

КИНЕТИКА И МЕХАНИЗМЫ НАРАБОТКИ ДЕФЕКТОВ В ЧИСТЫХ  
КВАРЦЕВЫХ СТЕКЛАХ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИСергеев А.П.<sup>1</sup>, Сергеев П.Б.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ФГБУН Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН (119991,  
ГСП-1, Москва, Ленинский проспект, 53, ФИАН  
[sergandy@mail.ru](mailto:sergandy@mail.ru), [psergeev@sci.lebedev.ru](mailto:psergeev@sci.lebedev.ru) )

В электронно–пучковых эксимерных лазерах (ЭПЛ) окна облучаются рентгеновским излучением и рассеянными из пучка накачки электронами [1–3]. При их воздействии прозрачность оптических материалов падает, что сказывается и на работоспособности лазеров. Чистые кварцевые стекла для УФ диапазона являются базовым материалом для окон мощных технологических ЭПЛ. Поэтому и потребовалось выяснить, какие из современных кварцевых стекол наиболее стойки при длительном воздействии импульсов электронного пучка (ЭП) [4–6]. Испытывались российские стекла КС-4В и КУ-1, а также Corning 7980 Base Grade (C-0), KrF Grade (C-KrF) и ArF Grade (C-ArF).

Облучение образцов проводилось на лазерной установке ЭЛА с электронно-пучковым возбуждением газовых сред [7]. Её ЭП имеет энергию электронов  $\sim 300$  кэВ, длительность импульса 80 нс и частоту повторения  $\sim 5 \cdot 10^{-3}$  Гц. За импульс плотность энергии ЭП (далее флюенс F) в 3 см от фольги электронной пушки в воздухе, где и размещались образцы, была около  $2$  Дж/см<sup>2</sup> на площади около  $70$  см<sup>2</sup> [4-6, 8].

Дозиметрические измерения показали распределение поглощенной дозы по толщине материала с плотностью ( $\rho$ ) кварцевого стекла  $2,2$  г/см<sup>3</sup>. Оно очень неравномерно [4-5]. Основная энергия поглощается в приповерхностной зоне. За импульс с  $F_1=2$  Дж/см<sup>2</sup> максимальная доза в стеклах была  $\sim 40$  кГр. В предположении равномерного распределения этой дозы значение эффективной толщины облучения  $L_0=0,02$  см [9].

Облучаемые образцы размещались в нишах дюралевой пластины и закрывались фольгами из Ti. Это обеспечивало снятие объемного заряда, вносимого ЭП, за счет минимизации сопротивления для обратного тока. Так устранялось и загрязнение образцов, и их подсветка [5-6]. Толщина закрывавших образцы фольг определяла режимы облучения. Для 1-го режима она была 14 мкм, для 2-го – 90 и около 140 мкм для 3-

го. Для 1-го режима за импульс  $F_1$  был около  $2 \text{ Дж/см}^2$ , для 2-го  $\sim 0,6$  и для 3-го  $\sim 0,1 \text{ Дж/см}^2$ . В каждом из режимов образцы облучались одновременно. Следовательно, различия по  $F_1$  для каждого режима пропорциональны различиям в средней мощности облучения [9-11].

После серий до 500 облучающих импульсов ЭП (2 недели) с общим флюенсом до  $1 \text{ кДж/см}^2$  проводилось обследование образцов на спектрофотометрах Genesys-2 в области 200-1000 нм и ВМР-2 в области 150-240 нм. Приборы давали пропускание образцов в цифровом формате с шагом 1–3 нм. Оно преобразовывалось в спектры оптической плотности [8]. Сложные спектры этого наведенного ЭП поглощения (НП) в стеклах раскладывались по методу Аленцева-Фока [12] на индивидуальные полосы поглощения (ИП). Наш опыт показал, что спектры НП в области  $\sim 160\text{-}350 \text{ нм}$  у всех изученных кварцевых стекол с точностью до 0,01 описываются на основе 6 ИП гауссового профиля. Их характеристики представлены в Таблице 1 [8-10].

Таблица 1. Характеристики индивидуальных полос поглощения кварцевых стекол.  $i$  – номер полосы;  $\lambda_{mi}$  и  $E_{mi}$  положение максимума ИП на шкале длин волн и энергий;  $\Delta E_i$  – полуширина полосы.

$i$	$\lambda_{mi}$ , [нм]	$E_{mi}$ , [эВ]	$\Delta E_i$ , [эВ]	Поглощающий дефект
1	260	4,8	0,54	НАК
2	245	5,1	0,27	?
3	225	5,54	0,25	?
4	213	5,86	0,42	E'-центр
5	183,5	6,8	0,55	?
6	163,5	7,63	0,33	КДЦ

В Таблице 1 НАК - это немостиковый атом кислорода, КДЦ – кислороддефицитный центр. Природа остальных дефектов пока окончательно не установлена, что отражено знаком вопроса [8-10].

Разложение конкретного спектра НП на ИП позволяет описать его набором амплитудных коэффициентов ( $A_i$ ) соответствующих ИП. Они через сечения поглощения полос в максимуме ( $\sigma_i$ ) связаны с поверхностной плотностью дефектов ( $N_i$ ):  $N_i = A_i/\sigma_i$ . Для названных в Таблице 1 дефектов  $\sigma_i$  известны [8]. И этого достаточно для количественного описания изменения дефектной структуры стекол с ростом  $F$  [9-11].

Отметим, что спектры НП регистрировались примерно через сутки после облучения [8]. Следовательно, соответствующие характеристики ИП принадлежат ансамблям долгоживущих дефектов кварцевых стекол сформировавшимся к этому времени. Последующие времена жизни этих групп дефектов при температурах хранения около  $0^{\circ}\text{C}$  и отсутствии световой подсветки достигают  $10^8$  с и более [6].

В [9–10] приведены экспериментальные зависимости  $A_i(F)$  для стекол КУ-1, КС-4В и С–АгF. Типичная их группа представлена на примере стекла КС-4В на рис.1. Здесь после буквы L стоит значение  $\lambda_{mi}$ . Линии на рисунке – это построенные по точкам аппроксимационные кривые типа  $A_i=A_{im}(1-\exp(-F/F_{im}))$ . Эта функция хорошо описывает все экспериментальные зависимости  $A_i(F)$  у всех изученных стекол.

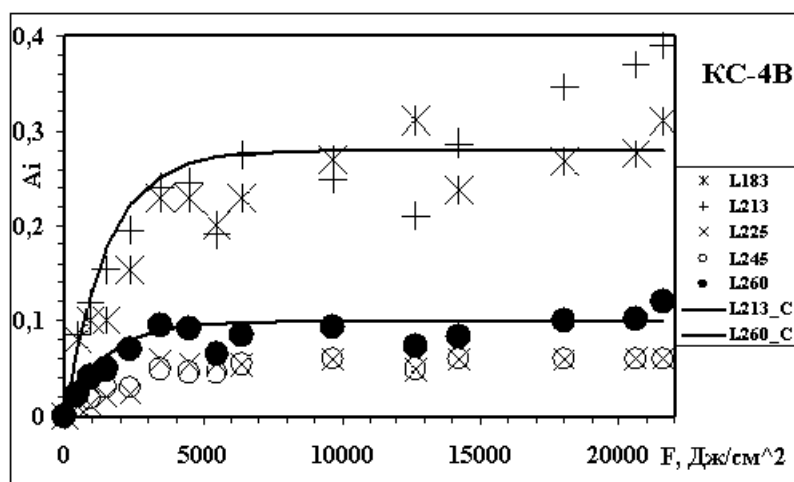


Рис. 1. Зависимости  $A_i$  от  $F$  для первых пяти полос у стекла КС–4В. Линии – аппроксимационные зависимости для соответствующих полос.

Представлены на рис.2 результаты по  $A_6$  у КУ-1 и КС-4В, полученные, что важно, при разных режимах облучения [9–10] очень близки и описываются одной аппроксимационной линией. Корнинговские стекла, в частности и С–АгF, имеют меньшие значения  $A_6$  [10].

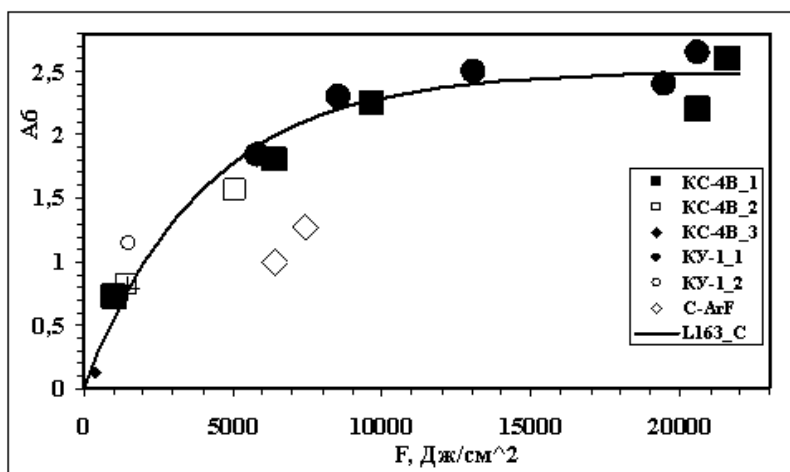


Рис.2. Зависимости  $A_6$  от  $F$  у исследованных стекол. Цифра после названия стекла обозначает номер режима облучения. Линия – аппроксимационная зависимость  $A_6(F)$  для КУ–1 и КС–4В.

Факт выхода амплитуд всех ИП на стационарный уровень дает возможность их сравнения в этом режиме. В Таблице 2 представлены значения  $A_{im}$  для трех марок стекол.

Таблица 2. Значения  $A_{im}$  у ИП исследованных стекол. В круглых скобках под  $A_{im}$  приведены значения  $\lambda_{mi}$  в нм.

Марка стекла	$A_{m1}$ , (260)	$A_{m2}$ , (245)	$A_{m3}$ , (225)	$A_{m4}$ , (213)	$A_{m5}$ , (183,5)	$A_{m6}$ , (163,5)
КС–4В	0,1	0,06	0,06	0,28	0,27	2,5
КУ–1	0,51	0,1	0,17	1,1	0,86	2,5
С–ArF	0,31	0,03	0,1	0,52	0,45	-

Из Таблицы 2 видно, что у чистых кварцевых стекол основное НП в УФ области спектра определяется НАК,  $E'$ -центрами и дефектами, ответственными за 5-ю полосу поглощения. Эти результаты детально описывают экспериментальный факт, что в УФ диапазоне радиационная стойкость стекла КС-4В в несколько раз выше, чем у КУ-1 и Corning 7980 ArF Grade [5-6, 8-10].

Проанализируем, какую информацию предоставляет нам вид зависимостей  $A_i(F)$ , а, значит, и  $N_i(F)$ , выходящие на стационарный уровень с ростом  $F$  [11]:

$$N_i = N_{im} [1 - \exp(-F/F_{im})], \quad (1)$$

Они являются решением дифференциальных уравнений

$$dN_i/dF = (N_{im}/F_{im}) - N_i/F_{im}. \quad (1. a)$$

Здесь  $N_{im}$  – величина стационарного количества  $i$ -тых дефектов,  $F_{im}$  – характеристика скорости их выхода на максимум. Эти параметры позволяют рассчитать третью величину ( $N_{im}/F_{im}$ ), определяющую скорость роста числа дефектов в начале облучения, и которая связана с энергией образования соответствующих дефектов ( $\varepsilon_i$ ) соотношением

$$\varepsilon_i = (N_{im}/F_{im})^{-1}. \quad (2)$$

Заметим, что уравнения (1. а), по сути, являются уравнениями кинетики для  $N_i$ , т.к. величина  $F$  есть линейная функция от времени облучения образцов  $t$ :  $F=W_s \cdot t$ . Здесь  $W_s$  есть средняя удельная мощность ЭП, равная произведению  $F_1$  на среднюю частоту следования импульсов  $f$ . С учетом этой связи  $F$  и  $t$  достаточно умножить все члены уравнения (1. а) на  $W_s$  чтобы получить уравнение кинетики для  $N_i$ :

$$dN_i/dt = (N_{im}/\tau_{im}) - N_i/\tau_{im}. \quad (1. б)$$

Здесь величина  $\tau_{im} = F_{im}/W_s$ . Исходя из детально описанных в [5–6] условий облучения образцов, флюенс ЭП в  $1000 \text{ Дж/см}^2$  достигается примерно за  $10^6$  с.

Знание величины  $N_{im}$  и предположение, что вид распределения концентрации дефектов ( $n_i$ ) по толщине образца ( $x$ ) повторяет вид распределения поглощенной дозы  $D(x)$ , который близок к прямоугольному [9], позволяет оценить максимальную концентрацию соответствующих дефектов ( $n_{im}$ ) на основе выражения:

$$n_{im} = N_{im}/L_0. \quad (3)$$

Напомним, что при  $F_1 = 2 \text{ Дж/см}^2$   $D(0) = 40 \text{ кГр}$ , а  $L_0 = 0,02 \text{ см}$  [9–10].

Приближение прямоугольного распределения поглощенной дозы на глубине  $L_0$  дает возможность перевести величины  $F_{im}$  в дозовые значения ( $D_{im}$ ) на основе соотношения

$$D_{im} = F_{im}/(L_0 \cdot \rho). \quad (4)$$

Величины  $N_{im}$ ,  $n_{im}$ ,  $F_{im}$ ,  $D_{im}$  и  $\varepsilon_i$  найденные соответствующим образом из экспериментальных зависимостей  $A_i(F)$  [9–10] с учетом (1)–(4) для кварцевых стекол КС–4В, КУ–1 и Corning 7980 ArF Grade (C–ArF) и представлены в соответствующих колонках Таблицы 3. Так как  $\sigma_i$  известны у трех основных дефектов (НАК, E'-центры, КДЦ) для них и выполнены соответствующие расчеты. Брались следующие значения сечений поглощения:  $\sigma_1 = 5,3 \cdot 10^{-18}$ ;  $\sigma_4 = 2,5 \cdot 10^{-17}$ ;  $\sigma_6 = 7,5 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$  [13–14].

Таблица 3. Ключевые характеристики наработки основных дефектов кварцевых стекол при электронном облучении.

Марка стекла	Тип дефекта	$N_{im} \cdot 10^{-16}$ , см <sup>-2</sup>	$n_{im} \cdot 10^{-18}$ , см <sup>-3</sup>	$F_{im}$ , Дж/см <sup>2</sup>	$D_{im}$ , МГр	$\epsilon_i \cdot 10^{13}$ , Дж
КС-4В	НАК (i=1)	2	1	1500	34	0,8
КУ-1	НАК (i=1)	10	5	1000	23	0,1
С-АrF	НАК (i=1)	6	3	1000	23	0,2
КС-4В	Е'-центр (i=4)	1,2	0,6	1500	34	1,2
КУ-1	Е'-центр (i=4)	4	2	1500	34	0,4
С-АrF	Е'-центр (i=4)	2	1	1000	23	0,5
КС-4В	КДЦ (i=6)	3,3	1,6	4000	91	1,2
КУ-1	КДЦ (i=6)	3,3	1,6	4000	91	1,2
С-АrF	КДЦ (i=6)	–	–	–		~1

Выход  $N_i$  на постоянный уровень с ростом  $F$ , а значит и временем облучения  $t$ , может быть обусловлен разными причинами. Рассмотрим два типичных случая, которые связаны с двумя принципиально разными механизмами наработки дефектов [11].

Первый предполагает, что рост количества дефектов со временем компенсируется их релаксацией. Этот случай описывается хорошо известным уравнением кинетики для концентрации дефектов  $n$ :

$$dn/dt = W - n/\tau. \quad (5)$$

Здесь  $\tau$  – время жизни дефектов,  $W$  – скорость их наработки, которая пропорциональна мощности облучения. При постоянстве этих величин  $n$  выходит на стационарный уровень ( $n_m = (W \cdot \tau)$ ) по закону:

$$n = (W \cdot \tau)[1 - \exp(-t/\tau)]. \quad (5.a)$$

Второй случай предполагает, что дефекты образуются из неких “предшественников”, концентрация которых ограничена и, предположим, равна  $p$ . В этом случае уравнение для концентрации дефектов можно представить в виде:

$$dn/dt = A(p-n) - n/\tau. \quad (6)$$

Здесь  $A$  есть коэффициент, характеризующий скорость превращения “предшественников” в дефекты. Он пропорционален мощности облучения. После преобразования уравнение (6) принимает такой вид:

$$dn/dt = Ap - n(A + 1/\tau). \quad (6.a)$$

Оно похоже на (5), но с другими коэффициентами, а решение такое:

$$n = [(Ap)/(A + 1/\tau)] \cdot [1 - \exp(-t(A + 1/\tau))]. \quad (6.б)$$

Если  $A \gg 1/\tau$ , то (6.б) упрощается:

$$n = p [1 - \exp(-tA)]. \quad (6.в)$$

Сравнение (6.б) и (5.а) показывает, что в обоих случаях выход на максимум описывается одинаковой функцией. При этом во втором случае максимальная концентрация дефектов приближается к концентрации “предшественников” и слабо зависит от мощности облучения. Кроме этого, в экспоненте к величине  $1/\tau$  во втором случае добавляется скорость выгорания “предшественников” ( $A$ ). В случае (6.в) эта скорость полностью определяет время выхода на стационар. Значит, при интерпретации данных, получаемых из одинаковых зависимостей  $N_i(F)$ , важно четко определиться с видом процесса наработки дефектов.

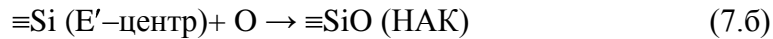
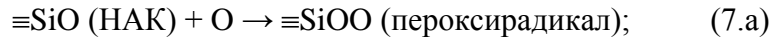
Эксперименты показали [5], что у стекла КУ–1 уровень стационарной оптической плотности на 250 и 215 нм практически линейно нарастает с  $F_1$ , а у образцов КС–4В при облучении в первом и втором режимах он был практически одинаков. Результаты по третьему режиму здесь не рассматриваем из-за того, что стационарный уровень при нем не достигался. Так как частота следования импульсов ЭП для всех режимов была одинаковой, то рост  $F_1$  отражает рост средней мощности облучения. Отсюда следует, что в КУ–1 наработку НАК и  $E'$ -центров можно описывать уравнением (5), а у КС–4В реализуется второй случай образования этих дефектов из “предшественников”.

Экспериментальные зависимости  $N_6(F)$  у КУ–1 и КС–4В практически совпадают и, что важно, при разных режимах облучения [9–10]. Это указывает на применимость и к их интерпретации второго подхода. При этом время жизни у КДЦ значительно выше, чем у НАК и  $E'$ -центров, что оправдывает применимость уравнения (6.в).

Утверждение, что в стекле КС–4В наработка основных дефектов происходит из “предшественников” ставит вопрос об их природе. В качестве таковых при образовании первичных НАК и  $E'$ -центров в этом стекле могут выступать “растянутые” связи, а наработка КДЦ объясняется локализацией дырок на “сжатых” связях [10]. Следовательно, приводимые в Таблице 3 значения  $n_{mi}$  у этого стекла показывают уровень концентрации соответствующих “предшественников”.

Образование НАК и  $E'$ -центров по каналу разрыва “растянутых” связей в КС–4В должно приводить к одинаковому количеству этих дефектов, что не совпадает с данными из Таблицы 3. Эти различия могут быть связаны с релаксационными процессами. Напомним, что облучение образцов импульсами ЭП длилось около года [5–6].

Превышение числа НАК над E'–центрами можно объяснить взаимодействием первичных дефектов с междоузельным кислородом, появляющимся в процессе образования КДЦ. Действительно, при одинаковых скоростях взаимодействия кислорода в реакциях с основными дефектами



количество E'–центров уменьшится, а число НАК останется прежним, т.к. их убывание в результате первой реакции компенсируется притоком по второй. Оценки, проведенные с учетом количества атомов O выброшенных в междоузлия при образовании КДЦ к моменту выхода на максимум количества НАК и E'–центров ( $F \approx 4$  кДж/см<sup>2</sup>), показывают, что данный механизм с хорошей точностью объясняет наблюдаемое неравенство наработки основной пары дефектов. Отсюда же следует, что именно число НАК у КС–4В в колонке для  $n_{im}$  Таблицы 3 наиболее точно отражает уровень “растянутых” связей в этом стекле.

КДЦ, образовавшиеся в стеклах КС–4В и КУ–1 при электронном облучении, очень устойчивы. После облучения ЭП их количество в образцах практически не менялось в течение четырех лет хранения. Облучение этих же образцов излучением ArF–лазера также не вызывало изменения числа КДЦ [8]. Следовательно, значения  $n_{6m}$  в Таблице 3 отражают уровень “предшественников” КДЦ, которыми могут быть “сжатые” связи [10-11].

Близость энергий образования НАК и КДЦ у КС–4В указывает на близость уровней концентрации их “предшественников” – “растянутых” и “сжатых” связей, и одинаковость механизмов стимуляции их превращений. В обоих случаях это локализация на них дырки.

Как видно в Таблице 3, количество КДЦ у КС–4В и КУ–1 в режиме насыщения совпадает. Значит, должны совпадать и концентрации их “предшественников” – “сжатых” связей. Они, как известно, определяются температурой стеклования [15]. Но это же относится и к “растянутым” связям, т.е. их количество в КУ–1 такое же, как в КС–4В. Тогда наработка НАК и E'–центров через разрыв “растянутых” связей в КУ–1 производит такое же количество этих дефектов, как и в КС–4В. В единицах концентрации это около  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, что составляет до 20% от всего количества НАК в КУ–1 и до 50% E'–центров.



Из столбца для  $\epsilon_i$  в Таблице 1 видно, что энергия образования НАК во “влажных” стеклах КУ–1 и С–AgF с содержанием гидроксила  $\sim 1000$  ppm близки, но значительно меньше, чем эта энергия у КС–4В, которое относится к группе “сухих” стекол и содержит гидроксила менее 1 ppm. Следовательно, у “влажных” стекол при электронном облучении есть дополнительные и эффективные механизмы наработки НАК.

В первую очередь это отрыв Н у комплекса  $\equiv\text{SiOH}$ , о чем говорилось ранее [8–10]. Концентрация таких комплексов у наших “влажных” стекол составляет  $\sim 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Но образование долгоживущих комплексов  $\equiv\text{SiO}$ , т.е. НАК, в первую очередь, возможно при отсутствии обратного процесса. Его устранение происходит при связывании свободных атомов водорода на междоузельном кислороде или хлоре. Поэтому концентрация этих газов в междоузлии и будет определять число НАК, образовавшихся в этом процессе [8]. Если каждый атом кислорода в междоузлии связывает два атома водорода, а О здесь появляется столько же, сколько КДЦ у КС–4В, то за счет этого процесса в КУ–1 образуется НАК  $\sim 3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> или  $\sim 60\%$  от их полного числа [11].

Отрыв Н у комплекса  $\equiv\text{SiOH}$  может приводить к наработке основной пары дефектов и при наличии обратного процесса. Так, если оторванный атом Н не вернется на старое место, а свяжется с НАК короткоживущей комплиментарной пары, образовавшейся при разрыве регулярной  $\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$  связи, то произойдет пространственное разделение первичных НАК и E’-центра, что переводит их в разряд долгоживущих [8]. Оценки показывают, что по этому третьему каналу в КУ–1 нарабатывается до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup> НАК и E’-центров, что составляет примерно 20 и 50% от их общего количества [11].

По паспортным данным, содержание хлора у стекол Corning 7980 типа Base Grade, KrF Grade и ArF Grade составляет  $\sim 100$ , 50 и 20 ppm соответственно при одинаковом содержании гидроксила на уровне 800–1000 ppm. Наведенная оптическая плотность в УФ диапазоне у этой группы стекол в режиме насыщения различалась всего лишь на 10% [8]. Из этого следует, что наблюдаемые различия в поглощении у стекол КУ–1 и С–AgF обусловлены не столько различиями в содержании Cl, сколько в содержании гидроксила. Напомним, что в КУ–1 его количество составляет от 1000 до 2000 ppm.

Результаты колонок по  $F_{\text{im}}$  и  $D_{\text{im}}$  в Таблице 3 отражают скорости выхода количества соответствующих дефектов на стационарный

уровень, который достигается примерно при  $3F_{\text{им}}$ . В стекле КС–4В скорость наработки НАК и  $E'$ -центров определяется скоростью выгорания “растянутых” связей и, естественно, она одинакова у обоих дефектов. Доминирование различных каналов наработки этих дефектов во “влажных” стеклах определяет и различие скоростей их выхода на стационарный уровень. Меньшая скорость образования КДЦ в КС–4В и КУ–1, чем скорость наработки НАК, может объясняться почти в 3 раза меньшей квантовой эффективностью процессов, протекающих при локализации дырок на “сжатых” связях [11].

Таким образом, проведенный в данной работе анализ зависимостей амплитуд ИП, принадлежащих основным дефектам кварцевых стекол, от флюенса ЭП позволил выявить различия в процессах дефектообразования у них. У высокочистого кварцевого стекла КС–4В основным механизмом создания НАК и  $E'$ -центров является разрыв “растянутых” связей при локализации дырок на них. Аналогичный процесс на “сжатых” связях ведет к образованию КДЦ и выбросу атомов кислорода в междоузлие. Их взаимодействие с НАК и  $E'$ -центрами приводит к уменьшению концентрации последних и появлению новых дефектов, в частности, пероксирадикалов, поглощающих, по всей видимости, в полосе на 183 нм. Во “влажных” стеклах с высоким содержанием гидроксила (КУ–1 и С–ArF) на процессы, происходящие при разрыве “напряженных” связей описанных выше, накладываются процессы наработки НАК при отрыве водорода от гидроксильной группы, а также взаимодействие выбрасываемых в междоузлия атомов водорода с кислородом и короткоживущими НАК. Эти процессы ведут к повышению выхода долгоживущих НАК у исследованных стекол от 3 до 5 раз, а  $E'$ -центров до 2 раз [11].

Полученные результаты показывают, что среди изученных кварцевых стекол наименьшим уровнем наведенного электронным пучком стационарного поглощения в индивидуальных полосах НАК и  $E'$ -центров обладает новое российское высокочистое “сухое” стекло КС–4В. Выявление механизмов образования радиационных дефектов в этом стекле дает возможность определения дальнейших путей повышения его радиационной прочности: надо искать способы снижения количества “напряженных” связей. Это может быть и стандартный путь с понижением скорости остывания при стекловании, и отжиг материала светом ВУФ диапазона или рентгеновским излучением в при-

сутствии водорода, воды, метана или других газов в междоузлиях стекла для перевода возникающих при облучении НАК и E'–центров в  $\equiv\text{SiOH}$  комплексы [11].

#### Литература

1. В.С.Барабанов и др. Квантовая электроника, **18**, 1364 (1991).
2. V.S.Varabanov et al. J.of Non-Crystalline Solids, **149**, 102 (1992).
3. А.В.Амосов и др. Квантовая электроника, **20**, 1077 (1993).
4. V.G.Bakaev et al. Proc. SPIE **5137**, 323 (2003).
5. П.Б.Сергеев и др. Оптический журнал, **71**(6), 93 (2004).
6. П.Б.Сергеев и др. Квантовая электроника, **37**, 706 (2007).
7. P.V.Sergeev, Journal of Soviet Laser Research, **14**(4), 237 (1993).
8. П.Б.Сергеев, А.П.Сергеев, Квантовая электроника, **40**, 804 (2010).
9. А.П.Сергеев, П.Б.Сергеев, Оптический журнал, **78**(5), 77 (2011).
10. А.П.Сергеев, П.Б.Сергеев, Краткие сообщения по физике ФИАН, **38**(12), 21 (2011).
11. А.П.Сергеев, П.Б.Сергеев, Краткие сообщения по физике ФИАН, **41**(10), 11 (2014).
12. М.В.Фок, Труды ФИАН, **59**, 3 (1972).
13. L.Skuja, H.Hosono, M.Hirano, Proc. SPIE **4347**, 155 (2001).
14. K.Kajihara et al. Phys. Rev. **B.78**, 094201 (2008).
15. K.Awazu, H.Kawazoe, J. Appl. Phys. **94**, 6243 (2003).