

Радиационная стойкость оптических материалов для окон эксимерных лазеров УФ и ВУФ диапазонов

П.Б.Сергеев, А.П.Сергеев, В.Д.Зворыкин

Экспериментально изучено поведение современных кварцевых стекол и флюорита при длительном воздействии импульсов электронного пучка с энергией электронов 280 кэВ и общим флюенсом до ~ 30 кДж/см². У всех исследованных материалов наводимое поглощение с ростом флюенса выходило на насыщение. У высокочистых образцов CaF₂ предельные изменения пропускания при таком облучении не превышали 5%–10% в области 120–1000 нм. Квазистационарное поглощение в области ~ 180 –300 нм у стекла марки КС-4В было примерно в 4 раза меньше, чем у стекла КУ-1, и в 2 раза меньше, чем у стекла Corning 7980.

Ключевые слова: оптические материалы, лазерные окна, ионизирующее излучение, радиационная прочность.

1. Введение

Бурное освоение технологическими лазерами УФ и ВУФ диапазонов с особой остротой высветило проблему радиационной прочности оптических материалов (ОМ). Окна коротковолновых газовых лазеров, особенно с электронно-пучковым возбуждением, должны обладать высокой радиационной стойкостью, т. к. именно этот параметр в значительной степени определяет их долговременную работоспособность. Это и делает актуальным экспериментальное изучение радиационной прочности прозрачных в широкой области спектра кристаллов CaF₂, MgF₂, а также кварцевых стекол. Современные высокочистые образцы данных ОМ по свойствам иногда резко отличаются от таких же материалов, производившихся ранее, что и вызывает необходимость их комплексного исследования под действием ионизирующих и лазерных излучений.

Целью данной работы было экспериментальное изучение поведения российских кварцевых стекол КУ-1 и КС-4В в сравнении с образцами производства Corning Inc., а также высокочистых кристаллов CaF₂ под действием электронного пучка (ЭП). Образцы облучались в условиях, максимально близких к условиям работы окон электронно-пучковых эксимерных лазеров [1–5]. Учитывалось также то, что высокая чистота ряда ОМ позволяет использовать их в качестве прототипа «идеально чистых» материалов, результаты исследования которых могут стать базисом для отладки разрабатываемых численных моделей их поведения под действием ионизирующих и лазерных излучений [6–7].

Именно в связи с этим энергия используемых ЭП выбиралась ниже порога ударного дефектообразования в ОМ. Тогда ЭП нарабатывает только электронно-дырочные пары и другие электронные возбуждения, как и в случае двухфотонного поглощения. Электрические поля, возникающие в диэлектриках при облучении пучками заряженных

частиц [8], могут влиять на дефектообразование. Чтобы свести к минимуму эти эффекты, образцы ОМ размещались внутри металлических ниш. Было измерено также распределение поглощенной дозы облучения от используемого ЭП по толщине облучаемых образцов [1–4], что необходимо для определения связи наводимого в ОМ поглощения с характеристиками ионизирующего излучения. Все эти экспериментальные тонкости позволили получить результаты исследования радиационной стойкости перечисленных выше ОМ под действием ЭП в четко определенных условиях облучения, что важно и для теории, и для практики.

2. Методика экспериментов

Основным материалом для крупногабаритных окон мощных электронно-пучковых КгF-лазеров являются кварцевые стекла. Это и определило наш интерес к изучению их возможностей. Для использования в УФ диапазоне изготавливаются стекла марки КУ-1, а также многие их зарубежные аналоги, в частности Corning 7980, относящиеся к стеклам III типа. У них концентрация гидроксидов OH составляет около 1000 ppm, а содержание остальных примесей, в основном хлора, варьируется в пределах от ~ 200 ppm (КУ-1) до 20 ppm (Corning 7980 AgF grade) [3, 4, 9–11]. Наряду с этими стеклами испытывалось также новое российское особо чистое кварцевое стекло марки КС-4В [9], разработанное в Институте химии силикатов им. И.В.Гребенщикова РАН. В настоящее время начато промышленное производство такого стекла на Миасском машиностроительном заводе. Это стекло IV типа [9, 10]. Содержание примесей в нем по 15 основным элементам менее 0.5 ppm, гидроксидов менее 0.1 ppm, а атомов хлора менее 20 ppm [9]. Сравнительные радиационные характеристики всех этих стекол при одинаковых условиях облучения могут оказаться полезными во многих отношениях.

Испытывавшиеся кристаллы высокочистого флюорита, пригодные для работы с лазерным излучением УФ и ВУФ диапазонов, были изготовлены в ГОИ им. С.И.Вавилова. Содержание примесей в них было на уровне 15–17 ppm [1, 2, 5]. (Остальные сведения по образцам будут представлены при описании результатов.)

П.Б.Сергеев, А.П.Сергеев, В.Д.Зворыкин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: psergeev@sci.lebedev.ru

Образцы стекол имели диаметр около 12 мм и толщину 3–4 мм. Поверхности пластин полировались, как правило, по III классу чистоты. Испытания ОМ под действием ЭП проводились на лазерной установке ЭЛА с электронно-пучковым возбуждением [12]. В данных экспериментах лазерная камера с установки была снята, а у фольги электронной пушки размещалась специальная сборка с испытываемыми образцами [1–5]. Сборкой служила толстая дюралевая пластина с выфрезерованными для каждого образца нишами. Со стороны, на которую падает ЭП, образцы прикрывались одним слоем фольги из Ti толщиной 14 мкм. Образцы за фольгой облучались в так называемом первом режиме, когда энергия электронов была ~ 280 кэВ, а плотность энергии за импульс $F_1 \sim 2$ Дж/см². Часть образцов прикрывалась дополнительным фильтром из титановой фольги толщиной 50–100 мкм. У поверхности этих образцов, облучавшихся в так называемом втором режиме, энергия электронов пучка не превышала 100 кэВ, а значение F_1 варьировалось в пределах 0.2–0.8 Дж/см².

Электронная пушка установки ЭЛА работала в импульсном режиме с частотой $\sim 5 \times 10^{-3}$ Гц. При проведении экспериментов в течение рабочего дня делалось от 50 до 150 выстрелов. Энергия электронов за фольгой электронной пушки составляла около 280 кэВ, плотность тока пучка – до 200 А/см², длительность импульса – 80 нс. Полная энергия ЭП за выходной фольгой равнялась 250–300 Дж при площади сечения 4×22 см, а плотность энергии F_1 у фольги достигала 3 Дж/см². Сборка с образцами размещалась на расстоянии 25 мм от разделительной фольги для уменьшения мелкомасштабных неоднородностей плотности энергии ЭП. Здесь F_1 составляла около 2.5 Дж/см², а площадь сечения ЭП с таким флюенсом превышала 70 см², что позволяло одновременно облучать до 25 образцов.

Перед облучением и после серии импульсов с необходимым суммарным флюенсом F электронного пучка пропускание образцов в области 200–1000 нм измерялось на спектрофотометре Genesys-2 фирмы Spectronics, а в области 120–240 нм – с помощью монохроматора ВМР-2. Спектры пропускания регистрировались в виде цифровых таблиц с шагом по длине волны 3 нм. Это позволило применить компьютерную обработку результатов, что упростило их анализ.

Первым шагом в таком анализе было построение из спектров пропускания спектров оптической плотности (ОД) образцов. При этом значение ОД на конкретной длине волны λ вычислялось по формуле

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

где T_0 и T – пропускание образца до и после облучения электронным пучком или какого-либо другого воздействия.

3. Долгоживущее поглощение в кварцевых стеклах, наведенное электронным пучком

Типичные спектры пропускания некоторых из испытанных образцов до и после облучения ЭП в первом режиме и соответствующие спектры наведенной ЭП оптической плотности образцов $OD(\lambda)$ представлены на рис. 1. Отметим, что ВУФ граница пропускания у стекол III типа (КУ-1 и образцы Corning Inc.) до облучения практически совпадают. Эта граница определяется концент-

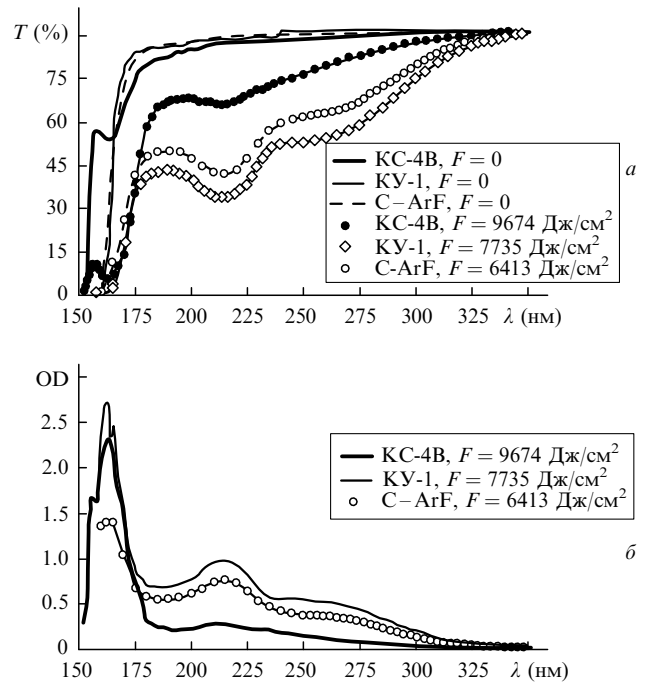


Рис. 1. Спектры пропускания образцов стекол KC-4B, КУ-1 и Corning 7980 (ArF grade – C-ArF) до и после облучения электронным пучком установки ЭЛА (а) и спектры наведенной оптической плотности для тех же образцов (б) при различных флюенсах пучка F .

рацией гидроксильной группы (у всех этих стекол она составляет около 1000 ppm). У стекла KC-4B содержание ОН почти на 4 порядка меньше, а ВУФ граница его пропускания смещена в коротковолновую область примерно на 10 нм.

Как видно из рис. 1, характерные изменения в спектрах пропускания образцов после облучения ЭП наблюдаются в области с $\lambda < 350$ нм (в видимом диапазоне вплоть до ~ 1000 нм пропускание не изменялось). Потеря прозрачности всех стекол под действием ЭП в коротковолновой области достаточно велика. Это необходимо учитывать при создании технологических электронно-пучковых эксимерных лазерных установок.

Спектры наведенной ЭП оптической плотности, представленные на рис. 1, б, практически тождественны спектрам, возникающим под действием и других ионизирующих излучений [13–15]. При этом стоит отметить, что отношения интенсивностей основных линий поглощения в области 180–350 нм у каждой марки стекла сохраняются в широком диапазоне значений флюенсов. Данный факт облегчает описание зависимостей спектров наведенного поглощения в указанной области от характеристик ионизирующих излучений, в частности от флюенса ЭП: достаточно установить эту зависимость на одной из длин волн. Нам это удобно делать на $\lambda = 250$ нм.

На рис. 2 показаны зависимости ОД на $\lambda = 250$ нм (OD_{250}) от флюенса для образцов стекол Corning 7980 (Standard grade – C-0, KrF grade – C-KrF, ArF grade – C-ArF), КУ-1 и KC-4B, полученные в одинаковых условиях облучения на установке ЭЛА в первом режиме с флюенсами до 6.5 кДж/см². Здесь же для сравнения приводятся результаты измерений для стекол КУ-1 и KC-4B, полученные в аналогичных условиях в более ранних экспериментах [3, 4].

Из рис. 2 видно, что с ростом флюенса ЭП величина наведенного поглощения у всех испытанных стекол вы-

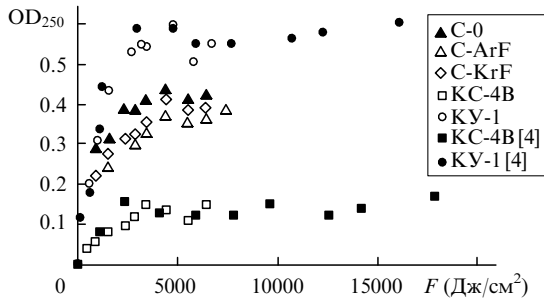


Рис.2. Зависимости наведенной оптической плотности на $\lambda = 250$ нм от флюенса ЭП для различных образцов стекол; ■, ● – результаты аналогичных измерений, взятые из [4].

ходит на насыщение. В режиме насыщения минимальное поглощение было у стекла KC-4B. Для него максимально достигнутое в этих экспериментах значение оптической плотности OD_{250}^{\max} составило 0.15. Из стекол III типа наилучшую радиационную прочность имеет Corning 7980 (ArF grade – C-ArF). Для него $OD_{250}^{\max} = 0.37$. У остальных стекол наблюдалось увеличение OD_{250}^{\max} с ростом концентрации примеси хлора. У наиболее «грязного» по данной примеси стекла KY-1 она составила 0.6.

Как было установлено ранее, наведенное поглощение на квазистационарном участке в УФ области у стекла KY-1 пропорционально средней мощности облучения электронным пучком [3, 4]. Аналогичная зависимость наблюдается и у других марок стекол этого типа.

У стекла KC-4B зависимость OD от средней мощности облучения электронным пучком на квазистационарном участке существенно слабее. У него при почти десятикратном различии в мощностях облучения значения насыщенного поглощения различаются примерно в 1.5 раза [4].

Зависимости наведенной оптической плотности от флюенса показывают, что процесс наработки долгоживущих центров окраски под действием ЭП является нелинейным. Его нельзя описать одним параметром – эффективностью наработки центров. Наряду с наработкой происходит и их релаксация. На рис.3 показаны зависимости от времени спада поглощения в образцах Corning 7980 после последнего импульса ЭП. Аналогичные временные зависимости OD наблюдались и у стекол KY-1 и KC-4B. Экстраполяционные зависимости OD от времени t на $\lambda = 250$ нм (линии на рис.3) описываются выражениями вида

$$OD_{250} = A - B \ln t, \quad (2)$$

где t измеряется в секундах, а значения соответствующих

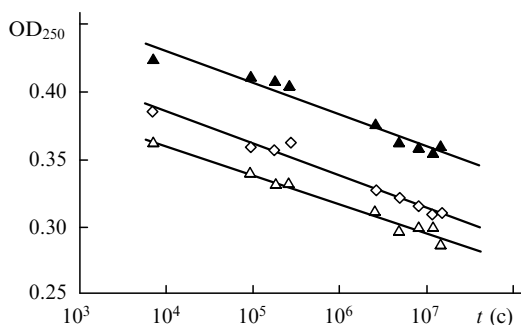


Рис.3. Уменьшение OD_{250} со временем после окончания облучения электронным пучком у образцов стекол Corning 7980. Обозначения материалов такие же, как на рис.2.

Табл.1.

Марка стекла	A	B
KY-1	0.82	0.024
C-0	0.53	0.01
C-KrF	0.45	0.009
C-ArF	0.45	0.0093
KC-4B	0.18	0.0045

коэффициентов A и B для всех исследованных марок стекол представлены в табл.1.

Эти коэффициенты получены по экспериментальным результатам на временном интервале $\sim 4 \times 10^3 - 10^7$ с при хранении образцов в темноте при комнатной температуре. Особо следует отметить, что результаты по релаксации OD получены на образцах с очень большой неоднородностью распределения поглощенной дозы от ЭП по толщине [1 – 5]. Условия хранения образцов после облучения также важны. Так, прогрев образцов Corning Inc. и стекла KY-1 в течение примерно 20 часов при температуре около 400°C практически полностью устраняет наведенное поглощение. Для отжига поглощения у стекла KC-4B времени требуется больше. Световое облучение также сказывается на релаксации наведенного поглощения.

Полученные результаты показывают, что, исходя из радиационной прочности, стекло марки KC-4B является наилучшим из испытанных материалом для изготовления окон электронно-пучковых эксимерных лазеров УФ диапазона.

4. Поглощение во флюорите, наведенное электронным пучком

В работах [1, 2, 5] представлены наши первые результаты изучения поведения высокочистых образцов CaF_2 и MgF_2 под действием ЭП установки ЭЛА. Эти эксперименты были продолжены, и при исследовании CaF_2 был получен ряд новых результатов.

На рис.4,а показана типичная сводная картинка из спектров пропускания одного из шести образцов высокочистого CaF_2 , облучавшихся с марта 2003 г. по июль 2005 г. и накопивших к концу данного цикла $F > 26$ кДж/см². Отметим, что все образцы этой группы имеют размеры 10×10 мм, что не совпадает с размером окна на спектрофотометре (5×11 мм). Из-за этого всегда присутствовавшие незначительные смещения образцов при их креплении на окне спектрофотометра приводили к параллельному смещению спектра в область меньших значений T , что явно видно из рис.4,а. Значение такого смещения варьируется в пределах 5%. Эта систематическая ошибка сравнима с величиной наведенного поглощения.

В связи с этим на последнем этапе данных экспериментов к старой группе образцов CaF_2 был добавлен новый образец, изготовленный из центральной части булы диаметром 100 мм. По сведениям производителя (ГОИ им. С.И.Вавилова) этот материал обладал предельно высокой чистотой. Результаты по новому образцу CaF_2 с размерами $20 \times 20 \times 5$ мм (рабочий номер 2/3) показаны на рис.4,б. Подчеркнем, что этот образец, как и все прочие образцы CaF_2 , все время облучался в максимально жестком первом режиме (при использовании одной титановой фольги толщиной 14 мкм в качестве фильтра) с флюенсом за импульс в пределах $2 - 2.4$ Дж/см² и энер-

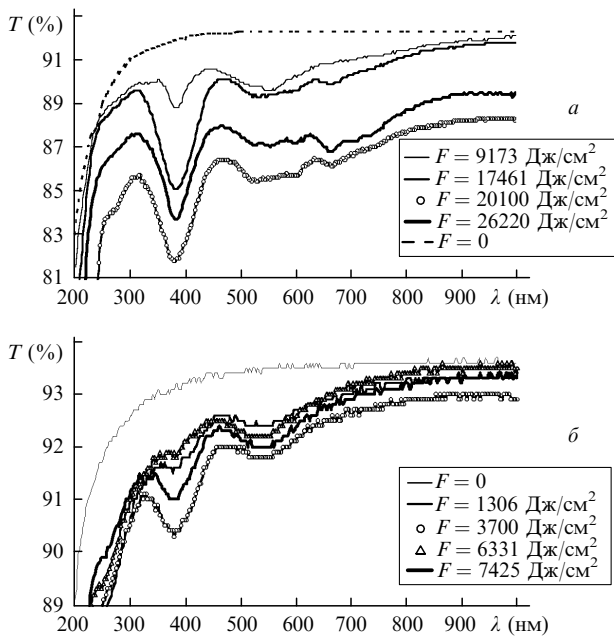


Рис.4. Спектры пропускания одного из шести «старых» образцов CaF₂ № 8 (а) и образца № 2/3 (б) после облучения ЭП с различными флюенсами.

гией электронов около 280 кэВ. На рис.4,б также заметен параллельный сдвиг спектров, но уже в пределах 0.5 %, что близко к точности калибровки спектрофотометра. На этом уровне может проявляться и запыление образца.

На рис.5 представлены спектры оптической плотности для образца № 2/3 через различные промежутки времени после окончания облучения ЭП с $F = 7425 \text{ Дж/см}^2$. Эти спектры несколько отличаются от аналогичных спектров у старой группы образцов [5]. Здесь наблюдается новая полоса поглощения с максимумом на $\lambda = 260 \text{ нм}$ и более четко выделилась полоса с максимумом в области 540 нм. Эти полосы практически не изменились за год хранения образца.

Наиболее сильная полоса поглощения с максимумом на $\lambda = 379 \text{ нм}$ принадлежит F-центрам [16]. Она четко проявляется у всех исследованных образцов CaF₂ (рис.4) и поэтому была использована для характеристики их радиационной прочности. Для количественного описания конкретных кривых была выбрана величина провала в спектрах пропускания на $\lambda = 379 \text{ нм}$, которая определялась так:

$$\Delta D = [(T_1 - T_m) + (T_2 - T_m)]/2. \quad (3)$$

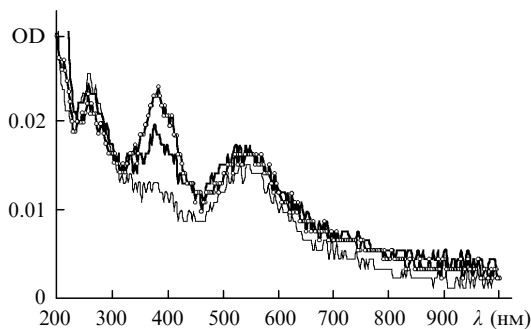


Рис.5. Спектры OD для образца CaF₂ № 2/3 через 2 часа (○), через сутки (жирная кривая) и через месяц (тонкая кривая) после окончания облучения ЭП с $F = 7425 \text{ Дж/см}^2$.

Здесь T_m – значение пропускания на $\lambda = 379 \text{ нм}$, T_1 и T_2 – максимальные значения пропускания образца слева и справа от провала. Из-за малого значения ΔD выполнялось соотношение $\Delta D = \Delta OD$. Использование этой величины для количественной характеристики радиационной прочности флюоритовых образцов позволяет устранить систематическую ошибку, связанную с параллельным сдвигом спектров при различных измерениях пропускания.

У всех испытанных образцов CaF₂ не было видно явной зависимости между наведенным поглощением и F . Причинами этого могли быть быстрая релаксация наводимых центров окраски и различия в задержке измерений пропускания образцов после их облучения, которая изменялась в разных экспериментах от 2 часов до 5 суток. На рис.5 отчетливо заметна релаксация полосы поглощения с максимумом на $\lambda = 379 \text{ нм}$ у образца № 2/3. Для выяснения влияния времени задержки между окончанием облучения и измерением пропускания все исследовавшиеся флюоритовые образцы прописывались через два часа после последнего выстрела, затем через сутки, двое, трое суток, через месяц и год. По этим результатам были построены временные зависимости ΔD для образца № 2 и усредненной по 6 старым образцам ΔD (рис.6). Видно, что за первые сутки после облучения значение ΔD у них падает в среднем на 30 %, а за трое суток оно уменьшается практически вдвое. У старых образцов ΔD уменьшилась за год в среднем в 3.2 раза.

Экстраполяционные временные зависимости ΔD на 379 нм (прямые на рис.6) описываются, как и у кварцевых образцов, выражением (2). Значения коэффициентов A и B для усредненных данных по «старым» образцам составляют 0.0533 и 0.0025, а у образца № 2/3 они равны 0.0238 и 0.0014.

Уменьшение со временем величины поглощения в F-полосе должно сопровождаться уменьшением концентрации и, следовательно, поглощения H-центров, чьи полосы расположены в области 310 и 700 нм ([16], с. 115). Но, скорее всего, это поглощение мало, и мы его не видим. Наблюдаемые же полосы с максимумами на $\lambda = 260$ и 540 нм принадлежат не френкелевским дефектам. Они могут быть связаны с примесью кислорода, диффундирующего в образцы в процессе облучения [5, 17], или принадлежать другим примесным или поверхностным центрам окраски [18, 19]. Стоит отметить, что проведенное нами сравнение облученной и не облученной поверхности образцов CaF₂ под электронным микроскопом показало заметное повышение шероховатости облученной поверхности. Аналогичные эффекты наблюдались ранее

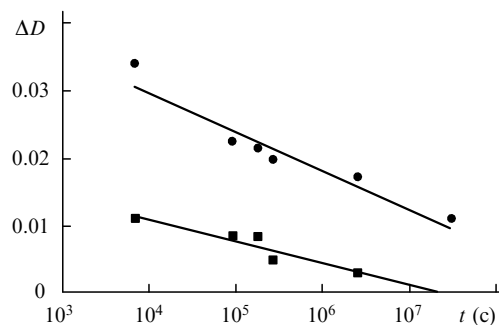


Рис.6. Релаксация ΔD на $\lambda = 379 \text{ нм}$ для образца № 2/3 (■) и усредненная ΔD по шести «старым» образцам из CaF₂ (●).

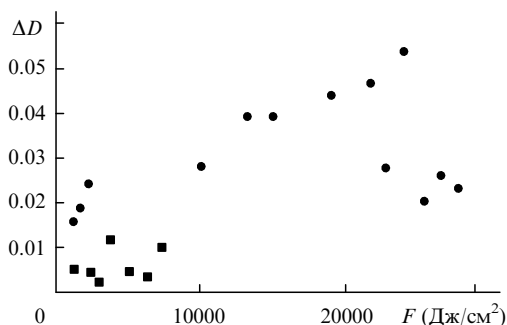


Рис. 7. Зависимость ΔD на $\lambda = 379$ нм от флюенса для образца № 2/3 (■) и усредненная ΔD по шести «старым» образцам из CaF_2 (●).

при облучении образцов CaF_2 синхротронным излучением [18, 19]. У кварцевых образцов, как и у MgF_2 и Al_2O_3 , изменений в структуре облученной электронным пучком поверхности мы не обнаружили.

Величина ΔD была использована и для анализа роста наведенного ЭП поглощения в CaF_2 с увеличением F . На рис. 7 представлена вся совокупность данных по ΔD , усредненных по группе из 6 «старых» образцов, а также данные для образца № 2/3 при различных F . Все результаты на рис. 7 получены при суточной задержке в измерении пропускания образцов после окончания очередной серии облучающих импульсов ЭП. Но даже в этом случае наблюдается примерно двукратный разброс в результатах при близких значениях F . Анализ причин такого разброса показал, что результаты по «старым» образцам с $\Delta D \sim 0.025$ получались в сериях облучения со средним темпом стрельбы на уровне 50–70 имп./день. Большие значения ΔD наблюдались при мощностях облучения ~ 100 –150 имп./день. Аналогичная корреляция между ΔD и средней мощностью облучения за серию наблюдалась и у образца № 2/3, но при меньших максимальных значениях ΔD .

Из полученных результатов по образцам высококачественного CaF_2 можно сделать следующие выводы:

1. Наведенное электронным пучком поглощение на собственных дефектах во флюорите выходит на насыщение, уровень которого определяется средней мощностью облучения. Это обусловлено быстрой релаксацией образующихся пар F- и H-дефектов.

2. В предельно чистых образцах CaF_2 максимальные значения зарегистрированного поглощения после облучения электронным пучком на установке ЭЛА не превышали 5%–10% в диапазоне 120–1000 нм.

3. Основная часть наводимого ЭП долгоживущего поглощения в CaF_2 связана с примесями, имеющимися в кристалле или диффундирующими в объем с поверхностью в процессе облучения.

4. Окна из высококачественных кристаллов CaF_2 даже в электронно-пучковых эксимерных лазерах УФ и ВУФ диапазонов обеспечат им высокую работоспособность.

5. Заключение

В работе экспериментально изучено поведение современных кварцевых стекол и флюорита для окон газовых лазеров УФ и ВУФ диапазонов при длительном воздействии ЭП с энергией электронов менее 280 кэВ и флюенсом $F \leq 30$ кДж/см². У высококачественных образцов CaF_2 предельные изменения пропускания при облучении ЭП с $F \leq 30$ кДж/см² не превысили 5%–10% в видимом, УФ

и ВУФ диапазонах. Окна из таких кристаллов CaF_2 могут обеспечить надежную длительную работу как электроразрядных, так и электронно-пучковых эксимерных лазеров с длинами волн излучения, превышающими 150 нм.

Эксперименты показали, что наведенное электронным пучком поглощение в области ~ 180 –300 нм у нового российского стекла марки КС-4В примерно в 4 раза меньше, чем у стекла КУ-1, и более чем в 2 раза меньше, чем у стекла Corning 7980. Это делает стекло КС-4В перспективным для изготовления окон мощных лазеров УФ диапазона.

При проведении испытаний ОМ на радиационную прочность использовался ЭП с энергиями электронов ниже порога деструктуризации материалов в результате прямого выбивания атомов решетки. Для применявшегося ЭП было измерено распределение поглощенной дозы по толщине поглотителя. Такая специфика экспериментов дает возможность использования полученных результатов для отладки численных моделей долговременного поведения ОМ под действием ионизирующего и интенсивного лазерного излучений УФ и ВУФ диапазонов, которые являются мощным источником ионизации материалов в результате действия двухфотонных процессов.

Полученные в работе экспериментальные данные по радиационной прочности современных кварцевых стекол и флюорита необходимы для более глубокого понимания физики радиационных процессов и для их моделирования. Эти результаты будут полезны для производителей оптических материалов, а также для разработчиков лазерных и других источников УФ и ВУФ излучения.

Выражаем большую благодарность И.А.Миронову, В.М.Рейтерову, И.К.Евлампиеву, J.L.Giuliani, J.D.Sethiani, M.F.Wolford за предоставление образцов оптических материалов, а также Д.Б.Ставровскому, Н.Ф.Стародубцеву и Г.Г.Дубровской за помощь в спектральных измерениях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 05-02-16195-а) и Naval Research Laboratory program.

1. Mironov I.A. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5479**, 135 (2004).
2. Sergeev P.B. et al. *Proc. 12th Int. Conf. Radiation Phys. and Chem. of Inorganic Mater.* (Tomsk, 2003, p. 82).
3. Sergeev P.B. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5506**, 81 (2004).
4. Сергеев П.Б. и др. *Оптический журнал*, **71** (6), 93 (2004).
5. Сергеев П.Б. и др. *Оптический журнал*, **72** (6), 85 (2005).
6. Курбасов В.С., Сергеев П.Б. *Квантовая электроника*, **30**, 703 (2000).
7. Сергеев П.Б. *Квантовая электроника*, **32**, 344 (2002).
8. Боев С.Г., Ушаков В.Я. *Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики* (М.: Энергоатомиздат, 1991, с. 12).
9. Черемисин И.И. В сб. РАН: *Физикохимия силикатов и оксидов* (СПб.: Наука, 1998, с. 253).
10. Лeko В.К., Мазурин О.В. *Свойства кварцевого стекла* (Л.: Наука, 1985).
11. <http://www.corning.com/>
12. Sergeev P.B. *J. Sov. Laser Research*, **14** (4), 237 (1993).
13. Jani M.G., Hallibuto L.E. *J. Appl. Phys.*, **56**, 942 (1984).
14. Marshall C.D., Speth J.A., Payne S.A. *J. Non-Cryst. Sol.*, **212**, 59 (1997).
15. Latkowski J.F. et al. *Fusion Sci. Technol.*, **43**, 540 (2003).
16. Стоунхэм А.М. *Теория дефектов в твердых телах* (М.: Мир, 1978, т.2, с. 16).
17. Чередов В.Н. *Дефекты в синтетических кристаллах флюорита* (СПб.: Наука, 1993, с. 99).
18. Gatto A. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4932**, 366 (2002).
19. Guenster S. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4932**, 422 (2002).