

Влияние излучения КrF-лазера на наведенное электронным пучком поглощение в флюорите и кварцевых стеклах

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

Исследовано поведение высокочистого флюорита и кварцевых стекол типа КУ-1, КС-4В и Corning 7980 при воздействии электронного пучка и излучения КrF-лазера. Облучение образцов оптических материалов этим лазерным излучением при интенсивностях ~ 5 МВт/см² как в момент воздействия электронного пучка, так и после него приводит к уменьшению остаточного поглощения не менее чем в 1.5 раза.

Ключевые слова: оптические материалы, излучение КrF-лазера, ионизирующее излучение, радиационная прочность.

1. Введение

Кварцевые стёкла и флюорит являются основными материалами для изготовления окон мощных КrF-лазеров и других эксимерных лазеров с электронно-пучковым возбуждением. Радиационная прочность материалов этих окон, работающих при воздействии рассеянных из пучка накачки электронов, рентгеновского и интенсивного лазерного излучения, в значительной степени определяет работоспособность, и, следовательно, перспективы использования этих лазеров [1–4]. Проблемы радиационной стойкости возникают и при работе с синхротронным излучением, в резонаторной оптике лазеров на свободных электронах [5, 6] и в окнах реакторов для лазерного термоядерного синтеза [7, 8]. Все это свидетельствует о необходимости и актуальности изучения возможностей оптических материалов (ОМ) работать при воздействии разных ионизирующих и лазерных излучений.

В рамках работ по исследованию перспектив использования КrF-лазера с электронно-пучковым возбуждением в качестве драйвера для лазерного термоядерного синтеза нами было изучено поведение ряда современных кварцевых стекол и кристаллов высокочистого СаF₂ при длительном воздействии импульсов электронного пучка (ЭП) [2, 3, 9]. Настоящая работа является продолжением этих исследований. Нашей целью было изучение влияния излучения КrF-лазера на наведенное ЭП остаточное поглощение в исследованных ранее образцах кварцевых стекол КУ-1, КС-4В, Corning 7980, а также высокочистого СаF₂. При этом эксперименты планировались так, чтобы получаемые результаты могли прояснить физическую картину происходящих в ОМ под действием ЭП и лазерного излучения процессов и послужить базисом для отладки их моделей.

2. Радиационная прочность кварцевых стекол при одновременном воздействии электронного пучка и излучения КrF-лазера

Как было показано в [2, 3, 9], при длительном облучении образцов кварцевых стекол и высокочистого флюорита

ЭП их прозрачность уменьшается и выходит на новый квазистационарный уровень. Но окна электронно-пучковых лазеров облучаются не только ионизирующим излучением (ИИ), состоящим из рассеянных из пучка накачки электронов и рентгеновского излучения, но и лазерным излучением (ЛИ). И вопрос о том, что будет с ОМ при таком комплексном воздействии, интересен не только в практическом, но и в научном плане. В данном разделе приводятся экспериментальные результаты, дающие ответ на этот вопрос для кварцевых стекол, облучаемых электронным пучком одновременно с излучением КrF-лазера.

Эксперименты выполнялись на установке ЭЛА (ранее ЭЛ-1 [10, 11]). В обычных условиях работы плотность энергии ИИ на окне лазерной камеры за импульс $F_1 \approx 0.1$ Дж/см² [1]. При обычном темпе стрельбы установки (5×10^{-3} Гц) и такой плотности F_1 максимальное наведенное поглощение даже в образцах из стекла КУ-1, которое является наименее радиационно прочным из испытываемых кварцевых стекол, не превышает 9%. У стекла КС-4В при указанном значении F_1 наведенное поглощение не превышает 2%–3%, что находится на грани чувствительности спектрофотометров. Для повышения наводимого ИИ поглощения необходимо было увеличить F_1 .

Для этого в лазерной камере установки ЭЛА были размещены постоянные магниты. Их магнитное поле, перпендикулярное направлению распространения электронного пучка накачки, поворачивало его часть в сторону одного из выходных окон лазера. Измерения плотности энергии ЭП с помощью калориметра показали, что F_1 в области поверхности окна в этом случае достигает 0.4 Дж/см². Распределение плотности энергии ЭП по свободной поверхности окна было достаточно однородным, что проверялось по его отпечатку на винилпластовой пластине, использовавшейся вместо окна в отладочных экспериментах. Затем в этом месте устанавливалось выходное окно из исследуемого оптического материала. На втором окне лазера размещалось плоское зеркало резонатора с $R_b = 100\%$ на 248 нм. Выходное плоское резонаторное зеркало с $R_o = 44\%$ устанавливалось вне лазерной камеры вблизи выходного окна.

Особенность данного эксперимента заключалась в том, что дополнительной диафрагмой, расположенной возле зеркала с $R = 100\%$ внутри лазерной камеры, перекрывалась половина лазерного пучка. В результате ла-

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

зерная генерация происходила на одной половине кругового сечения световой апертуры лазера. При этом только половина исследуемого образца, служившего окном, облучалась ЛИ, в то время как ЭП облучал его полностью. Сравнение наведенного поглощения в каждой из половинок окна после серии выстрелов установки ЭЛА позволяло выявить различие в поглощении при воздействии на образец только ЭП и ЭП одновременно с ЛИ. Все прочие различия в экспериментальных факторах, которые могли сказываться на наведенном поглощении (материал окна и условия его облучения) при этом устранялись.

В данных экспериментах КrF-лазер работал на газовой смеси из Ar – Kr – F₂ при соотношении Ar:Kr = 10:2, давления F₂ не более 0.005 атм и общем давлении 1.1 атм. Именно при этом давлении плотность энергии ЭП на окне составляла в среднем 0.4 Дж/см². Различия в плотностях газовой смеси лазера и воздуха, в котором и проводилось измерение энергии ЭП в области окна в калибровочных экспериментах, компенсировалось дополнительным фильтром из алюминиевой фольги перед калориметром.

В связи с тем, что исследуемое окно располагалось внутри резонатора лазера, полная интенсивность ЛИ и, следовательно, плотность энергии ЛИ на нем (E_w) складывались из интенсивностей прямого и обратного пучков. Величина E_w при $R_b = 100\%$ в этом случае связана с плотностью выходной энергии лазера (E_o) соотношением

$$E_w = E_o(1 + R_o)/(1 - R_o). \quad (1)$$

При $R_o = 44\%$ получаем

$$E_w = 2.57E_o.$$

В этих экспериментах энергия выходного лазерного излучения измерялась с помощью калориметра БКДМ в каждом выстреле. Величина E_o определялась путем деления среднего значения выходной энергии лазера за всю серию импульсов с исследуемым окном на площадь сечения пучка выходного ЛИ. Интенсивность ЛИ на окне (I_w) вычислялась из выражения

$$I_w = E_w/\tau, \quad (2)$$

где $\tau = 80$ нс – длительность импульса ЛИ.

По данной методике было испытано пять образцов кварцевых стекол: три образца Corning 7980 (Standard Grade – C-0, KrF grade – C-KrF, ArF grade – C-ArF), КУ-1 и КС-4В. В связи с тем, что диаметр образцов фирмы Corning Inc. был 52 мм, а толщина – 10.5 мм, при их установке на окно лазерной камеры использовался небольшой переходной фланец. При этом световой диаметр лазера уменьшался с обычных 52 до 42 мм. Диаметр образцов КУ-1 и КС-4В составлял 60 мм при толщине 17 мм. Для них световая апертура была обычной.

Испытываемые образцы окон работали на лазерной камере 6–7 дней, в течение которых на установке производилось около 400 выстрелов. Полная плотность F энергии ЭП на их поверхности за это время достигла ~ 160 Дж/см². Средняя плотность энергии E_w излучения КrF-лазера на облучавшейся половинке окна за импульс составляла в этих экспериментах ~ 0.3 Дж/см² при интенсивности $I_w \approx 4$ МВт/см². Примерно через час и через день после последнего выстрела каждая половинка окна

прописывалась на спектрофотометре Spectronics Genesis-2 в области 200–1000 нм.

Типичные спектры пропускания одного из исследованных образцов (C-ArF) до и после воздействия только ЭП, а также ЭП и ЛИ представлены на рис.1. Видно, что область, подвергшаяся воздействию ЭП и ЛИ, имеет большее пропускание, чем область, облучавшаяся только ЭП. Такое различие наблюдалось во всем видимом диапазоне спектра при $\lambda > 350$ нм, где наведенное ЭП поглощение отсутствует [2, 9]. По-видимому, этот эффект связан с лазерной очисткой поверхности. Он наблюдался на всех испытанных кварцевых образцах.

Из спектров пропускания образцов после воздействия ЭП (E) и ЭП и ЛИ (L) (кривые 2 и 3 на рис.1) на основе поточечного преобразования по формуле

$$OD = \ln(T_0/T) \quad (3)$$

были построены спектры оптической плотности (рис.2). Видно, что в случае одновременного воздействия ЭП и ЛИ наведенная оптическая плотность оказывается заметно меньше. Для количественного описания этого различия был выбран коэффициент K_{EL} , который определялся следующим образом:

$$K_{EL} = \frac{(OD_{250} - OD_{400})_L}{(OD_{250} - OD_{400})_E}, \quad (4)$$

где OD_{250} и OD_{400} – оптическая плотность на $\lambda = 250$ и 400 нм соответственно.

Выражение (4) позволяет устранить неопределенность, связанную с выбором нулевого уровня оптической плотности для участков образца с разной чистотой поверхности.

Полученные в данных экспериментах значения коэффициентов K_{EL} для всех исследованных образцов кварцевых стекол представлены в табл.1.

Среднее по всем образцам K_{EL} составляет 1.5. Ошибка определения K_{EL} не превышает 20%. Следовательно, с точностью до ошибки измерения значение K_{EL} у всех исследованных образцов стекол одинаково и равно 1.5. Другими словами, в окнах электронно-пучковых КrF-лазеров, изготовленных из исследованных кварцевых стекол, наведенное ИИ поглощение будет в 1.5 раза меньше, чем при воздействии на них в том же режиме лишь одного ИИ.

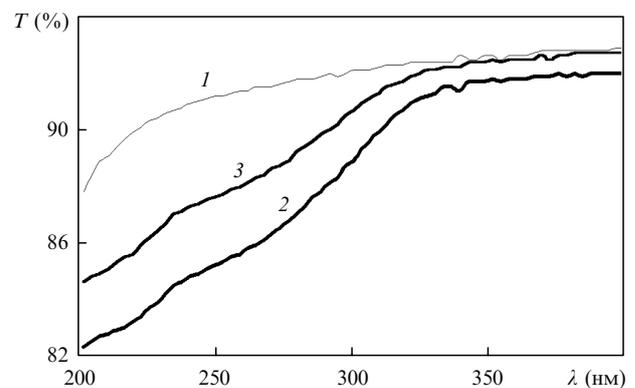


Рис.1. Спектры пропускания соответствующих половинок образца стекла Corning 7980 (ArF grade – C-ArF) до (1) и после облучения ЭП (2), а также ЭП одновременно с излучением КrF-лазера (3).

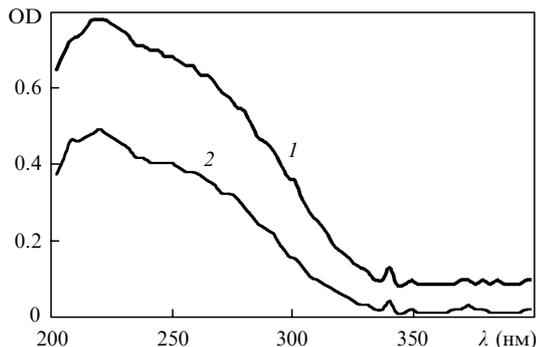


Рис.2. Спектры оптической плотности для половинок образца C-ArF, облученных только ЭП (1) и ЭП одновременно с излучением КrF-лазера (2).

Табл.1.

Марка стекла	K_{EL}
C-0	2
C-KrF	1.32
C-ArF	1.5
КС-4В	1.55
КУ-1	1.2

Аналогичные эксперименты с образцами кристаллов высокочистого флюорита не проводились в связи с тем, что при использовавшемся в экспериментах режиме облучения образцов ЭП наводимое в CaF_2 поглощение составляло не более 1%, т.е. находилось на пороге чувствительности спектрофотометра, и выявить различия в поглощении для разных режимов облучения здесь было практически невозможно.

3. Отжиг наведенного ЭП поглощения в ОМ излучением КrF-лазера

Уменьшение наведенного ИИ поглощения в кварцевых стеклах в случае одновременного воздействия на них ИИ и излучения КrF-лазера может быть обусловлено двумя основными причинами. Первая – уменьшение выхода долгоживущих дефектов в стекле в каждом импульсе такого комплексного воздействия излучений. Вторая – лазерный отжиг дефектов, наработанных за предшествующие импульсы ИИ. Выявить главную причину уменьшения можно с помощью экспериментов по раздельному воздействию на образцы ОМ сначала ИИ, а потом ЛИ.

В процессе длительных экспериментов по изучению поведения ОМ под действием ЭП [2, 3, 9] у нас накопился набор образцов, облученных с разными флюенсами и имевших значительное поглощение в интересующей нас УФ области спектра. Часть из них и была взята для изучения влияния излучения КrF-лазера на наведенное ЭП остаточное поглощение.

В экспериментах были использованы два образца стекла КУ-1 – № 2/2 ($F = 18.7$ кДж/см²) и № 2/3 ($F = 3.2$ кДж/см²), а также два образца стекла КС-4В – № 1 ($F = 20.6$ кДж/см²) и № 2 ($F = 4.1$ кДж/см²). Их облучение на установке ЭЛА было завершено 01.03.2004 [9]. Около полутора лет на этих образцах отслеживалась релаксация наведенного ЭП поглощения. Кроме того, испытывались также три образца стекла Corning 7980 (C-0, C-KrF, C-ArF). Они облучались ЭП с $F = 6.4$ кДж/см². Их облучение ЭП было завершено 05.07.2005. Примерно через два

месяца, в течение которых отслеживалась релаксация их наведенного поглощения, с ними были начаты эксперименты по лазерному отжигу.

Облучение образцов проводилось с помощью электрооразрядного эксимерного лазера EMG 150 MSC фирмы ‘Lambda Physik’. За импульс длительностью 20 нс плотность энергии излучения КrF-лазера на образцах была около 0.1 Дж/см². Частота следования импульсов в серии составляла 5 или 10 Гц. После облучения с требуемым общим флюенсом лазерного излучения F_L (как правило, ~ 100 Дж/см²) пропускание образцов измерялось на спектрофотометре. Время между очередными сериями облучения образцов в среднем составляло около двух недель.

Типичная совокупность спектров пропускания на примере образца КУ-1 № 2/2 после различных серий облучения КrF-лазером с соответствующими флюенсами показана на рис.3. Видно, что с ростом флюенса ЛИ спектры пропускания сходятся к определенному пределу, т.е. пропускание выходит на новый квазистационарный уровень.

Для упрощения анализа происходящих в образцах процессов по измеренным спектрам пропускания были построены спектры оптической плотности (OD) с помощью поточечного преобразования на основе (3). (Отметим, что на рис.3–6 представлены также соответствующие спектры образцов перед началом их лазерного отжига.) Выборочные спектры OD(F_L) после лазерного облучения для образца КУ-1 № 2/2 показаны на рис.4, а для образца КС-4В № 1 – на рис.5. (На рис.4 и 5 и далее в тексте в скобках после OD указано значение F_L в Дж/см².)

Из рис.3 и 4 видно, что при малых F_L (≤ 10 Дж/см²) в образцах КУ-1 происходит выжигание полосы поглощения, спектр которой (OD(0)–OD(10)) представлен пунктирной линией на рис.4. Эта полоса имеет максимум на 226 нм при ширине на полувысоте 23 нм. Она наблюдалась и в образце КУ-1 № 2/3 и в образцах Corning Inc. Эта характерная для стекол III типа полоса, по-видимому, принадлежит поверхностным центрам, которые до сих пор экспериментально не наблюдались [12]. После выжигания такой полосы с ростом F_L происходит пропорциональное уменьшение поглощения по всей УФ области спектра, на что указывает постоянство отношения OD(520)/OD(115) в области 200–330 нм на рис.4. Аналогичное поведение поглощения с ростом F_L наблюдается и у образцов стекол Corning 7980.

У стекла КС-4В также присутствует быстро выжигаемая излучением КrF-лазера полоса, но она имеет несколько другую форму (штриховая кривая на рис.5). Она

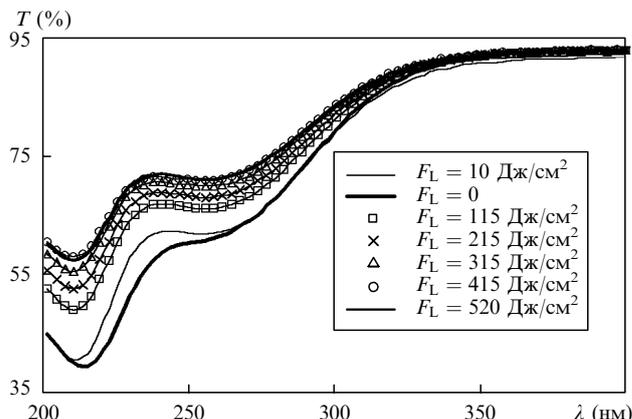


Рис.3. Спектры пропускания образца КУ-1 № 2/2 до и после облучения КrF-лазером.

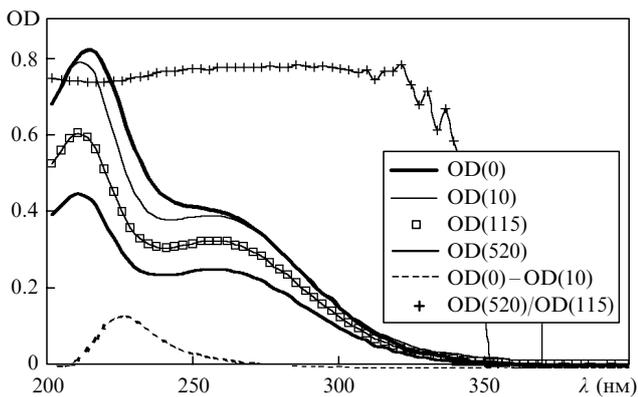


Рис.4. Спектры OD(F_L) образца KY-1 № 2/2 при разных F_L.

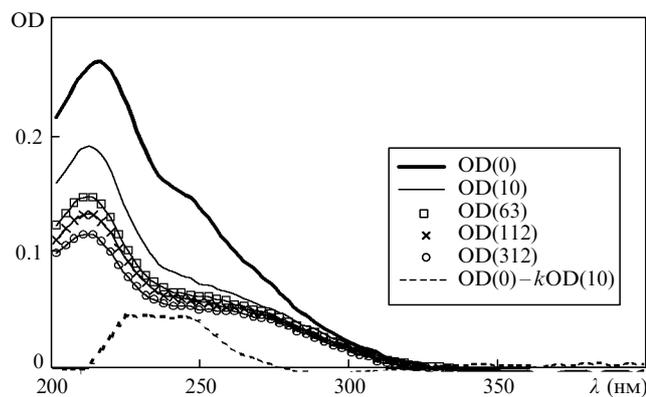


Рис.5. Спектры OD(F_L) образца KC-4B № 1 при разных F_L.

была получена вычитанием из кривой OD(0) кривой OD(10), домноженной на коэффициент $k = OD_{200}(0)/OD_{200}(10)$, который обеспечивал совмещение «хвостов» соответствующих спектров. Полученная полоса с плоской вершиной в области 226–250 нм явно состоит из нескольких «элементарных» полос. При дальнейшем увеличении F_L у образцов KC-4B, как и у других стекол, происходило однородное уменьшение поглощения по всей УФ области с выходом на квазистационарный уровень.

На рис.6 представлены экспериментальные зависимости OD₂₅₀ от F_L излучения Krf-лазера (λ = 248 нм) для всех исследованных образцов кварцевых стекол. Они наглядно показывают, что наведенное поглощение в кварцевых образцах под действием излучения Krf-лазера уменьшается до нового квазистационарного уровня.

Определим это уменьшение коэффициентом

$$K_L = [OD_{250}^{max} - \Delta OD_{250}^S] / OD_{250}^{min}. \tag{5}$$

Здесь OD₂₅₀^{max} – максимальная оптическая плотность образца на λ = 250 нм перед началом его лазерного облучения; ΔOD₂₅₀^S – изменение OD₂₅₀, связанное с выжиганием поверхностного поглощения; OD₂₅₀^{min} – минимальное OD₂₅₀ после облучения образца с максимальным флюенсом ЛИ. Значения коэффициентов K_L для всех испытанных кварцевых образцов представлены в табл.2.

Отметим, что значения K_L для образцов Corning Inc. получены при F_L = 300 Дж/см², поэтому они несколько меньше, чем для KY-1. У образцов KC-4B, особенно у № 2, из-за малости OD₂₅₀^{min} ошибка определения величины K_L примерно вдвое выше, чем у других образцов, у ко-

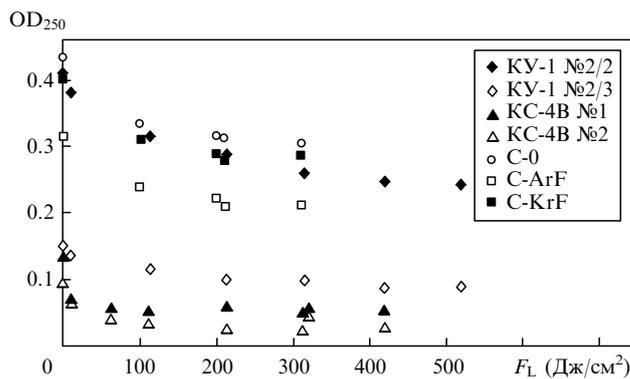


Рис.6. Зависимости OD на λ = 250 нм от F_L для всех испытанных образцов кварцевых стекол.

Табл.2.

Образец	K _L
KY-1 № 2/2	1.7
KY-1 № 2/3	1.7
C-0	1.5
C-KrF	1.4
C-ArF	1.5
KC-4B № 1	1.8
KC-4B № 2	2

торых она не превышает 10%. Видно, что среднее значение K_L по всем испытанным образцам составляет 1.7. С точностью до 10% с ним совпадают все полученные значения. Следовательно, с помощью излучения Krf-лазера можно выжигать УФ полосы наведенного ИИ поглощения в кварцевых стеклах до уровня, который ниже исходного не менее чем в 1.7 раза.

Незначительное различие в коэффициентах K_{EL} и K_L свидетельствует о том, что уменьшение наведенного поглощения в кварцевых стеклах при одновременном воздействии ЭП и ЛИ обусловлено лазерным выжиганием долгоживущих центров, образованных за предыдущие импульсы, а не изменением в эффективности их образования.

Аналогичные эксперименты были проведены с тремя образцами высокочистого CaF₂ из тех шести, которые были облучены ЭП на установке ЭЛА с общим флюенсом 26.2 кДж/см² [3, 9]. Промежуток между окончанием облучения этих образцов ЭП и началом экспериментов с ЛИ составлял 38 дней. Это позволило устранить влияние естественной релаксации наведенного поглощения на результаты экспериментов с ЛИ.

На рис.7 показаны спектры пропускания одного из исследованных образцов CaF₂ (№ 4) до и после облучения излучением Krf-лазера с общим флюенсом 50, 150 и 250 Дж/см². По этим спектрам сложно судить о влиянии ЛИ на наведенное поглощение из-за систематической ошибки, вызванной параллельным смещением спектров пропускания при их измерениях на спектрофотометре [9].

Как и в [9], для количественного описания происходящих с образцами CaF₂ изменений, но уже под действием ЛИ, была использована величина провала ΔD в спектрах пропускания в области поглощения F-центров на λ = 379 нм. Она определяется следующим образом:

$$\Delta D = [(T_1 - T_m) + (T_2 - T_m)] / 2. \tag{6}$$

Здесь T_m – значение пропускания для λ = 379 нм, T₁ и T₂ – максимальные значения пропускания образца слева и

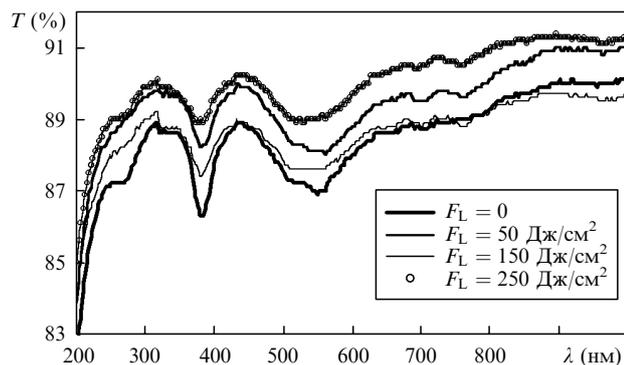


Рис. 7. Спектры пропускания образца CaF_2 № 4 до и после облучения ЛИ.

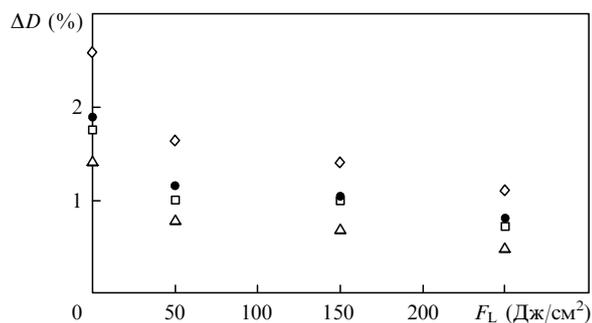


Рис. 8. Зависимости ΔD на $\lambda = 379$ нм от F_L для образцов CaF_2 (№ 4 (\diamond), 12 (\square) и 14 (∇)), а также усредненные ΔD по трем значениям (\bullet).

справа от провала. Использование этой величины для количественной характеристики наведенного поглощения в CaF_2 позволяет устранить систематическую ошибку, связанную с параллельным смещением спектров в процессе измерения образцов [9].

На рис. 8 представлены экспериментальные зависимости ΔD от F_L для трех исследованных образцов CaF_2 (№ 4, 12 и 14), а также соответствующие усредненные по трем значениям ΔD . Эти зависимости показывают, что воздействие излучения КгF-лазера при интенсивностях около 5 МВт/см^2 уменьшает наведенное электронным пучком остаточное поглощение на собственных центрах окраски в CaF_2 . Количественно опишем это уменьшение коэффициентом

$$K_C = \Delta D_{\max} / \Delta D_{\min}. \quad (5)$$

Здесь ΔD_{\max} – соответствующая величина до лазерного облучения, ΔD_{\min} – после облучения ЛИ с максимальным F_L . Для средних значений ΔD на рис. 8 значение $K_C = 2.4$. Отметим, что это относится к образцам с заметными следами примеси кислорода [3]. На предельно чистых образцах CaF_2 значение ΔD и без воздействия ЛИ уменьшается примерно в два раза за три дня после окончания воздействия ЭП [9]. Облучение таких образцов излуче-

нием КгF-лазера при интенсивностях $\sim 5 \text{ МВт/см}^2$ ускоряет релаксацию наведенного ЭП поглощения.

4. Заключение

Полученные в данной работе экспериментальные результаты показывают, что длительное облучение кварцевых стекол типа КУ-1, КС-4В, Corning 7980 импульсами излучения КгF-лазера с интенсивностями $\sim 5 \text{ МВт/см}^2$ как в момент воздействия на них ионизирующих излучений, так и после приводит к уменьшению наведенного ИИ квазистационарного поглощения не менее чем в 1.5 раза на всех их полосах УФ диапазона. Еще в большей степени это проявляется в образцах высокочистого CaF_2 .

Выявленные в работе эффекты отжига наведенного ИИ квазистационарного поглощения в исследованных ОМ под действием излучения КгF-лазера позволяют сделать более оптимистические прогнозы по ресурсным возможностям окон мощных электронно-пучковых КгF-лазеров, предназначенных, в частности, для использования в качестве драйверов в лазерном термоядерном синтезе. Среди испытанных образцов российское стекло КС-4В является наилучшим материалом для крупногабаритных окон таких лазеров. Изученные эффекты повышают и без того уникально высокую стойкость высокочистых кристаллов CaF_2 к воздействию электронного пучка и рентгеновского излучения.

Комплекс экспериментальных результатов, касающихся поведения современных высокочистых ОМ под действием ИИ и ЛИ, который представлен в данной работе, послужит углублению понимания физики радиационных процессов в них. Эти результаты будут полезны также производителям ОМ и разработчикам мощных электронно-пучковых эксимерных лазеров.

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

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

1. Барабанов В.С., Морозов Н.В., Сергеев П.Б. *Квантовая электроника*, **18**, 1364 (1991).
2. Сергеев П.Б. и др. *Оптический журн.*, **71**, 93 (2004).
3. Сергеев П.Б. и др. *Оптический журн.*, **72**, 85 (2005).
4. Sethian J.D. et al. *Proc. IEEE*, **92**, 1043 (2004).
5. Gatto A. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4932**, 366 (2002).
6. Guenster S. et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4932**, 422 (2002).
7. Marshall C.D., Speth J.A., Payne S.A. *J. Non-Cryst. Sol.*, **212**, 59 (1997).
8. Latkowski J.F. et al. *Fusion Sci. Technol.*, **43**, 540 (2003).
9. Сергеев П.Б., Сергеев А.П., Зворыкин В.Д. *Квантовая электроника*, **37**, 706 (2007).
10. Бучнев В.М., Клементов А.Д., Сергеев П.Б. *Квантовая электроника*, **8**, 1235 (1981).
11. Sergeev P.B. *J. Sov. Laser Research*, **14**, (4), 237 (1993).
12. Skuja L. *J. Non-Cryst. Sol.*, **239**, 16 (1998).