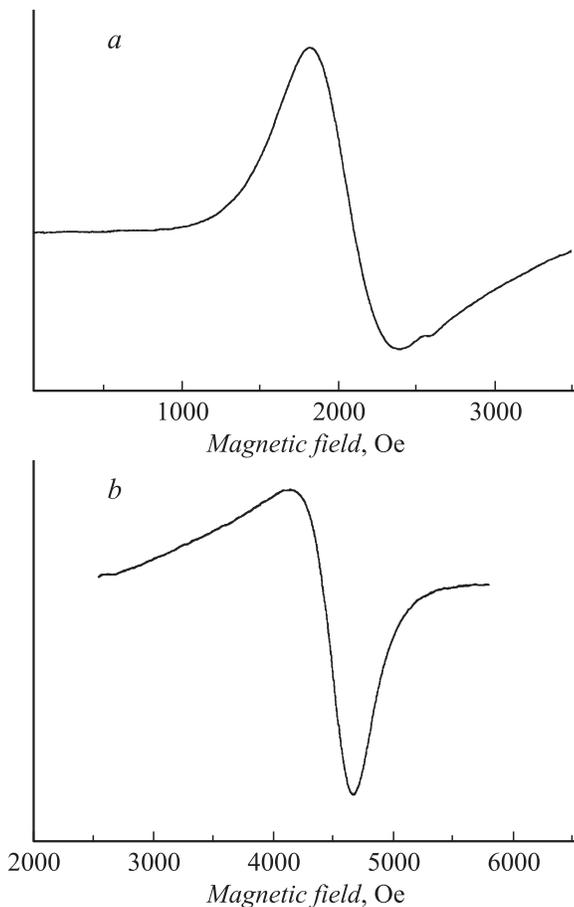


Рис. 5. Спектры ЭМР образца PEI/(Fe₃O₄/PAN)₁₆ для ориентации внешнего магнитного поля H_0 параллельно (a) и перпендикулярно (b) плоскости пленки.

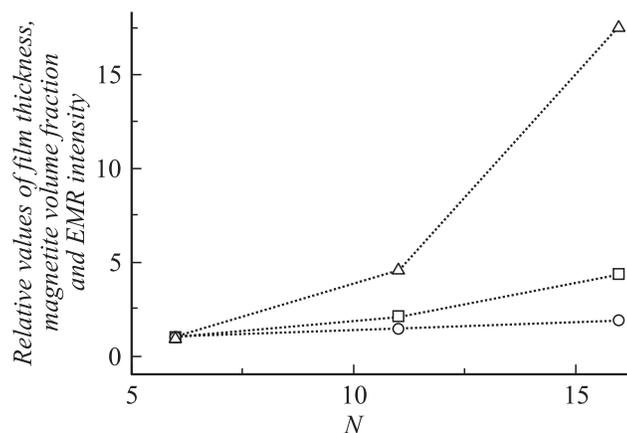


Рис. 6. Зависимость различных характеристик пленок от числа N слоев $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{РАН}$. Круги — толщина пленки (табл. 1, метод АСМ), квадраты — содержание магнетита (табл. 1, метод Бр), треугольники — интенсивность сигнала ЭМР (сумма первых двух столбцов в табл. 2). Все величины нормированы на соответствующие значения при $N = 6$.

резонанса. Интересно, что с увеличением числа магнитных слоев резонансный сигнал не уширяется или даже становится более узким, что может свидетельствовать о повышении магнитной однородности образцов.

Значительная анизотропия эффективного g -фактора резонансной линии в нанокompозитных пленках, содержащих наночастицы оксида железа, свидетельствует о существенной намагниченности образцов. Для оценки намагниченности образцов можно использовать формулы Киттеля для сигналов ферромагнитного магнитного резонанса от магнитного диска с учетом размагничивающего фактора [31]:

$$\omega_0/|\gamma| = (H_{R,\parallel}(H_{R,\parallel} + 4\pi M))^{1/2}, \quad (5)$$

$$\omega_0/|\gamma| = H_{R,\perp} - 4\pi M. \quad (6)$$

Здесь величина $\omega_0/|\gamma|$ равна резонансному полю для образца в форме шара, для объемного магнетита оно соответствует $g_{\text{eff}} = 2.12$.

Полученные с помощью формул (5),(6) значения намагниченности образцов (150 кА/м) примерно в 3 раза меньше по сравнению с намагниченностью объемной фазы кристаллического магнетита (480 кА/м).

Форма и ширина линии ЭМР почти не изменяются с ростом N . Однако интенсивность линии ЭМР существенно возрастает с увеличением количества магнитных слоев (рис. 6). Для сравнения на рис. 6 также показано относительное изменение толщины пленки и содержания в ней магнетита. Как видно из рис. 6, нелинейное увеличение интенсивности сигнала ЭМР обусловлено увеличением плотности (компактизации) магнитной части пленок. С увеличением N магнитные слои становятся более плотными, по-видимому, из-за увеличения их шероховатости. Поскольку значение параметров ЭМР (ширины линии и эффективного g -фактора)

при этом значительно не изменяется, наночастицы не агломерируют, уменьшается лишь среднее расстояние между ними.

Заключение

Получены магнитные нанокompозитные пленки полиэлектролит/наночастицы оксида железа на подложках монокристаллического кремния. Установлено, что при увеличении числа слоев возрастают показатель преломления и шероховатость нанокompозитных покрытий. Исследования мультислойных структур полиэлектролит/наночастицы магнетита методом вторичной ионной масс-спектрометрии позволили установить, что увеличение показателя преломления и шероховатости пленок связано с ростом объемной фракции наночастиц оксида железа. Проведена оценка объемной фракции наночастиц оксида железа в нанокompозитной пленке с использованием модели эффективной среды.

Методом электронного магнитного резонанса обнаружены значительная анизотропия эффективного фактора спектроскопического расщепления резонансной линии и заметная нелинейность в зависимости интенсивности микроволнового поглощения от количества слоев магнитных наночастиц в пленке.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности управления оптическими и магнитными свойствами нанокompозитных покрытий путем варьирования в них числа слоев наночастиц магнетита.

Работа выполнена при финансовой поддержке совместного российско-немецкого проекта РФФИ (06-02-04009, 08-03-01081) и DFG (436 RUS 113/844/0-1).

Список литературы

- [1] Petty M.C. Langmuir-Blodgett films: an introduction. Cambridge. Cambridge Univ. Press, 1996. 234 p.
- [2] Khomutov G.B. // Adv. Coll. Int. Sci. 2004. Vol. 111. P. 79.
- [3] An M., Hing J.-D. // Thin Solid Films. 2006. Vol. 500. P. 74.
- [4] Schlehoff J.B., Dubas S.T., Farhat T. // Langmuir. 2000. Vol. 16. N 26. P. 9968.
- [5] Michel M., Izquierdo A., Decher G., Voegel J.-C., Schaaf P., Ball V. // Langmuir. 2005. Vol. 21. N 17. P. 7854.
- [6] Decher G. // Science. 1997. Vol. 277. P. 1232.
- [7] Correa-Duarte M.A., Giersig M., Kotov N.A., Liz-Marzan L.M. // Langmuir. 1998. Vol. 14 N 22. P. 6430.
- [8] Ruths J., Essler F., Decher G., Rieglar H. // Langmuir. 2000. Vol. 16. N 23. P. 8871.
- [9] Mamedov A.A., Kotov N.A. // Langmuir. 2000. Vol. 16. N 13. P. 5530.
- [10] Mamedov A., Ostrander J., Aliev F., Kotov N.A. // Langmuir. 2000. Vol. 16. N 8. P. 3941.
- [11] Tjong S.C., Liang G.D. // Mat. Chem. Phys. 2006. Vol. 100. P. 1.
- [12] Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. // Усп. химии. 2005. Т. 74. № 6. С. 539.

- [13] Ушаков Н.М., Кособудский И.Д., Юрков Г.Ю., Губин С.П., Запис К.В., Кочубей В.И., Ульзутуев А.Н. // Радиотехника. 2005. Т. 10. С. 105.
- [14] Варфоломеев А.Е., Волков А.В., Годовский Д.Ю., Капустин Г.А., Москвина М.А. // Письма в ЖТФ. 1995. Т. 67. Вып. 1. С. 37.
- [15] Звездин К.А. // ФТТ. 2000. Т. 42. Вып. 1. С. 116.
- [16] Kim S.-S., Kim S.-T., Ahn J.-M., Kim K.-H. // J. Magn. Magn. Mater. 2004. Vol. 271. P. 39.
- [17] Kingman S.W., Rowson N.A. // Minerals Engineering. 1998. Vol. 11. N 11. P. 1081.
- [18] Портнов С.А., Яценко А.М., Губский А.С., Горин Д.А., Невешкин А.А., Климов Б.Н., Нефедов А.А., Ломова М.В. // Приборы и техника эксперимента. 2006. Т. 5. С. 1.
- [19] Grigoriev D., Gorin D., Sukhorukov G.B., Yashchenok A., Maltseva E., Möhwald H. // Langmuir. 2007. Vol. 23. N 24. P. 12 388.
- [20] Shchukin D.G., Sukhorukov G.B., Möhwald H. // Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 2003. Vol. 42. P. 4472.
- [21] Gaponik N., Radthenko I.L., Sukhorukov G.B., Rogach A.L. // Langmuir. 2004. Vol. 20. P. 1449.
- [22] Köstler S., Delgado A.V., Ribitsch V. // J. Coll. Int. Sci. 2005. Vol. 286. P. 339.
- [23] Kolasinska M., Warszynski P. // Appl. Surf. Sci. 2005. Vol. 252. P. 759.
- [24] Kolasinska M., Krastev R., Warszynski P. // J. Coll. Int. Sci. 2007. Vol. 305. P. 46.
- [25] Биленко Д.И., Полянская В.П., Гецьман М.А., Горин Д.А., Невешкин А.А., Яценко А.М. // ЖТФ. 2005. Т. 75. Вып. 6. С. 69.
- [26] Rokakh A.G., Zhukov A.G., Stetsura S.V., Serdobintsev A.A. // Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. B. 2004. Vol. 226. N 4. P. 595.
- [27] Harris J.J., Bruening M.L. // Langmuir. 2000. Vol. 16. N 4. P. 2006.
- [28] Neff P.A., Naji A., Ecker C., Nickel B., Klitzing R., Bausch A.R. // Macromolecules. 2006. Vol. 39. N 2. P. 443.
- [29] Nagy N., Deak A., Horvolgyi Z., Fried M., Agod A., Barsony I. // Langmuir. 2006. Vol. 22. N 20. P. 8416.
- [30] Фелдман Л., Майер Д. Основы анализа поверхности и тонких пленок. М.: Мир, 1989. 344 с.
- [31] Киттель Ч. Введение в физику твердого тела. М.: Наука, 1978. 789 с.