

05;07;10;11;12

ОБРАЗОВАНИЕ ФОТОЭМИССИОННЫХ ЦЕНТРОВ В ОПТИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

© Д.Ю.Бирюков, А.Ф.Зацепин, В.С.Кортов

Уральский государственный технический университет,
620002 Екатеринбург, Россия
(Поступило в Редакцию 13 июня 1995 г.
В окончательной редакции 17 апреля 1996 г.)

Методом фотостимулированной экзоэлектронной эмиссии исследовано воздействие быстрых электронов (10 МэВ) на силикатное стекло К8. Продемонстрирована эффективность метода при регистрации собственных радиационных нарушений, соответствующих спектральной области интенсивного поглощения примесей. Установлено образование в приповерхностных слоях стекла набора фотоэмиссионных радиационных центров, связанных с континуальным (4.95 и 5.4 эВ) и с дискретным (4.75, 5.2 и 5.75 эВ) разупорядочением структуры матрицы. Выявлены три стадии процесса формирования эмиссионно-активных центров, что находит отражение и в дозовой зависимости порога оптического пробоя поверхности стекла.

Введение

Известно, что воздействие быстрых частиц на оптические стеклообразные среды приводит не только к перезарядке состояний в щели подвижности, связанных с дискретной и континуальной неупорядоченностью [1], но и к повышению дефектности матрицы как на поверхности, так и в объеме. Наиболее изученными являются стимулированные воздействием частиц больших энергий процессы в объеме [2,3], тогда как поверхностные радиационные повреждения оптических материалов исследованы недостаточно полно. Вместе с тем структура и энергетическое состояние поверхности прозрачных диэлектриков играют важную роль при эксплуатации элементов силовой и интегральной оптики, в других технологических приложениях.

В настоящей работе методы оптического поглощения и фотостимулированной экзоэлектронной эмиссии (ФСЭЭ) использованы для изучения процессов образования активных центров в объеме и поверхностных слоях многокомпонентного оптического стекла под действием потоков электронов высоких энергий.

Исследовались образцы щелочноборосиликатных стекол К8. Выбор объектов исследования обусловлен широким применением многокомпонентных стекломатриц при изготовлении элементов оптических систем. Образцы облучались на микротроне М20 быстрыми электронами с энергией 10 МэВ потоками $\Phi = 5 \cdot 10^{11} - 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Спектры оптического поглощения снимались на спектрофотометре "Specord M400" в диапазоне от 200 до 600 нм. Измерялась оптическая плотность $D = \lg(I_0/I)$ (где I_0 и I — интенсивность соответственно падающего и прошедшего излучения), которая затем пересчитывалась в логарифмический коэффициент поглощения $\alpha (\text{см}^{-1}) = \ln(10)D/d$, где $d (\text{см})$ — толщина образца.

Спектры ФСЭЭ измерялись в диапазоне от 200 до 600 нм. Источником стимулирующего излучения служила дейтериевая лампа, из спектра которой с помощью двойного монохроматора ДМР-4 выделялись световые потоки с квантами требуемой энергии $E (\text{эВ})$. С помощью оптической кварцевой системы световое излучение фокусировалось в пятно, имеющее форму полосы $3 \times 0.5 \text{ мм}$. Интенсивность ФСЭЭ $J (\text{имп/с})$ измерялась с помощью вторично-электронного умножителя ВЭУ-6. Все спектральные зависимости ФСЭЭ нормировались на величину светового потока. Вакуум поддерживался двухступенчатой системой откачки, обеспечивающей остаточное давление не выше 10^{-4} Па .

Спектральные зависимости ФСЭЭ облученных образцов становятся более информативными при сравнении их с интенсивностью ФСЭЭ, измеренной до облучения. По аналогии с [4] в каждой спектральной точке рассчитывались приведенные зависимости ФСЭЭ, представляющие собой отношение интенсивности J ФСЭЭ облученного образца к интенсивности J_0 исходного.

Все измерения проводились при комнатной температуре.

Экспериментальные результаты

О п т и ч е с к о е п о г л о щ е н и е. Край ультрафиолетового (УФ) поглощения необлученного стекла начинается с 3.5 эВ (рис. 1, а). Вместе с тем с 4.7 эВ наблюдается плато оптического поглощения, продолжающееся до 6.2 эВ. Наличие плато в полосе поглощения может быть связано с широкой вариацией состояний примесного железа в матрице [5]. Максимальное поглощение необлученного стекла составляет 40 см^{-1} в области 4.8 эВ.

В связи с высоким наведенным поглощением данным методом не удалось исследовать образцы, подвергнутые облучению потоками $\Phi > 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. На начальной стадии облучения в спектральной области 4.2–6.2 эВ наблюдается просветление. Наиболее "низкое" положение плато ($\sim 30 \text{ см}^{-1}$) имеет место при потоке $5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, затем поглощение растет и при потоке электронов $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ достигает 45 см^{-1} . В области 2–4.2 эВ рост поглощения обнаруживается при малых потоках.

На спектрах наведенного поглощения (рис. 1, б) хорошо виден пик в районе 4 эВ. При малых потоках его максимум приходится на 3.7 эВ

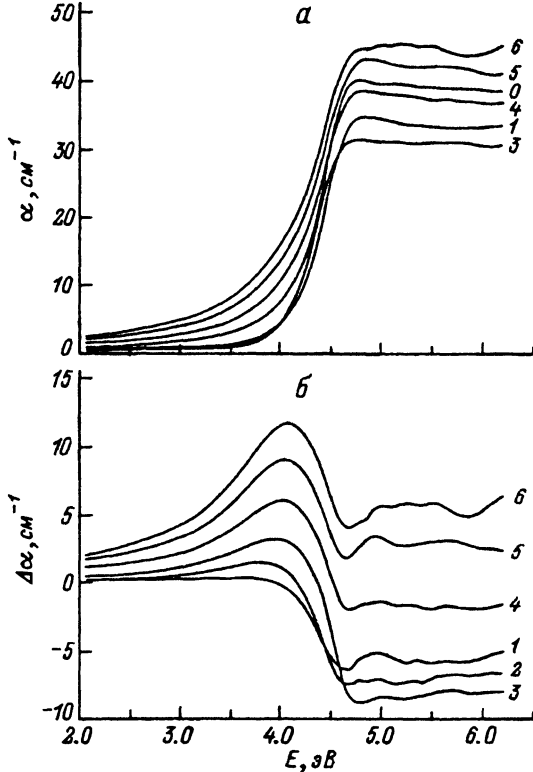


Рис. 1. Спектральные зависимости оптического поглощения (а — спектры поглощения, б — спектры наведенного поглощения) исходного (кривая 0) и облученного стекла (1-6).

Потоки электронов при облучении Φ , см^{-2} : 1 — $5 \cdot 10^{11}$, 2 — $1.5 \cdot 10^{12}$, 3 — $5 \cdot 10^{12}$, 4 — 10^{13} , 5 — $2 \cdot 10^{13}$, 6 — $4 \cdot 10^{13}$.

($\alpha = 0.5 \text{ см}^{-1}$), при дальнейшем увеличении потока максимум начинает смещаться в направлении больших энергий, достигая при потоке $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ положения 4.1 эВ ($\alpha = 11.4 \text{ см}^{-1}$).

В области просветления не наблюдается ярко выраженных полос. Падение и рост поглощения в зависимости от интегрального потока отмечаются параллельным сдвигом плато.

Электронная эмиссия. Стекло К8 является эмиссионно-активным в диапазоне энергий квантов света 4.5–6.2 эВ, что соответствует плато примесного поглощения. Толщина поглощающего слоя в спектральной области эмиссионной активности практически не зависит от энергии квантов стимулирующего излучения. Ее величина, оцененная по коэффициенту оптического поглощения как α^{-1} , в зависимости от Φ колеблется в интервале 220–325 мкм, что значительно превышает максимальную глубину выхода электрона. Другими словами, толщина поглощающего слоя в данном случае не определяет толщину эмиссионно-активного слоя.

Спектры ФСЭЭ в полулогарифмическом масштабе приведены на рис. 2. Наблюдаемая в спектре необлученного стекла в районе 5.1 эВ особенность обусловлена участием в ФСЭЭ центров примесного железа (ионов Fe^{2+}) [4,6].

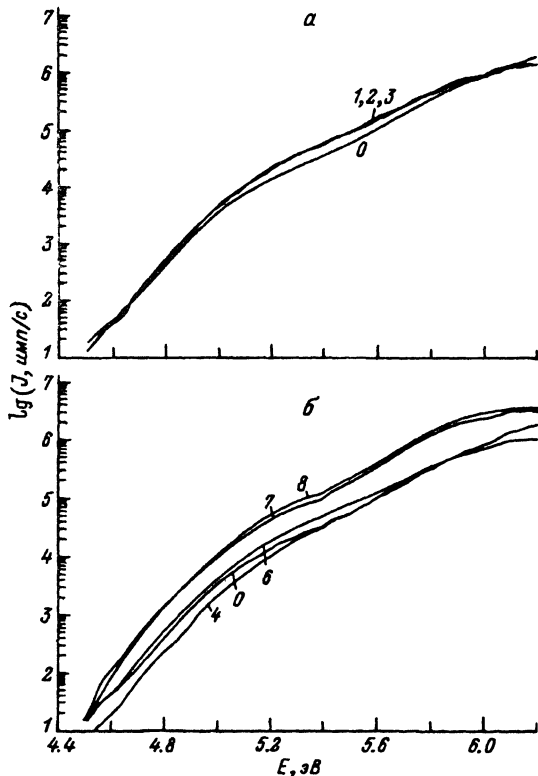


Рис. 2. Спектры ФСЭЭ исходного (кривая 0) и облученных стекол (1-8).
 ф: а — $5 \cdot 10^{11}$ (1), $1.5 \cdot 10^{12}$ (2, 3); б — 10^{13} (4), $4 \cdot 10^{13}$ (6), 10^{15} (7), 10^{16} (8).

Воздействие электронного облучения на интенсивность ФСЭЭ можно условно разделить в зависимости от величины Φ на три стадии. На начальной стадии облучения (до $5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$) наблюдается возрастание эмиссионной активности с насыщением в области $\Phi = 5 \cdot 10^{11} - 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (рис. 2, а). На второй стадии ($5 \cdot 10^{12} - 10^{13} \text{ см}^{-2}$) интенсивность эмиссии падает, достигая величины ниже значений ФСЭЭ до облучения (рис. 2, б, кривая 4). На третьей стадии ($\Phi > 10^{13} \text{ см}^{-2}$) увеличение интегрального потока электронов приводит к росту интенсивности ФСЭЭ (рис. 2, б, кривые 6-8).

Приведенные на рис. 3 спектральные зависимости ФСЭЭ позволяют наблюдать изменения в структуре спектров. На первой стадии облучения происходит формирование полос с максимумами в районе 4.8 и 5.4 эВ (рис. 3, а). На второй стадии полоса 4.8 эВ расщепляется на два селективных пика 4.75 и 4.95 эВ, максимум полосы 5.4 эВ смещается на 5.75 эВ (рис. 3, б, кривая 4). Это свидетельствует о сложной структуре наблюдаемых полос. Пик в области 4.8 эВ образован полосами 4.75 и 4.95 эВ, а другой пик — полосами 5.2, 5.4 и 5.75 эВ. Полоса с максимумом 5.2 эВ наблюдается явно в спектре при $\Phi \geq 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (рис. 3, в, кривые 7, 8).

В начале третьей стадии в спектре ФСЭЭ наиболее выражена полоса с максимумом 5.4 эВ, однако уже при $\Phi = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ее рост

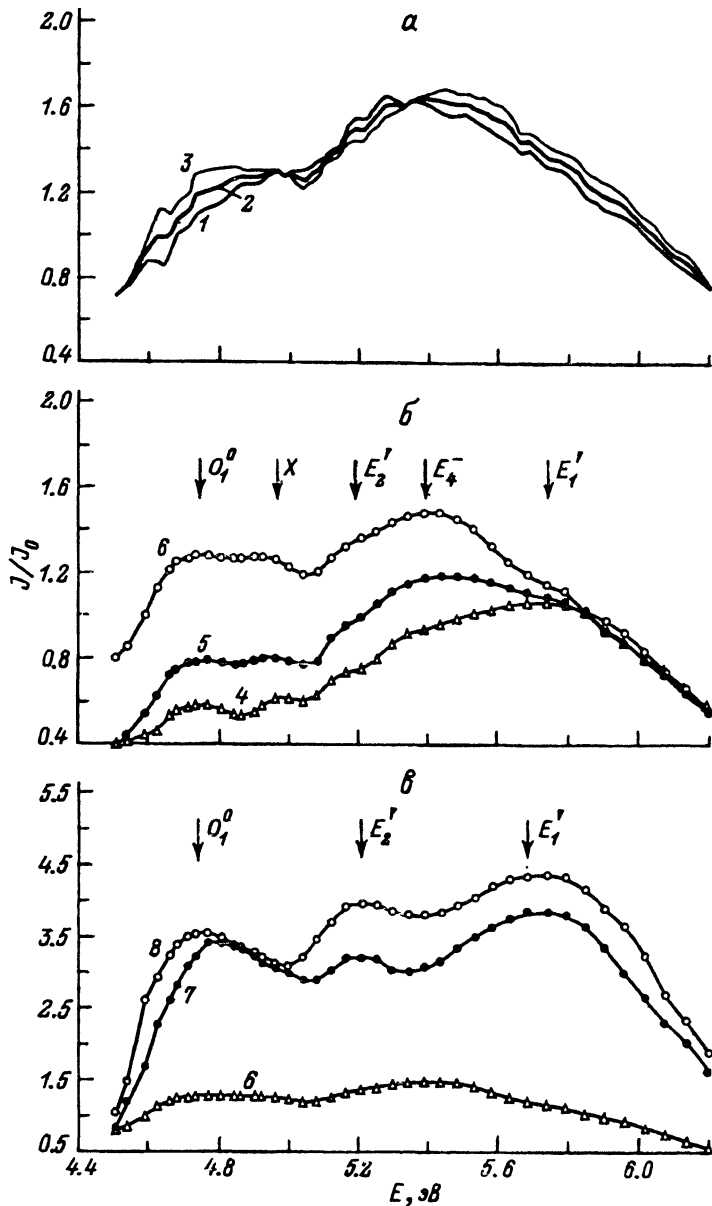


Рис. 3. Приведенные спектральные зависимости ФСЭЭ облученных стекол.
 Ф: а — $5 \cdot 10^{11}$ (1), $1,5 \cdot 10^{12}$ (2), $5 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ (3); б — 10^{13} (4), $2 \cdot 10^{13}$ (5), $4 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$ (6);
 в — $4 \cdot 10^{13}$ (6), 10^{15} (7), 10^{16} см $^{-2}$ (8).

замедляется. Полосы 4.75 и 4.95 эВ растут синхронно, а полоса 5.75 эВ практически не изменяется (рис. 3, б). Дальнейшее увеличение интегрального потока электронов приводит к существенному росту полос с максимумами 4.75, 5.2 и 5.75 эВ. Полосы 4.95 и 5.4 эВ при больших потоках электронов явно не наблюдаются (рис. 3, в, кривые 7, 8).

Таким образом, в спектрах облученных стекол обнаружены пять эмиссионных полос и сложная полоса оптического поглощения, характеризующиеся различной дозовой кинетикой.

Обсуждение результатов

Радиационные центры. Анализ спектров наведенного поглощения и приведенных спектров ФСЭЭ свидетельствует об образовании под действием облучения радиационных дефектов как в объеме, так и на поверхности стекла. Радиационный пик наведенного поглощения в области 4 эВ (рис. 1, б) имеет сложную структуру. Его дозовая кинетика позволяет предположить, что эта полоса обусловлена поглощением по крайней мере двух центров окраски. По данным [7] в этой спектральной области для щелочносиликатных стекол характерны полосы с максимумами поглощения при 3.7 и 4.1 эВ, принадлежащие соответственно электронным и дырочным центрам. Не исключено, что полоса в спектральной области 4 эВ обусловлена поглощением именно этих центров. С другой стороны, поскольку центры, поглощающие при 3.7 эВ, электронные [8], то возникает необходимость объяснить отсутствие эмиссии в области их поглощения.

Как известно [9-11], существуют два возможных механизма ФСЭЭ. В одном случае происходит прямая фотоионизация эмиссионных центров, в другом — фотовозбуждение с последующей термической ионизацией. Вероятно, поглощение 3.7 эВ определяется внутрицентровыми переходами, без термического освобождения электрона.

Обнаруженные полосы ФСЭЭ с максимумами при 4.75, 4.95, 5.2, 5.4 и 5.75 эВ свидетельствуют о возникновении в поверхностном слое стекла донорных радиационных центров. Однако наличие примесного плато в УФ спектрах поглощения не позволяет наблюдать в исследуемом стекле полосы собственных радиационных центров окраски. В спектрах поглощения облученных щелочносиликатных стекол [6,12] полосы с максимумами при 5.4, 5.2 и 5.75 эВ обусловлены соответственно E_4^- , E_2' и E_1' -центрами. Соответствие положения обнаруженных эмиссионных полос и оптического поглощения собственных центров окраски дает возможность предполагать образование именно этих центров в поверхностном слое исследуемого стекла.

Указанные центры относятся к двум разным типам. Центры E_4^- связаны с континуальной разупорядоченностью [4,6]. Они образуются путем захвата электронов на локализованные состояния хвоста зоны проводимости и отражают процессы, обусловленные возбуждением матрицы. Центры E_1' и E_2' относятся к дискретному типу и связаны со структурными нарушениями кремнекислородной подрешетки стекла [12,15]. Объемные радиационные E_1' -центры могут образовываться как в результате разрыва кремний-кислородной связи с образованием изолированного трехкоординированного атома кремния с неспаренным электроном (Si_3^0), так и путем захвата носителей заряда на кислородную вакансию [14,15]. В матрице стекла К8 центры E_2' образуются, по-видимому, аналогичным образом, однако в отличие от E_1' -центров представляют собой модифицированный дефект типа Si_3^0/Me^+ [12,14].

Рассматривая донорно-акцепторные свойства обнаруженных центров, необходимо отметить, что если электронная природа E_4^- -центров не вызывает сомнений [4,6], то природа E' -центров установлена неоднозначно. С одной стороны, существуют данные, позволяющие отнести E' -центры к дырочному типу [12,14]. С другой стороны, имеются многочисленные факты термоэмиссионной активности данных центров [16,17], предложен многофононный механизм их распада в эмиссионных процессах как доноров электронов [18].

Обнаруженная в настоящей работе фотоэмиссионная активность радиационных E'_1 - и E'_2 -центров говорит в пользу их электронной природы. Известно [13,14], что поглощение E'_1 -центра при 5.75 эВ приводит к внутрицентровому возбуждению электрона и не сопровождается люминесценцией. Вероятнее всего, происходит безызлучательная релаксация электрона в основное состояние, когда время жизни возбужденного состояния сравнимо со временем термической ионизации. В этом случае E'_1 -центры могут являться донорами электронов и участвовать в ФСЭЭ по фототермическому механизму [9-11]. Подтверждением этому может служить тот факт, что под действием светового излучения с энергией 5.75 эВ наблюдается уменьшение концентрации объемных E'_1 -центров [14]. Вышесказанное в полной мере относится и к E'_2 -центрам. Более того, для модельных щелочносиликатных стекол имеются прямые экспериментальные доказательства их электронной природы [12,13].

Эмиссионные полосы с максимумами 4.75 и 4.95 эВ не имеют оптических аналогов, связанных с донорными центрами. До настоящего времени в исследуемых стекломатрицах не были обнаружены радиационные центры электронного типа, поглощающие в указанной спектральной области. По данным [7] в области 4.75 эВ в щелочносиликатных стеклах наблюдается поглощение O_1^0 -центра нейтрального немостикового кислорода. Логично предположить, что и в исследуемом стекле за полосу с максимумом при 4.75 эВ ответственны O_1^0 -центры. Известно [14,15], что центры O_1^0 образуются при локализации дырки, а переходы 4.75 эВ являются внутрицентровыми. Поэтому механизм ФСЭЭ с участием на стадии поглощения O_1^0 -центров требует специального изучения. На данном этапе можно предположить, что энергия, поглощаемая центром немостикового кислорода, эффективно передается донорным эмиссионным центрам. При этом электрон освобождается из ловушки и может участвовать в процессе эмиссии. Возбужденное состояние дырки центра немостикового кислорода находится вблизи валентной зоны и в щелочносиликатных матрицах может попадать в область локализованных валентных состояний [15], поэтому возможна передача энергии возбуждения посредством прыжкового переноса дырок и реализация оже-рекомбинационного механизма эмиссии [19]. В случае реализации только внутрицентровых переходов возможна передача энергии резонансным путем. Для окончательного решения данного вопроса необходимы аналогичные эксперименты с кварцевыми стеклами, у которых возбужденное состояние O_1^0 -центра удалено от границы валентной зоны.

X-центры, ответственные за эмиссионную полосу с максимумом 4.95 эВ (рис. 3), обнаружены впервые и их природа неизвестна. Как показано ниже, предположительно их можно отнести к собственным центрам типа локализованных состояний зонных хвостов.

Таким образом, центры ФСЭЭ, зафиксированные в спектральной области интенсивного примесного поглощения, являются собственными радиационными нарушениями поверхностных слоев матрицы стекла. С учетом сведений о природе обнаруженных центров и данных о кинетике их накопления рассмотрим процессы, протекающие на разных стадиях облучения.

Радиационные процессы. Кривые, отражающие кинетику накопления эмиссионных центров, приведены на рис. 4. На ранних стадиях облучения в эмиссии принимают участие дорадиационные дефекты и падение интенсивности ФСЭЭ в конце первого этапа облучения ($\Phi = 10^{13} \text{ см}^{-2}$), как и просветление в спектрах оптического поглощения объясняется их трансформацией. Этот процесс, вероятней всего, связан с перезарядкой дефектных состояний, возникших на этапе изготовления и обработки стекла. При средних дозах доминируют процессы возбуждения стекломатрицы. Основной эффект облучения состоит в локализации электронов на ионах-модификаторах с образо-

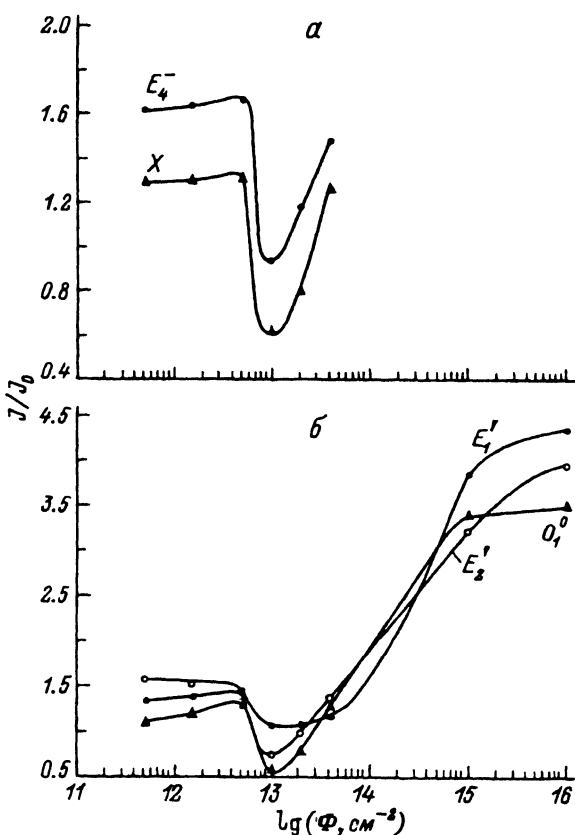


Рис. 4. Кинетика накопления радиационных эмиссионно-активных центров непрерывного (а) и дискретного (б) типа.

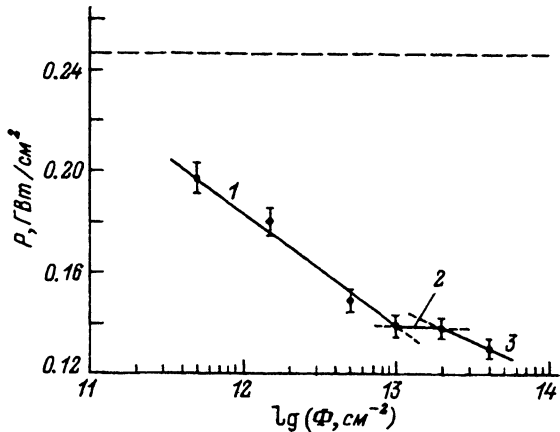


Рис. 5. Зависимость лучевой прочности (P) поверхности от интегрального потока электронов при воздействии лазерного излучения $\lambda = 1.06$ мкм, $\tau = 50$ нс. 1 — область трансформации дорадиационных центров, 2 — область возбуждения матрицы стекла, 3 — область образования радиационных дефектов, пунктир — порог пробоя необлученного стекла.

ванием E_4^- -центров (рис. 4, а). Эффекты перезарядки зонных хвостов определяются плотностью состояний для данных центров и при больших потоках должны испытывать насыщение. Полоса E_4^- -центров, вероятно, не испытывает рост на поздней стадии облучения и перекрывается соседними пиками. Полоса с максимумом при 4.95 эВ ведет себя аналогично (рис. 3, в), из чего следует заключить, что X -центры могут быть связаны также с перезарядкой локализованных состояний.

Дозовая кинетика E_1' -центров (рис. 4, б) указывает на незначительный вклад процессов дефектообразования на стадии возбуждения матрицы стекла ($\Phi \sim 10^{13}$ см $^{-2}$). Однако уже при $\Phi = 4 \cdot 10^{13}$ см $^{-2}$ этот вклад усиливается, а при больших интегральных потоках дефектообразование становится доминирующим, о чем свидетельствует существенный рост концентрации E_1' - и E_2' -центров. Поскольку полоса 4.75 эВ при больших интегральных потоках продолжает интенсивно расти, то связанные с ней центры также могут быть обусловлены радиационными повреждениями. Этот факт свидетельствует в пользу предположения о принадлежности полосы 4.75 эВ центрам нейтрального немостикового кислорода. Необходимо заметить, что кривая накопления этих центров близка к ходу кривых накопления E_1' - и E_2' -центров (рис. 4, б). Как уже было отмечено, E_1' - и E_2' -центры имеют сходные механизмы образования, о чем свидетельствует корреляция их дозовых зависимостей. Относительно природы центров, ответственных за полосу 4.75 эВ, можно предположить, что они составляют комплементарную пару дефектам типа E' . Такими дефектами в силикатных стеклах являются O_1^0 -центры, комплементарные по отношению к изолированным E' -центрам [14, 15]. Воздействие корпускулярных излучений может приводить к разрыву кремний-кислородных связей с образованием центров Si_3^0 (E_1') и O_1^0 . Если вблизи разорванной связи присутствует щелочной ион, то образуются дефекты типа Si_3^0/Me^+ , спектрально проявляющиеся как E_2' -центры.

В зависимости от дозы облучения быстрыми электронами поверхность стекла могут находиться в различных структурно-энергетических состояниях, соответствующих указанным выше стадиям. Для проверки данного заключения и установления роли радиационных дефектов в процессах оптического разрушения были проведены исследования зависимости лучевой прочности от состояния поверхности стекла после электронного облучения (рис. 5). Как видно из рисунка, порог оптического пробоя поверхности исходного стекла при воздействии лазерного излучения с длиной волны $\lambda = 1.06$ мкм и длительностью импульсов $\tau_i = 50$ нс составляет 0.246 ГВ/см². Облучение электронами приводит к снижению лучевой прочности, характер ее изменения во многом определяется энергетическим состоянием поверхностных слоев, т.е. типом радиационных процессов, превалировавших на данном этапе облучения. Кривая зависимости лучевой прочности от дозы облучения имеет три участка, соответствующих стадиям облучения. Заметное снижение лучевой прочности наблюдается на стадии трансформации дорадиационных дефектов и на этапе образования радиационных повреждений, в то время как на стадии перезарядки электронных состояний зонных хвостов порог оптического разрушения практически не изменяется.

Сравнительный анализ поведения лучевой прочности (рис. 5) и кинетики образования радиационных нарушений (рис. 4) указывает на то, что величина порога оптического разрушения поверхности определяется, главным образом, наличием дискретных эмиссионно-активных дефектов, как дорадиационных, так и возникших под электронным облучением. В меньшей степени порог лазерного пробоя зависит от локализованных электронных возбуждений зонных хвостов.

Выводы

В результате исследования влияния быстрых электронов на фотоэмиссионные свойства поверхности стекла К8 установлено следующее.

1. При облучении быстрыми электронами с потоком $10^{11} - 10^{16}$ см⁻² в стекле К8 наблюдаются три стадии радиационно-стимулированных процессов: трансформация дорадиационных дефектов (перезарядка дефектных состояний), возбуждение матрицы стекла с образованием локализованных электронных возбуждений и накопление радиационных повреждений стекломатрицы.

2. Обнаружена сложная полоса наведенного оптического поглощения с максимумом вблизи 4 эВ, обусловленная возникновением в объеме стекла электронных (3.7 эВ) и дырочных (4.1 эВ) центров окраски.

3. Обнаружены полосы наведенной фотоэмиссионной активности (4.75, 4.95, 5.2, 5.4 и 5.75 эВ), три из которых связаны с центрами E_2' (5.2 эВ), E_4^- (5.4 эВ) и E_1' (5.75 эВ). За эмиссионную полосу 4.75 эВ может быть ответственен дискретный O_1^0 -центр немостикового кислорода, образующийся по механизму разрыва кремнекислородных связей. Обнаружены новые центры ФСЭЭ, поглощающие в области 4.95 эВ и связанные с континуальной разупорядоченностью матрицы стекла.

4. Установлена корреляция лучевой прочности поверхности облученных стекол с параметрами ФСЭЭ, что подтверждает возможность использования последних для прогнозирования поведения оптических

сред при воздействии мощных световых потоков. Метод ФСЭЭ оказывается эффективным при исследовании радиационных нарушений поверхности и позволяет фиксировать собственные радиационные центры даже в спектральной области интенсивного поглощения примесей.

Работа выполнена при частичной поддержке Российской программы "Фундаментальные проблемы современной физической оптики и ее применений".

Список литературы

- [1] *Клява Я.Г.* ЭПР спектроскопия неупорядоченных твердых тел. Рига: Зинатне, 1988. 320 с.
- [2] *Образцова Е.В., Луценко В.П., Кузьмин И.И.* // Физ. хим. стекла. 1980. Т. 6. № 3. С. 344-345.
- [3] *Образцова Е.В., Луценко В.П., Кузьмин И.И.* // Вопросы атомной науки и техники. Сер. физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. № 3/22. Харьков, 1982. С. 44-45.
- [4] *Арбузов В.И., Зацепин А.Ф., Кортвов В.С.* и др. // Физ. хим. стекла. 1994. Т. 20. № 6. С. 689-700.
- [5] *Арбузов В.И., Николаев Ю.П., Толстой М.Н.* // Физ. хим. стекла. 1989. Т. 15. № 3. С. 433-441.
- [6] *Арбузов В.И., Толстой М.Н.* // Физ. хим. стекла. 1988. Т. 14. № 1. С. 3-18.
- [7] *Глебов Л.Б., Докучаев В.Г., Петров М.А.* и др. // Физ. хим. стекла. 1990. Т. 16. № 1. С. 39-47.
- [8] *Глебов Л.Б., Докучаев В.Г., Петров М.А.* и др. // Физ. хим. стекла. 1988. Т. 14. № 3. С. 355-361.
- [9] *Кязмбре Х.Ф., Белкинд А.И., Бичевин В.В.* и др. // РиЭ. 1969. Т. 14. № 12. С. 2216-2221.
- [10] *Зацепин А.Ф., Кортвов В.С., Шапова Ю.В.* // РиЭ. 1992. Т. 37. № 2. С. 2216-2221.
- [11] *Arbuzov V.I., Zatzepin A.F., Kortov V.S.* et. al. // J. Non-Crystalline Solids. 1991. Vol. 134. P. 208-217.
- [12] *Глебов Л.Б., Докучаев В.Г., Петров М.А.* и др. // Физ. хим. стекла. 1990. Т. 16. № 4. С. 619-624.
- [13] *Sigel G.H.* // J. Non-Crystalline Solids. 1973/74. Vol. 13. N 2. P. 372-398.
- [14] *Силин А.Р., Трутин А.Н.* Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. Рига: Зинатне, 1985. 244 с.
- [15] *Бреговский С.М., Тюльнин В.Л.* Радиационные центры в неорганических стеклах. Москва: Энергоатомиздат, 1988. 200 с.
- [16] *Зацепин А.Ф., Ушкова В.И., Калентьев В.А.* // Поверхность. 1990. № 6. С. 100-105.
- [17] *Kortov V.S., Zatzepin A.F., Ushkova V.I.* // Physics and Chemistry of Minerals. 1985. Vol. 12. P. 114-121.
- [18] *Зацепин А.Ф., Мазуренко В.Г., Кортвов В.С.* и др. // ФТТ. 1988. Т. 30. Вып. 11. С. 3472-3474.
- [19] *Толпыго Е.И., Толпыго К.Б., Шейнкман М.К.* // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1966. Т. 30. № 12. С. 1901-1905.