

ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТА, ПОЛУЧЕННОГО ИМПЛАНТАЦИЕЙ ИОНОВ СЕРЕБРА В ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ

Ю. А. Бумай^а, В. С. Волобуев^{б*}, В. Ф. Валеев^в, Н. И. Долгих^б,
М. Г. Лукашевич^б, Р. И. Хайбуллин^в, В. И. Нуждин^в, В. Б. Оджаев^б

УДК 539.21:539.12:538.958

^а Белорусский национальный технический университет, Минск

^б Белорусский государственный университет,
220030, Минск, просп. Независимости, 4; e-mail: vlasname@mail.ru

^в Казанский физико-технический институт, Россия

(Поступила 6 апреля 2012)

Имплантацией ионов серебра с энергией 30 кэВ в интервале доз $D = 1 \cdot 10^{16} - 1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при плотности ионного тока $j = 4.0 \text{ мкА/см}^2$ в пленки полиэтилентерефталата получены металлополимерные композиты. В диапазоне 190—1100 нм изучены спектральные зависимости коэффициентов отражения, пропускания и экстинкции. Обнаружено усиление полос отражения при $\lambda_1 = 205 \text{ нм}$ и $\lambda_2 = 260 \text{ нм}$ и падении света на неимплантированную сторону. Исследовано проявление поверхностного плазмонного резонанса на наночастицах серебра. На основе двухслойной модели полученной структуры и оптических измерений рассчитан показатель преломления модифицированного слоя и оценены размеры формирующихся наночастиц серебра, которые в зависимости от дозы имплантации изменялись в диапазоне 1.3—2.8 и 5—20 нм соответственно.

Ключевые слова: полимер, полиэтилентерефталат, металлополимерные композиты, ионная имплантация, отражение, пропускание, экстинкция, наночастицы, поверхностный плазмонный резонанс.

Metal polymer composites have been obtained by implanting 30 keV silver ions (dose range, $D = 1.0 \cdot 10^{16} - 1.5 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ and ion current density, $j = 4.0 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$) into polyethyleneterephthalate films. Spectral dependencies of reflection, transmission, and extinction coefficients in the wavelength range of 190—1100 nm have been studied. The gain in intensities of the reflection bands at $\lambda_1 = 205 \text{ nm}$ and $\lambda_2 = 260 \text{ nm}$ was observed at the light incidence on the non-implanted side. The surface plasmon resonance in the silver nanoparticles was investigated. Based on a two-layer model for the produced structure and data of optical measurements, the modified layer refractive indices and nanoparticle sizes versus implantation dose have been estimated to vary in the ranges of 1.3—2.8 and 5—20 nm respectively.

Keywords: polymer, polyethyleneterephthalate, ion implantation, metal polymer composites, ion implantation, reflection, transmission, extinction, nanoparticles, surface plasmon resonance.

Введение. Исследование оптических и нелинейно-оптических характеристик металлополимерных нанокомпозитных материалов привлекает пристальное внимание в связи с возможностью их использования в нано- и оптоэлектронике при создании оптических переключателей пикосекундного диапазона и других устройств на основе этих материалов [1—4]. Особенности проявления нелинейно-оптических эффектов в таких нанокомпозитах связаны с наличием в полимерной матрице металлических наночастиц (НЧ) и возбуждением в них под действием света поверхностных плазмонов, т. е. с явлением поверхностного плазмонного резонанса (ППР) [3].

OPTICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE OBTAINED BY ION IMPLANTATION OF SILVER IONS IN POLYETHYLENTEREPHTHALATE

U. A. Boomy^a, V. S. Volobuev^{b*}, V. F. Valeev^c, N. I. Dolgikh^b, M. G. Lukashevich^b, R. I. Khaibullin^c, V. I. Nuzhdin^c, and V. B. Odzhaev^b (^a Belarusian National Technical University, Minsk; ^b Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220030, Belarus; e-mail: vlasname@mail.ru; ^c Kazan Physical-Technical Institute, Russia)

В основе формирования НЧ металлов в полимерах путем ионной имплантации [1, 2] лежит процесс внедрения в тонкий (до 1 мкм) слой облучаемой подложки ускоренных ионов металлов с концентрацией, заведомо превышающей равновесный предел растворимости примеси. Возникающая при этом система не стабильна и релаксирует с образованием металлической нанofазы НЧ [4]. Известно, что эффективность проявления ППР и нелинейно-оптических эффектов в металлополимерных нанокомпозитах зависит от объемной доли (фактора заполнения) металлической фазы, химического типа, размеров и формы металлических НЧ, что легко контролируется путем варьирования режимов и параметров имплантации.

Основная цель настоящей работы — экспериментальное изучение оптических характеристик полиэтилентерефталата (ПЭТФ), имплантированного ионами серебра, в частности, определение показателя преломления модифицированного слоя (МС) полимера и средних размеров ионно-синтезированных НЧ Ag в зависимости от дозы имплантации. Отметим, что в ряде обзорных работ (см., например, [1, 2] и ссылки там), а также в монографиях [3, 5—7] изложены различные теоретические подходы для описания оптических характеристик композиционных материалов, а в [8, 9] выполнено математическое прогнозирование их оптических свойств, что в целом послужило теоретическим базисом для анализа полученных нами экспериментальных результатов.

Методика эксперимента. Пленки ПЭТФ толщиной 40 мкм имплантировались ионами Ag^+ с энергией 30 кэВ в интервале доз $D = 2.5 \cdot 10^{16} — 1.5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ при плотности тока 4 мкА/см^2 на ускорителе ИЛУ-3 при комнатной температуре. Спектры отражения и пропускания регистрировались в диапазоне 190—1100 нм при комнатной температуре на спектрофотометре PROSKAN MS-122 при падении как на имплантированную сторону (ИС), так и на обратную, неимплантированную сторону (НИС) полимерной пленки. Спектры отражения регистрировались под углом 20° . Коэффициент экстинкции рассчитывался на основе коэффициентов пропускания и отражения. Относительная погрешность эксперимента при измерении спектров отражения и пропускания не превышала 0.1 %.

Расчет пробегов ионов Ag^+ в матрице ПЭТФ, выполненный по программе SRIM [10], показал, что средний проецированный пробег иона составляет 35 нм со стандартным среднеквадратичным отклонением $\Delta R_p = 5 \text{ нм}$, а глубина МС достигает 60 нм. Оценка геометрических размеров формируемых НЧ серебра проводилась на основе теории Ми [11] с использованием программы MiePlot v.4.2 [9]. С целью изучения влияния термического разогрева образцов во время ионного облучения на оптические характеристики ПЭТФ проводилась термообработка исходных пленок ПЭТФ на воздухе в интервале температур 25—250 °С с шагом 30 °С и длительностью 15 мин.

Результаты и их обсуждение. Измерения спектров пропускания пленок ПЭТФ как с ИС, так и с НИС показывают, что коэффициент пропускания не зависит от направления падения света, а граница прозрачности как исходной, так и всех имплантированных пленок лежит в области 310 нм, что соответствует краю оптического пропускания ПЭТФ [12, 13]. Однако в имплантированных образцах в области прозрачности ПЭТФ ($\lambda > 310 \text{ нм}$) коэффициент пропускания значительно уменьшается (с 80 до 45 % при $\lambda = 620 \text{ нм}$) уже при наименьшей дозе имплантации, что связано как с процессами карбонизации облученного полимера [14], так и с превышением предела растворимости имплантируемого металла, т. е. с формированием металлических включений [1, 15]. При этом изменяются величины отражения как ИС, так и НИС.

Как видно из рис 1, а, б, величина отражения и форма спектров существенно различаются при падении света на разные стороны полимерной пленки. При падении света на ИС наблюдается почти двукратное увеличение коэффициента отражения (КО), который достигает максимального значения при $\lambda \approx 620 \text{ нм}$, что хорошо коррелирует с длиной волны света, при которой наблюдается максимальный КО как для графита, так и для серебра [16].

В случае исходного образца отражение не зависит от стороны падения света (рис. 1, а и б, кривые 1) и для него в УФ области наблюдаются две слабо выраженные полосы при 205 нм (λ_1) и 260 нм (λ_2). Наличие этих полос обусловлено присутствием в исходной молекулярной цепочке ПЭТФ π -электронов ароматического хромофора [17]. Видно также, что с ИС слабо выраженных пиков отражения в УФ области практически не наблюдается, в то время как на НИС происходит увеличение КО на этих длинах волн. Так как указанные полосы отражения обусловлены наличием π -электронных связей в исходной молекуле ПЭТФ, рост количества этих связей на НИС может вызываться температурной модификацией полимера за пределами пробега ионов серебра вследствие разогрева образца в процессе имплантации. Подтверждение этого получено при измерении КО термообработанной пленки ПЭТФ (рис. 2), показавшем рост отражения в УФ области при λ_1 и λ_2 . Отсутствие таких полос на ИС пленки связано с завершением процесса карбонизации уже при первых дозах имплантации и сильной деструкцией полимера в МС.

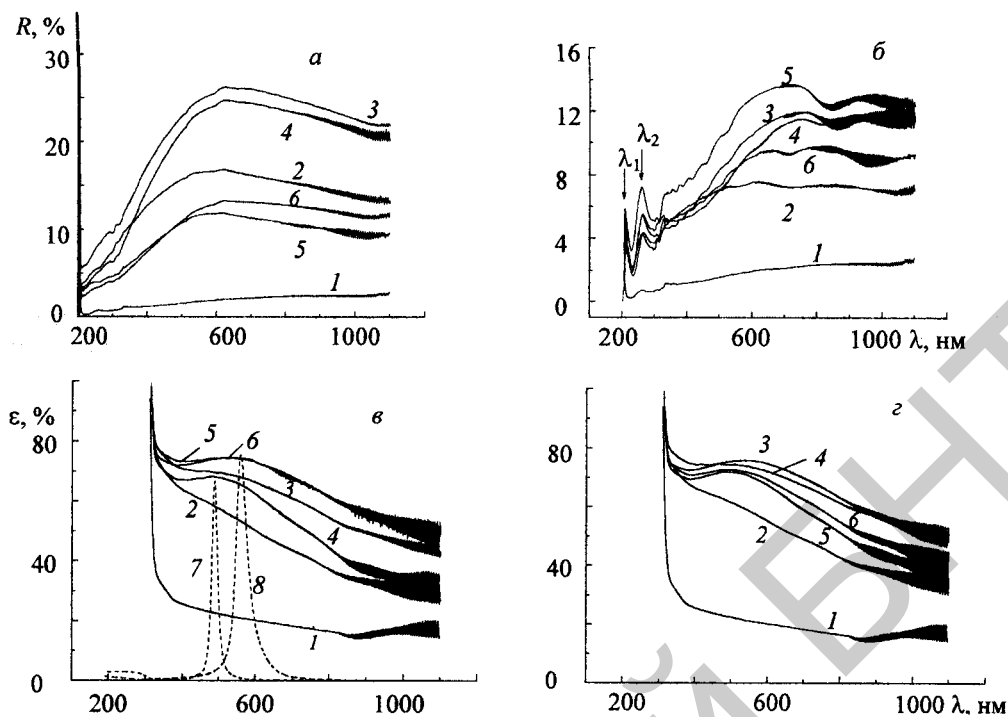


Рис. 1. Спектры отражения (*a, б*) и экстинкции (*в, з*) имплантированной (*a, в*) и неимплантированной (*б, з*) сторон пленок полиэтилентерефталата, имплантированных ионами серебра дозой (см^{-2}): 2 — $1 \cdot 10^{16}$, 3 — $2.5 \cdot 10^{16}$, 4 — $7.5 \cdot 10^{16}$, 5 — $1 \cdot 10^{17}$, 6 — $1.5 \cdot 10^{17}$, 1 — исходный образец; 7 и 8 — рассчитанные спектры по теории Ми для показателя преломления 1.8 (диаметр кластера 5 нм) и 2.8 (20 нм)

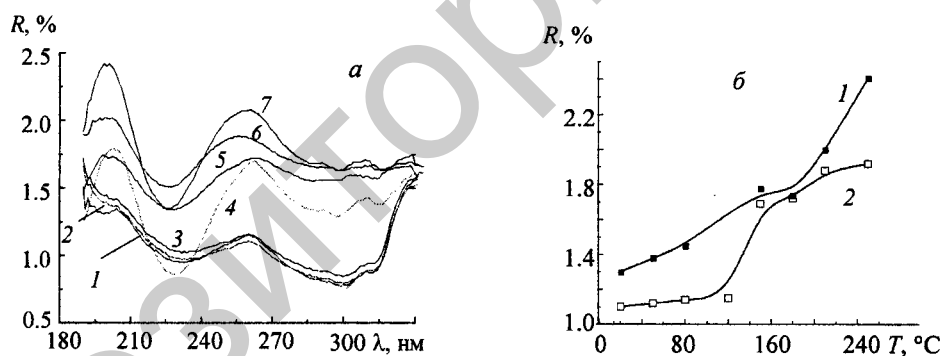


Рис. 2. Спектры отражения пленки полиэтилентерефталата после термообработки на воздухе (*a*) при температуре ($^{\circ}\text{C}$): 2 — 50, 3 — 80, 4 — 150, 5 — 180, 6 — 210, 7 — 250, 1 — исходный образец; зависимость коэффициента отражения на $\lambda = 205$ (1) и 260 нм (2) от температуры термообработки (*б*)

Увеличение КО в видимом диапазоне (рис. 1) и наличие максимума на спектральной зависимости свидетельствуют о формировании НЧ имплантируемого металла в приповерхностной области имплантированной пленки и о проявлении в них ППР. Максимум отражения, обусловленный ППР, наблюдается для ИС при 620 нм и с ростом дозы смещается до 650 нм. С НИС максимум полосы смещается в длинноволновую область при увеличении дозы имплантации (вплоть до 720 нм для $D = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$). Сдвиг максимума полосы отражения ППР с ростом дозы имплантации обусловлен увеличением размера формирующихся в процессе имплантации нанокластеров серебра, а также показателя преломления МС, что неоднократно наблюдалось в диэлектрических средах, содержащих металлические частицы разного диаметра [1, 3].

На положение максимума отражения и его сдвиг с ростом дозы имплантации серебра с ИС пленки, на наш взгляд, существенное влияние оказывают не только изменение показателя преломления карбонизированного слоя полимера, но и формирование включений по типу металлическое ядро—углеродная оболочка. Процесс образования углеродной оболочки вокруг металлической НЧ наиболее вероятен в облученном

слое на глубине между максимумами распределения углерода и серебра. Максимум распределения углерода (по [10]) находится на глубине около 15 нм, что меньше проецированного пробега ионов Ag^+ . Наличие углеродной оболочки вокруг НЧ должно приводить к смещению положения максимума, обусловленного ППР, в длинноволновую область спектра [1]. Отметим также, что при максимальных дозах имплантации наблюдается некоторое уменьшение КО (рис. 1, *a*, кривые 5 и 6), что может быть вызвано формированием при данных дозах лабиринтоподобной структуры с размерами, близкими к длине волны падающего света. Такие структуры наблюдались методом атомной силовой микроскопии [18], а также при имплантации ионов других металлов методом просвечивающей электронной микроскопии [19].

Как видно из сравнения рис. 1, *a* и *b*, для каждой дозы имплантации максимум отражения при измерении с НИС сдвинут в более длинноволновую область спектра по сравнению с положением максимума, регистрируемого с ИС, на $\Delta\lambda \approx 100$ нм. Этот эффект вызывается неравномерным распределением размеров формирующихся НЧ серебра по глубине МС. Такое же различие спектрального положения максимумов, регистрируемых с разных сторон облучаемой подложки, наблюдалось при имплантации ионов серебра в кварцевое стекло [20]. При этом, согласно [20], наиболее крупные серебряные частицы формируются ближе к имплантированной поверхности, а более мелкие удалены от нее. Подобная ситуация, на наш взгляд, соответствует и нашему случаю имплантации серебра в полимерную матрицу ПЭТФ. Неравномерное глубинное распределение НЧ по размерам обусловлено как распылением имплантируемой поверхности полимера, так и высоким коэффициентом диффузии атомов серебра в разогретом при имплантации МС полимера. Последнее обуславливает интенсивный диффузионный отток примеси серебра из МС и формирование более мелких частиц в глубине полимерной пленки.

На рис. 3 представлены дозовые зависимости КО, измеренного при падении света на ИС и НИС, для характерных длин волн 260 и 620 нм. Видно, что при 260 нм (рис. 3, *a*) для ИС при первых двух дозах имплантации наблюдается рост КО, а затем плавное его уменьшение, что обусловлено завершением процесса карбонизации в облученном слое полимера и, следовательно, значительным влиянием углеродного слоя на отражательную способность композита в УФ области. В то же время с НИС наблюдается увеличение КО, вызываемое, как отмечено выше, процессами термической модификации полимерной пленки во время облучения. При измерении отражения с ИС на $\lambda = 620$ нм (рис. 3, *b*) КО значительно больше при всех дозах имплантации, чем на $\lambda = 260$ нм. Это связано с высокой отражательной способностью в этой области формирующихся включений серебра [16] и проявлением ППР в них. Наблюдаемое уменьшение КО при максимальных дозах обусловлено процессами реструктуризации МС и формированием лабиринтоподобной структуры вследствие коагуляции НЧ Ag . В отличие от случая падения света на ИС, коэффициент отражения НИС с повышением дозы увеличивается и выходит на насыщение.

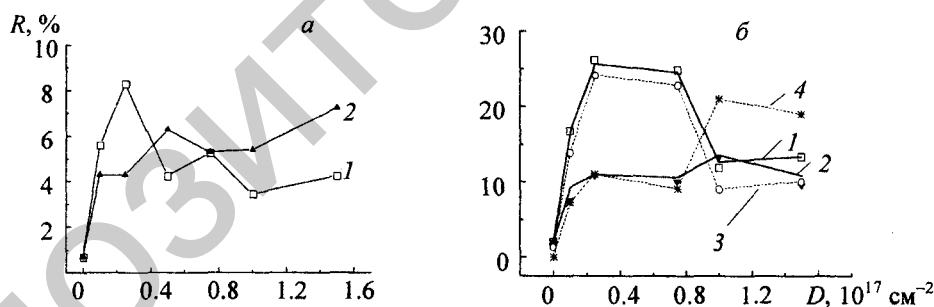


Рис. 3. Экспериментальные зависимости коэффициента отражения для пленок полиэтилентерефталата на $\lambda = 260$ (*a*) и 620 нм (*b*) от дозы имплантации ионов серебра при падении света на имплантированную (1) и неимплантированную (2) стороны полимерной пленки; рассчитанные дозовые зависимости коэффициента отражения от модифицированного слоя (3) и внутренней границы между слоями (4), полученные с использованием двухслойной модели для имплантированной полимерной пленки

Спектральные зависимости коэффициента экстинкции, полученные при прохождении света как с ИС, так и с НИС пленки, показаны на рис. 1, *в* и *г*. Хорошо видно, что в обоих случаях в спектрах наблюдаются широкий максимум в интервале 400—700 нм и его последовательный сдвиг в длинноволновую область до $\Delta\lambda \approx 50$ нм при увеличении дозы. Сдвиг максимума экстинкции с дозой имплантации в длинноволновую область связан с ростом концентрации примеси металла в облученном слое и, соответственно, с увеличением среднего размера формирующихся НЧ серебра. Отметим также, что определенный вклад в это длинноволновое смещение может внести и формирование углеродного окружения вокруг НЧ, которое, как

отмечено выше, наиболее вероятно на глубине между максимумами распределения концентрации примеси серебра и углерода в имплантированной пленке. Из рис. 4, а, на котором показаны дозовые зависимости коэффициента экстинкции, видно, что наиболее сильное увеличение экстинкции наблюдается на начальном этапе при первых дозах имплантации. При более высоких дозах, т. е. при завершении процесса карбонизации, величина экстинкции практически не изменяется. Отметим, что практически во всем интервале доз экстинкция несколько больше при падении света на НИС. Такое различие обусловлено тем, что при падении света на НИС за счет более слабого отражения от передней границы пленки и, соответственно, за счет увеличения интенсивности проникающего в полимер света существенный вклад в общее поглощение может вносить также немодифицированная объемная часть полимерной пленки.

Моделирование оптических параметров металлополимерного композита. В работах [1, 20, 21] показана возможность определения размеров НЧ в диэлектрической матрице в рамках теории Ми [11]. Однако в нашем случае моделирование оптических спектров на основе оптических характеристик исходной пленки ПЭТФ и металлического серебра в рамках теории Ми показало, что максимум экстинкции находится при $\lambda \approx 300$ нм, что намного ниже экспериментальных значений. Поэтому для согласования эксперимента с теорией необходимо выявить изменения показателя преломления МС полимера в зависимости от дозы имплантации ионов серебра.

Для определения показателя преломления МС полимера полученные металлополимерные композитные пленки необходимо представить в виде двухслойной структуры: первый ультратонкий поверхностный слой — это слой полимера, содержащий имплантированную примесь серебра; второй, значительно более толстый слой — фактически сама полимерная основа с внутренней границей раздела между слоями, расположенной на глубине 60 нм, соответствующей максимальному пробегу ионов в матрице ПЭТФ.

Численное моделирование прохождения света с $\lambda = 620$ нм через такую двухслойную структуру проведено с использованием закона Бугера—Ламберта и учетом многократных отражений на границах слоев. Полученные результаты расчетов сравнивались с экспериментальными значениями КО, коэффициентов пропускания и экстинкции для различных использованных доз имплантации при падении света как на ИС, так и на НИС. Для КО от внутренней границы между слоями использована формула Бера [22] в виде:

$$R_i = \frac{(n_1 - n_2)^2 + (\chi_1 - \chi_2)^2}{(n_1 + n_2)^2 + (\chi_1 + \chi_2)^2} \quad (1)$$

Здесь n_1 и n_2 — показатели преломления первого и второго слоев; χ_1 и χ_2 — параметры, характеризующие затухание волны в слоях и связанные с показателями экстинкции слоев α_1 и α_2 соотношениями $\chi_1 = \alpha_1 \lambda / 4\pi$, $\chi_2 = \alpha_2 \lambda / 4\pi$.

При моделировании проводилась вариация КО R_1 и R_2 и показателей экстинкции α_1 , α_2 (следовательно, χ_1 , χ_2) МС и оставшейся части пленки до совпадения с абсолютной точностью не хуже 1 %, КО и коэффициента экстинкции для всей структуры с экспериментально измеренными при падении света как на ИС, так и на НИС пленки. Определенные таким способом R_1 и α_1 (или χ_1) для МС позволяют рассчитать его показатель преломления из выражения, которое несложно получить из формулы Бера для КО на границе воздух—среда [22] и справедливого для случая неметаллического отражения:

$$n_1 = \frac{1 + R_1}{1 - R_1} + \sqrt{\left(\frac{1 + R_1}{1 - R_1}\right)^2 - (1 + \chi_1^2)} \quad (2)$$

Результаты моделирования представлены на дозовых зависимостях КО (рис. 3, б) и коэффициента экстинкции (рис. 4, а). Полученные при моделировании точки соединены штриховыми линиями. Моделирование показало, что для случая падения света на ИС (рис. 3, б, кривая 3) КО лишь на ~3 % ниже экспериментального КО от всей структуры. Для доз $< 7.5 \cdot 10^{16}$ см⁻² при падении света с НИС существенное увеличение КО всей структуры по сравнению с исходной пленкой обусловлено отражением от внутренней границы раздела слоев, достигающим максимального значения ~11 % (кривая 4), и в меньшей степени — от границы МС—воздух. Моделирование в рамках двухслойной структуры с использованием формулы (1) для внутренней границы дает удовлетворительные результаты до дозы имплантации $7.5 \cdot 10^{16}$ см⁻². При более высоких дозах, при которых наблюдаются сильное уменьшение КО (при падении с ИС) и высокая экстинкция, для совпадения с экспериментальными данными необходимо принудительно повышать КО от внутренней границы между слоями до ~20 % (рис. 3, б, кривая 4) и увеличивать (до 1.5 раз) коэффициент экстинкции немодифицированной части пленки. Первая особенность может быть связана, как отмечено выше, с реструктуризацией МС при этих дозах имплантации и позволяет предположить образование третьего слоя — квазисплошной пленки серебра между карбонизированным слоем и неимплантированной частью пленки. Усиление экстинкции в пленке за пределами имплантированного слоя, очевидно, вызвано ее нагревом в процессе имплантации.

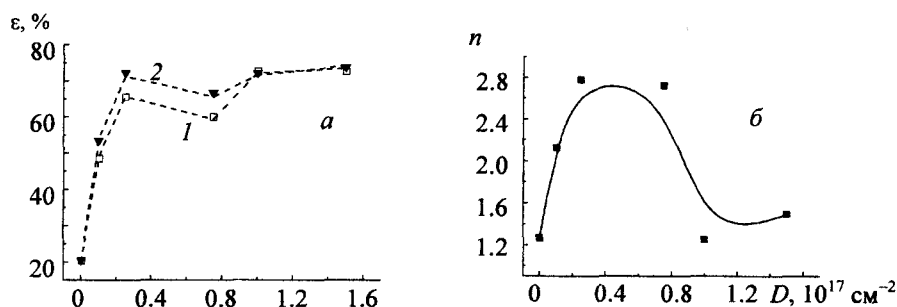


Рис. 4. Зависимости рассчитанного коэффициента экстинкции (точки) пленок полиэтилентерефталата, имплантированных ионами серебра, от дозы имплантации на $\lambda = 620$ нм при падении света на имплантированную (1) и неимплантированную (2) стороны пленки, штриховые линии — численное моделирование (а); рассчитанная в рамках двухслойной модели зависимость показателя преломления модифицированного слоя от дозы имплантации (б)

На рис. 4, б показана дозовая зависимость показателя преломления МС, рассчитанная из данных моделирования с использованием формулы (2). Видно, что уже при начальных дозах имплантации, для которых характерно значительное увеличение концентрации имплантируемых ионов серебра, показатель преломления возрастает более чем в два раза, достигая $n = 2.8$, что связано с насыщением полимера ионами серебра и формированием карбонизированного приповерхностного слоя. Известно, что насыщение диэлектрика ионами серебра может приводить к увеличению коэффициента преломления до $n = 1.9$ [23], а еще большее значение показателя преломления может быть обусловлено формированием карбонизированного слоя, максимальная величина показателя преломления которого может достигать $n = 3$ [24]. При высоких дозах имплантации ($>7.5 \cdot 10^{16}$ см $^{-2}$), при которых наблюдается реструктуризация, показатель преломления карбонизированного слоя уменьшается до малых величин, сравнимых со значением для исходной пленки. Такое уменьшение показателя преломления МС связано с дегидрогенизацией МС. Согласно [24], это может приводить к уменьшению показателя преломления аморфного углерода с 2.8 до 1.3. Полученные величины показателя преломления МС позволяют с помощью моделирования по теории Ми определить размеры формирующихся НЧ не только для полимерной матрицы, что может быть характерно для малых доз имплантации, но и в карбонизированном приповерхностном слое, показатель преломления которого значительно превосходит показатель преломления исходной пленки. Результаты моделирования при варьировании коэффициента преломления в интервале $n = 1.8$ —2.8 показывают (рис. 1, а, кривые 7, 8), что совпадение положений экспериментальных и рассчитанных максимумов экстинкции достигается при диаметрах кластеров серебра в диапазоне 5—20 нм. Таким образом, учет карбонизации приповерхностного слоя, приводящий к увеличению его показателя преломления, при формировании металлических включений в полимере методом ионной имплантации позволяет согласовать наблюдаемые максимумы экстинкции пленок ПЭТФ, имплантированных ионами серебра, с численным моделированием по теории Ми.

Заключение. Экспериментально обнаружено увеличение коэффициента отражения модифицированных имплантацией ионами серебра пленок полиэтилентерефталата при $\lambda_1 = 205$ нм и $\lambda_2 = 260$ нм и падении света на неимплантированную сторону полимерной пленки, что обусловлено термической модификацией полимера за пределами пробега ионов в процессе имплантации. Отсутствие этого эффекта в области непрозрачности полимера при падении света на имплантированную сторону пленки связано с определяющим влиянием карбонизированного слоя на отражательную способность имплантированной поверхности. Показано, что максимум отражения, обусловленный поверхностным плазмонным резонансом, при измерении с неимплантированной стороны полимерной пленки находится при больших длинах волн, чем при измерении с имплантированной стороны, что может свидетельствовать о неравномерном распределении по глубине диаметра формирующихся наночастиц Ag. Обнаружены максимум коэффициента экстинкции при $\lambda = 500$ нм, а также его сдвиг в длинноволновую область 500—550 нм при увеличении дозы имплантации, вызываемый увеличением размера наночастиц Ag с дозой и ростом показателя преломления модифицированного слоя. Коэффициент экстинкции при измерении с неимплантированной стороны полимерной пленки больше, что обусловлено разной интенсивностью входящего в двухслойную структуру света и многократным отражением на границе раздела модифицированный слой—полимерная пленка. Определен показатель преломления модифицированного слоя в металлополимерном композите в предположении двухслойной модели: карбонизированный слой с наночастицами—полимерная пленка. С использованием теории Ми оценен размер формирующихся наночастиц. В зависимости от дозы имплантации показатель преломления и размер формирующихся наночастиц серебра изменялись в диапазонах 1.3—2.8 и 5—20 нм.

- [1] A.L.Stepanov, R.I.Khaibullin. Rev. Adv. Mater. Sci., 7, N 2 (2004) 108—125
- [2] V.N.Popok. Rev. Adv. Mater. Sci., 30, N 1 (2012) 1—26
- [3] U.Kreibig, M.Vollmer. Optical Properties of Metal Clusters, Berlin, Springer (1995) 12—134
- [4] А.Д.Помогайло, А.С.Розенберг, И.Е.Уфлянд. Наночастицы металлов в полимерах, Москва, Химия (2000) 151—236
- [5] S.V.Gaponenko. Introduction to Nanophotonics, New York, Cambridge University Press (2010) 166—196
- [6] S.A.Maier. Plasmonics: Fundamental and Application, Berlin, Springer Verlag (2007) 28—153
- [7] C.F.Boren, D.R.Huffman. Absortion and Scattering of Light by Small Particles, New York, John Wiley and Sons (1985) 389—541
- [8] О.В.Рухленко, А.В.Леонтьев. Вестн. БГУ. Сер. 1, № 3 (2008) 108—111
- [9] <http://www.philiplaven.com/mieplot.htm>
- [10] J.F.Ziegler, J.P.Biersack, U.F.Littmark. The Stopping and Range of Ions in Solids, New York, Pergamon Press (1985) [SRIM-2011 software at <http://www.srim.org/>]
- [11] G.Mie. Ann. Phys., 25, N 3 (1908) 377—445
- [12] Т.А.Сперанская, Л.И.Тарутина. Оптические свойства полимеров, Ленинград, Химия (1976) 46
- [13] В.С.Волобуев, Ю.А.Бумай, М.Г.Лукашевич, Ф.А.Нажим, В.И.Нуждин, Р.И.Хайбуллин, В.Б.Оджаев. Сб. науч. тр. IV междунар. науч. конф. “Актуальные проблемы физики твердого тела”, Минск, 20—23 октября 2009 г., Минск, издат. центр БГУ, 3 (2009) 306—308
- [14] В.Б.Оджаев, И.П.Козлов, В.Н.Попок, Д.В.Свиридов. Ионная имплантация полимеров, Минск, БГУ (1998) 46—87
- [15] P.E.Pehrsson, D.C.Weber, N.C.Koon, J.E.Campana, S.L.Rose. Mater. Res. Symp. Proc., 27 (1984) 429—434
- [16] В.М.Золотарев, В.Н.Морозов, Е.В.Смирнова. Оптические постоянные природных и технических сред, справочник, Ленинград, Химия (1984)
- [17] Д.Браун, А.Флойд, М.Сейнзбери. Спектроскопия органических веществ, Москва, Мир (1992) 26—29
- [18] В.С.Волобуев, Ф.Нажим. Вестн. БГУ, Сер. 1, № 4 (2009) 48—51
- [19] M.G.Lukashевич, V.N.Popok, V.S.Volobuev, A.A.Melnikov, R.I.Khaibullin, V.V.Bazarov, A.D.Wieck, B.Odzaev. Open Appl. Phys. J., 3 (2010) 1—5
- [20] A.L.Stepanov, D.E.Hole, P.D.Townsend. J. Non-Cryst. Sol., 244, N 2 (1999) 275—279
- [21] A.Sileikaite, I.Prosycevas, J.Puiso, A.Juraitis, A.Guobienė. J. Mater. Sci., 12, N 4 (2006) 287—291
- [22] Р.В.Поль. Оптика и атомная физика, Москва, Наука (1966)
- [23] A.Faik, L.Allen, C.Eicher, A.Gagola, P.Townsend, C.Pitt. J. Appl. Phys., 54 (1983) 2597—2601
- [24] Е.А.Коншина. Аморфный гидрогенизированный углерод и применение его в оптических устройствах, Санкт-Петербург, СПбГУ ИТМО (2010) 25—40