

Формирование тонких пленок и наночастиц серебра в серебросодержащих стеклах и на их поверхности при электронном облучении

© В.С. Брунов,¹ О.А. Подсвилов,² А.И. Сидоров,¹ Д.В. Чураев²

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 197101 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: aisidorov@qip.ru

(Поступило в Редакцию 16 сентября 2013 г.)

Экспериментально показано, что облучение стекол, содержащих ионы серебра, электронами с энергией 5–7 keV и дозой 20–50 мС/см² приводит к образованию на поверхности стекла тонкой пленки и наночастиц серебра. При высокой концентрации ионов серебра в стекле пленка серебра формируется и под поверхность стекла. Причиной данных эффектов является формирование в приповерхностном слое стекла области отрицательного объемного заряда, что приводит к полевой миграции ионов серебра из объема стекла в область отрицательного объемного заряда и на поверхность стекла, и восстановление электронами с тепловой энергией ионов серебра до нейтральных атомов.

Введение

Тонкие пленки и наночастицы металлов широко используются в фотонике и плазмонике в устройствах телекоммуникаций и обработки информации, оптических измерениях, детектировании молекул и химических веществ, медицине, других плазмонных устройствах, основанных на усилении люминесценции и рамановского рассеяния в условиях локального усиления амплитуды поля электромагнитной волны при плазмонном резонансе. К таким устройствам относятся оптические волокна и волноводы с оболочкой из металлических наночастиц [1], химические [2] и биосенсоры [3,4], плазмонные волноводы [5], наноантенны [6] и оптические нанотранзисторы [7], метаматериалы [8], концентраторы электромагнитного поля [9], оптические композиты [10], светодиоды [11], фотонные кристаллы [12] и другие устройства наноплазмоники [13,14]. В устройствах наноплазмоники на основе металлических наночастиц в основном используются наночастицы серебра, золота и меди, так как они обладают наиболее интенсивными плазмонными резонансами в видимой области спектра [15,16]. Наночастицы металлов могут быть сформированы в жидких или полимерных средах методами химического синтеза [17,18], на поверхности подложки методами лазерной абляции [19], методом вакуумного напыления [20] и термообработкой стекол, содержащих ионы металла, в восстановительной атмосфере [21,22]. Для формирования наночастиц металлов в приповерхностном слое подложки может быть использован метод ионной имплантации [23]. В работах [24–27] показано, что облучение электронами с энергией 5–50 keV стекол, содержащих ионы серебра или меди, в приповерхностном слое стекла могут быть сформированы металлические наночастицы. Электроннолучевой метод формиро-

вания наночастиц основан на том, что при облучении электронами в приповерхностном слое стекла формируется отрицательный объемный заряд, что приводит к полевой миграции подвижных положительных ионов металла из объема стекла к его поверхности. Термализованные электроны в области отрицательного объемного заряда восстанавливают ионы металла до нейтральных атомов. Атомы металла могут агрегироваться в наночастицу либо непосредственно в процессе электронного облучения, либо при последующей термообработке. В работе [26] отмечено, что при облучении серебросодержащего стекла электронами с энергией менее 10 keV на поверхности стекла возникает сплошная тонкая пленка металлического серебра. Достоинством электроннолучевого метода является его органичное сочетание с методом электронной литографии, что позволяет формировать плазмонные наноструктуры локально, в том числе, в наноразмерных областях. Поэтому изучение особенностей формирования металлических наночастиц и наноструктур при воздействии электронного пучка на стекла, содержащие ионы металла, представляет не только научный, но и практический интерес.

Целью настоящей работы являлось исследование изучения процессов, происходящих в стеклах, содержащих ионы серебра, при воздействии электронных пучков с относительно низкой энергией электронов 5–7 keV. Основной акцент при этом был сделан на изучение возможности формирования тонких пленок или наночастиц серебра непосредственно на поверхности стекла.

Методика экспериментов

В экспериментах использовались полированные плоскопараллельные пластины стекол двух типов.

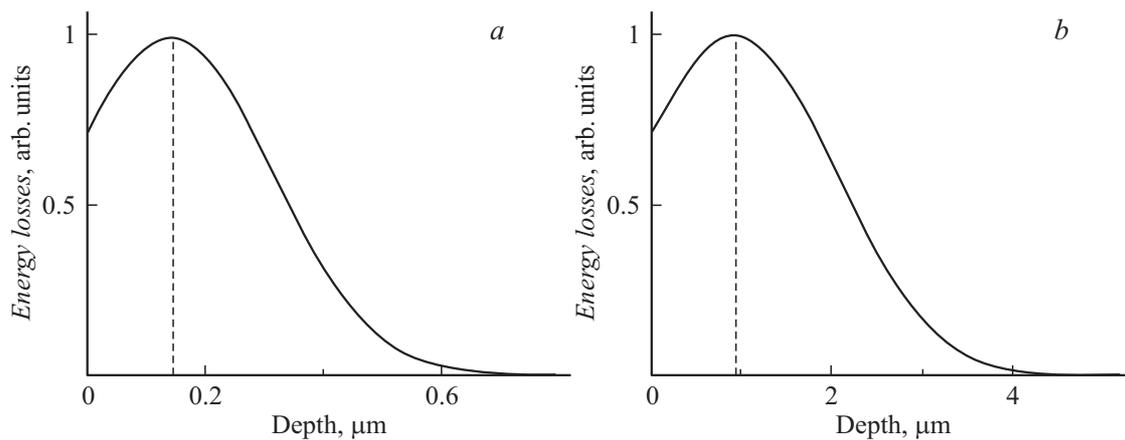


Рис. 1. Нормированные профили энергетических потерь электронов в стекле. *a* — $E = 5$, *b* — $E = 20$ keV.

1. Натриево-силикатное (soda lime (SL)) стекло исходного состава $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO}$ размером 15–20 mm и толщиной 1 mm. Ионы серебра вводились в приповерхностные слои стекла методом ионного обмена [28] путем замены в стекле ионов натрия на ионы серебра ($\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Na}^+$) в расплаве смеси AgNO_3 (5 mol.%) + NaNO_3 (95 mol.%) при температуре 350°C в течение 15 min. Расчеты показывают, что при этом в стекле формируется слой, содержащий ионы серебра, толщиной 15 μm . Необходимо отметить, что при замене ионов натрия на ионы серебра в приповерхностном слое стекла происходит увеличение показателя преломления стекла и формируется оптический волновод [28].

2. Фототерморелактивное (PTR) стекло [29], в которое серебро было введено в процессе синтеза стекла. Стекло было синтезировано в СПб НИУ ИТМО и имело следующий состав: $\text{Na}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-NaF-NaCl-CeO}_2\text{-Sb}_2\text{O}_3\text{-Ag}_2\text{O}$. Концентрация Ag_2O в стекле составляла 0.2 mol%.

Электронное облучение проводилось на сильноточном сканирующем электронном микроскопе JEBD-2 с энергией электронов $E = 5$ и 7 keV, при плотности электронного тока $j = 44 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ и дозе облучения $Q = 20\text{--}50 \text{ mC}/\text{cm}^2$. Время облучения изменялось от 7.5 до 19 min в зависимости от дозы и плотности электронного тока. Поперечный размер электронного пучка на поверхности образца составлял 1 mm. Поперечный размер пучка был выбран исходя из удобства последующих оптических измерений. Энергии облучения были выбраны так, чтобы пространственный отрицательный заряд формировался в непосредственной близости к поверхности.

При электронном облучении образцов часть энергии электронов теряется на пленке алюминия и образующейся на поверхности стекла пленке серебра. Поэтому для определения доли энергии электронов, прошедших непосредственно вглубь стекла через пленки алюминия и серебра, необходимо учитывать энергетические потери электронов в этих пленках. Расчеты энергетиче-

Потери энергии электронами при прохождении пленок серебра и алюминия

E , keV	Потери (Al, 100 nm), keV	Потери (Ag, 100 nm), keV
5	3.11	5
10	2.46	3.78
20	1.82	3.13

ских потерь электронов в металлических пленках и в стекле проводились по методике, описанной в [30,31], для начальной энергии электронов 5, 10 и 20 keV. При расчете энергетических потерь электронов в стекле учитывались основные компоненты стекла: Si, O и Na. Расчеты показали, что для энергии электронов $E = 5$ keV потери в пленке алюминия толщиной 100 nm составляют 3.11 keV (таблица). В свою очередь, пленка серебра толщиной 100 nm полностью поглощает такой электронный пучок (таблица). Поэтому для образования серебряных пленок и наночастиц под электронным облучением целесообразно использовать энергии электронов в пучке не менее 5 keV.

Исходя из профиля энергетических потерь электронов непосредственно в самом стекле, представленном на рис. 1, *a*, максимум удельных потерь энергии электронов в стекле при $E = 5$ keV приходится на глубину 170 nm и составляет $2.21 \cdot 10^{-9} \text{ J}/\text{m}$ (рис. 1, *a*). Для падающего пучка электронов с энергией электронов $E = 20$ keV максимальная глубина энергетических потерь электронов составляет 910 nm, на которой удельные потери равны $1.36 \cdot 10^{-9} \text{ J}/\text{m}$ (рис. 1, *b*).

Таким образом, при выбранных режимах электронного облучения максимум энергетических потерь электронов приходится на глубину менее 100 nm. В данной области и формируется пространственный отрицательный заряд. Облучение электронами проводилось при комнатной температуре, однако необходимо учитывать, что, согласно расчетам, при электронном облучении с указанными выше параметрами электронного луча

приповерхностный слой стекла нагревается примерно до 110°C . Для удаления поверхностного заряда, возникающего на стекле в процессе облучения электронами, на поверхность стекла наносилась пленка Al толщиной 100 nm , которая заземлялась. После электронного облучения пленка Al удалялась травлением в водном растворе KOH. Термообработка образцов после электронного облучения проводилась на воздухе в муфельной печи (Nabertherm). Спектры оптической плотности образцов измерялись с помощью спектрофотометра Cary500 при комнатной температуре.

Экспериментальные результаты и обсуждение

Эксперименты показали, что облучение SL- и PTR-стекла электронами с энергией менее $5\text{--}7\text{ keV}$ приводит к появлению на поверхности стекла сплошной металлической пленки, обладающей зеркальным металлическим блеском. На вставке в рис. 2 показана фотография пленки серебра на поверхности SL-стекла, сделанная с помощью оптического микроскопа на просвет. Неправильная форма пленки связана с несимметричным распределением плотности электронного тока в пучке. На рис. 2 показаны спектры оптической плотности образца SL-стекла до электронного облучения и после облучения электронами с энергией 5 и 7 keV . Необходимо отметить, что спектры оптической плотности являются интегральными по области, отмеченной штрихами на вставке в рис. 2. Из рисунка видно, что после облучения электронами происходит не только увеличение оптической плотности в широком спектральном интервале, связанное с формированием сплошной пленки серебра,

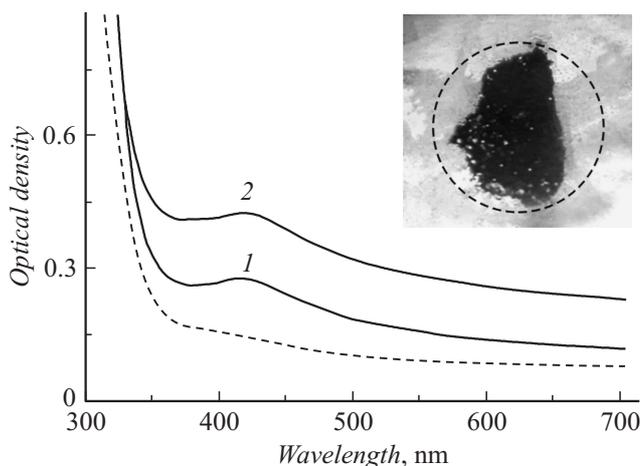


Рис. 2. Спектральные зависимости оптической плотности SL-стекла после электронного облучения. 1 — $E = 5\text{ keV}$, $Q = 20\text{ mC/cm}^2$; 2 — $E = 7\text{ keV}$, $Q = 33\text{ mC/cm}^2$. Штриховая линия — до электронного облучения. На вставке — фотография поверхностной пленки серебра под микроскопом на просвет. Штрихом показана область измерения оптической плотности.

но и появление полосы поглощения с максимумом на $\lambda = 425\text{ nm}$, что характерно для плазмонного резонанса наночастиц серебра [15,16]. Это указывает на то, что при электронном облучении формируется не только сплошная пленка серебра, но и наночастицы серебра. При этом наночастицы могут формироваться как на поверхности стекла, так и в микро- и нанотрещинах вблизи поверхности, которые возникают при механической полировке стекла.

Факт образования пленки серебра непосредственно на поверхности стекла подтверждается проведенными измерениями ее электрического сопротивления. Расстояние между измерительными электродами составляло 0.8 mm . Измеренное электрическое сопротивление пленки на поверхности SL-стекла после облучения электронами с энергией 7 keV составило $500\ \Omega$. Сопротивление стекла, не подвергнутого электронному облучению, превышает $1\text{ G}\Omega$. Расчет показывает, что при использованной геометрии измерений толщина пленки серебра с указанным сопротивлением должна быть менее 1 nm . Однако пленка серебра такой толщины должна быть практически прозрачной в видимой области спектра. Согласно расчетам, пленка серебра толщиной 50 nm имеет коэффициент пропускания 5% , а пленка серебра толщиной 20 nm — 43% . Однако у пленки серебра толщиной 20 nm , для использованной геометрии измерений, сопротивление должно быть $0.4\ \Omega$. Существенное увеличение сопротивления пленки серебра, полученной на поверхности стекла электронным облучением, может быть связано с тем, что она состоит не из чистого серебра, а содержит примесь ионов натрия, которые, так же как и ионы серебра, мигрируют из объема стекла и выходят на его поверхность. Ионы натрия в силикатных стеклах имеют большую подвижность, чем ионы серебра [28]. Однако после ионного обмена в приповерхностном слое стекла концентрация ионов серебра больше, чем концентрация ионов натрия. Поэтому сформировавшаяся на поверхности пленка состоит в основном из серебра. Можно предположить также, что в процессе электронного облучения происходит диффузия ионов Al в пленку серебра из пленки, нанесенной на стекло для удаления поверхностного заряда. Такой процесс возможен, так как ионы Al в пленке получают энергию от электронов. Кроме того, для них также возможна полевая миграция в область отрицательного заряда.

Рис. 3 иллюстрирует механизм формирования пленки и наночастиц серебра на поверхности стекла при электронном облучении для электронного пучка, имеющего колоколообразное распределение концентрации электронов в поперечном сечении.

Облучение электронами приводит к образованию в приповерхностном слое стекла отрицательного объемного заряда. Возникающее при этом электрическое поле вызывает полевую миграцию подвижных положительных ионов серебра и натрия из объема стекла в область отрицательного объемного заряда. В стекле кроме тока

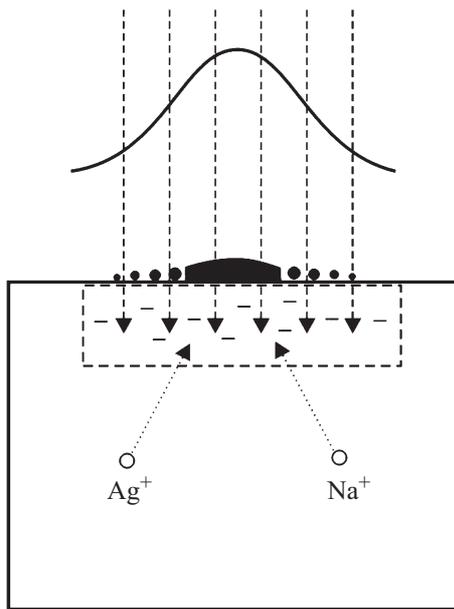


Рис. 3. Механизм формирования пленки и наночастиц серебра на поверхности стекла при электронном облучении.

электронов из падающего электронного пучка имеется ток электронов с тепловыми энергиями из области отрицательного объемного заряда в пленку Al на поверхности стекла, имеющую высокое электрическое сопротивление. Благодаря этому ионы серебра и натрия могут выходить и на поверхность стекла. На поверхности и под поверхностью стекла при электронном облучении возможны два процесса. Во-первых, восстановление ионов серебра и натрия электронами с тепловыми энергиями до нейтральных атомов. Такие атомы могут формировать на поверхности стекла как металлическую пленку, так и наночастицы. Во-вторых, энергичные электроны из падающего пучка могут ионизировать нейтральные атомы серебра и натрия, тем самым препятствуя образованию металлической пленки и наночастиц. Факт образования пленки и наночастиц серебра на поверхности стекла указывает на то, что первый процесс является преобладающим. Пленка серебра формируется в области максимальной плотности электронного тока, соответствующей максимальному объемному заряду в стекле. Наночастицы серебра могут формироваться на крыльях поперечного распределения электронов в пучке. Данная область соответствует меньшему объемному заряду в стекле, и в ней концентрации атомов серебра недостаточно для образования сплошной пленки серебра. Очевидно, что при проведении облучения стеклом электронным пучком с меньшей плотностью тока и меньшей дозой на поверхности стекла будут формироваться только наночастицы серебра без образования сплошной пленки серебра.

Эксперименты показали, что пленка серебра, образовавшаяся на поверхности стекла после электронного облучения, растворяется в 10% водном растворе HNO_3 за

время менее 5 min. После этого электрическое сопротивление облученной зоны стекла становится более 1 GΩ. При этом было установлено, что в облученной зоне стекла в объеме стекла находится еще один полупрозрачный слой серого цвета (см. вставку в рис. 4). На рис. 4 показаны спектры оптической плотности облученной зоны SL-стекла после травления в HNO_3 . На спектрах оптической плотности отсутствует полоса поглощения, характерная для наночастиц серебра, и наблюдается лишь увеличение поглощения в широком спектральном интервале. Как было показано в работе [32] методами численного моделирования, при облучении диэлектрика возникновение в нем свободных носителей заряда противоположного знака, имеющих различную подвижность (например, электронов и дырок), объемный заряд формируется в диэлектрике в виде слоев. Причем слой, ближайший к поверхности, имеет максимальную плотность заряда и минимальную толщину. Это было подтверждено экспериментально в работе [26], где методом ТЕМ было исследовано распределение наночастиц серебра в PTR-стекле по глубине после облучения электронами с энергией 30 keV и термообработки. В настоящей работе было показано, что наночастицы серебра располагаются слоями, причем ближайший к поверхности слой имеет толщину 20 nm и состоит из плотноупакованных наночастиц серебра. Можно предположить, что в условиях нашего эксперимента в слое объемного заряда, ближайшего к поверхности, концентрация нейтральных атомов серебра настолько высока, что они образуют не отдельные наночастицы, а сплошную тонкую пленку серебра. Для оценки глубины залегания этой пленки один из образцов SL-стекла был повергнут травлению в 5% водном растворе HF в течение 30 s. После этого поглощение в облученной зоне уменьшилось до поглощения необлученного стекла.

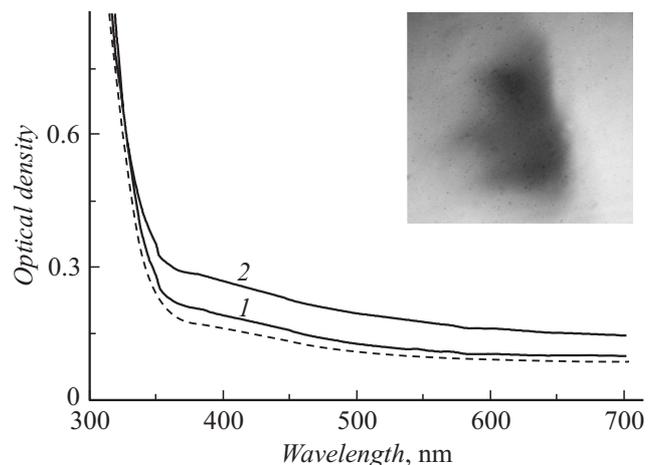


Рис. 4. Спектральные зависимости оптической плотности SL-стекла после удаления поверхностной серебряной пленки и наночастиц травлением в азотной кислоте. 1 — $E = 5 \text{ keV}$, $Q = 20 \text{ mC/cm}^2$; 2 — $E = 7 \text{ keV}$, $Q = 33 \text{ mC/cm}^2$. Штриховая линия — до электронного облучения. На вставке — фотография облученной зоны стекла под микроскопом на просвет.

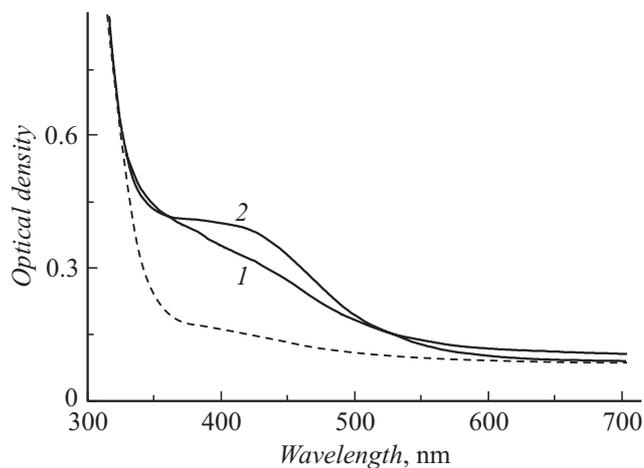


Рис. 5. Спектральные зависимости оптической плотности SL-стекла после электронного облучения, удаления поверхностной пленки серебра и термообработки. 1 — $E = 5$ keV, $Q = 20$ mC/cm²; 2 — $E = 7$ keV, $Q = 33$ mC/cm². Штриховая линия — до электронного облучения.

Предварительные эксперименты показали, что скорость травления данного типа стекол в плавиковой кислоте составляет 100 nm/min. Таким образом, можно сделать вывод, что пленка серебра образуется в стекле на глубине менее 50 nm.

Для проверки предположения о формировании пленки серебра под поверхностью стекла образец SL-стекла после электронного облучения и удаления поверхностной пленки серебра был подвергнут термообработке при температуре 450°C в течение 3 h. После термообработки окраска облученных зон изменилась с серой на желтую, а на спектрах оптической плотности появилась полоса поглощения, характерная для наночастиц серебра (рис. 5). Это указывает на то, что в результате термообработки происходит частичное растворение в стекле сплошной пленки серебра и образование отдельных наночастиц серебра. Таким образом, данный эксперимент подтверждает сделанное ранее предположение о формировании под поверхностью стекла тонкой сплошной пленки серебра.

Аналогичные результаты были получены и для PTR-стекло, в которые серебро вводилось в процессе синтеза стекла. Отличием является то, что электронное облучение PTR-стекло не приводит к формированию пленки серебра под поверхностью стекла. Причиной этого является то, что концентрация ионов серебра в PTR-стеклах значительно меньше, чем в SL-стеклах, в которые серебро вводилось методом ионного обмена.

Заключение

Таким образом, облучение стекол, содержащих ионы серебра, электронами с энергией 5–7 keV приводит к образованию на поверхности стекла тонкой сплошной

пленки и наночастиц серебра. При высокой концентрации ионов серебра в стекле тонкая пленка серебра формируется и под поверхностью стекла. Причиной наблюдаемых эффектов является формирование в приповерхностном слое стекла области отрицательного объемного заряда, что приводит к полевой миграции ионов серебра из объема стекла в область отрицательного объемного заряда и на поверхность стекла, и восстановление электронами с тепловой энергией ионов серебра до нейтральных атомов.

Достоинствами данного метода является его органичное сочетание с методом электронной литографии, возможность получения как пленок, так и наночастиц серебра и возможность формирования пленки серебра под поверхностью стекла. Достоинством метода является также то, что при его сочетании с методом ионного обмена появляется возможность создания гибридных устройств типа „плазменная наноструктура (наночастица)–оптический волновод“. Подобные гибридные устройства весьма востребованы при разработке устройств интегральной оптики, а также химических и биосенсоров.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг. (контракт П412 12.05.2010, Минобрнауки РФ) и ФЦП „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2012 гг.“ (контракт № 16.552.11.7002 29.04.2011, Минобрнауки РФ).

Список литературы

- [1] Zhou W., Mandia J.D., Griffiths M., Bialiyev A., Zhang Y., Gordon P.G., Barry S.T., Albert J. // *Opt. Expr.* 2013. Vol. 21. P. 245–255.
- [2] Tagada C.K., Dugasani S.R., Aiyer R., Park S., Kulkarni A., Sabharwal S. // *Sens. and Act. B: Chem.* 2013. Vol. 183. P. 144–149.
- [3] Nashchekin A.V., Nevedomskiy V.N., Obratsov P.A., Stepanenko O.V., Sidorov A.I., Usov O.A., Turoverov K.K., Konnikov S.G. // *Proc. SPIE.* 2012. Vol. 8427. P. 842 739.
- [4] Choi S., Dickson R.M., Yu J. // *Chem. Soc. Rev.* 2012. Vol. 41. P. 1867–1891.
- [5] Yang R., Lu Z. // *Int. J. of Opt.* 2012. Vol. 2012. P. 1–12.
- [6] Hewageegana P., Stockman M.I. // *Infrared Phys. and Tech.* 2006. Vol. 50. P. 177–181.
- [7] Tseng C.W., Chen Y.L., Tao Y.T. // *Org. Electr.* 2012. Vol. 13. P. 1436–1442.
- [8] Jin X.R., Lu Y., Zheng H., Lee Y.P., Rhee J.Y., Kim K.W., Jang W.H. // *Opt. Commun.* 2011. Vol. 284. P. 4766–4768.
- [9] Normatov A., Ginzburg P., Berkovitch N., Lerman G.M., Yanai A., Levy U., Orenstein M. // *Opt. Expr.* 2010. Vol. 18. P. 14 079–14 086.
- [10] Chang R., Chiang H.P., Leung P.T., Tsai D.P., Tse W.S. // *Sol. St. Commun.* 2005. Vol. 133. P. 315–320.
- [11] Ma X., Benavides J., Haughn C.R., Xu F., Doty M.F., Cloutier S.G. // *Org. Electr.* 2013. Vol. 14. P. 1916–1923.

- [12] Singh M.R. // *Superlat. and Microstr.* 2008. Vol. 43. P. 537–541.
- [13] Lindquist N.C., Nagpal P., McPeak K.M., Norris D.J., Oh S.H. // *Rep. Prog. Phys.* 2012. Vol. 75. P. 161.
- [14] Garcia M.A. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2011. Vol. 44. P. 1–20.
- [15] Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физмалит, 2010. 480 с.
- [16] Kreibig U., Vollmer M. *Optical properties of metal clusters.* Berlin: Springer-Verlag, 1995. 532 p.
- [17] Дыкман Л.А., Богатырев В.А., Щеголев С.Ю., Хлебцов Н.Г. Золотые наночастицы: синтез, свойства, биомедицинское применение. М.: Наука, 2008. 319 с.
- [18] Карнов С.В., Слабко В.В. Оптические и фотофизические свойства фрактальноструктурированных золей металлов. Новосибирск: СО РАН, 2003. 265 с.
- [19] Atoruso S., Ausanio G., Bruzzese R., Vitiello M., Wang X. // *Phys. Rev. B.* 2005. Vol. 71. P. 033 406.
- [20] Stoll S.L., Gillan E.G., Barron A.R. // *Chem. Var. Depos.* 1996. Vol. 2. P. 182.
- [21] Kaganovskii Y., Mogilko E., Lipovskii A.A., Rosenbluh M. // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2007. Vol. 61. P. 508.
- [22] Образцов П.А., Нащекин А.В., Никоноров Н.В., Сидоров А.И., Панфилова А.В., Брунков П.Н. // *ФТТ.* 2013. Т. 55. N 6. С. 1180–1186.
- [23] Ганеев Р.А., Ряснянский А.И., Степанов А.Л., Кодиров М.К., Усманов Т. // *Опт. и спектр.* 2003. Т. 95. № 6. С. 1034.
- [24] Sidorov A.I., Nashchekin A.V., Nevedomskiy V.N., Usov O.A., Podsvirov O.A. // *Int. J. of Nanosci.* 2001. Vol. 10. P. 1265.
- [25] Podsvirov O.A., Ignatiev A.I., Nashchekin A.V., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskiy V.A., Usov O.A., Vostokov A.V. // *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B.* 2010. Vol. 268. P. 3103.
- [26] Игнатьев А.И., Нащекин А.В., Неведомский В.М., Подсви́ров О.А., Сидоров А.И., Соловьев А.П., Усов О.А. // *ЖТФ.* 2011. Т. 81. С. 75.
- [27] Подсви́ров О.А., Сидоров А.И., Цехомский В.А., Востоков А.В. // *ФТТ.* 2010. Т. 52. № 9. С. 1776–1779.
- [28] Tervonen A., West B.R., Honkanen S. // *Opt. Eng.* 2011. Vol. 50. P. 071 107.
- [29] Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskii V.A. Silver nanoparticles in oxide glasses: technologies and properties. В кн. „Silver nanoparticles“/ Ed. by D.P. Perez. Vukovar: Croatia: In-Tech. 2010. 334 p. .
- [30] Макаров В.В. // *ЖТФ.* 1978. Т. 48. С. 551.
- [31] Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И. Физические основы электронной и ионной технологий. М.: Высшая школа, 1984. 320 с.
- [32] Touzin M., Goeriot D., Guerret-Piécorct C., Juvé D., Tréheux D., Fitting H.-J. // *J. Appl. Phys.* 2006. Vol. 99. P. 114 110.