

Растворение пленки серебра в силикатных стеклах при электронном облучении

© В.С. Брунов,¹ О.А. Подсвиров,² А.И. Сидоров,¹ М.А. Просников²

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
email: aisidorov@cjp.ru

(Поступило в Редакцию 19 марта 2014. г)

Показано, что при воздействии электронного пучка с энергией электронов $E > 10$ keV и дозе электронного облучения $Q \geq 20$ mQ/cm² на силикатные стекла с пленкой серебра толщиной 80–100 nm происходит частичное или полное растворение пленки серебра в стекле. Основными механизмами, вызывающими данный эффект, являются формирование отрицательного объемного заряда под поверхностью стекла, полевая эмиссия положительных ионов серебра из пленки и полевая миграция ионов серебра в область объемного заряда.

1. Введение

При облучении стекол пучком энергичных электронов возникает ряд новых физических явлений, представляющих как научный, так и прикладной интерес. Так, электронный пучок может инициировать кристаллизацию отдельных компонентов стекла [1,2], а полевая миграция подвижных положительных ионов в поле отрицательного объемного заряда, создаваемого в стекле электронами, могут приводить к их пространственному перераспределению [3]. В работах [4–8] показано, что при облучении электронами стекол, содержащих ионы серебра или меди, происходит полевая миграция этих ионов, их восстановление и образование металлических наночастиц, обладающих плазмонным резонансом. В работе [9] показано, что при облучении электронами силикатных стекол, содержащих ионы натрия, их полевая миграция в область отрицательного объемного заряда приводит к увеличению показателя преломления стекла и формированию вблизи поверхности стекла оптического волновода. В работе [10] с помощью методов численного моделирования установлено, что при облучении электронами диэлектрика, содержащего положительные носители заряда, пространственный заряд распределяется по глубине немонотонно. Это было экспериментально подтверждено в работе [5], где было показано, что наночастицы серебра в стекле, возникшие после электронного облучения, располагаются слоями. В работах [5,6] для стекол, исходно содержащих ионы серебра, было также отмечено, что при энергии электронов $E \leq 10$ keV часть серебра выходит из стекла на его поверхность, образуя сплошную металлическую пленку. Рис. 1, *a, b* иллюстрирует этот эффект. Электроны с относительно низкой энергией формируют область отрицательного объемного заряда непосредственно вблизи поверхности стекла. Подвижные ионы серебра вытягиваются из объема стекла полем в область объемного заряда, восста-

навливаются термализованными электронами и могут выходить на поверхность стекла (без нарушения его электронейтральности) с образованием металлической пленки. В связи с этим возникает вопрос: возможен ли обратный процесс — растворение пленки серебра в стекле, не содержащем ионы серебра, при его облучении энергичными электронами? Возможную схему такого процесса иллюстрирует рис. 1, *c, d*. Электроны с относительно высокой энергией простреливают тонкую

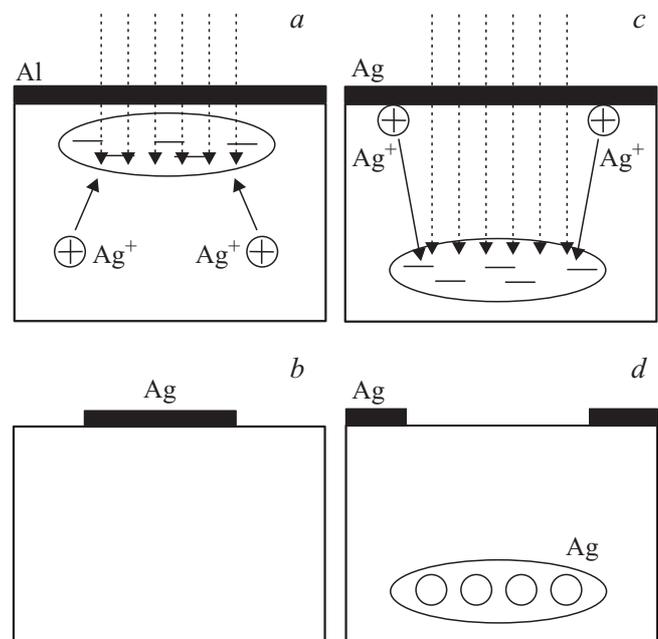


Рис. 1. *a, b* — формирование пленки серебра на поверхности стекла с ионами серебра при электронном облучении (пленка Al служит для стока поверхностного заряда и удаляется после облучения), *c, d* — растворение пленки серебра при электронном облучении в стекле, не содержащем ионов серебра.

пленку серебра и формируют область отрицательного объемного заряда в глубине стекла. Ионы серебра полем объемного заряда могут вытягиваться из пленки серебра и мигрировать в область объемного заряда. При этом может происходить растворение пленки. Похожий процесс происходит в стеклах, в объеме которых сформированы наночастицы серебра или меди. При нагреве такого стекла и приложении постоянного электрического поля происходят растворение наночастиц в стекле и полевая миграция положительных ионов металла к катоду [11–13]. Разрушение наночастиц серебра в стекле под действием энергичных электронов и поля пространственного заряда обнаружено в работе [14]. Похожий эффект наблюдается также при ионном обмене из пленки серебра в щелочные силикатные стекла в присутствии электрического поля [15,16].

Целями настоящей работы были экспериментальная проверка возможности растворения пленки серебра в стекле при облучении электронами и изучение особенностей данного процесса для электронных пучков с энергией электронов $E = 10–50$ keV.

2. Методика эксперимента

В экспериментах использовались образцы из стекла М4 состава $\text{SiO}_2\text{--Na}_2\text{O--MgO--Al}_2\text{O}_3$, а также из оптического стекла К2 состава $\text{SiO}_2\text{--B}_2\text{O}_3\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--BaO--K}_2\text{O--Na}_2\text{O}$. Образцы представляли собой плоскопараллельные пластины с полированными поверхностями. Пленки серебра толщиной 80 и 100 нм наносились на поверхность стекла методом вакуумного напыления.

Облучение электронами проводилось на сильноточном сканирующем электронном микроскопе JEBD-2 с энергией электронов $E = 10–50$ keV дозами $Q = 20$ и 50 мкКл/см² при плотности электронного тока $j = 50$ и 100 мкА/см². Продолжительность облучения составляла 400 с для $Q = 20$ мкКл/см² и 1000 с для $Q = 50$ мкКл/см² для $j = 50$ мкА/см². Облучение проводилось при комнатной температуре. Диаметр электронного луча на поверхности стекла был равен 2 мм. Для удаления поверхностного заряда, возникающего на стекле в процессе облучения электронами, пленка серебра заземлялась. После электронного облучения оставшаяся пленка серебра удалялась травлением в водном растворе азотной кислоты. Термообработка образцов после электронного облучения проводилась на воздухе при температуре $t = 500^\circ\text{C}$ в муфельных печах (Nabertherm) с программным управлением. Спектры оптической плотности измерялись с помощью спектрофотометра Cary500 (Varian) при комнатной температуре.

3. Обсуждение результатов

Для определения глубины, на которой формируется область отрицательного объемного заряда энергетических потерь и глубины проникновения электронов в

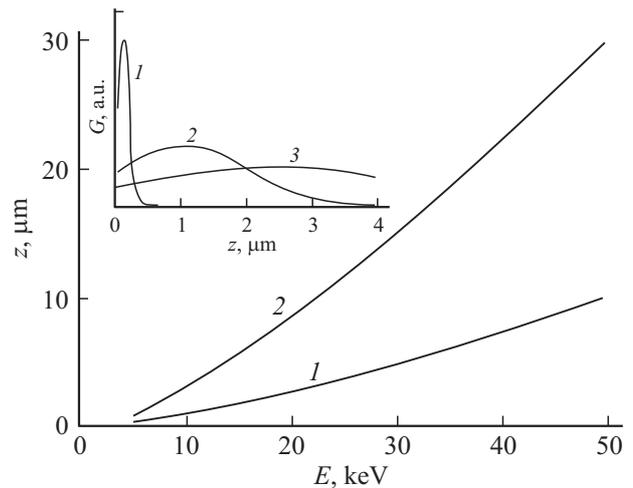


Рис. 2. Расчетные зависимости глубины залегания области максимальных энергетических потерь электронов (1) и максимальной глубины проникновения электронов (2) от первичной энергии электронов. На вставке — расчетное распределение энергетических потерь электронов по глубине. 1 — первичная энергия электронов 5, 2 — 20, 3 — 30 keV.

стекло, был проведен расчет по методике, описанной в [17,18]. При расчете учитывались основные компоненты стекла М4: Si, O и Na. На рис. 2 показаны расчетные зависимости глубины залегания области максимальных энергетических потерь электронов и максимальной глубины проникновения электронов от первичной энергии электронов. На вставке в рис. 2 показано расчетное распределение энергетических потерь электронов по глубине $G(z)$.

Из рисунка видно, что при увеличении энергии электронов от 10 до 50 keV глубина залегания области максимальных энергетических потерь увеличивается от 0.8 до 9 μm. Максимальная глубина проникновения электронов при этом увеличивается от 1.5 до 30 μm. По мере увеличения энергии электронов зависимость $G(z)$ размывается, и потери по глубине распределяются все более равномерно.

На вставке в рис. 3,а показана фотография образца из стекла М4 с пленкой серебра, сделанная на просвет, после облучения электронами с энергией $E = 10, 30, 40$ и 50 keV и дозой облучения 20 мкКл/см². Из фотографии видно, что для $E = 50$ keV произошло полное исчезновение пленки серебра в облученной зоне, а для $E = 40$ keV — частичное. После удаления оставшейся пленки серебра было обнаружено слабое изменение окраски облученных зон от исходно бесцветной до бледно-желтой для $E = 30, 40$ и 50 keV. Спектры оптической плотности необлученного стекла и облученных зон показаны на рис. 3,а. Из рисунка видно, что для $E = 10$ keV изменения поглощения стекла не произошло. Для $E = 30, 40$ и 50 keV произошло равномерное увеличение поглощения в спектральном интервале 300–650 nm. После термообработки спектры оптиче-

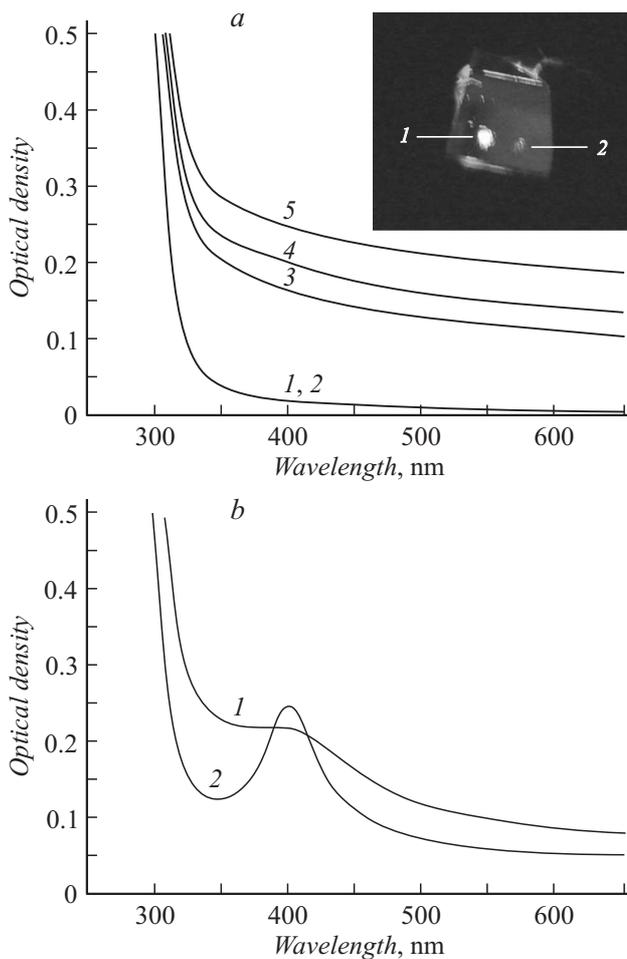


Рис. 3. Спектры оптической плотности облученных зон образца из стекла М4 после удаления пленки серебра. *a* — после электронного облучения: 1 — необлученное стекло, 2 — $E = 10$, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50 keV. На вставке — фотография образца на просвет до удаления оставшейся пленки серебра. 1 — $E = 50$, 2 — 40 keV. *b* — после электронного облучения и термообработки при $t = 500^\circ\text{C}$ в течение 1 h: 1 — $E = 40$, 2 — 50 keV. Толщина пленки серебра 80 nm $Q = 20 \text{ mQ/cm}^2$, $j = 50 \mu\text{A/cm}^2$.

ской плотности участков, облученных электронами с энергией $E = 10$ и 30 keV, не изменились. Однако на спектрах оптической плотности участков, облученных электронами с энергией $E = 40$ и 50 keV, появились плазмонные полосы поглощения (рис. 3, *b*), характерные для сферических наночастиц серебра размером 2–10 nm [5,19,20]. Спектральное положение максимума плазмонных полос поглощения на рис. 3, *b* ($\lambda = 410 \text{ nm}$) определяется показателем преломления стекла, окружающего наночастицы [20]. Таким образом, предположение о возможности растворения пленки серебра в стекле при электронном облучении получило экспериментальное подтверждение.

Из рис. 3, *b* видно, что форма спектров оптической плотности для $E = 40$ и 50 keV различна. Так, плазмонная полоса поглощения для $E = 40 \text{ keV}$ имеет

малую амплитуду и уширена, в то время как в области с $E = 50 \text{ keV}$ сформировалась узкая плазмонная полоса поглощения большой амплитуды. Кроме того, для $E = 50 \text{ keV}$ произошло существенное уменьшение поглощения в спектральном интервале 320–650 nm, в то время как для $E = 40 \text{ keV}$ поглощение в указанном интервале практически не изменилось.

При облучении стекла М4 с пленкой серебра толщиной 100 nm электронами с энергией $E = 10, 20, 30, 40$ и 50 keV и дозой $Q = 50 \text{ mQ/cm}^2$ полное растворение пленки серебра происходит во всех облученных зонах, за исключением области с $E = 10 \text{ keV}$. При этом формирование наночастиц серебра в стекле происходит уже в процессе облучения без термообработки. На вставке в рис. 4 показана фотография образца стекла М4 с удаленной пленкой серебра после облучения электронами. Из фотографии видно, что на участке, облученном электронами с $E = 10 \text{ keV}$, изменения отсутствуют. На остальных участках появилась окраска от черной (участки 2 и 3) до коричневой (участки 4, 5 и 6). На рис. 4 показаны спектры оптической плотности для участков, облученных электронами с энергией $E = 20$ и 50 keV. Из рисунка видно, что для $E = 20 \text{ keV}$ плазмонная полоса поглощения уширена и деформирована, а в спектральном интервале 550–800 nm наблюдается увеличение поглощения, определяющее черную окраску данного участка. На участке с $E = 50 \text{ keV}$ сформировалась относительно узкая и чрезвычайно интенсивная плазмонная полоса поглощения с оптической плотностью в максимуме, превышающей порог чувствительности спектрофотометра. В то же время в спектральном интервале 500–800 nm поглощение меньше, чем в слу-

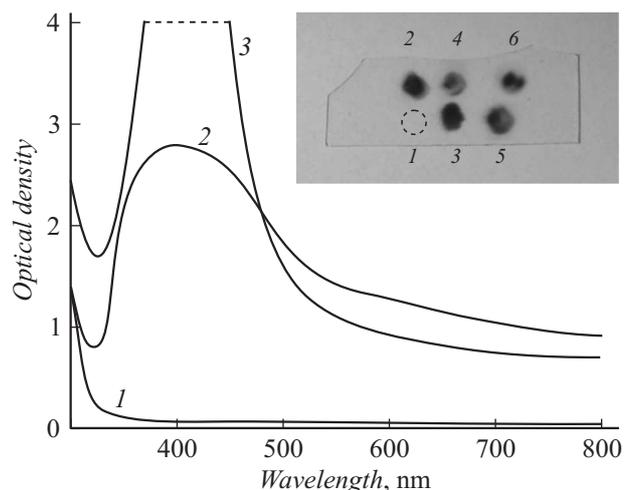


Рис. 4. Спектры оптической плотности стекла М4 после облучения электронами: 1 — необлученное стекло, 2 — $E = 20$, 3 — 50 keV. На вставке — фотография образца после удаления оставшейся пленки серебра: 1 — область облученная электронами с $E = 10 \text{ keV}$ (отмечена пунктиром), 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 50, 6 — 30. Толщина пленки серебра 100 nm. $Q = 50 \text{ mQ/cm}^2$, $j = 50 \mu\text{A/cm}^2$.

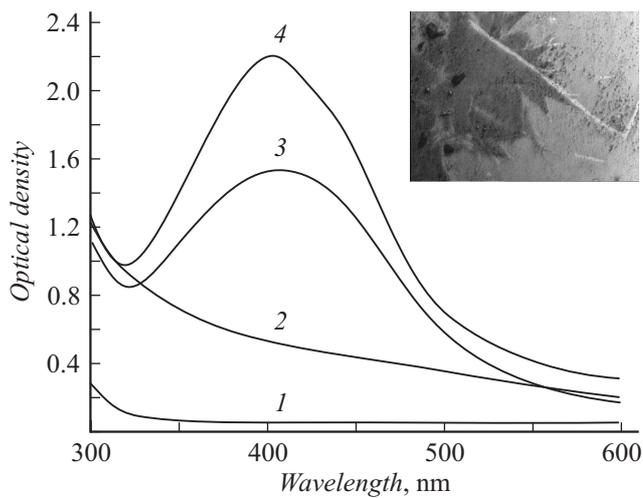


Рис. 5. Спектры оптической плотности стекла K2 после облучения электронами с $E = 20 \text{ keV}$, $Q = 50 \text{ mQ/cm}^2$ и $j = 100 \mu\text{A/cm}^2$: 1 — необлученное стекло, 2 — после облучения электронами, 3 — после термообработки при $t = 500^\circ\text{C}$ в течение 1 h, 4 — после термообработки при $t = 500^\circ\text{C}$ в течение 2 h. На вставке — микрофотография части облученной зоны. Толщина пленки серебра 100 nm.

чае с $E = 20 \text{ keV}$. Термообработка данного образца при $t = 500^\circ\text{C}$ в течение 1 h не привела к заметному изменению спектров поглощения. Образование наночастиц серебра непосредственно при электронном облучении в данном случае вызвано двумя причинами. Во-первых, увеличением исходной толщины пленки серебра, что привело к увеличению концентрации атомов серебра в стекле. Во-вторых, увеличением дозы облучения при сохранении плотности электронного тока, что привело к 2-кратному увеличению продолжительности облучения.

На рис. 5 показаны спектры оптической плотности стекла K2 с пленкой серебра толщиной 100 nm после облучения электронами с $E = 20 \text{ keV}$, $Q = 50 \text{ mQ/cm}^2$ и термообработок. Выбор данного стекла для исследования вызван тем, что оно содержит ионы K^+ , которые в отличие от ионов Na^+ существенно уменьшают коэффициент диффузии ионов Ag^+ в силикатных стеклах [16,22,23]. В данном случае также произошло полное растворение пленки серебра в облученных зонах стекла. Однако, несмотря на высокую энергию электронов и большую дозу облучения, непосредственно при электронном облучении наночастицы серебра с плазмонным резонансом не сформировались (рис. 5, кривая 2). Вместо этого возникла широкая полоса поглощения, аналогичная приведенным на рис. 3, а. Уширенные и деформированные плазмонные полосы поглощения возникли в данном образце только после термообработок при $t = 500^\circ\text{C}$ (рис. 5, кривые 3 и 4). Кроме того, на микрофотографии облученной зоны (см. вставку в рис. 5) проявились участки со следами микроразрядов в объеме стекла, представляющими собой микротрещины, заполненные наночастицами серебра.

При внедрении электронов в стекло они теряют энергию, и происходит нагрев приповерхностных слоев стекла. Для оценки вклада термических процессов в растворение пленки серебра при электронном облучении был проведен расчет температуры приповерхностных слоев стекла. Расчет проводился по методике, описанной в [24], в предположении, что вся энергия электронов в стекле превращается в тепло. Расчет показал, что для $E = 20\text{--}50 \text{ keV}$ и $j = 50 \mu\text{A/cm}^2$ температура приповерхностных слоев стекла повышается на $150\text{--}250^\circ\text{C}$. Данные величины являются завышенными, так как в расчете не учитывались потери энергии при эмиссии вторичных электронов и разрыве химических связей сетки стекла. Тем не менее при указанных температурах уже возможен процесс растворения пленки серебра в стекле за счет термической диффузии. Для проверки вклада термических процессов в растворение пленки серебра была проведена термообработка стекла K2 с пленкой серебра толщиной 100 nm при температуре 400°C . Эксперимент показал, что для указанных условий пленка серебра полностью растворяется в стекле за 2 h. Учитывая экспоненциальную зависимость коэффициента диффузии $D(T)$ от температуры (формула Аррениуса):

$$D(T) = D_0 \exp(-E_a/kT), \quad (1)$$

можно сделать вывод, что вклад термических процессов в растворение пленки серебра в стекле при электронном облучении для наших условий незначителен.

При облучении электронами в объеме стекла формируется область отрицательного объемного заряда. Глубина залегания этой области в стекле определяется начальной энергией электронов. Для $E \leq 10 \text{ keV}$ область объемного заряда лежит непосредственно вблизи поверхности стекла (рис. 2). Это обеспечивает благоприятные условия для стока электронов в пленку серебра, поэтому величина объемного заряда в стекле в данном случае мала и растворения пленки серебра не происходит. По мере увеличения энергии электронов область объемного заряда смещается в глубину стекла, а высокое электрическое сопротивление стекла обеспечивает накопление большого объемного заряда и высокую напряженность электрического поля. Результатом этого является возможность полевой эмиссии положительных ионов серебра из пленки и их полевой миграции в область отрицательного объемного заряда. Необходимо отметить, что ионы Na^+ и K^+ в силикатных стеклах также имеют высокую подвижность [16]. Полевая миграция этих ионов из объема стекла в область отрицательного объемного заряда приводит к частичной компенсации этого заряда.

Непосредственно после облучения электронами в стекле сохраняется высокая концентрация термализованных электронов, которые восстанавливают положительные ионы серебра до нейтральных атомов. Появление после электронного облучения широкой ($\lambda = 350\text{--}650 \text{ nm}$) полосы поглощения указывает на то,

что при растворении пленки серебра в стекле образуются не только атомы серебра, но и нейтральные молекулярные кластеры серебра Ag_n . Спектры поглощения молекулярных ионов и нейтральных молекулярных кластеров серебра Ag_n ($n = 3-55$) в цеолите изучались в работах [25,26]. Оптические свойства молекулярных кластеров Ag_n ($n = 2-5$) в твердом аргоне исследованы в работах [27-29]. Так, молекулярные кластеры Ag_8 имеют широкую полосу поглощения в спектральном интервале 500–600 nm [30]. Отсутствие структуры у полос поглощения в нашем случае объясняется перекрытием полос поглощения кластеров с разным n , а также возможностью образования кластеров типа Ag_nX ($X = O, Na, K$), дающих дополнительные полосы поглощения. Структуры стабильных кластеров Ag_nO ($n = 1-7$) и Ag_nCl ($n = 2-7$) описаны в работах [31, 32]. В работе [33] методами численного моделирования определены возможные структурные и энергетические состояния стабильных кластеров $Au_{19}-M$ ($M = Li, Na, K, Rb, Cs, Cu, Ag$). В силикатных стеклах подобные кластеры располагаются в области дефектов — разрывов в сетке стекла [33]. При термообработке термическая диффузия атомов серебра в стекле приводит к формированию наночастиц серебра на молекулярных кластерах серебра, которые играют роль центров кристаллизации [35].

Для $E = 30 \text{ keV}$ и $Q = 20 \text{ mQ/cm}^2$ напряженность электрического поля, создаваемого объемным зарядом, недостаточна для полного растворения пленки серебра в стекле. Поэтому концентрация атомов серебра в стекле после электронного облучения мала и недостаточна для формирования наночастиц серебра, обладающих плазмонным резонансом. В то же время, полное или почти полное растворение пленки при $E = 40$ и 50 keV и $Q = 20 \text{ mQ/cm}^2$ обеспечивает высокую концентрацию атомов серебра и возможность формирования наночастиц серебра при термообработке (рис. 3, б). Обращает на себя внимание различие формы плазмонных полос поглощения для $E = 40$ и 50 keV на рис. 3, б. Плазмонная полоса поглощения после облучения электронами с меньшей энергией деформирована и значительно уширена в длинноволновую область спектра. Аналогичное различие наблюдается и для случая $E = 20$ и 50 keV и $Q = 50 \text{ mQ/cm}^2$ (рис. 4, кривые 2 и 3). Причиной этого является то, что для малых энергий электронов уменьшается глубина залегания области, в которой формируются наночастицы серебра, и происходит уменьшение ее толщины (рис. 2). Это приводит к увеличению концентрации наночастиц внутри этой области и уменьшению расстояния между ними. Здесь необходимо учитывать и то, что совместная миграция электронов и положительных ионов металлов в стекле приводит к образованию слоев объемного заряда [5,10], что еще больше увеличивает концентрацию наночастиц в слоях. В результате возрастает электромагнитное взаимодействие между наночастицами серебра, приводящее к деформации плазмонной полосы поглощения и появлению перекрывающихся плазмонных полос в длинно-

волновой области спектра [36,37]. Аналогичный эффект наблюдался в работе [5] после облучения электронами стеклов, содержащих ионы серебра. При облучении стекла электронами с энергией 50 keV потери электронов по глубине распределяются более равномерно, а толщины слоев, в которых формируются наночастицы серебра, увеличиваются. В результате этого при том же количестве наночастиц серебра их концентрация уменьшается, а расстояние между ними увеличивается. Поэтому в данном случае форма и спектральное положение плазмонной полосы поглощения оказываются подобными форме и спектральному положению плазмонной полосы поглощения изолированной наночастицы серебра в стекле.

В стекле К2, содержащем ионы K^+ , при $E = 50 \text{ keV}$ и $Q = 50 \text{ mQ/cm}^2$ также происходит полное растворение пленки серебра. Однако при этом наночастицы серебра формируются в стекле только после термообработки (рис. 5). Причинами этого являются уменьшение коэффициента диффузии ионов и атомов серебра из-за наличия ионов калия, а также 2-кратное уменьшение продолжительности облучения из-за увеличения плотности электронного тока. Плазмонные полосы поглощения в данном случае уширены и деформированы, что указывает на возникновение электромагнитного взаимодействия между наночастицами серебра. Уменьшение расстояния между наночастицами здесь вызвано в основном уменьшением глубины проникновения ионов серебра в стекло из-за уменьшения их подвижности и уменьшения продолжительности облучения.

4. Выводы

Таким образом, впервые экспериментально показано, что при облучении электронами силикатных стекол с тонкой пленкой серебра происходит полное или частичное растворение пленки в стекле. Данный эффект возникает при энергии электронов $E > 10 \text{ keV}$ и дозе электронного облучения $Q \geq 20 \text{ mQ/cm}^2$. Основными механизмами, вызывающими данный эффект, являются формирование отрицательного объемного заряда под поверхностью стекла, полевая эмиссия положительных ионов серебра из пленки и полевая миграция ионов серебра в область объемного заряда.

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009–2013 гг. (контракт П412 12.05.2010, Минобрнауки РФ) и государственного контракта 16.526.12.6017 Минобрнауки РФ.

Список литературы

- [1] Jiang N., Qiu J., Spence J.C.H. // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 143 112.
- [2] Jiang N., Wu B., Qiu J., Spence J.C.H. // Appl. Phys. Lett. 2007. Vol. 90. P. 161 909.

- [3] Gedeon O., Zemek J., Jurek K. // J. Non-Cryst. Sol. 2008. Vol. 354. P. 1169.
- [4] Podsvirov O.A., Ignatiev A.I., Nashchekin A.V., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskii V.A., Usov O.A., Vostokov A.V. // Nucl. Inst. Meth. B. 2010. Vol. 268. P. 3103.
- [5] Игнатъев А.И., Нащечкин А.В., Неведомский В.М., Подсви́ров О.А., Сидоров А.И., Соловьёв А.П., Усов О.А. // ЖТФ. 2011. Т. 81. Вып. 5. С. 75.
- [6] Брунов В.С., Подсви́ров О.А., Сидоров А.И., Чураев Д.В. // ЖТФ. 2014. Т. 84. Вып. 8. (в печати).
- [7] Подсви́ров О.А., Сидоров А.И., Цехомский В.А., Востоков А.В. // ФТТ. 2010. Т. 52. Вып. 9. С. 1776.
- [8] Востоков А.В., Верзин И.А., Игнатъев А.И., Подсви́ров О.А., Сидоров А.И. // Опт. и спектр. 2010. Т. 109. С. 407.
- [9] Жигалов А.А., Игнатъев А.И., Нико́норов Н.В., Подсви́ров О.А., Сидоров А.И. // Оптический журн. 2011. Т. 78. № 10. С. 63.
- [10] Touzin M., Goeriot D., Guerret-Piécort C., Juve D., Treheux D., Fitting H.-J. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 99. P. 114 110.
- [11] Липовский А.А., Мелехин В.Г., Петриков В.Д. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 6. С. 89.
- [12] Deparis O., Kazansky P.G., Abdolvand A., Podlipenky A., Seifert G., Graener H. // Appl. Phys. Lett. 2004. Vol. 85. P. 872.
- [13] Podlipensky A., Abdolvand A., Seifert G., Graener H., Deparis O., Kazansky P.G. // J. Phys. Chem. B. 2004. Vol. 108. P. 17 699.
- [14] Sidorov A.I., Nashchekin A.V., Nevedomskiy V.N., Usov O.A., Podsvirov O.A. // Int. J. Nanosci. 2011. Vol. 10. N 6. P. 1265.
- [15] Tervonen A., Honkanen S., Leppihalme M. // J. App. Phys. 1987. Vol. 62. P. 759.
- [16] Tervonen A., West B.R., Honkanen S. // Opt. Eng. 2011. Vol. 50. P. 071 107.
- [17] Макаров В.В. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 3. С. 551.
- [18] Аброян И.А., Андронов А.Н., Тутов А.И. Физические основы электронной и ионной технологий. М.: Высшая школа. 1984. 320 с.
- [19] Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomsky V.A. Silver nanoparticles / Ed. by D.P. Perez. Vukovar: In-Tech, 2010. P. 177.
- [20] Климов В.В. Наноплазмоника. М.: Физматлит, 2009. 480 с.
- [21] Нико́норов Н.В., Сидоров А.И., Цехомский В.А., Лазарева К.Е. // Опт. и спектр. 2009. Т. 107. № 5. С. 745.
- [22] Chartier G.H., Laybourn P.J.R., Girod A. // Electron. Lett. 1986. Vol. 22. P. 925.
- [23] Tervonen A., Honkanen S. // Opt. Lett. 1988. Vol. 13. P. 71.
- [24] Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
- [25] Ozin G.A., Hugues F. // J. Phys. Chem. 1983. Vol. 87. P. 94.
- [26] Ozin G.A., Hugues F., Mattar S.M., McIntosh D.F. // J. Phys. Chem. 1983. Vol. 87. P. 3445.
- [27] Ozin G.A., Huber H. // Inorganic Chem. 1978. Vol. 17. N 1. P. 155.
- [28] Fedrigo S., Harbich W., Buttet J. // J. Chem. Phys. 1993. Vol. 99. P. 5712.
- [29] Felix C., Sieber C., Harbich W., Buttet J., Rabin I., Schulze W., Ertl G. // Chem. Phys. Lett. 1999. Vol. 313. P. 105.
- [30] Sun Y., Balasubramanian K., Rao T.U.B., Pradeep T. // J. Phys. Chem. C. 2011. Vol. 115. P. 20 380.
- [31] Zhou J., Z.-H., Wang W.-N., Fan K.-N. // Chem. Phys. Lett. 2006. Vol. 421. P. 448.
- [32] Zhao S., Li Z.-H., Wang W.-N., Fan K.-N. // J. Chem. Phys. 2005. Vol. 122. P. 144 701.
- [33] Banerjee A., Ghanty T.K., Chakrabarti A., Kamal C. // J. Phys. Chem. C. 2012. Vol. 116. P. 193.
- [34] Isaji T., Wakasugi T., Fukumi K., Kadono K. // Chem. Phys. Lett. 2012. Vol. 522. P. 72.
- [35] de Lamaestre R.E., Béa H., Bernas H., Belloni J., Marignier J.L. // Phys. Rev. B. 2007. Vol. 76. P. 205 431.
- [36] Quinten M., Kreibig U. // Appl. Opt. 1993. Vol. 32. P. 6173.
- [37] Карпов С.В., Слабко В.В. Оптические и фотофизические свойства фрактально-структурированных золей металлов. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2003. 265 с.