

ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.343.2; 544.54.

ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОЛОС ПОГЛОЩЕНИЯ В ВЫСОКОЧИСТЫХ КВАРЦЕВЫХ СТЕКЛАХ ОТ ФЛЮЕНСА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА

© 2011 г. А. П. Сергеев; П. Б. Сергеев, канд. физ.-мат. наук

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: sergandy@mail.ru, psergeev@sci.lebedev.ru

Для изучения образования дефектов в кварцевых стеклах типа КС-4В, КУ-1 и Корнинг 7980 под действием электронного пучка использован метод разложения спектров наведенного поглощения на индивидуальные полосы с максимумами на длинах волн 163,5, 183,5, 213, 225, 244 и 260 нм. У всех стекол интенсивности большинства индивидуальных полос с ростом флюенса электронного пучка насыщались при дозах около 90 МГр. Величина стационарного поглощения на 260, 213 и 183 нм у КС-4В была в 2–4 раза меньше, чем у КУ-1. Интенсивности полос на 163 нм у этих стекол практически совпадали и монотонно возрастали с ростом флюенса электронного пучка. Это говорит об ударном механизме наработки кислороддефицитных центров, ответственных за эту полосу.

Ключевые слова: кварцевое стекло, спектры поглощения, индивидуальные полосы, дефекты, электронный пучок.

Коды OCIS: 160.2220; 160.2750; 300.6250

Поступила в редакцию 09.12.2010

Введение

Высокочистые кварцевые стекла используются для изготовления проходной оптики и световодов, работающих с излучениями разной интенсивности и длинами волн. Эти же стекла, в силу своей чистоты, служат моделями при изучении фундаментальных процессов радиационного дефектообразования [1–2]. Поэтому изучение поведения новых более чистых кварцевых стекол, к которым относится сейчас и российское стекло КС-4В, под действием разнообразных ионизирующих и лазерных излучений актуально и в практическом, и в научном плане.

В ранних работах авторов [3–6] были представлены результаты испытаний поведения кварцевых стекол типа КС-4В, КУ-1 и Корнинг 7980 при длительном воздействии импульсов электронного пучка (ЭП) с энергией электронов около 280 кэВ и общим флюенсом (F) до 20 кДж/см². Там основные зависимости наведенной оптической плотности (ОД) образцов

стекол от F приводились лишь на длине волны 250 нм. Но накопленный массив спектров образцов содержал в себе значительно больше информации. Ее извлечение на основе разложения спектров ОД на индивидуальные полосы (ИП), интенсивность которых пропорциональна концентрации соответствующих дефектов, и было целью данной работы.

Изученные стекла попарно имеют сходства и различия по основным технологическим примесям гидроксидов и хлора. КУ-1 и Корнинг 7980 ArF Grade (далее С8) имеют почти одинаковое количество гидроксидов (≈ 1000 ppm), но различаются по содержанию хлора (≈ 100 и < 20 ppm соответственно). У С8 и КС-4В содержание хлора примерно одинаковое, но в КС-4В практически нет гидроксидов. Сравнение поведения основных дефектов у этих пар стекол позволяет по-новому взглянуть на давно обсуждаемую роль технологических примесей [7–10] в процессах радиационного дефектообразования.

Экспериментальные результаты и методика их обработки

Так как детали методики облучения образцов ЭП изложены в [3–6], здесь приводим лишь ее главные особенности. Образцы стекол облучались на электронной пушке установки ЭЛА (ранее ЭЛ-1 [11]) в импульсном режиме с частотой около 5 мГц. За день делалось до ста таких облучений. Энергия электронов за фольгой электронной пушки не превышает 280 кэВ, плотность тока пучка – до 200 А/см² при длительности импульса 80 нс. Флюенс ЭП за импульс (F_1) был около 2 Дж/см².

Образцы стекол диаметром 12 мм и толщиной 3–4 мм размещали в нишах толстой дюралевой пластины. Со стороны падения ЭП образцы закрывались фольгой из титана толщиной 14 мкм. Это снижало до минимума наводимое в образцах электрическое поле и устраняло их подсветку от люминесцирующего воздуха.

На рис. 1 представлено распределение поглощенной дозы от ЭП за один импульс с $F_1 = 2$ Дж/см² по толщине материала с плотностью кварцевого стекла 2,2 г/см³. Это экспериментальная кривая [3–4], пересчитанная под соответствующую плотность и F_1 . Видно, что поглощенная энергия здесь почти равномерно распределена в приповерхностном слое толщиной около 0,2 мм. При $F = 20$ кДж/см² поглощенная доза в этом слое достигает 400 МГр.

Спектры пропускания образцов $T(\lambda)$ в цифровом формате в области 200–1000 нм с шагом 3 нм регистрировали на спектрофотометре Genesys-2, который допускал проведение измерений уже через час после окончания очередного облучения. Такие измерения выполнялись также до и после измерения образцов в области 150–240 нм на монохроматоре ВМР-2, что делалось примерно через неделю и более после окончания облучения. Затем разные участки “сшивались” в один спектр. В силу сложности работы с ВМР-2 количество спектров в области вакуумного ультрафиолета было значительно меньше, чем в видимом диапазоне.

Оптическая плотность образцов для каждой λ вычислялась по формуле

$$OD = \ln(T_0/T), \quad (1)$$

где T_0 и T – пропускание образца до и после облучения ЭП. Спектры $OD(\lambda)$ разлагались на ИП по разработанной ранее методике [8]. Используемые ИП описывались гауссовым профи-

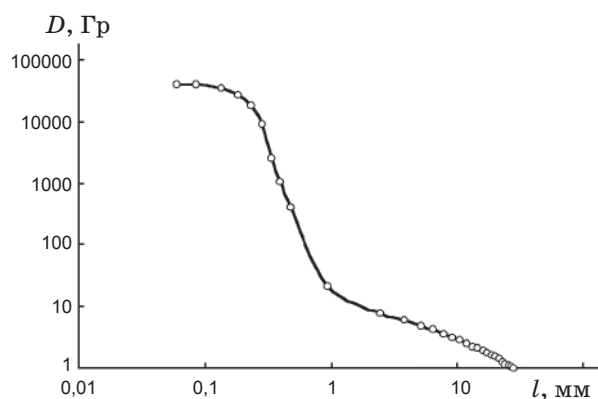


Рис. 1. Распределение поглощенной дозы (D) по толщине материала (l) с плотностью 2,2 г/см³, подвергнутого облучению одним импульсом электронного пучка установки ЭЛА с $F_1 = 2$ Дж/см².

лем по энергии, которые в переменных по длине волны λ рассчитывались по формуле

$$L\lambda_i = A_i \exp\{-\ln 2(E_i/\Delta E_i)^2[(\lambda_i - \lambda)/\lambda]^2\}. \quad (2)$$

Здесь A_i – амплитудный коэффициент полосы в конкретном спектре, E_i – положение ее максимума на шкале энергии, ΔE_i – полуширина полосы, λ_i – положение максимума полосы, i – номер полосы в табл. 1. Расчетные спектры обозначаются далее как SLi и являются суммой вкладов от всех $L\lambda_i$. Процесс разложения конкретных спектров на ИП сводился к подбору перечисленных параметров, при которых в расчетной области величина

$$OD(\lambda) - SLi(\lambda) = Dif(\lambda) \quad (3)$$

по модулю не превышала 0,01.

В табл. 1 даны усредненные параметры ИП, использованных при разложении всех спектров $OD(\lambda)$ исследованных стекол. Вначале про-

Таблица 1. Характеристики полос поглощения кварцевых стекол

i	λ_i , нм	E_i , эВ	ΔE_i , эВ	Поглощающий центр
1	260	4,8	0,54	НАК
2	244	5,1	0,27	?
3	225	5,54	0,25	?
4	213	5,86	0,42	Е'-центр
5	183,5	6,8	0,55	?
6	163,5	7,63	0,33	КДЦ

цедуры разложения спектров характеристики ИП брались из литературы [2, 13–15]. Многократные переповерки вариантов разложения с изменением соответствующих параметров привели к тому, что приведенные в табл. 1 данные, по сути, стали экспериментальными. Они получены на основе обработки по описанной выше методике около сотни спектров наведенного поглощения ЭП, а также их модификаций после воздействия излучения KrF- и ArF-лазеров на кварцевые стекла КУ-1, КС-4В и Корнинг 7980 [5, 6, 16].

Как видно из таблицы, спектры $OD(\lambda)$ исследованных стекол описываются на основе шести ИП, расположенных в области 160–260 нм. В области $260 < \lambda < 1000$ нм наведенное поглощение в стеклах если и присутствовало, то не превышало порога его определения (0,01).

На рис. 2 представлен типичный пример разложения спектра $OD(\lambda)$ образца КС-4В на ИП. Кроме перечисленных шести ИП у КС-4В проявлялась еще узкая полоса в области 152 нм шириной около 0,2 эВ. Присутствие этой полосы отмечалось и ранее [13]. У “влажных” стекол эта область скрадывается сильным поглощением на комплексах $\equiv SiOH$ [17].

Привязка ИП к поглощающим центрам (таблица, последняя колонка) проведена на основе имеющейся информации по дефектам структуры высокочистых стекол [2, 13–15]. Практически однозначно полосы с максимумами 260, 213 и 163,5 нм можно приписать, соответственно, немостиковым атомам кислорода (НАК), E'-центрам и кислороддефицитным центрам (КДЦ). Природа остальных по-

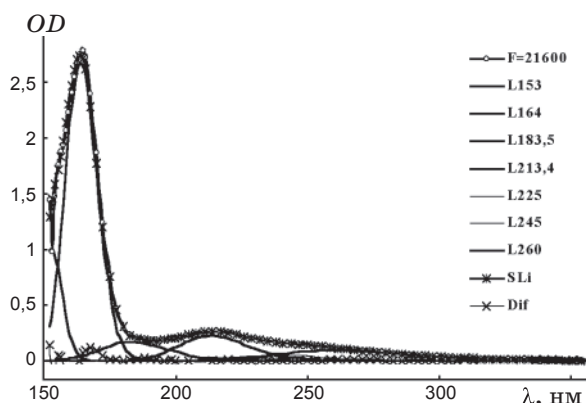


Рис. 2. Пример разложения спектра $OD(\lambda)$ образца КС-4В с флюенсом ЭП $F = 21,6$ кДж/см² на индивидуальные полосы. Линия с кружками – экспериментальный спектр, SLi – расчетный спектр, Dif – их разность.

лос, в том числе и на 183,5 нм, окончательно не установлена, что отражено в последней колонке табл. 1 знаком вопроса.

После разложения спектров на ИП их можно описывать набором коэффициентов A_i . Они равны произведению поверхностной плотности соответствующих дефектов (N_i) на их сечение поглощения в максимуме (σ_i). Отсюда получаем, что

$$N_i = A_i / \sigma_i. \quad (4)$$

Знание N_i упрощает интерпретацию происходящих в стеклах процессов. Но так как для дефектов 2, 3 и 5 их σ_i пока не известны, далее при представлении результатов будем использовать A_i и N_i .

Для выявления процессов, протекающих в стеклах при облучении, нужно иметь максимально полное представление об их исходном состоянии: примеси, дефектность и проч. Частично все это отражается в их исходных спектрах поглощения. Полных данных по стеклу КС-4В найти не удалось. Пришлось их измерять самим с использованием известного метода двух образцов. Он заключается в следующем.

Если коэффициент поглощения α неизменен по толщине материала, то, сделав из последнего два образца разной толщины l_1 и l_2 , где $l_2 > l_1$, и измерив их спектры пропускания T_{01} и T_{02} , можно определить $\alpha(\lambda)$, пользуясь соотношением

$$\alpha(\lambda) = \ln(T_{01}/T_{02}) / (l_2 - l_1). \quad (5)$$

Это выражение и использовалось для определения спектра поглощения в различных образцах стекла КС-4В. На рис. 3 показан один из них. Эти спектры, как и спектры $OD(\lambda)$, разлагались на ИП, но при этом вместо A_i определялись амплитудные значения α_i . У наилучших образцов стекла КС-4В поглощение в полосе на 152 нм составляло не менее $2,6 \text{ см}^{-1}$, на 163,5 нм оно было примерно 1 см^{-1} , на 183,5 нм – $0,1 \text{ см}^{-1}$, на 213 нм – на уровне $0,01 \text{ см}^{-1}$, а на 260 нм – менее $0,005 \text{ см}^{-1}$.

По этим данным можно оценить исходные концентрации дефектов (n_i) из соотношения

$$n_i = \alpha_i / \sigma_i. \quad (6)$$

Сечения поглощения ряда дефектов кварцевых стекол известны: $\sigma_1 = 5,3 \times 10^{-18} \text{ см}^2$, $\sigma_4 = 2,5 \times 10^{-17} \text{ см}^2$, $\sigma_6 = 7,5 \times 10^{-17} \text{ см}^2$ [10–11]. Отсюда получаем, что исходная концентрация КДЦ в КС-4В составляет не менее 10^{16} см^{-3} , E'-центров в нем, как и НАК – не более 10^{15} см^{-3} .

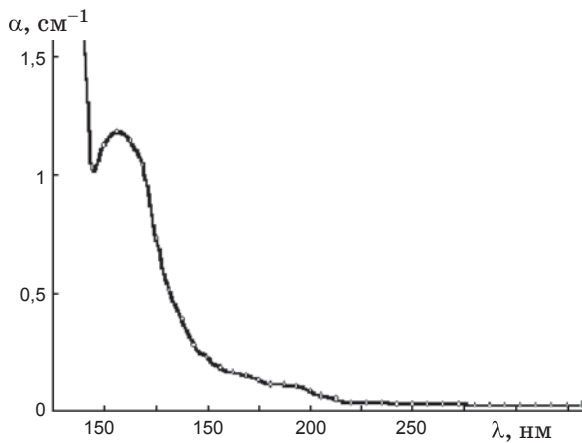


Рис. 3. Исходный спектр поглощения стекла КС-4В.

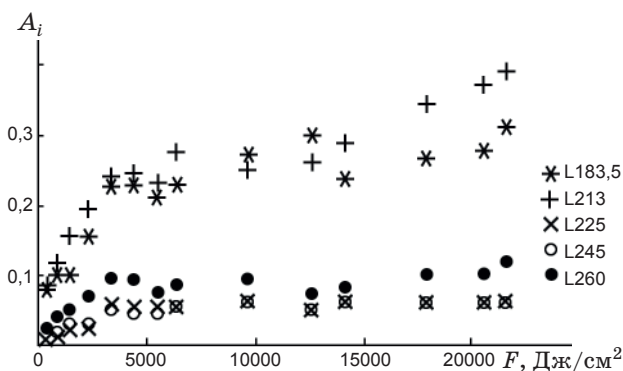


Рис. 4. Зависимости $A_i(F)$ для первых пяти полос стекла КС-4В.

Теперь перейдем к основным экспериментальным результатам. На рис. 4–6 показаны зависимости $A_i(F)$ для образцов стекол КУ-1 и КС-4В. Основная особенность этих зависимостей заключается в насыщении поглощения у первых пяти полос при $F \approx 4\text{--}5$ кДж/см². Это наблюдалось и у образцов фирмы Корнинг.

Интенсивности шестой полосы, как видно на рис. 6, монотонно нарастают во всем диапазоне изменения F , хотя и наблюдается тенденция к насыщению. Здесь важным является факт практического совпадения величин A_6 у таких разных стекол, как КС-4В и КУ-1.

В табл. 2 представлены значения A_i и N_i для спектров образцов стекол с разным временем задержки после окончания облучения электронным пучком. Хотя флюенсы ЭП у этих образцов и различаются, но все они находятся в области насыщения поглощения большинства полос, что позволяет проводить их сравнение. При расчете значений N_i по формуле (4) использовались уже приводившиеся сечения

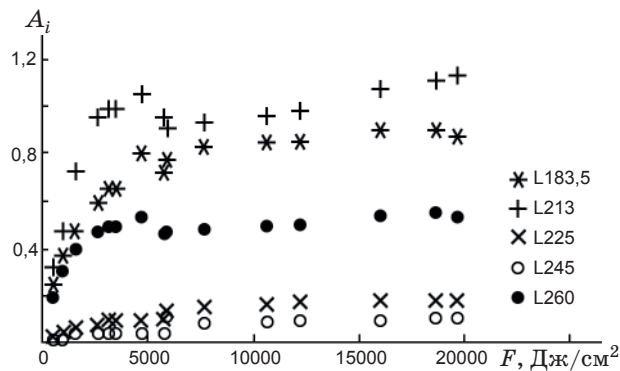


Рис. 5. Зависимости $A_i(F)$ для первых пяти полос стекла КУ-1.

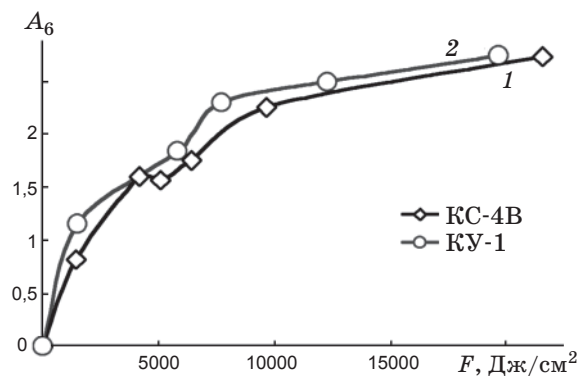


Рис. 6. Зависимости $A_6(F)$ стекол КС-4В (1) и КУ-1 (2).

поглощения из работ [10, 11]. В последней колонке этой таблицы даются важные, с точки зрения авторов статьи, значения отношения $N_1/N_4 = P$, которые отражают диспропорции в количестве НАК и E' -центров.

Обсуждение результатов

Как уже отмечалось, представленные в табл. 1 характеристики ИП можно считать экспериментальными. Их сравнение с имеющимися в литературе данными [2, 13–15] показывает, что различия в λ_i и E_i у всех ИП не превышают 1%. Небольшие различия наблюдаются в значениях ΔE_i у НАК и E' -центров. У слабых второй и третьей полос эти различия более существенны и достигают иногда 100% [13].

Литературных данных по ширине полосы на $\lambda = 183,5$ нм найти не удалось. По-видимому, они являются новыми. Это достаточно сильная полоса, но ее наличие отмечено совсем недавно [13–14]. Ее изучение только начинается. Результаты данного исследования показывают отсутствие жесткой связи интенсивности

Таблица 2. Значения N_i и A_i для ряда спектров образцов стекол

	$N_1 \times 10^{-16}$, см ⁻²	A_2 (245)	A_3 (225)	$N_4 \times 10^{-16}$, см ⁻²	A_5 (183,5)	$N_6 \times 10^{-16}$, см ⁻²	$P = N_1/N_4$
КУ-1 $F = 19,7$ кДж/см ²							
1 час	10,4	0,1	0,175	4,56	0,86	—	2,3
1 сутки	9,06	0,09	0,175	4	0,83	—	2,3
2 года	6,2	0,03	0,08	2,28	0,47	3,6	2,7
С8 $F = 6,4$ кДж/см ²							
1 час	6,04	0,04	0,11	2,32	0,46	—	2,6
1 сутки	5,75	0,037	0,095	2,2	0,44	—	2,61
2 года	4,72	0,026	0,045	1,72	0,31	1,33	2,74
КС-4В $F = 21,6$ кДж/см ²							
1 час	2,26	0,06	0,06	1,64	0,31	—	1,4
1 сутки	2,21	0,06	0,058	1,48	0,31	—	1,5
2,7 года	1,7	0,05	0,04	0,93	0,17	3,65	1,8

этой полосы с другими полосами, что отвергает ее принадлежность НАК [15]. Как видно из табл. 2, этот дефект имеет близкие скорости релаксации с НАК и E'-центрами, что может указывать на наличие у него несвязанного электрона. Он также легко "отжигается" излучением KгF- и ArF-лазеров [16]. Наиболее полно всем этим свойствам удовлетворяет пероксирадикал, но это могут быть и междоузельные молекулы N₂O.

Самые большие различия между литературными и полученными авторами значениями наблюдались в ширине полосы на $\lambda = 163,5$ нм. Возможной причиной этого является наложение на нее ряда узких линий поглощения от неизвестных пока компонентов [16], а также "хвостов" от широких континуумов поглощения комплексов ≡SiOH и междоузельных молекул кислорода и воды [17–19]. Концентрация последних сильно зависит от предыстории образцов, что может сказываться на измеряемых значениях λ_6 и ΔE_6 .

Равенство A_6 у таких разных стекол, как КУ-1 и КС-4В, указывает на идентичность механизмов образования в них КДЦ. Таким универсальным механизмом может быть ударное удаление кислорода из регулярного узла решетки в междоузлие быстрыми электронами с энергией >110 кэВ [2, с. 110] с последующим слиянием образовавшихся при этом двух

близких E'-центров в КДЦ. Вероятность такого слияния должна быть высокой, так как в противном случае будет нарабатываться больше E'-центров, чем НАК.

Если предположение о механизме образования КДЦ верно, то величину A_6 можно использовать в качестве показателя эффективности образования КДЦ конкретным ионизирующим излучением за счет механизма выбивания атома кислорода в междоузлия. Подчеркнем, что при этом число наработанных КДЦ определяет нижнюю границу числа атомов кислорода, выброшенных в междоузлия в процессе облучения, так как возможен еще отрыв кислорода и от НАК.

Оценки показывают, что при облучении образцов изученных стекол электронным пучком в первом режиме [3–5] эффективность наработки в них КДЦ, определяемая как отношение их числа к флюенсу ЭП ($\mu_6 = N_6/F$), в начале облучения ($F \leq 4$ кДж/см²) равна $\mu_6 \approx 5 \times 10^{12}$ Дж⁻¹. За один импульс ЭП с $F_1 = 2$ Дж/см² в приповерхностном слое стекла толщиной 0,02 см плотность выбитых в междоузлия атомов кислорода составляет около 5×10^{14} см⁻³. Уже после десятка таких импульсов общее количество кислорода в междоузлии превысит его предельную концентрацию, достигаемую за счет диффузии из воздуха [18]. Именно этот, нарабатываемый в процессе об-

лучения свободный кислород в междоузлии и будет влиять на распределение первичной дефектности стекла в процессе релаксации.

Для того чтобы понять, как это происходит, обратимся к результатам табл. 2 и посмотрим на отношение числа основных дефектов стеккол – НАК и E'-центров (P). У КС-4В оно равно 1,4 после облучения и возрастает до 1,8 почти за 3 года релаксации. У КУ-1 за 2 года P меняется с 2,3 до 2,7, а у С8 слабо варьируется около 2,5. Как видно, во “влажных” стеклах существует значительное преобладание количества НАК над E'-центрами. Значит, кроме механизма создания комплиментарной пары дефектов из-за разрыва регулярной или напряженной связи $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$, во “влажных” стеклах есть и другие механизмы наработки НАК.

Одним из таких механизмов, очевидно, является отрыв атома водорода от комплекса $\equiv\text{SiOH}$ [2, 7–10]. Он может происходить и за счет ударного выбивания H в междоузлия быстрыми электронами с пороговой энергией всего лишь в 3–4 кэВ (этот низкий порог до сих пор почему-то не замечался), и за счет ионизации связанного гидроксила.

В обратном процессе соединения H с НАК комплекс $\equiv\text{SiOH}$ восстановится, но, вероятно, в другом месте. Из-за диффузии атомов H произойдет пространственное разделение первичных E'-центров и НАК, что приведет к повышению выхода долгоживущих центров. Также могут вести себя и другие одновалентные примесные атомы галогенной и щелочной групп (R), образующие в стекле концевые связи типа $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{R}$ или $\equiv\text{Si}-\text{R}$. Этот механизм, по видимому, и определяет меньшую радиационную прочность большинства стекол с такими примесями.

Повышение выхода долгоживущих НАК при отрыве водорода от $\equiv\text{SiOH}$ происходит лишь в том случае, если атомы H по каким-либо причинам не примут участия в обратном процессе связи с НАК. Одной из таких причин может быть междоузельный кислород. На нем водород “зависает”, образуя свободный радикал OH или H_2O . А у этих молекул другие скорости и доминирующие направления реакций с дефектами и самой решеткой стекла [9]. К таким же последствиям ведут и реакции H с междоузельным хлором, что отмечалось еще в работах [7–8].

Так как С8 и КС-4В в примесях различаются лишь по содержанию гидроксила, реакциям с H и можно приписать существенные различия

у них (см. табл. 2) в P и общем количестве НАК (N_1) и E'-центров (N_4).

Отметим также, что факт существенного доминирования НАК во “влажных” стеклах свидетельствует о малом количестве в них дефектов типа $\equiv\text{SiH}$. В противном случае при отрыве H от этого центра и его последующей более вероятной связи на НАК [20] должны нарабатываться преимущественно E'-центры.

Хлор в стекле образует комплексы типа $\equiv\text{SiCl}$ и $\equiv\text{SiOCl}$. Энергия связи Cl в них примерно одинакова [20]. Значит, число E'-центров и НАК при отрыве хлора также должно быть примерно равным, как и количество обратных реакций. Хорошо заметные из табл. 2 отличия в количестве дефектов и скоростях релаксации у С8 и КУ-1 можно связать с различиями по примеси хлора. Напомним, что в российском стекле его содержание примерно на порядок выше.

Представленные на рис. 4 и 5 графики демонстрируют один из основных результатов работы: в области $F \approx 4-5$ кДж/см² все ИП, кроме первой, выходят на насыщение. Поглощенная доза в приповерхностном слое стекол при этом составляет около 90 МГр (200 кДж/см³). Эта энергия близка к энергии разрыва всех связей Si–O, в предположении, что на одну тратится примерно 10 эВ. Такая стабилизация ИП свидетельствует об установлении равновесия между скоростями наработки и релаксации дефектов.

Можно предположить, что после однократного разрыва всех связей Si–O в стекле падает выход долгоживущих комплиментарных пар дефектов из НАК и E'-центров из-за “выгорания” напряженных связей. Но из проведенного выше анализа видно, что в деталях этих процессов можно разобраться лишь при моделировании кинетики наработки и релаксации всех дефектов стекол с учетом их взаимодействия со свободными электронами, друг с другом, совокупностью междоузельных атомов кислорода, водорода, хлора и большого числа их молекулярных соединений в различных зарядовых состояниях. Это, очевидно, отдельная большая работа, которая выходит за рамки данной публикации.

Заключение

В работе показано, что спектры наведенного электронным пучком поглощения в высококачественных кварцевых стеклах КС-4В, Корнинг 7980 и КУ-1 в области 155–1000 нм можно описать с помощью шести индивидуальных полос.

С ростом флюенса ЭП все ИП, кроме полосы на длине волны 163,5 нм, выходят на насыщение в области поглощенной дозы около 90 МГр. Эта энергия близка к энергии однократного разрыва всех связей Si–O в соответствующем объеме стекла. Одинаковый и монотонный рост полос КДЦ на 163,5 нм во всех исследованных стеклах в процессе облучения ЭП свидетельствует

об универсальности механизма наработки этих дефектов за счет выбивания атомов кислорода в междоузлия быстрыми электронами. Кислород, а также другие междоузельные атомы и молекулы, в первую очередь водород и хлор, взаимодействуя друг с другом и с дефектами стекла, определяют квазиравновесную концентрацию долгоживущих центров окраски.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Абрамов А.В., Боганов А.Г., Корниенко Л.С., Руденко В.С., Рыбалтовский А.О., Чернов П.В.* Радиационные центры окраски в кварцевом стекле КС-4В и в волоконных световодах на его основе // *Физика и химия стекла*. 1988. Т. 14. № 1. С. 91–96.
2. *Силинь А.Р., Трухин А.Н.* Точечные дефекты и элементарные возбуждения в кристаллическом и стеклообразном SiO₂. Рига: Зинатне, 1985. 48 с.
3. *Sergeev P.B., Cheremisin I.I., Ermolenko T.A., Evlampiev I.K., Popov S.A., Pronina M.S., Turoverov P.K., Sergeev A.P., Zvorykin V.D.* E-beam-induced absorption in various grades of quartz // *Proc. of SPIE*. 2004. V. 5506. P. 81–86.
4. *Сергеев П.Б., Ермоленко Т.А., Евлампиев И.К., Зворыкин В.Д., Попов С.А., Пронина М.С., Сергеев А.П., Тuroverov П.К., Черемисин И.И.* Наведенное электронным пучком поглощение в кварцевых стеклах // *Оптический журнал*. 2004. Т. 71. № 6. С. 93–97.
5. *Сергеев П.Б., Сергеев А.П., Зворыкин В.Д.* Радиационная стойкость оптических материалов для окон эксимерных лазеров УФ и ВУФ диапазонов // *Квантовая электроника*. 2007. Т. 37. № 8. С. 706–710.
6. *Сергеев П.Б., Сергеев А.П., Зворыкин В.Д.* Влияние излучения KrF-лазера на наведенное электронным пучком поглощение в флюорите и кварцевых стеклах // *Квантовая электроника*. 2007. Т. 37. № 8. С. 711–715.
7. *Амосов А.В., Дорфман Г.А., Жахов В.В., Корнев В.В., Малышкин С.Ф.* Роль технологических примесей водорода и хлора в радиационных процессах в кварцевом стекле // *Физика и химия стекла*. 1983. Т. 9. № 6. С. 741–744.
8. *Амосов А.В., Корниенко Л.С., Морозова И.О., Рыбалтовский А.О., Чернов П.В.* Особенности радиационно-стимулированного образования немостиковых атомов кислорода в кварцевом стекле КУ-1 (тип 111) // *Физика и химия стекла*. 1987. Т. 13. № 1. С. 126–129.
9. *Силинь А.Р., Миллерс Д.К., Хиноверова И.А.* Влияние радиации на стеклообразный диоксид кремния с примесью гидроксила // *Физика и химия стекла*. 1987. Т. 13. № 3. С. 425–428.
10. *Vaccaro L., Cannas M., Boizot B., Parlato A.* Radiation induced generation of non-bridging oxygen hole center in silica: Intrinsic and extrinsic processes // *J. of Non-Cryst. Solids*. 2007. V. 353. P. 586–589.
11. *Sergeev P.B.* Electron-Beam Noble-Gas Halide Lasers with High Excitation Level // *Journal of Soviet Laser Research*. 1993. V. 14. № 4. P. 237–285.
12. *Сергеев А.П., Сергеев П.Б.* Индивидуальные полосы наведенного поглощения в MgF₂ // *Квантовая электроника*. 2008. Т. 38. № 3. С. 251–257.
13. *Saito K., Ikushima A.J., Kotani T., Miura T.* Effects of preirradiation and thermal annealing on photoinduced defects creation in synthetic silica glass // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 86. № 7. P. 3497–3501.
14. *Skuja L., Hosono H., Hirano M.* Laser-induced color centers in silica // *Proc. SPIE*. 2001. V. 4347. P. 155–168.
15. *Skuja L., Hirano M., Hosono H., Kajihara K.* Defects in oxide glasses // *Physica status solidi (c)*. 2005. V. 2. № 1. P. 15–24.
16. *Сергеев П.Б., Сергеев А.П.* Отжиг наведенного поглощения в кварцевых стеклах излучением ArF-лазера // *Квантовая электроника*. 2010. Т. 40. № 10. С. 24–36.
17. *Vella E., Boscaino R., Navarra G.* Vacuum-ultraviolet absorption of amorphous SiO₂: Intrinsic contribution and role of silanol groups // *Phys. Rev.* 2008. B. 77. 165203(1–6).
18. *Kajihara K., Hirano M., Uramoto M., Morimoto Y., Skuja L., Hosono H.* Interstitial oxygen molecules in amorphous SiO₂. Quantitative concentration analysis by thermal desorption, infrared photoluminescence, and vacuum-ultraviolet optical absorption // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 98. 013527 (1–6).
19. *Kajihara K., Hirano M., Skuja L., Hosono H.* Vacuum-ultraviolet absorption of interstitial O₂ and H₂O molecules in SiO₂ glass // *J. of Non-Cryst. Solids*. 2006. V. 352. P. 2303–2306.
20. *Дианов Е.М., Соколов О.В., Сулимов В.Б.* Численное моделирование дефектов в кварцевом стекле // *Труды ИОФАН*. 1990. Т. 23. С. 122–158.