III. НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ И ИОННЫХ ПУЧКОВ И ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЫ

Плазмонные фотоннокристаллические наноструктуры SiO₂-Ag: синтез осаждением на микросферы SiO₂ кластеров Ag распылением ионным пучком

А.А. Семенова², А.П. Семенов¹, Е.А. Гудилин^{2,3}, И.А. Семенова¹

¹Институт физического материаловедения СО РАН
670047 Улан-Удэ, Россия

e-mail: semenov@pres.bscnet.ru; alexandersemenov@mail.ru

²Факультет наук о материалах, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
119991 Москва, Россия

³Химический факультет, Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова
119991 Москва, Россия

DOI 10.31554/978-5-7925-0524-7-2018-114-121

Рассмотрен синтез плазмонных фотоннокристаллических мультислоев SiO₂-Ag осаждением наночастиц серебра в вакууме на фотоннокристаллической структуре (микросферах) диоксида кремния, синтезированных по методу Штёбера (Stöber). Поток осаждаемых частиц создавался физическим распылением в вакууме мишени серебра пучком ионов аргона килоэлектронвольтных энергий. На основе уравнений каскадной теории и особенностей рассмотренной физической модели распыления рассчитывается коэффициент распыления серебра ускоренными ионами аргона. Показана взаимосвязь эффекта плазмонного резонанса с оптическими свойствами наноструктурированных подложек и морфологией агрегатных структур наночастиц (кластеров) серебра.

Введение

Комбинационное рассеяние (КР) света (эффект Рамана) - рассеяние оптического излучения на молекулах вещества, возникающее вследствие неупругого взаимодействия излучения с молекулами и сопровождающееся изменением частоты излучения.

Метод гигантского (поверхностно-усиленного) комбинационного рассеяния (ГКР) или surface enhanced Raman spectroscopy (SERS), обладая высокой чувствительностью, позволяет получать информацию о структуре молекул, в том числе в составе живых систем *in vivo* [1]. ГКР наблюдается для молекул, адсорбированных на поверхности наночастиц или наноструктурных поверхностях из благородных металлов *Ag* и *Au*.

На поверхности наноструктуры существуют плазмоны. Плазмон – квазичастица, представляющая собой

осцилляции поверхностных электронов относительно положительно заряженных ядер металла.

Поверхностные плазмоны (плазмоны, ограниченные поверхностями) сильно взаимодействуют со светом, приводя к образованию составных квазичастиц – поляритонов.

Плазмонную частоту ω_p можно оценить по формуле (1)

$$e \sqrt{\frac{n}{m\epsilon}}, \quad (1)$$

где e - элементарный заряд, n - плотность поверхностных электронов, m - масса электрона, ϵ_0 - диэлектрическая проницаемость.

Когда частота падающего света совпадает с плазмонной частотой (1), наблюдается поверхностный плазмонный резонанс.

Актуальной задачей является создание наноструктурированных подложек,

содержащих наночастицы благородных металлов, которые, благодаря плазмонному резонансу, позволяют усиливать сигнал КР от ряда биологических молекул, входящих в состав клеточных структур и детектировать молекулы в субмикромольной концентрации, использовать лазеры малой мощности. Наноструктурные подложки могут служить сенсорами, чувствительными к ранним патологическим изменениям в клетках.

Для создания таких подложек во многих случаях используют композитные частицы на основе микросфер диоксида кремния или полистирола и наночастиц благородных металлов, к основным способам получения, которых относятся химические методы осаждения наночастиц на поверхность подложки [2–3], формирование пленок по методу Ленгмюра–Блоджетт [4], привитие отдельно полученных наночастиц к модифицированной амино- или тиольными группами поверхности микросфер [5–7], физические методы нанесения наночастиц на подложки [8–12]. При использовании последней группы методов, включая ионное распыление, термическое испарение и испарение электронным пучком в вакууме, важную роль могут играть те из экспериментальных параметров, которые определяют морфологию осаждаемых наночастиц (кластеров) [13], предопределяющую особенности эффекта плазмонного резонанса, от которых, в свою очередь, в немалой степени зависит дальнейшее практическое использование таких нанокомпозитов.

Перспективными выглядят процессы физического распыления в высоком вакууме твердой мишени ускоренным ионным пучком. Такие процессы занимают заметное место в ряду приоритетных электронных, ионных и плазменных технологий, и являются при этом одним из развивающихся направлений использования, в частности, газоразрядных источников ионов [14].

В настоящей работе предлагается создание подложек на основе диоксида кремния и наночастиц серебра, включающее несколько этапов: синтез

микросфер диоксида кремния гидролизом тетраэтоксисилана в щелочной среде (метод Штёбера [15]); осаждение мультислоев полученных сфер на стеклянные подложки; нанесение кластеров серебра методом ионного распыления.

1. Методика эксперимента

Фотоннокристаллическую структуру на основе микросфер диоксида кремния и наночастиц серебра получали в три стадии, рис. 1.

Рис. 1. Схема эксперимента [26]

На первой стадии проводили синтез микросфер диоксида кремния при щелочном гидролизе тетраэтоксисилана в среде этилового спирта и водного раствора аммиака. Для этого гомогенизировали смесь, содержащую этанол, концентрированный раствор аммиака и дистиллированную воду, при постоянном перемешивании в течение 45 мин при 313 К. Не прекращая перемешивание, в реакционную среду добавляли тетраэтоксисилан $(C_2H_5O)_4Si$ и полученную смесь выдерживали 8–12 ч. Мольное соотношение реагентов составляло $C_2H_5OH:NH_3:H_2O:(C_2H_5O)_4Si = 63,33:12,96:4,07:1$.

На второй стадии получали мультислои микросфер SiO_2 методом вертикального осаждения, для чего стеклянные пластины (подложки) с плоскопараллельными поверхностями роста погружали в полученную суспензию с микросферами диоксида кремния и оставляли при комнатной температуре до полного испарения жидкости.

Третья стадия включает осаждение кластеров серебра на микросферы диоксида кремния, физическим распылением пучком ускоренных ионов аргона мишени серебра.

На рис. 2 представлена структурная схема осаждения кластеров серебра распылением мишени серебра ионным пучком.

Подложка 4, стеклянная пластина с осажденными мультислоями микросфер SiO_2 , удерживалась за боковые грани с возможностью поворота пошагово на 45° без разрыва вакуума на угол $0, 45, 90, 135$ и 180° . Ось поворота 6 проходит и совпадает с осью симметрии подложки рис. 2. Исходя

Рис. 2. Структурная схема осаждения кластеров серебра распылением ионным пучком [16]: 1-распыляющие мишень ионы Ar^+ , 2-мишень Ag , 3-распыленные атомы (кластеры) Ag , 4-подложка, 5-микросферы SiO_2 , 6-ось поворота подложки (направлена нормально плоскости рисунка). *I, II* – пространственная ориентация плоскости подложки относительно плоскости мишени 45 и 135° (серия образцов 1); *III* – 90° (серия – 2); *IV* – 0 и 180° (серия – 3)

из пространственной ориентации *I* плоскопараллельных поверхностей подложки 4 относительно плоскости мишени 2 под углом 45° , осаждается композитная наноструктура на одну из сторон подложки, обращенную к мишени 2 рис. 2. Затем подложка 4 поворачивается на угол 135° , (кратный шагу в 45°) и пространственно ориентируется в позиции

II и на тыльную теневую плоскость подложки осаждаются наночастицы серебра на микросферы диоксида кремния, тем самым обеспечивая формирование композитной наноструктуры на двух сторонах подложки. В случае пространственной ориентации *III* подложка 4 устанавливается под углом 90° , при котором одновременно частицы серебра поступают на обе стороны подложки 4, на которых высажены микросферы диоксида кремния. В случае пространственной ориентации *IV* подложка устанавливается параллельно плоскости мишени под углом 0 и формируется композитная наноструктура, затем подложка поворачивается на угол 180° (кратный шагу в 45°) и подобная композитная наноструктура формируется на обратной теневой стороне подложки 4. Кроме того, в представленных условиях пошаговый поворот подложки без разрыва вакуума, обеспечивает формирование различных модификаций композитных наноструктур: диоксид кремния – серебро на двух противоположных плоскостях подложки (на одной стороне под углом 45° , на обратной – 180°). Притом изменяется размер, пространственное расположение и особенности агрегатной структуры наночастиц серебра, осаждаемых на микросферы диоксида кремния.

Учитываются временные и пространственные факторы процесса рис. 2 время осаждения, направленность распыления, взаимная пространственная ориентация плоскопараллельных сторон подложки и распыляемой поверхности под углом 45° и $135^\circ, 90^\circ, 0$ и 180° . В таких условиях сформированы композитные наноструктуры с эффектом плазмонного резонанса.

Полученные образцы исследовали методом УФ-видимой спектроскопии (UV-vis спектрофотометр Lambda 950, Perkin-Elmer) с приставкой диффузного отражения, область длин волн $175-3300$ нм. Анализ морфологии поверхности проводили с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) растровый электронный микроскоп ZeissNVision 40. Исследование образцов методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводили на

электронном микроскопе LEO912 ABOMEGA.

Осаждение кластеров серебра проводили в вакуумной камере ионно-лучевой электровакуумной установки [14], рис.3.

Параметры процесса: предельное давление $\sim 10^{-3}$ Па, рабочее давление $\sim 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение 8 кВ, ток ионного пучка 1 мА, угол падения ионов на мишень 45° . Отпечаток ионного пучка на мишени представляет эллипс с малой и большой

Рис. 3. Общий вид ионно-лучевой установки [14]

осями соответственно 5,5 и 7 мм. В качестве мишени серебра использовали пластину серебра мерного № СА 5842 ГОСТ Р 51784-2001, обозначение СШСр 50 с массовой долей серебра 99,99%, производитель ОАО «Новосибирский аффинажный завод».

2. Результаты и обсуждение

Считается [14], что направленный поток частиц 3, выбиваемых с мишени, состоит в основном из серебросодержащей плазмы (атомов серебра, включая возбужденные и ионизованные, кластеров и электронов).

Эффективность распыления мишени Ag ионами Ar^+ характеризуется коэффициентом распыления Y_{Ag} . Число атомов $Y_{Ag}(0)$ выбиваемых в режиме линейных каскадов, средних энергий и масс ионов одним нормально падающим на мишень ионом, описывается в

приближении переноса кинетической энергии в каскадах столкновений на основе решения линеаризованного уравнения Больцмана в его интегро-дифференциальной форме [17-21].

Рис. 4. Зависимость приведенного сечения ядерного торможения от приведенной энергии Линдхарда [19]

На основе решения уравнений каскадной теории [21] формулу расчета $Y_{Ag}(0)$ можно привести к виду

$$Y_{Ag}(0) = \frac{0,467\alpha e^2\alpha_o s_n(\varepsilon)}{U_o} \cdot \frac{Z_{Ar}Z_{Ag}}{\left(Z_{Ar}^{\frac{1}{2}} + Z_{Ag}^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{M_{Ar}}{(M_{Ar} + M_{Ag})}, \quad (2)$$

где α - безразмерная функция отношения M/M_i массы распыляемого атома к массе распыляющего иона; α_o - боровский радиус; Z_{Ar} , Z_{Ag} - атомные номера; e^2 - квадрат заряда электрона; $s_n(\varepsilon)$ - приведенное сечение ядерного торможения для взаимодействия Томаса-Ферми; U_o - энергия сублимации Ag .

$$\varepsilon = \frac{0,885M_{Ag}E_{Ar}\alpha_o}{Z_{Ar}Z_{Ag}e^2(M_{Ar} + M_{Ag})} \cdot \frac{1}{\left(Z_{Ar}^{\frac{1}{2}} + Z_{Ag}^{\frac{1}{2}}\right)^{\frac{2}{3}}}, \quad (3)$$

где E_{Ar} - энергия распыляющих ионов Ar^+ .

Приведенное сечение ядерного торможения для взаимодействия Томаса-

Ферми находим из зависимости рис. 4 [19] где ε – приведенная энергия Линдхарда вычисляется по формуле (3) [19]. Подставляя в (3) $E_{Ar}=8 \cdot 10^3$ эВ; $\alpha_o=0,529$ Å; $M_{Ag}=107,868$; $M_{Ar}=39,94$; $Z_{Ar}=18$; $Z_{Ag}=47$; $e^2=14,395$ эВ·Å находим $\varepsilon=0,045$. Из зависимости рис. 4 имеем $s_n(\varepsilon)=0,315$.

Безразмерную функцию α отношения M_{Ag}/M_{Ar} массы атома Ag к массе иона Ar^+ находим из зависимости рис. 5 [18].

Рис. 5. Зависимость безразмерной функции от отношения массы распыляемого атома к массе распыляющего иона [18]

Подставляя в (2) $\alpha=0,48$ для $M_{Ag}/M_{Ar}=2,701$; $\alpha_o=0,529$ Å; $Z_{Ar}=18$; $Z_{Ag}=47$; $e^2=14,395$ эВ·Å; $s_n(\varepsilon)=0,315$; $U_o=2,94$ эВ [19]; $M_{Ag}=107,868$; $M_{Ar}=39,94$. Находим численно коэффициент распыления при $\theta=0$, $Y_{Ag}(0)=8,4$.

В условиях эксперимента угол падения ионов на мишень $\theta=45^\circ$. В случае наклонного падения ионов, отклонение от нормального падения на угол θ , приводит к сокращению глубины проникновения ионов на величину $\cos\theta$ и как следствие концентрированию каскада столкновений в области поверхности мишени. В этом случае коэффициент распыления выражается соотношением [22]

$$Y(\theta) \sim \frac{Y(0)}{(\cos\theta)^k}, \quad (4)$$

где $k \sim 1,7$ при $M_i \geq M$ и $k \sim 1$ при $M_i \ll M$. Из неоднозначного характера зависимости (4) $Y(\theta)$ [23] следует, - при $\theta=45^\circ$ значение $Y_{Ag}(\theta) > Y_{Ag}(0)$ и составляет 11,8.

Коэффициент распыления, определяющий число атомов Ag, выбитых из мишени одним ионом Ar^+ , сравнительно высокий. В связи с этим, необходимо малые скорости осаждения на микросферы диоксида кремния кластеров серебра со средним размером 3-25 нм обеспечивались кратковременным 0,5, 1, 3, 5 или 10 мин воздействием пучка ионов на мишень [23-25].

Средний диаметр микросфер диоксида кремния, по данным ПЭМ, составил

Рис. 6. РЭМ-изображение (угол между подложкой и мишенью – 45° , время напыления – 10 мин) [13]

235 – 250 нм, средний размер кластеров серебра – 3 – 25 нм.

Рис. 7. Характерные спектры поглощения подложек без серебра (1) и с серебром (2 – 5) [27]. Время напыления: 1 (2), 3 (3), 5 (4) и 10 мин (5); угол между подложкой и мишенью – 45° [27]

На рис. 6 приведено изображение микросфер SiO_2 , покрытых кластерами

металлического серебра [13]. При достаточно малых размерах (диаметр кластера < длины волны входящего электромагнитного излучения), кластер Ag может быть рассмотрен как колеблющийся диполь.

Во всех спектрах поглощения наноструктурированных подложек наблюдалось наличие плазмонного пика в области 450 – 500 нм [13,26-28].

На рис. 7 приведены характерные спектры поглощения (серия образцов 1), угол между подложкой и мишенью при осаждении 45°. Положение максимума в спектрах поглощения наноструктурированной поверхности соответствует длине волны, на которой наблюдается поверхностный плазмонный резонанс.

Временные и пространственные факторы осаждения серебра позволяют получить нанокompозитные структуры SiO₂-Ag с различными морфологическими особенностями и закономерно изменяющимися оптическими свойствами (спектрами поглощения, демонстрирующими полосы плазмонного резонанса) обстоятельно рассмотренными в [13].

Данный эффект достигается как за счет сочетания высоких пересыщений относительно осаждаемых компонентов (в данном случае, металлического серебра), типичных для физических методов осаждения металлов и других веществ в вакууме при использовании высокоэнергетических физических воздействий. Так и благодаря наличию существенного градиента концентрации осаждаемого компонента (серебра), максимальной вблизи поверхности микроструктурированного слоя диоксида кремния и резко спадающей на протяжении двух верхних слоев микросфер. Высокое пересыщение приводит к вынужденному формированию множественных кластеров серебра диаметром 1–3 нм, сопоставимых с размером зародышевых кристаллов и осаждающихся на любой доступной поверхности, имеющей температуру, достаточно низкую для конденсации распыленного потока серебра (плазмы, содержащей ионы и кластеры серебра).

Градиент достигается, во-первых, асимметрией потока атомов (кластеров) выбиваемых ионами аргона из серебряной мишени, с достаточно высокой кинетической энергией ~ 10 эВ, переносимых с поверхности распыляемой мишени. Во-вторых, действием эффекта "тени" - угол между подложкой и мишенью – 90° (серия образцов 2), возникающего вследствие такой асимметрии и выражающегося в недоступности третьего–четвертого слоя микросфер для осаждения на них серебра, "экранируемого" первым и вторым слоем.

Своя особенность есть и у образцов серии 3 (угол между подложкой и мишенью – 0 и 180°), характеризующихся сплошным слоем серебра [13,23], формирующегося на поверхности верхнего слоя микросфер диоксида кремния во время осаждения металлического серебра. В них невысока доля аномально выросших наночастиц серебра, напротив, основная фракция – это мелкие кластеры серебра, которые, однако, образуют на последних стадиях осаждения плотный и сплошной слой [29]. Это приводит к формированию асимметричных диэлектрических микрочастиц - "янусов", покрытых с одной стороны (по одной полусфере) проводящим слоем серебра, контактирующим с соседними микрочастицами в слое.

У спектров поглощения на поздних стадиях осаждения четко возникают два пика рис. 7, один из которых ~ 435 нм вполне соответствует мелкой фракции слабо агрегированных наночастиц серебра, в то время как второй пик ~ 476 нм возможно связан с наличием наночастиц большего размера. Данный вывод вполне согласуется с наблюдаемой морфологией РЭМ-изображений микросфер [29], содержащих "рыхлое" покрытие микросфер наночастицами диаметром 3–5 нм с одновременным присутствием многократно больших по размеру наночастиц серебра. Качественный анализ спектров поглощения образцов показывает, что увеличение времени осаждения приводит к плавному увеличению интенсивности пика плазмонного резонанса. Смещению его в область больших длин волн 470–485 нм, что согласуется с простой моделью увеличения

степени покрытия микросфер наночастицами серебра и постепенным увеличением их среднего размера. При этом микрочастицы диоксида кремния ведут себя как изолированные образования и "перетекания" плазмон-поляритонов между ними не должно происходить, поскольку отсутствует прямой физический контакт между микрочастицами, а для туннелирования слишком велики расстояния между микросферами.

Картина существенно изменяется для образцов в которой возникает физический проводящий контакт между микрочастицами, асимметрично покрытыми достаточно плотным слоем металлического серебра [13,23,29]. В спектре поглощения образцов данной серии видны, как минимум, 4 пика 400, 470, 515, 565 нм, часть из которых смещена в область больших длин волн. Такую сложную структуру спектра, по всей видимости, нельзя объяснить наличием нескольких "фракций" наночастиц серебра. Согласно [30], плазмонный резонанс для концентрической (симметричной) металлической "наносферы" возникает в силу гибридизации простых плазмонных мод с одним и тем же угловым моментом, причем как от внутренних, так и от внешних поверхностей такой "наносферы". Для металлической "сферы" с неоднородной смещенной оболочкой понижение симметрии системы снимает ряд запретов на правила отбора плазмонных мод, что позволяет проявлять себя дипольным компонентам и поэтому в спектре могут возникать множественные пики. Кроме того, если в образцах основным элементом структуры были именно отдельные микросферы, поверхностно модифицированные серебром, то в случае серии образцов 3 возникают более благоприятные условия для распространения в самой пленке поверхностных плазмон-поляритонов на границе раздела металл – диэлектрик в слое физически контактирующих друг с другом микросфер.

Заключение

Предложенный подход формирования композитных наноструктур характеризуется возможностью синтеза плазмонных фотоннокристаллических мультислоев SiO_2 -Ag в широкой области свойств, посредством управления параметрами и характеристиками распыления ионным пучком. Даже незначительное изменение предыстории получения наноструктурированных подложек в существенной степени изменяет их оптические свойства, что связано, в основном, с особенностями (закономерной эволюцией) агрегатной структуры осажденных на поверхность упорядоченных микросфер диоксида кремния кластеров и наночастиц серебра.

Подложки подобного типа в перспективе могут служить элементами так называемых lab-on-chip [16], которые позволят проводить исследование живых клеток в интактном состоянии (например, эритроцитов), в связи с чем могут найти применение непосредственно для диагностики заболеваний в медицине или для проведения экспертизы в криминалистике.

Список литературы

- [1]. Brazhe N.A., Abdali S., Brazhe A.R., Luneva O.G., Bryzgalova N.Y., Parshina E.Y., Sosnovtseva O.V., Maksimov G.V. // *Biophysical Journal*. 2009. V. 97. No. 12. P. 3206–3210.
- [2]. Flores J.C., Torres V., Popa M., Crespo D., Calderon-Moreno J.M. // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2008. V. 354. P. 5435–5439.
- [3]. Kim Y.H., Lee D.K., Kang Y.S. // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2005. V. 257–258. P. 273–276.
- [4]. Chen Z., Gang T., Wang Y., Chen X., Guan C., Zhang J., Sun Z., Zhang K., Zhao B., Yang B. // *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*. 2006. V. 277. P. 37–43.
- [5]. Bardosova M., Pemble M.E., Povey I.M., Tredgold R.H. // *Adv. Mater.* 2010. V. 22. P. 3104–3124.
- [6]. Huang C.-K., Chen C.-Y., Han J.-L., Chen C.-C., Jiang M.-D., Hsu J.-S., Chan C.-H., Hsieh K.-H. // *J. Nanopart. Res.* 2010. V. 12. P. 199–207.
- [7]. Lupitskiy R., Motornov M., Minko S. // *Langmuir*. 2008. V. 24. P. 8976–8980.
- [8]. Kim T.-H., Kim D.-W., Lee J.-M., Lee Y.-G., Oh S.-G. // *Materials Research Bulletin*. 2008. V. 43. P. 1126–1134.
- [9]. Pawar A.B., Kretzschmar I. // *Langmuir*. 2008. V. 24. P. 355–358.

- [10]. Zhang G., Wang D., Mohwald H. // Nano Lett. 2005. Vol. 5. No. 1. 143–146.
- [11]. Singh D.P., Nagar R., Singh J.P. // J. Appl. Phys. 2010. V. 107. 074306-1 – 074306-4.
- [12]. Suzuki D., Kawaguchi H. // Colloid Polym. Sci. 2006. V. 284. P. 1471–1476.
- [13]. Семенова А.А., Гудилин Е.А., Семенова И.А., Семенов А.П., Иванов В.К., Третьяков Ю.Д. // Доклады Академии наук. 2011. Т. 438. № 4. С.490-493.
- [14]. Семенов А.П. Пучки распыляющих ионов: получение и применение. Улан-Удэ: Изд-во Бурятского научного центра СО РАН, 1999. 207 с.
- [15]. Stöber W., Fink A., Bohn E. // Colloid Interface Sci. 1968. V. 26. P. 62–69.
- [16]. Патент № 2643697 RU, МПК В81В 3/00 // Способ получения композитных наноструктур: диоксид кремния – серебро / А.П.Семенов, А.А.Семенова, И.А.Семенова, Е.А.Гудилин. - № 2017117147; заявл. 11.05.2017; опубл. 05.02.2018. - Бюл. № 4. - 16 с.
- [17]. Фундаментальные и прикладные аспекты распыления твердых тел / Под ред. Е. С. Машковой. М.: Мир, 1989. 349 с.
- [18]. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Р. Бериша. М.: Мир, 1984. 336 с.
- [19]. Габович М. Д., Плешивцев Н. В., Семашко Н. Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 248 с.
- [20]. Плетнев В. В. Современное состояние теории физического распыления неупорядоченных материалов // Итоги науки и техники. Сер. Пучки заряженных частиц и твердое тело. М., 1991. Т. 5. С. 4-62.
- [21]. Sigmund P. Theory of sputtering. 1. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets // Phys. Rev. 1969. Vol.184. N2. P.383-416.
- [22]. Yamamura Y., Shimizu R., Shimizu H., Itoh N. Ion-induced sputtering // Ион оё токусю (Japan). 1983. Vol.26. N.2.P.69-87.
- [23]. Семенова А.А., Гудилин Е.А., Семенов А.П., Семенова И.А., Иванов В.К., Третьяков Ю.Д. // Труды IV Международного Крейнделевского семинара «Плазменная эмиссионная электроника». Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2012. С. 124-129.
- [24]. Semenova A.A., Goodilin E.A., Semenov A.P., Semenova I.A., Ivanov V.K. Tretyakov Yu.D. // Russian Physics Journal. 2012. Vol. 55. N. 12/3. P. 92-97.
- [25]. Semenova A.A., Goodilin E.A., Semenov A.P., Semenova I.A., Ivanov V.K. Tretyakov Yu.D. // Abstracts 3rd International Congress on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, High Current Electronics and Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk: 2012. P. 477-478.
- [26]. Семенова А.А., Гудилин Е.А., Третьяков Ю.Д., Семенов А.П. // Тезисы докладов II Международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2010: Беларусь – Россия – Украина». Киев: 2010. С. 716.
- [27]. Семенова А.А., Гудилин Е.А., Семенов А.П., Третьяков Ю.Д. // Тезисы докладов IV Всероссийской конференции по наноматериалам. М.: ИМЕТ РАН, 2011. С.512.
- [28]. Семенова А.А., Гудилин Е.А., Семенов А.П., Третьяков Ю.Д. // Тезисы докладов XIX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. «Химия и технология материалов, включая наноматериалы». Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2011. Т. 2. С.100-101.
- [29]. Семенова А.А. Наноструктурированные материалы на основе серебра для биомедицинской диагностики методом гигантского комбинационного рассеяния: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.21, 02.00.01 / Семенова Анна Александровна. – Москва, 2012. – 26 с.
- [30]. Wang H., Wu Y., Lassiter B., Nehl C.L., Hafner J.H., Nordlander P. // PNAS. 2006. V. 103. No. 29. P. 10856–10860.