

## ОПТИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ ИНФОРМАЦИИ

# Многоцветная лазерная запись оптической информации в силикатных стеклах с ионами европия, серебра и церия

Д.А.Клюкин, А.Ю.Хмелев, А.С.Пшенова, А.И.Сидоров, Ю.К.Федоров

*Экспериментально показано, что воздействие непрерывного УФ излучения и излучения УФ наносекундного лазера, а также термообработка стекол с ионами европия, серебра и церия (фотосенсибилизатор) позволяют локально создавать в стекле области, имеющие различный цвет люминесценции или участки различной окраски. Данные эффекты вызваны изменением зарядового состояния молекулярных кластеров серебра и формированием в стекле наночастиц серебра, обладающих плазмонным резонансом. Это позволяет сфокусированным пучком УФ лазера записывать многоцветную оптическую информацию как вблизи поверхности стекла, так и в его объеме. Определено влияние хлора на формирование и свойства наночастиц серебра в стекле при термообработке после лазерного воздействия.*

**Ключевые слова:** люминесценция, молекулярный кластер серебра, лазерный импульс, стекло.

## 1. Введение

Использование методов оптической записи информации позволяет превзойти традиционные двумерные устройства как по скорости записи и чтения, так и по плотности хранения. К числу таких оптических методов можно отнести, в частности, создание люминесцентных и поглощающих центров сфокусированным лазерным излучением.

В качестве среды для хранения 3D информации стекло считается перспективным материалом, поскольку имеет преимущество перед кристаллами в стоимости и технологичности изготовления, а перед полимерами – в устойчивости к механическим и химическим воздействиям [1].

Ранее нами было показано, что при воздействии наносекундным УФ лазерным излучением на стекла, содержащие ионы и заряженные молекулярные кластеры (МК) серебра, происходит формирование нейтральных МК серебра, обладающих интенсивной люминесценцией в видимой области спектра [2]. Было также показано, что термическая обработка (ТО) при температуре меньшей температуры стеклования  $T_g$  увеличивает количество нейтральных люминесцирующих кластеров вследствие восстановления заряженных МК [3]. При температуре ТО выше  $T_g$  в стекле происходит формирование наночастиц (НЧ) серебра [4], которые по своим люминесцентным и оптическим свойствам существенно отличаются от МК серебра [3, 5]. Вышеописанные эффекты могут быть использованы для локального изменения люминесцентных свойств стекол с серебром при лазерном облучении, что открывает возможности для трехмерной записи оптической информации с высокой плотностью. Поэтому представляет инте-

рес изучение влияния легирующих добавок, в частности ионов редкоземельных металлов, а также лазерного и других внешних воздействий на расширение функциональных возможностей стекол с ионами серебра с точки зрения записи оптической информации.

Целью настоящей работы было исследование влияния ионов европия, а также непрерывного и импульсного УФ облучения и термообработки на формирование и разрушение люминесцентных центров и центров окраски в содержащих серебро стеклах. Исследовано также влияние ионов хлора на формирование и свойства наночастиц серебра в стеклах после лазерного воздействия и термообработки.

## 2. Методика экспериментов

Для проведения исследований в Университете ИТМО были синтезированы силикатные стекла, составы которых приведены в табл.1. Эти стекла близки по составу к фототерморелактивному стеклу, изученным нами ранее [2]. Основной особенностью исследуемых составов является высокая для силикатных стекол концентрация ионов серебра и европия, а также наличие или отсутствие ионов хлора. Образцы, содержащие хлор, обозначаются далее AgEu–Cl, образцы без хлора – AgEu. Следует отметить, что при синтезе стекла большая часть ионов церия переходит из четырехвалентного состояния в трехвалентное, а ионов сурьмы – из трехвалентного в пятивалентное. Полоса люминесценции ионов  $\text{Ce}^{3+}$  лежит в УФ области спектра, поэтому эти ионы выполняют только роль фотосенсибилизатора [4]. Ионы  $\text{Sb}^{5+}$  играют роль восстановителя в процессе ТО стекла [4]. Ввод галогена в стекло обусловлен тем, что он ускоряет формирование НЧ серебра в стекле при ТО. Кроме того, в процессе роста НЧ серебра на их поверхности образуется оболочка из галогенида серебра, что позволяет управлять спектральным положением плазмонного резонанса НЧ серебра [6]. Температура стеклования, измеренная дифференциальным сканирующим калориметром STA6000 (Perkin-Elmer), составляет 507 °С. Образцы стекол представляли собой

Д.А.Клюкин, А.Ю.Хмелев, А.С.Пшенова, А.И.Сидоров, Ю.К.Федоров. Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Россия, 197101 С.-Петербург, Саблинская ул., 14; e-mail: kliukinda@gmail.com

Поступила в редакцию 8 июня 2016 г.

Табл.1. Составы стекол.

Стекло	Концентрация компонентов стекол (мол.%)									
	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	ZnO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cl	F	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CeO <sub>2</sub>	Ag <sub>2</sub> O	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
AgEu	74.8	15.0	5.4	2.3	0	1.87	0.045	0.007	0.12	0.5
AgEu–Cl	72.5	15.6	5.2	2.2	2.2	1.81	0.043	0.007	0.12	0.5

полированные плоскопараллельные пластины размером 10×5×1.5 мм.

Для воздействия непрерывным УФ излучением использовалась ртутная лампа с полосой излучения, попадающей в полосу поглощения ионов церия. Для импульсного УФ лазерного облучения образцов использовался твердотельный многомодовый наносекундный YAG: Nd<sup>3+</sup>-лазер с длиной волны генерации на третьей гармонике λ = 355 нм. Длительность импульса составляла 9 нс, а плотность энергии варьировалась от 0.01 до 0.5 Дж/см<sup>2</sup>. Излучение лазера фокусировалось на поверхность стекла в пятна с диаметрами 1 мм и 50 мкм либо в объем стекла. Для фокусировки использовалась линза с фокусным расстоянием 18 мм, а также микрообъектив (20×, NA = 0.4). Выбор диаметров облученной зоны диктовался удобством оптических измерений.

ТО облученных образцов проводилась при температурах 350–530 °С в течение 1–13 ч в муфельной печи (Nabertherm). Спектры оптической плотности образцов измерялись с помощью спектрофотометра Lambda 650 (Perkin-Elmer) в спектральном интервале 200–800 нм. Для измерения спектров люминесценции использовалась интегрирующая сфера С9920-02G (Hamamatsu Photonics). Спектры поглощения и люминесценции измерялись при комнатной температуре.

### 3. Результаты и их обсуждение

Исходно стекла AgEu и AgEu–Cl были бесцветными и обладали относительно слабой люминесценцией в красной области спектра с характерными для ионов Eu<sup>3+</sup> основными максимумами на длинах волн 590, 613, 705 нм (рис.1, кривая 1) [7]. Облучение непрерывным УФ излучением ртутной лампы в полосу поглощения ионов Ce<sup>3+</sup> (λ = 305–310 нм) в течение 20 мин и последующая ТО при T = 350 °С приводят к появлению широкой полосы люми-

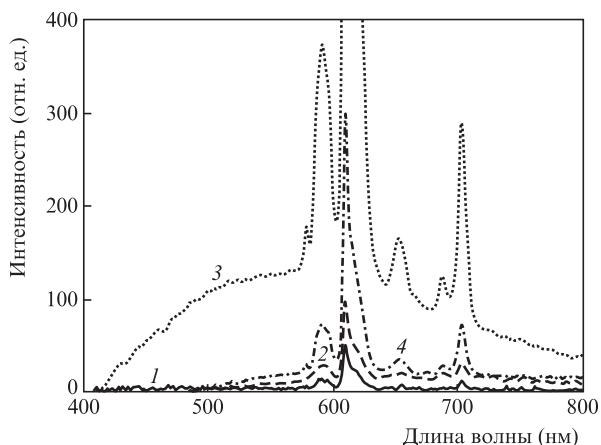


Рис.1. Спектры люминесценции стекла AgEu до (1) и после (2) облучения УФ ртутной лампой или УФ наносекундным лазером, а также после ТО при 350 °С в течение 3 ч (3) и при 530 °С в течение 13 ч (4). Интенсивность в максимуме на λ = 613 нм составляет 1500 отн. ед., длина волны возбуждения 350 нм.

несценции в спектральном интервале 430–800 нм (кривые 2 и 3 на рис.1). Ранее нами было показано [8–10], что данная полоса люминесценции вызвана трансформацией заряженных МК серебра, изначально присутствующих в стекле, в нейтральные МК. Такая трансформация происходит в результате захвата заряженными МК серебра свободных электронов, которые появляются в стекле при фотоионизации ионов церия и термической ионизации комплексов [Sb<sup>5+</sup>]<sup>-</sup>. Анализ, проведенный в работе [3], показал, что вклад в данную полосу люминесценции вносят, в основном, нейтральные МК серебра Ag<sub>2</sub>, Ag<sub>3</sub> и Ag<sub>4</sub>, а также атомы Ag<sup>0</sup>. Из фотографий 1 и 2, представленных на рис.2,а, видно, что цвет люминесценции образцов изменяется от красного до светло-желтого. УФ облучение приводит также к незначительному увеличению амплитуды полос люминесценции ионов Eu<sup>3+</sup> (кривая 2 на рис.1). Последующая ТО при T = 350 °С сопровождается существенным увеличением, более чем в 15 раз, интенсивности люминесценции ионов Eu<sup>3+</sup> (кривая 3 на рис. 1). Причиной этого является рост концентрации нейтральных МК серебра в стекле и смещение максимума их люминесценции в синюю область спектра (кривая 3 на рис.1). Это способствует большему перекрытию полос люминесценции нейтральных МК серебра и полос поглощения ионов Eu<sup>3+</sup>, что сопровождается переносом энергии с нейтральных МК серебра на ионы Eu<sup>3+</sup> [9]. Аналогичные эффекты наблюдаются и в стеклах AgEu–Cl.

Дальнейшее облучение образцов интенсивным лазерным УФ излучением приводит к частичному или полному тушению люминесценции нейтральных МК серебра

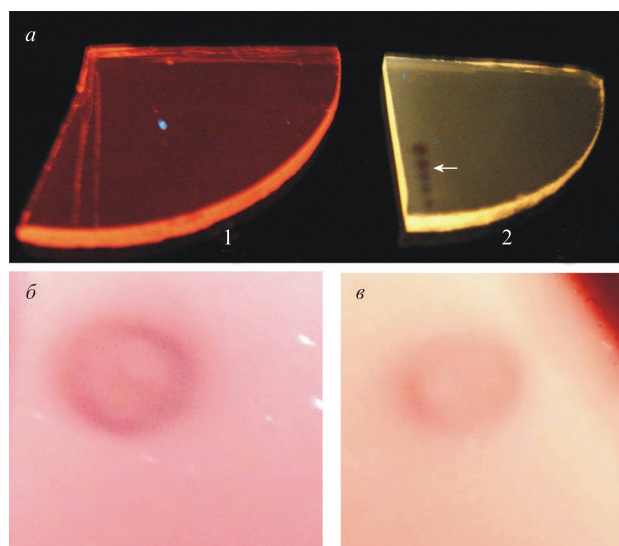


Рис.2. Фотографии люминесценции стекол до (1) и после (2) УФ облучения ртутной лампой и УФ лазерного облучения (стрелка указывает на участки, облученные УФ лазером) (а), а также после УФ облучения AgEu (б) и AgEu–Cl (в) ртутной лампой, УФ лазерного облучения и ТО при 530 °С в течение 15 мин. Длина волны возбуждения люминесценции 365 нм. Цветные изображения этого рисунка, а также рис.3–7 приведены на сайте «Квантовой электроники» www.quantum-electron.ru.

в облученных участках стекла (кривая 4 на рис.1 и фотография 2 на рис.2,*а*). Интенсивность люминесценции ионов  $\text{Eu}^{3+}$  также уменьшается вследствие уменьшения эффективности переноса энергии. При этом цвет люминесценции в облученных зонах изменяется до красного либо люминесценция исчезает при использовании коротковолнового УФ возбуждающего излучения. Причиной данного эффекта является то, что лазерное излучение с  $\lambda = 355$  нм попадает в полосы поглощения нейтральных МК серебра [11, 12] и переводит их из нейтрального состояния в заряженное. Последующее воздействие на образцы непрерывного УФ излучения либо ТО приводит к частичному или полному восстановлению люминесценции нейтральных МК в облученных зонах (фотографии на рис.2,*б, в*). Это связано с появлением в стекле свободных электронов в результате описанных выше процессов.

В том случае, если образцы стекол  $\text{AgEu}$  и  $\text{AgEu}-\text{Cl}$  не подвергались предварительному воздействию непрерывного УФ излучения, но облучались импульсным УФ лазером, цвет люминесценции в облученных зонах при увеличении плотности лазерной энергии изменялся от красного до светло-желтого или белого (рис.3). Спектры люминесценции облученных участков стекла аналогичны показанным на рис.1 (кривые 2 и 3), что указывает на трансформацию в облученной зоне заряженных МК серебра в нейтральное состояние. В данном случае источником свободных электронов являются не ионы  $\text{Ce}^{3+}$ , имеющие полосы поглощения на  $\lambda = 305-310$  нм, а заряженные дефекты сетки стекла (glass network). На рис.4 показаны

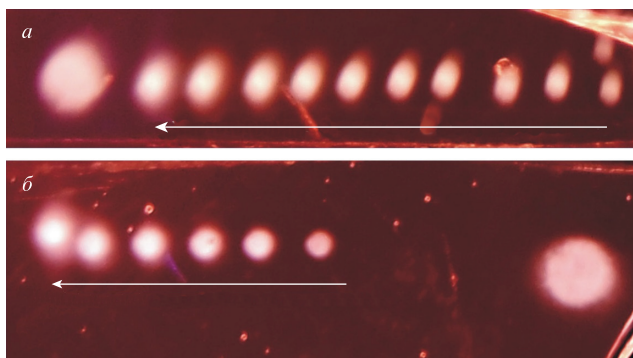


Рис.3. Фотографии люминесценции стекол  $\text{AgEu}$  (*а*) и  $\text{AgEu}-\text{Cl}$  (*б*) после УФ лазерного облучения. Стрелки направлены в сторону увеличения плотности энергии лазерного импульса, длина волны возбуждения люминесценции 365 нм.

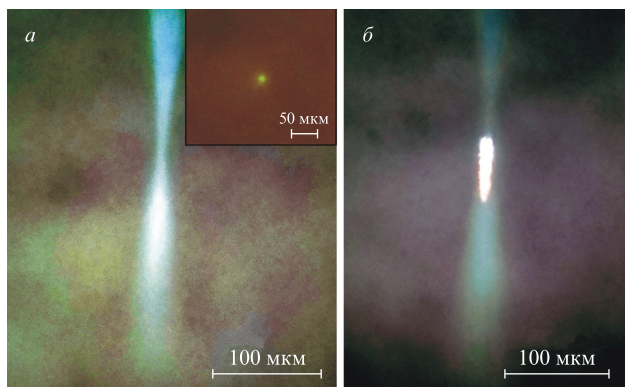


Рис.4. Фотографии люминесценции треков лазерных пучков, сфокусированных в объеме стекла (на вставке – вид сверху) при  $E = 0.5$  (*а*) и  $2$  Дж/см<sup>2</sup> (*б*). Длина волны возбуждения люминесценции 365 нм.

люминесцентные треки в объеме стекла, полученные после фокусировки в него лазерного пучка; диаметр перетяжки в фокусе составляет примерно 10 мкм. При плотности энергии  $E > 10$  Дж/см<sup>2</sup> в области фокуса происходит оптический пробой, в результате чего яркость свечения данной области увеличивается (рис.4,*б*) из-за переотражений люминесценции от стенок микротрещин. Другой причиной увеличения яркости может быть рост концентрации свободных электронов при разрушении сетки стекла лазерным импульсом. Это приводит к увеличению концентрации нейтральных МК серебра. В пользу данного предположения говорит формирование при ТО в данной области НЧ серебра, описанное ниже.

Таким образом, в зависимости от предыстории стекла с ионами европия и серебра действием на него УФ наносекундных лазерных импульсов может быть локально потушена уже существующая люминесценция МК серебра либо, наоборот, сформированы люминесцентные области, содержащие излучающие нейтральные МК серебра. Данные эффекты могут быть использованы для двухцветной записи оптической информации путем изменения цвета люминесценции. В то же время возникает вопрос: почему в первом случае происходит тушение люминесценции, а во втором – ее возникновение? Причинами такого различия является следующее. В первом случае источником свободных электронов являются ионы церия, которые в процессе фотоионизации переходят из трехвалентного состояния в четырехвалентное. При импульсном лазерном облучении происходит фотоионизация нейтральных МК серебра, дефектов сетки стекла и образование новых дефектов, имеющих полосы поглощения на длине волны лазерного излучения (см. ниже). Возникшие при этом свободные электроны могут быть снова захвачены МК серебра, дефектами сетки стекла, а также ионами церия, переводя последние в трехвалентное состояние. Поэтому после воздействия лазерного импульса количество нейтральных МК серебра уменьшается, что сопровождается уменьшением интенсивности люминесценции в облученной зоне. Во втором случае МК серебра исходно находятся в заряженном состоянии, а ионы церия – в трехвалентном. Полосы поглощения этих объектов лежат вне длины волны воздействующего лазерного излучения, поэтому источником свободных электронов в стекле служат только дефекты сетки стекла. За время лазерного импульса (несколько наносекунд) свободные электроны не успевают достичь заряженных МК серебра, и они до конца импульса остаются в заряженном, непоглощающем состоянии. Переход МК серебра в нейтральное состояние происходит уже после окончания лазерного импульса, когда их фотоионизация уже невозможна.

Воздействие УФ лазерных импульсов приводит к появлению наведенного поглощения в ближней УФ области спектра [2]. Полоса поглощения на  $\lambda = 305-310$  нм соответствует поглощению ионов  $\text{Ce}^{3+}$ . Известно, что данное наведенное поглощение вызвано образованием дефектов сетки стекла, таких как немостиковые атомы кислорода (non-bridging oxygen centers), L-центры, E'-центры, а также формированием нейтральных МК серебра  $\text{Ag}_n$  ( $n = 2-4$ ) и переходом ионов серебра в нейтральное состояние [13].

Последующая длительная ТО при температуре выше  $T_g$  приводит к формированию в стеклах НЧ серебра. Это подтверждается наличием интенсивной полосы поглощения на длине волны 430 нм (рис.5), соответствующей поверхностному плазмонному резонансу НЧ серебра [4]. Со-



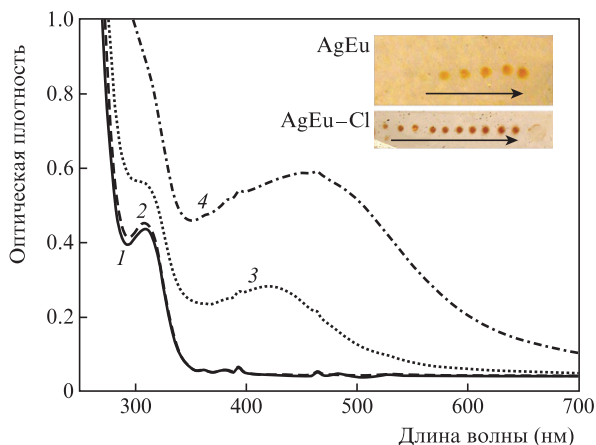


Рис.5. Спектры оптической плотности стекол после воздействия УФ лазерного излучения (600 импульсов) и ТО в течение 1 ч при 530 °С. Исходное стекло без Cl (1) и с Cl (2), стекло после облучения УФ наносекундным лазером без Cl (3) и с Cl (4). На вставке – фотографии стекол AgEu и AgEu–Cl после облучения УФ лазером и ТО. Стрелки направлены в сторону увеличения плотности энергии лазерного импульса.

гласно результатам, полученным с помощью просвечивающей электронной микроскопии, НЧ серебра в исследуемых стеклах имеют форму, близкую к сферической, и средний диаметр 4–5 нм [14]. Появление плазмонной полосы поглощения приводит к интенсивному окрашиванию стекла в облученной зоне (см. вставки на рис.5 и 6), причем цвет облученной зоны при увеличении плотности лазерной энергии изменяется до желтого, красного, коричневого или черного, в зависимости от концентрации и размера НЧ. Очевидно, что такое локальное изменение окраски также может быть использовано для многоцветной записи оптической информации. На рис.6 показаны области локализации НЧ серебра после облучения пучком УФ лазера, сфокусированным в объем стекла и на его поверхность. Видно, что окрашенные области, содержащие НЧ серебра, локализованы вдоль перетяжки сфокусированного лазерного пучка. При увеличении плотности энергии излучения протяженность участка растет. Минимальный диаметр данных областей составляет 10–20 мкм, а их протяженность равна 30–50 мкм. Наиболее эффективно данные области формируются при плотности энер-

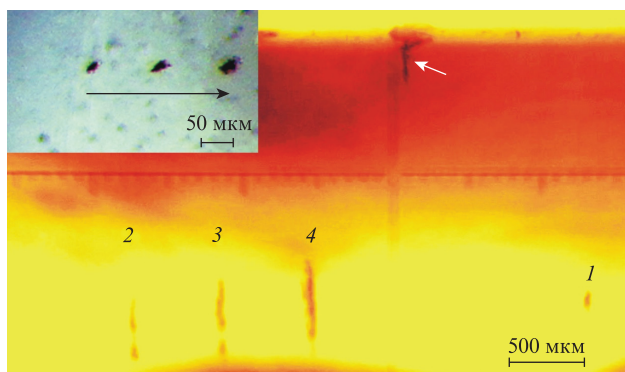


Рис.6. Фотографии стекол AgEu (а) и AgEu–Cl (б) после воздействия УФ лазерного излучения (600 импульсов), сфокусированного в объем стекла, а также ТО в течение 1 ч при 530 °С и  $E = 0.5$  (1), 2 (2), 6 (3) и 12 Дж/см<sup>2</sup> (4). Стрелка указывает на облученную зону при фокусировке пучка на поверхность стекла. На вставке – вид сверху. Стрелка направлена в сторону увеличения плотности энергии лазерного импульса.

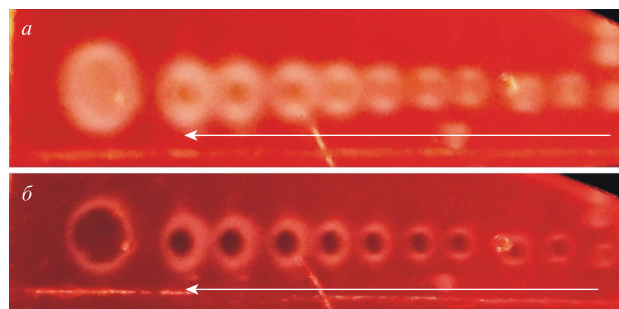


Рис.7. Фотографии люминесценции стекол AgEu (а) и AgEu–Cl (б) после УФ лазерного облучения и ТО в течение 1 ч при 530 °С. Стрелки направлены в сторону увеличения плотности энергии лазерного импульса, длина волны возбуждения люминесценции 365 нм.

гии, превышающей энергию, необходимую для оптического пробоя стекла. Причиной этого является то, что при пробое возникает множество свободных электронов, переводящих ионы и заряженные МК серебра в нейтральное состояние. Кроме того, большое количество дефектов сетки стекла, возникающих в области пробоя, облегчает термическую диффузию атомов серебра, что ускоряет рост НЧ. Стирание записанной информации в данном случае возможно при нагреве стекла до  $T = 800–900$  °С. При этом происходит термическое растворение НЧ серебра в стекле.

Интенсивность люминесценции в области формирования НЧ серебра при этом существенно уменьшается (рис.7), и ее максимум смещается в красную область (рис.1, кривая 4). Для объяснения изменения интенсивности люминесценции в стеклах с НЧ серебра после длительной ТО при температуре выше  $T_g$  можно выдвинуть два предположения. Первое заключается в том, что при описанных условиях формируются сверхмалые НЧ (ultrasmall nanoparticles [15]) серебра размером 1–2 нм, которые в ряде случаев обладают слабой люминесценцией [16]. Второе предположение сводится к тому, что в результате формирования НЧ серебра, обладающих плазмонным резонансом с максимумом на  $\lambda = 430$  нм, происходит поглощение люминесценции оставшихся нейтральных МК серебра в области поглощения НЧ серебра. Это объясняет сдвиг максимума люминесценции в красную область и уменьшение интенсивности люминесценции за счет уменьшения числа нейтральных атомов и МК серебра в объеме стекла, которые стали «строительным материалом» для новых НЧ серебра. По-видимому, это те МК  $Ag_3$ , которые еще остались в объеме стекла. Стоит отметить, что данные в литературе по люминесценции сверхмалых НЧ серебра существенно разнятся, и пока не разработано единой модели, описывающей оптические свойства таких объектов.

Из рис.7 видно, что изменение цвета люминесценции и уменьшение ее интенсивности с ростом плотности лазерной энергии происходит только в центре облученной зоны. Причиной этого является колоколообразное распределение интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка. Поскольку по периметру лазерного пучка интенсивность излучения меньше, то в этой области образуется меньше нейтральных атомов и МК серебра и, следовательно, рост НЧ серебра происходит менее эффективно.

Роль ионов хлора проявляется, в основном, при длительной ТО в процессе формирования и роста НЧ серебра. В работе [17] было показано, что в процессе роста НЧ серебра в силикатных стеклах на их поверхности формиру-

Табл.2. Характеристики и механизмы записи многоцветной оптической информации в стеклах с ионами европия и серебра.

Способ записи	Механизм записи	Считывание	Цвет облученной зоны (цвет вне зоны облучения)	Стирание
Облучение УФ ртутной лампой с последующим облучением УФ лазером	Перевод МК серебра из нейтрального в заряженное состояние	По изменению цвета люминесценции	Красный или черный, рис.2 (желтый или белый, рис.2)	Облучение УФ ртутной лампой
Облучение УФ лазером	Перевод МК серебра из заряженного в нейтральное состояние	По изменению цвета люминесценции	Желтый или белый, рис.3, 4 (красный или черный, рис. 3)	Нет
Облучение УФ лазером и ТО выше температуры стеклования	Формирование поглощающих НЧ серебра	По изменению цвета люминесценции	Черный, рис.7 (красный, рис.7)	ТО при $T = 800-900^\circ\text{C}$
		По изменению окраски в облученной зоне	Желтый, красный, коричневый, черный, рис. 5-7 (отсутствие цвета, вставка на рис.6)	ТО при $T = 800-900^\circ\text{C}$

ется тонкая оболочка из хлорида серебра. Появление такой оболочки вызывает ускорение роста НЧ серебра, что приводит к более интенсивному окрашиванию облученных лазером участков стекла (см. вставки на рис.5 и 6). Кроме того, такая оболочка, имеющая больший показатель преломления, чем показатель преломления стекла, смещает плазмонную полосу поглощения в длинноволновую область спектра (см. также [4]). Это позволяет, изменяя толщину оболочки за счет изменения концентрации хлора в стекле и продолжительности ТО, изменять как степень окрашивания облученной зоны стекла, так и ее цветовые оттенки.

Из рис.6 видно, что линейные размеры записанных областей в перетяжке в случае как люминесцентных, так и поглощающих областей не превышают 10–20 мкм. Однако их можно уменьшить, используя УФ объектив с большей апертурой ( $NA = 1-1.4$ ). При этом появляется возможность сфокусировать излучение в область с размером перетяжки менее 1 мкм, если использовать коротковолновое одномодовое лазерное излучение с длиной волны 355 нм, а следовательно, плотность записи информации может достигать 1 Тбит/см<sup>3</sup> при объеме ячейки 1 мкм<sup>3</sup>. Основные характеристики и механизмы записи многоцветной оптической информации в стеклах с ионами европия и серебра приведены в табл.2.

Таким образом, экспериментально показано, что при использовании непрерывного и импульсного лазерного УФ облучения и термообработки в силикатных стеклах, содержащих ионы серебра, европия и церия, формируются многоцветные люминесцентные центры и центры окраски, которые могут быть использованы для записи многоцветной оптической информации. Описанные эффекты связаны с изменением зарядового состояния молекулярных кластеров серебра и с формированием наночастиц серебра, обладающих плазмонным резонансом. Показано, что введение в состав стекла ионов хлора позволяет увеличивать насыщенность цвета центров окраски и изменять цвет облученной зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию №11.1227.2014/К.

- Zhang J., Gecevicius M., Beresna M., Kazansky P.G. *Phys. Rev. Lett.*, **112** (3), 1 (2014).
- Ignatiev A.I., Klyukin D.A., Leontieva V.S., Nikonorov N.V., Shakhverdov T.A., Sidorov A.I. *Opt. Mater. Express*, **5** (7), 1635 (2015).
- Dubrovina V.D., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Shakhverdov T.A., Agafonova D.S. *Opt. Mater. (Amst.)*, **36** (4), 753 (2014).
- Nikonorov N.V., Sidorov A.I., Tsekhomskii V.A. *Silver Nanoparticles* (InTech, 2010, pp 177–200).
- Treguer M., Rocco F., Lelong G., Le Nestour A., Cardinal T., Maali A., Lounis B. *Solid State Sci.*, **7** (7), 812 (2005).
- Nikonorov N.V., Sidorov, A.I., Tsekhomskii V.A., Lazareva K.E. *Opt. Spectrosc.*, **107** (5), 705 (2009).
- Eichelbaum M., Rademann K. *Adv. Funct. Mater.*, **19** (13), 2045 (2009).
- Miyamoto Y., Takei Y., Nanto H., et al. *Radiat. Meas.*, **46** (12), 1480 (2011).
- Eichelbaum M., Rademann K., Müller R., Radtke M., Riesemeier H., Görner W. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **44**, 7905 (2005).
- Simo A., Polte J., Pfänder N., Vainio U., Emmerling F., Rademann K. *J. Am. Chem. Soc.*, **134** (45), 18824 (2012).
- Klyukin D.A., Sidorov A.I., Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. *Opt. Mater.*, **38**, 233 (2014).
- Nahal A., Khalesifard H.R.M. *Opt. Mater.*, **29** (8), 987 (2007).
- Eichelbaum M., Rademann K., Hoell A., Tatchev D.M., Weigel W., Stöber R., Pacchioni G. *Nanotechnol.*, **19**, 135701 (2008).
- Klyukin D., Dubrovina V., Pshenova A., Putilin S., Shakhverdov T., Tsympkin A., Nikonorov N., Sidorov A. *Opt. Eng.*, **55** (6), 067101 (2016).
- Kim B.H., Hackett M.J., Park J., Hyeon T. *Chem. Mater.*, **26** (1), 59 (2014).
- Zheng K., Yuan X., Goswami N., Zhang Q., Xie J. *RSC Adv.*, **4** (105), 60581 (2014).
- Seward T.P. *J. Appl. Phys.*, **46** (2), 689 (1975).