

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ИМ. П.Н.ЛЕБЕДЕВА
ОТДЕЛЕНИЕ КВАНТОВОЙ РАДИОФИЗИКИ



УДК 621.373.826

№ гос. регистрации 0120.0411318

Инв.№ 11220-ОКРФ-8.1

(Депонирован в ВНТИЦ. Инвентарный номер 02.2.007 02173)

УТВЕРЖДАЮ

Директор ОКРФ ФИАН

академик

_____ **О. Н. Крохин**

« 29 » декабря 2006 г.

**ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СОЗДАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ
И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

(заключительный)

Часть 1

**РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ОПТИКИ ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ УФ И ВУФ
ДИАПАЗОНА**

Руководитель темы, д-р физ.-мат.наук,
профессор, зав. лаб. ПЛ _____

А.З.Грасюк

МОСКВА 2006

Список исполнителей

Руководитель темы, д-р физ.-мат. наук, профессор _____ А.З.Грасюк
(введение, заключение)

Ответственный исполнитель, канд.физ.-мат. наук, в.н.с. _____ П.Б.Сергеев
(введение, разделы 1 и 2, заключение)

Исполнитель, н.с. _____ Н.В.Морозов
(пункт 1.1)

Исполнитель, аспирант ФИАН _____ А.П.Сергеев
(разделы 1, 2)

Реферат

Отчет 50 с., 2 ч., 29 рис., 3 табл., 30 источников

Экимерные лазеры, электронный пучок, оптические материалы, кварцевые стекла, кристаллы, радиационная прочность, наведенное поглощение, лазерное излучение

Объектом исследования являются современные оптические материалы (ОМ), используемые для окон мощных экимерных лазеров с накачкой электронным пучком (ЭП): кварцевые стекла типа КУ-1, КС-4В, Корнинг 7980, а также высокочистые кристаллы CaF_2 , MgF_2 , Al_2O_3 . Материал этих окон подвергается воздействию электронов, рассеянных из пучка накачки, сопутствующего ЭП рентгеновского излучения, а также лазерного излучения. Их стойкость в таких условиях определяет надежность лазеров этого типа. Целью данной работы было экспериментальное изучение поведения современных ОМ при длительном воздействии импульсов ЭП, а также влияние излучения КгF-лазера на наводимое ЭП остаточное поглощение в образцах этих ОМ.

Поведение ОМ под действием ЭП изучалось по оригинальной методике. Облучаемые ЭП образцы размещались в металлических полостях, что резко снизило электрические поля, возникающие в диэлектриках при облучении заряженными частицами. Такие условия моделировали ионизацию ОМ любым коротковолновым ЛИ. Для использованного ЭП длительностью 80 нс было промерено распределение поглощенной дозы по толщине материала.

Испытания ОМ при длительном облучении импульсами ЭП впервые показали, что с ростом флюенса ЭП наведенное в образцах остаточное поглощение выходит на насыщение в кварцевых стеклах, CaF_2 и Al_2O_3 . В стеклах и флюорите стационарный уровень поглощения определяется средней мощностью облучения, а в Al_2O_3 - его первичной дефектностью. Поглощение в области 180–350 нм на стационарном уровне у стекла КС-4В было в 4 раза меньше, чем у КУ-1, и в 2-3 раза меньше, чем у стеклок Корнинг 7980. У образцов CaF_2 и Al_2O_3 за все время испытаний с достижением флюенса ЭП ~ 30 кДж/см² максимальное падение пропускания в области 200-1000 нм не превысило 10%. У высокочистых образцов MgF_2 наблюдалось монотонное возрастание наведенного поглощения на полосах в области 100-500 нм и уже при флюенсах ~ 1 кДж/см² в области 255 нм их пропускание приблизилось к нулю.

Воздействие излучения КгF-лазера (248 нм) с интенсивностью ~ 5 МВт/см² на облучаемые ЭП образцы кварца и флюорита уменьшает их стационарное поглощение более чем в 1,5 раза.

Полученные экспериментальные результаты имеют научную и практическую ценность. Они впервые показывают, что радиационная прочность современных ОМ позволяет создавать надежные экимерные технологические лазеры УФ и ВУФ диапазона с электронно-пучковой накачкой. Результаты будут полезны физикам, производителям оптических материалов, а также разработчикам лазерных и других видов источников излучения УФ и ВУФ диапазона.

СОДЕРЖАНИЕ

Стр.

Часть 1.

Определения, обозначения и сокращения	5
Введение	6
1. Радиационная стойкость оптических материалов для окон эксимерных ЭПЛ	8
1.1 Методика и техника испытания радиационной прочности образцов ОМ	9
1.2 Наведенное ЭП долгоживущее поглощение в кварцевых стеклах	12
1.3 Наведенное электронным пучком поглощение во флюорите	17
1.4 Наведенное электронным пучком поглощение в MgF_2	23
1.5 Наведенное электронным пучком поглощение в Al_2O_3	26
2. Влияние излучения KrF-лазера на наведенное электронным пучком поглощение в ОМ	30
2.1 Радиационная прочность кварцевых стекол при одновременном воздействии электронного пучка и излучения KrF-лазера	30
2.2. Отжиг наведенного ЭП поглощения в ОМ излучением KrF-лазера	35
2.2.1 Отжиг наведенного ЭП поглощения в кварцевых стеклах	35
2.2.2 Отжиг наведенного ЭП поглощения в CaF_2	40
2.2.3 Отжиг наведенного ЭП поглощения в MgF_2	42
2.3. Выводы по результатам раздела 2	46
Заключение	47
Список использованных источников	49

Часть 2.

Создание, исследование и применение нелинейно-оптических преобразователей

Определения, обозначения и сокращения

В настоящем отчете о НИР применяются следующие термины с соответствующими определениями, обозначениями и сокращениями.

БКДМ – марка калориметра, произведенного в ОКБ ФИАН

ВЧД-5 - марка калориметра, произведенного в ОКБ ФИАН

ВУФ – вакуумная ультрафиолетовая область спектра

ГОИ им.С.И.Вавилова (ГОИ) – Государственный оптический институт им.С.И.Вавилова

ИИ – ионизирующее излучение

КУ-1 – марка кварцевого стекла

КС-4В - марка кварцевого стекла

ЛИ – лазерное излучение

ОМ – оптические материалы

УФ – ультрафиолетовая область спектра

флюенс – плотность энергии излучения на поверхности образца

флюенс ЭП - плотность энергии электронного пучка на поверхности образца (F)

флюенс ЛИ - плотность энергии лазерного излучения на поверхности образца (F_L)

ЭП – электронный пучок

ЭПЛ – лазер с электронно-пучковым возбуждением

Corning 7980 Standard Grade – марка кварцевого стекла фирмы Корнинг

Corning 7980 KrF Grade – марка кварцевого стекла фирмы Корнинг

Corning 7980 ArF Grade – марка кварцевого стекла фирмы Корнинг

D – поглощенная доза [Дж/кг], Гр

ppm – количество примесных атомов на миллион атомов основного вещества

T – пропускание образца ОМ в [%]

OD – оптическая плотность образца ОМ

OD(250) - оптическая плотность образца ОМ на длине волны 250 нм

OD_m(250 нм) - максимально достигавшаяся у образца величина OD на длине волны 250 нм

λ - длина волны излучения

τ - длительность импульса

Введение

Кварцевые стёкла и кристаллы CaF_2 , MgF_2 и Al_2O_3 являются основными материалами, используемыми для изготовления окон мощных KrF -, и других эксимерных лазеров с электронно-пучковым возбуждением. Радиационная прочность материалов этих окон в значительной степени определяет работоспособность, и, соответственно, перспективы использования этих лазеров [1-4]. Похожие проблемы возникают при работе с синхротронным излучением [5, 6] и в резонаторной оптике лазеров на свободных электронах, в окнах реакторов для лазерного термоядерного синтеза [7, 8]. У этой проблемы большая предыстория. Однако современные высокочистые образцы большинства ОМ по своим характеристикам иногда резко отличаются от своих предшественников, что и делает актуальным их комплексное исследование под действием ионизирующих (ИИ) и лазерных излучений (ЛИ).

Ионизирующим излучением, воздействующим на окна электронно-пучковых эксимерных лазеров, являются рассеянные из пучка накачки электроны с энергиями, как правило, не более 300 кэВ, и сопутствующее ЭП рентгеновское излучение. Данные ИИ воздействуют на материал окон практически только через их электронную подсистему, создавая в них электронно-дырочные пары и другие электронные возбуждения. При их релаксации и возникают собственные дефекты в ОМ, что и приводит к изменению их оптических характеристик, в частности, пропускания.

Интенсивное коротковолновое лазерное излучение за счет двухфотонного поглощения производит такое же действие, как и перечисленные ИИ. Но, кроме этого, ЛИ может поглощаться на дефектах. В этом случае происходит локальный кратковременный разогрев решетки вокруг дефекта, что, как правило, ускоряет его релаксацию. В этом заключается принципиальное отличие ЛИ, как ионизатора, от ЭП и рентгеновского излучения. Аналогичные эффекты снижения эффективности дефектообразования могут проявляться и в случае одновременного воздействия ИИ и ЛИ на ОМ, что и реализуется в окнах электронно-пучковых лазеров (ЭПЛ).

Теоретически предсказать поведение пропускания окон эксимерных ЭПЛ при их работе в различных режимах сейчас невозможно. Здесь слово за экспериментом. Целью этой работы было экспериментальное изучение поведения российских кварцевых стекол КУ-1 и КС-4В в сравнении с образцами Корнинг 7980 из Corning Incorporated, а также высокочистых кристаллов CaF_2 , MgF_2 и Al_2O_3 под действием ЭП и излучения KrF -лазера.

Образцы облучались в условиях максимально близких к условиям работы окон электронно-пучковых эксимерных лазеров [2, 3, 9-11]. Учитывалось также то, что высокая чистота ряда ОМ позволяет использовать их в качестве прототипа “идеально чистых” материалов, результаты по которым могут стать базисом для отладки разрабатываемых численных моделей их поведения под действием ИИ и ЛИ [12-13].

Отчет состоит из двух основных разделов. В первом под названием “Радиационная стойкость оптических материалов для окон эксимерных ЭПЛ” представлены результаты исследования долговременной стабильности оптических материалов под действием импульсов электронного пучка. Во второй части “Влияние излучения KrF-лазера на наведенное электронным пучком поглощение в ОМ” описываются экспериментальные результаты по одновременному воздействию на образцы оптических материалов электронного пучка и излучения KrF-лазера, а также при их последовательном облучении сначала электронным пучком, а затем излучением KrF-лазера.

1. Радиационная стойкость оптических материалов для окон эксимерных ЭПЛ

Основным материалом для крупногабаритных окон мощных электронно-пучковых KrF-лазеров являются кварцевые стекла. Это и определило наше внимание к изучению их возможностей. Для УФ диапазона изготавливаются стекла марки КУ-1, а также многие его зарубежные аналоги, в частности Корнинг 7980, относящиеся к стеклам 111 типа. У них концентрация ОН составляет около 1000 ppm, а содержание остальных примесей, в основном хлора, варьируется в пределах от ~200 ppm (КУ-1) до 20 ppm (Corning 7980 ArF Grade) [2, 11, 14-16]. Наряду с этими стеклами, испытывалось также новое российское "Особо чистое кварцевое стекло марки КС-4В" [14] разработанное в Институте химии силикатов им. И.В.Гребенщикова РАН. Сейчас начато его промышленное производство на Миасском машиностроительном заводе. Это стекло 1V типа с низким содержанием ОН [14, 15]. В нем примесей по 15 основным элементам <0,5 ppm, ОН<0,1 ppm, а Cl<20 ppm [14]. Сравнительные радиационные характеристики всех этих стекол при одинаковых условиях облучения полезны во многих отношениях.

Большинство кристаллов щелочноземельных элементов были изготовлены в ГОИ им.С.И.Вавилова. Кристаллы выращивались модифицированным методом Бриджмена-Стокбаргера в вакууме. Перед их выращиванием производилась очистка исходного продукта от кислорода путем термообработки в активной фторирующей газовой среде. Содержание основных примесных элементов (кислород, щелочные металлы, элементы группы железа и редких земель) в CaF₂ составляет (1-5)·10⁻⁵ %. Общее содержание 34 контролируемых примесей не превышало 1,7·10⁻³ %. По частицам это соответствует примерно 15-17 ppm. У образцов MgF₂ первой партии содержание примесей было больше, на уровне 150-200 ppm только контролируемых элементов [3, 9, 10]. У образцов поставленных в 2006 г. содержание примесей было снижено примерно на порядок.

Нам удалось достать и испытать также несколько образцов MgF₂ из фирм Kerth Kristalle и Corning. По данным производителей, это образцы высшего качества, предназначенные для работы с излучением УФ и ВУФ диапазона. Примесей в них содержится около 20 ppm.

ВУФ граница пропускания ряда испытанных образцов ОМ показана на рисунке 1.1. Их толщина была 2-4 мм, а диаметр около 12 мм. Поверхности российских образцов обрабатывались по 111 классу чистоты.

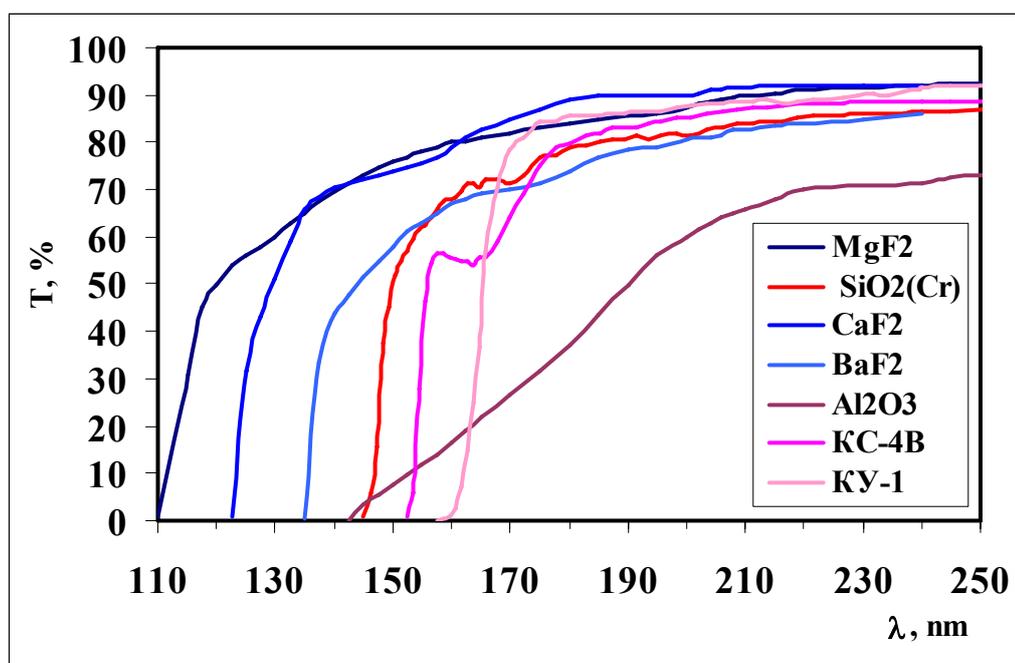


Рисунок 1.1 - ВУФ граница пропускания образцов ОМ толщиной 2-4 мм.

1.1 Методика и техника испытания радиационной прочности образцов ОМ

Испытания ОМ под действием электронного пучка проводились на лазерной установке ЭЛА с электронно-пучковым возбуждением [12]. Электронная пушка установки ЭЛА работает в импульсном режиме с частотой около 5 мГц. При проведении экспериментов за день делалось от 50 до 150 выстрелов. Энергия электронов за фольгой электронной пушки составляет около 280 кэВ, плотность тока пучка – до 200 A./cm^2 , длительность импульса – 80 нс. Полная энергия ЭП за выходной фольгой электронной пушки составляет около 250 Дж при площади сечения $4 \times 22 \text{ cm}^2$. Плотность энергии ЭП за импульс (F_1) у фольги достигает 3 Дж/см^2 . Для избежания мелкомасштабных неоднородностей ЭП сборка с образцами размещалась на расстоянии 25 мм от фольги электронной пушки. Здесь величина F_1 составляла около $2,5 \text{ Дж/см}^2$, а площадь сечения ЭП с таким флюенсом была не менее 70 cm^2 .

Сборкой служила толстая дюралевая пластина с выфрезерованными для образцов нишами. Со стороны, на которую падает ЭП, образцы прикрывались одной фольгой из Ti толщиной 14 мкм. Образцы за такой фольгой облучались в так называемом первом режиме, когда энергия электронов была $\sim 280 \text{ кэВ}$, а $F_1 \sim 2 \text{ Дж/см}^2$. Часть образцов прикрывалась дополнительным фильтром из Ti фольг толщиной 50-100 мкм. У поверхности этих образцов, облучавшихся в так называемом втором режиме, энергия электронов не превышала 100 кэВ, а F_1 варьировалась в пределах $0,2-0,8 \text{ Дж/см}^2$.

Отметим, что в отладочных опытах образцы BaF_2 при облучении в первом режиме с F_1 около 2 Дж/см^2 вне металлических ниш крошились уже после первого выстрела. Образцы CaF_2 в этих условиях разрушались при $F_1 \sim 3 \text{ Дж/см}^2$. В металлических полостях, даже кристаллы BaF_2 выдержали более 10^4 импульсов при $F_1 \sim 2 \text{ Дж/см}^2$. Это связано с тем, что в таких условиях минимизируются электрические поля, возникающие в диэлектриках при облучении электронами [18]. Сводится до минимума и влияние этих полей на процессы дефектообразования. В этих условиях воздействие ЭП на ОМ похоже на воздействие рентгеновского излучения, что важно для чистоты эксперимента в плане расчета эффективности наработки электронно-дырочных пар и экситонов.

Для используемого ЭП по методике, описанной в [2, 9, 10], было измерено усредненное по большому числу выстрелов распределение поглощенной дозы (D) по толщине (l) плоской мишени из материала с плотность 3 г/см^3 . Полученная зависимость представлена на рисунке 1.2. Она показывает распределение $D(l)$ в испытываемых образцах, плотность большинства из которых близка 3 г/см^3 . С ростом количества импульсов и возрастанием суммарного флюенса относительная форма распределения $D(l)$ не изменяется. Пропорционально F возрастает лишь амплитудное значение этой функции. Данное распределение необходимо учитывать при интерпретации полученных результатов.

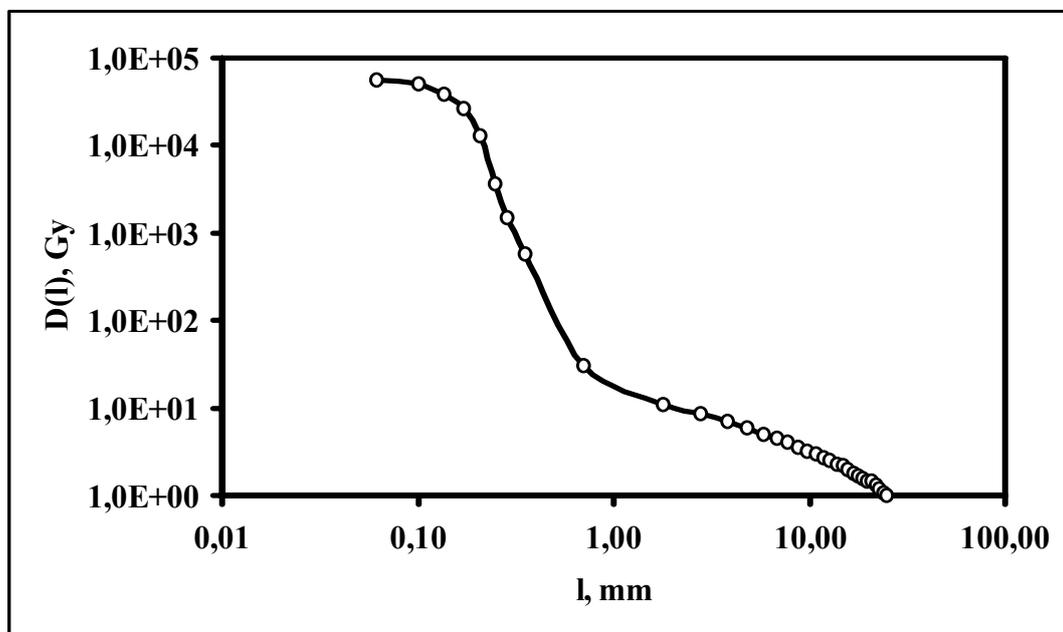


Рисунок 1.2. - Зависимость поглощенной дозы $D(l)$ в материале с плотностью 3 г/см^3 , подвергнутого облучению ЭП с энергией электронов 280 кэВ и $F_1=2,1 \text{ Дж/см}^2$ за импульс.

Из рисунка 1.2 видно, что распределение $D(l)$ в образцах крайне неоднородно. В приповерхностной области толщиной около $0,1 \text{ мм}$ $D(0)$ достигает 56 кГр за импульс с

флюенсом $2,1 \text{ Дж/см}^2$. Здесь D обусловлена энергокладом от ЭП. На глубинах более $0,2 \text{ мм}$ энергоклад обусловлен поглощением тормозного рентгеновского излучения.

Периодически после ~ 1000 импульсов производилась калибровочная серия выстрелов для проверки точности измерения величины F_1 . При этом вместо сборки с образцами устанавливался калориметр БКДМ. Перед ним ставилась дюралевая пластина толщиной 5 мм с отверстиями, расположенными как в сборке. Отверстия закрывались фильтром, стоявшим перед образцами, т.е. T_1 фольгой толщиной 14 мкм для первого режима, или набором фольг для второго режима облучения. По показаниям калориметра БКДМ в калибровочной серии выстрелов определялась плотность энергии ЭП на поверхности образцов. Она привязывалась к показаниям второго калориметра ВЧД-5. Он постоянно отслеживает работу электронной пушки в каждом выстреле как при калибровке, так и при облучении. По его показаниям и определялась величина F_1 для каждого выстрела, а затем и общий флюенс на поверхности образцов (F) для соответствующей серии импульсов.

Перед облучением и после серии импульсов с необходимым F пропускание образцов в области $200\text{-}1000 \text{ нм}$ измерялось на спектрофотометре Genesys-2 фирмы Spectronics, а в области $120\text{-}240 \text{ нм}$ – на 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 (OD) образцов. При этом значение OD на конкретной длине волны λ вычислялось по формуле:

$$OD = \ln(T_0/T). \quad (1.1)$$

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

В 2004 г была проведена первая серия экспериментов по облучению образцов ОМ ЭП установки ЭЛА с общим флюенсом до 20 кДж/см^2 за ~ 11000 импульсов. Были испытаны образцы кварцевых стекол КУ-1, КС-4В, Корнинг 7940, а также кристаллов CaF_2 , MgF_2 , BaF_2 , Al_2O_3 и SiO_2 [2, 3]. В 2005 г. эти эксперименты повторились уже с образцами кварцевых стекол Корнинг 7980 трех модификаций: Standard Grade, KrF Grade, ArF Grade, а также новых образцов MgF_2 и CaF_2 из ГОИ. В этой серии было сделано около 4000 импульсов, а общий флюенс превысил 6 кДж/см^2 . Полученная совокупность экспериментальных результатов по разным ОМ и представлена в следующих разделах.

1.2 Наведенное ЭП долгоживущее поглощение в кварцевых стеклах

Типичные спектры пропускания некоторых из испытанных образцов до (..._0) и после облучения ЭП в первом режиме с соответствующим флюенсом (цифра после _ [Дж/см²]) показаны на рисунке 1.3. Соответствующие спектры наведенной ЭП оптической плотности образцов представлены на рисунке 1.4. Отметим, что ВУФ граница пропускания у стекол 111 группы (КУ-1 и корнинговские образцы) до облучения практически совпадают. Эту границу определяет концентрация гидроксильной группы, которая у всех этих стекол составляет около 1000 ppm. У стекла КС-4В содержание ОН почти на 4 порядка меньше, а ВУФ граница его пропускания смещена в коротковолновую область примерно на 10 нм.

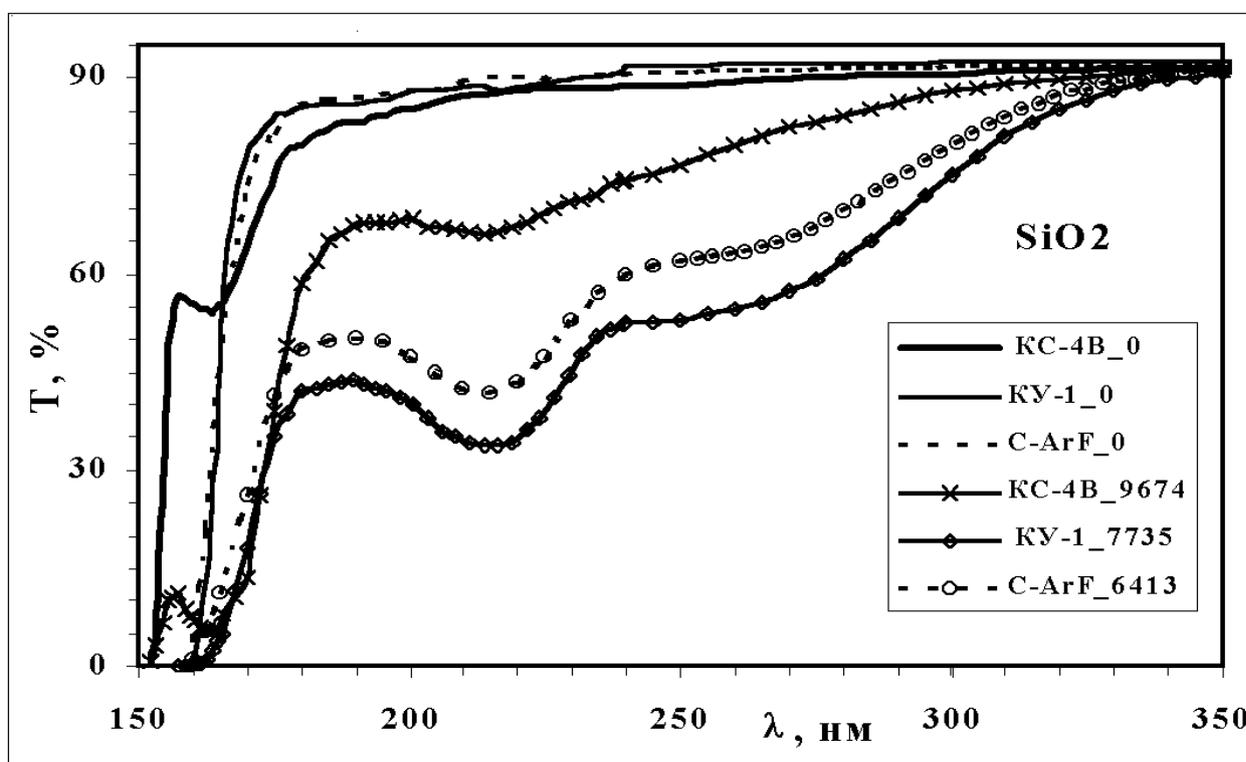


Рисунок 1.3 - Спектры пропускания образцов стекол КС-4В, КУ-1 и Corning 7980 ArF-grade (C-ArF) до и после облучения электронным пучком установки ЭЛА с соответствующим флюенсом (цифры после _ в Дж/см²).

Характерные изменения в спектрах пропускания испытанных кварцевых образцов после облучения происходили в области с $\lambda < 350$ нм, а в видимом диапазоне вплоть до ~ 1000 нм T не изменялось. Очевидно, что потеря прозрачности всех стекол под действием ЭП в коротковолновой области достаточно велика. Это надо обязательно учитывать при создании технологических электронно-пучковых эксимерных лазерных установок.

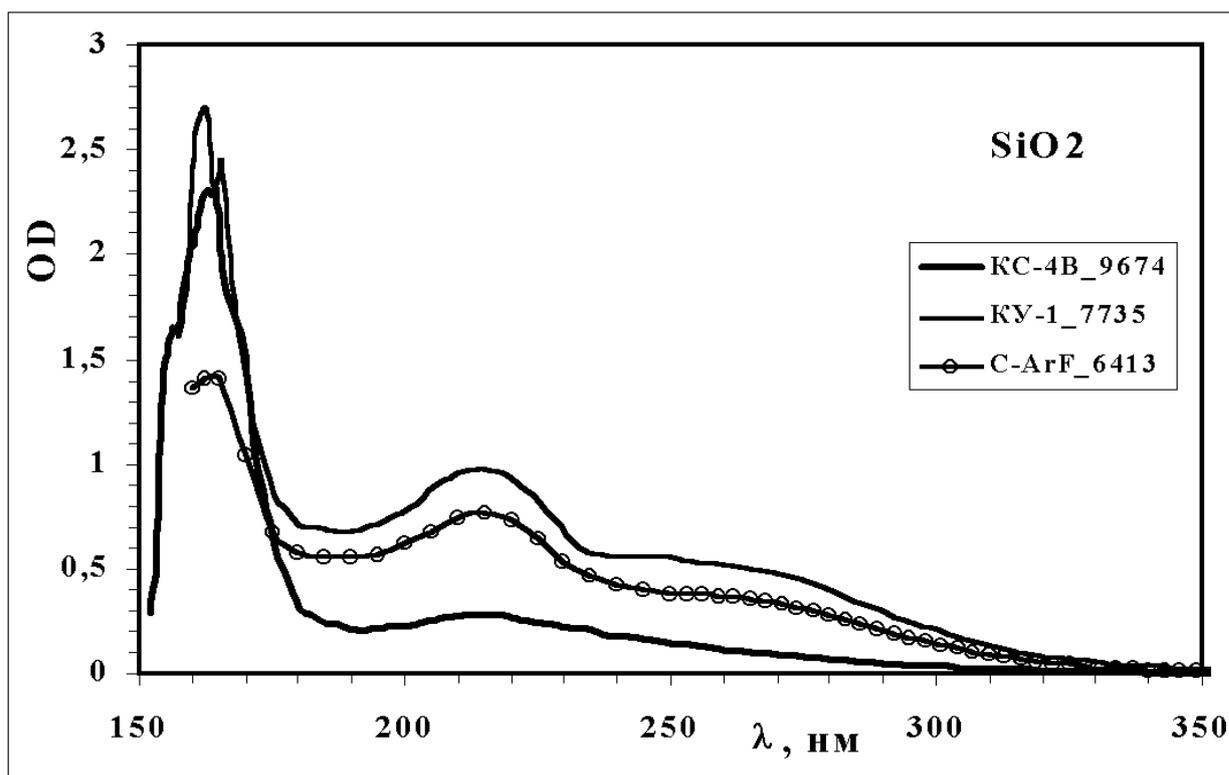


Рисунок 1.4 - Спектры наведенной оптической плотности для образцов с рис.1.3.

Наши спектры наведенной ЭП оптической плотности, представленные на рисунке 1.4 практически тождественны спектрам, возникающим под действием и других ИИ [7, 8, 19]. При этом стоит отметить, что основные линии поглощения в области 180-350 нм у каждой марки стекла сохраняют свои пропорции в широком диапазоне воздействий ИИ. Данный факт облегчает описание зависимостей спектров наведенного поглощения в данной области от характеристик ИИ, в частности, от флюенса ЭП: достаточно установить эту зависимость на одной из длин волн. Нам это удобно делать на 250 нм.

На рисунке 1.5 показаны зависимости $OD(250 \text{ нм})$ от F для образцов стекол Corning 7980 (Standard Grade – C-0, KrF grade –C-KrF, ArF grade –C-ArF), KY-1 и KC-4B (светлые кружки и квадратики), полученные в одинаковых условиях облучения на установке ЭЛА в первом режиме с флюенсами до $6,5 \text{ кДж/см}^2$. Здесь же для сравнения приводятся результаты по KY-1 и KC-4B (темные кружки и квадратики) полученные в аналогичных условиях в более ранних экспериментах [2].

Из рисунка 1.5 видно, что с ростом флюенса ЭП величина наведенного поглощения у всех испытанных стекол выходит на насыщение. В режиме насыщения минимальное поглощение было у стекла KC-4B. У него максимально достигавшаяся в этих экспериментах величина $OD_m(250 \text{ нм})=0,15$.

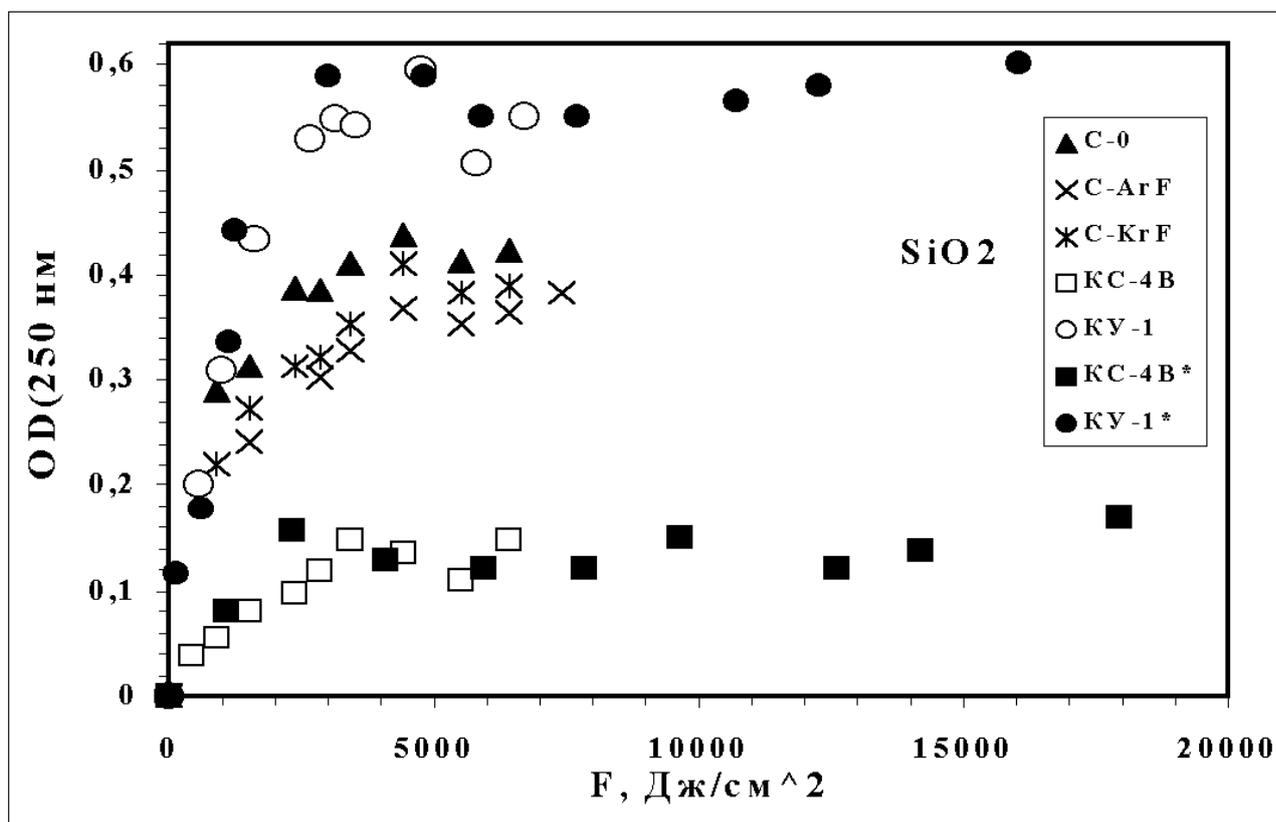


Рисунок 1.5 - Зависимости наведенной оптической плотности на 250 нм от флюенса ЭП для образцов стекол Corning 7980 (Standard Grade – C-0, KrF grade –C-KrF, ArF grade – C-ArF), KY-1 и KC-4B. Черные квадраты и кружки показывают результаты из [2].

Из стекол третьей группы наилучшую радиационную прочность имеет Corning 7980 ArF grade. У него $OD_m(250 \text{ нм})=0,37$. У остальных стекол наблюдалось увеличение $OD_m(250 \text{ нм})$ с ростом концентрации примеси хлора. У наиболее “грязного” по данной примеси стекла KY-1 $OD_m(250 \text{ нм})=0,6$.

Как было установлено ранее, величина наведенного поглощения на стационарном участке в УФ области у стекла KY-1 пропорциональна средней мощности облучения электронным пучком [2]. Аналогичная зависимость наблюдается и у других марок стекол этой группы.

У стекла KC-4B зависимость OD от средней мощности облучения электронным пучком на стационарном участке существенно слабее. У него при почти десятикратном различии в мощностях облучения величины насыщенного поглощения различаются примерно в 1,5 раза [2].

Зависимости $OD(F)$ показывают, что процесс наработки долгоживущих центров окраски под действием ЭП является нелинейным. Его нельзя описать одним параметром “эффективность наработки центров”. Наряду с наработкой происходит и их релаксация.

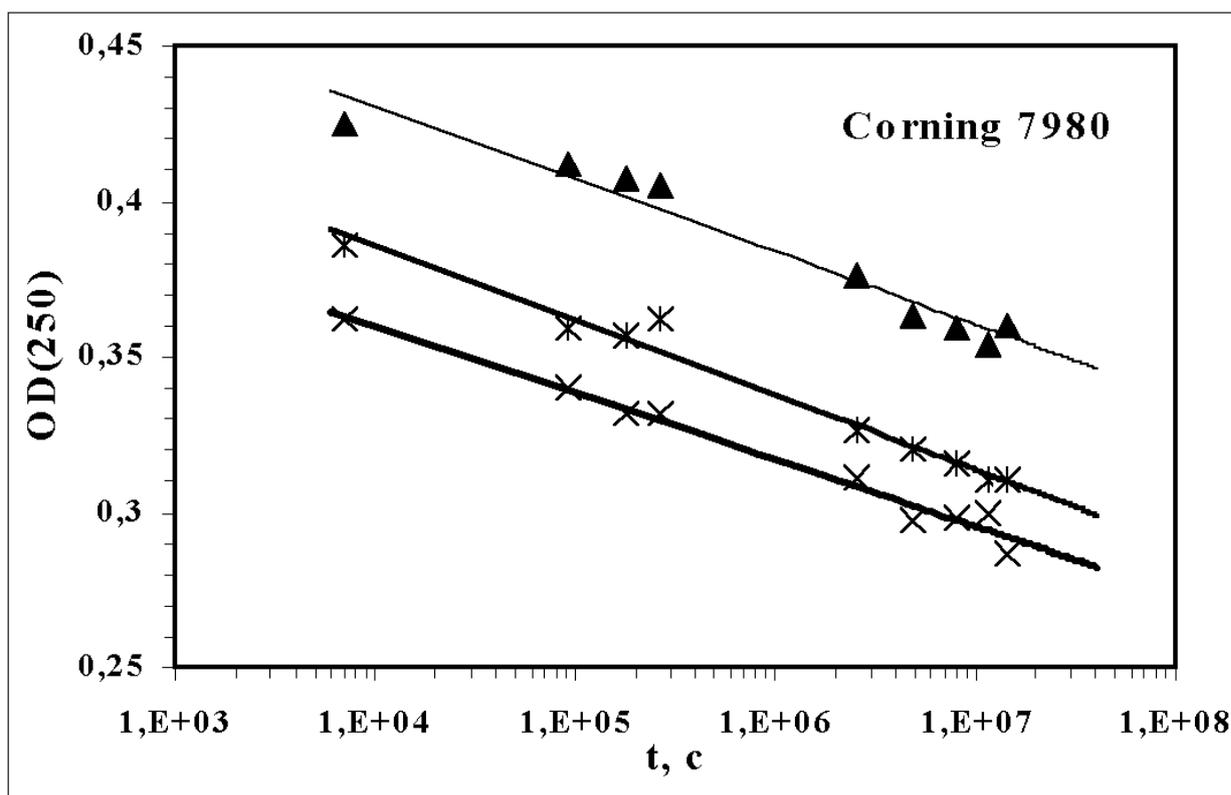


Рисунок 1.6 - Уменьшение OD(250 нм) со временем после окончания облучения ЭП у образцов стекол Corning 7980. Обозначения совпадают с рис.1.5.

На рисунке 1.6 показаны зависимости спада поглощения в образцах Corning 7980 (значки, обозначающие экспериментальные точки, совпадают с обозначениями рисунка 1.5) после последнего импульса ЭП. Такие же зависимости OD(t) были и у стекол КУ-1 и КС-4В. Экстраполяционные зависимости OD на 250 нм от времени (t) (линии на рисунке 1.6) описываются выражениями вида

$$OD(250)=A-B*\ln(t), \quad (1.2)$$

где t – в [с]. В таблице 1.1 представлены значения соответствующих коэффициентов A и B для всех исследованных марок стекол.

Таблица 1.1.

Марка стекла	A	B
КУ-1	0,82	0,024
С-0	0,53	0,01
С-KrF	0,45	0,009
С-ArF	0,45	0,0093
КС-4В	0,18	0,0045

Эти коэффициенты получены по экспериментальным результатам на временном интервале $\sim 4 \cdot 10^3 - 10^7$ 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, рисунок 1.2. Условия хранения образцов после облучения также важны. Так прогрев корнинговских образцов и КУ-1 в течении примерно 20 часов при температуре около 400 С практически полностью устраняет наведенное поглощение. Для отжига поглощения у КС-4В требуется примерно вдвое больше времени. Световое облучение также сказывается на релаксации наведенного поглощения. Об этом чуть ниже.

Анализ полученных результатов по кварцевым стеклам позволяет сделать следующие выводы.

В каждом из исследованных стекол с ростом флюенса ЭП наведенное поглощение в области ~180-350 нм выходит на насыщение [2].

2. В стекле КУ-1 величина поглощения в режиме насыщения пропорциональна средней плотности мощности ЭП. У стекла КС-4В при почти десятикратном различии в мощностях облучения для первого и второго режимов величины насыщенного поглощения различаются примерно в 1,5 раза [2].

3. При одинаковых условиях облучения ЭП наведенное поглощение в режиме насыщения у образцов стекла КС-4В в области ~180-330 нм примерно в 4 раза меньше, чем у КУ-1, и в 2 раза меньше, чем у Corning 7980 (ArF grade).

Полученные результаты показывают, что из испытанных стекол, исходя из радиационной прочности, стекло марки КС-4В является наилучшим материалом для изготовления окон электронно-пучковых эксимерных лазеров УФ диапазона, в том числе и KrF-ЭПЛ.

1.3 Наведенное электронным пучком поглощение во флюорите

В первой серии экспериментов 2004 г. испытывалось шесть одинаковых образцов высокочистого CaF_2 с размерами $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и толщиной 3 мм. Во второй серии испытания этой группы флюоритовых образцов были продолжены. В результате в конце этих экспериментов величина суммарного флюенса ЭП у них превысила 26 кДж/см^2 .

На рисунке 1.7 показана типичная сводная картинка из спектров пропускания одного из этих шести образцов высокочистого CaF_2 с рабочим №8. Отметим, что все образцы этой группы имеют размеры $10 \times 10 \text{ мм}^2$, что не совпадает с размером окна на спектрофотометре ($5 \times 11 \text{ мм}^2$). 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 и видно из рисунка. Величина такого смещения варьируется в пределах 5%. Эта систематическая ошибка сравнима с величиной наведенного поглощения.

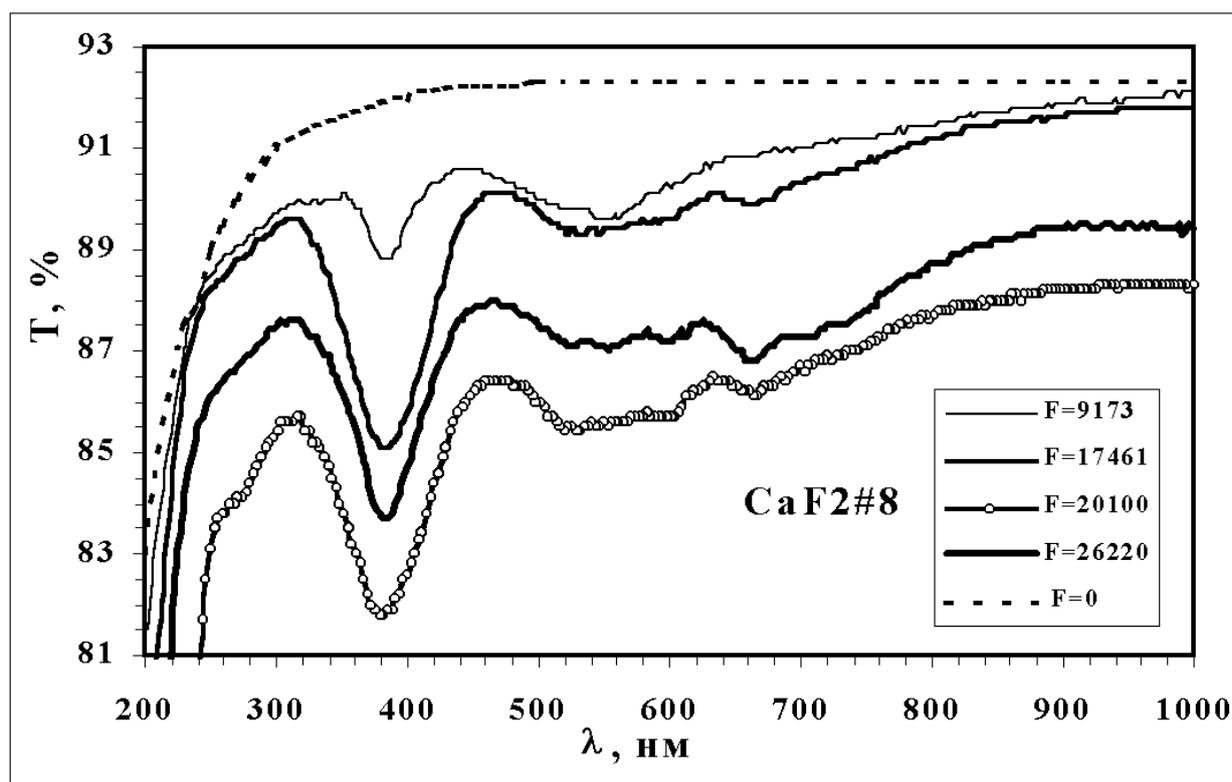


Рисунок 1.7 - Спектры пропускания одного из шести “старых” образцов CaF_2 №8 до и после облучения ЭП с разным флюенсом F [Дж/см^2].

На втором этапе экспериментов к старой группе образцов CaF_2 был добавлен новый образец из ГОИ, изготовленный из центральной части були диаметром 100 мм. По сведениям производителя, этот материал обладал предельно высокой чистотой.

Результаты по новому образцу CaF_2 с размерами $20 \times 20 \times 5$ мм³ (рабочий номер 2/3) показаны на рисунке 1.8. Подчеркнем, что этот, 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 энергией электронов около 280 кэВ. На рисунке 1.8 также заметен сдвиг спектров, но уже в пределах 0,5%, что близко к точности калибровки спектрофотометра. На этом уровне может проявляться и запыление образца.

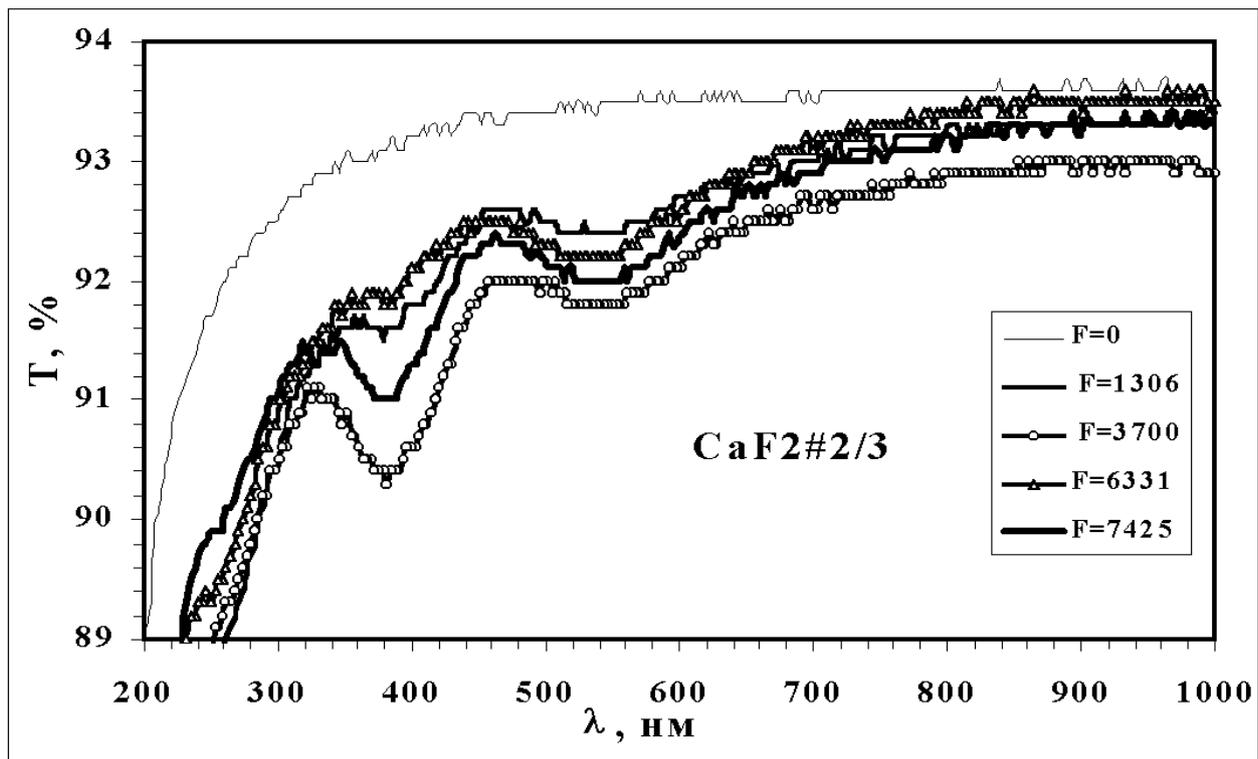


Рисунок 1.8 - Спектры пропускания образца CaF_2 №2/3 до и после облучения ЭП с разным флюенсом F [Дж/см²].

На рисунке 1.9 представлены спектры оптической плотности для образца №2/3 через два часа после последнего импульса ЭП ($F=7425$ Дж/см²), через сутки (7425^*) и через месяц ($7425m$). Эти спектры несколько отличаются от аналогичных спектров у старой группы образцов [3]. Здесь наблюдается новая полоса поглощения с максимумом на 260 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 379 нм принадлежит F-центрам [20]. Она четко проявляется у всех исследованных образцов CaF_2 и поэтому была использована для характеристики их радиационной прочности.

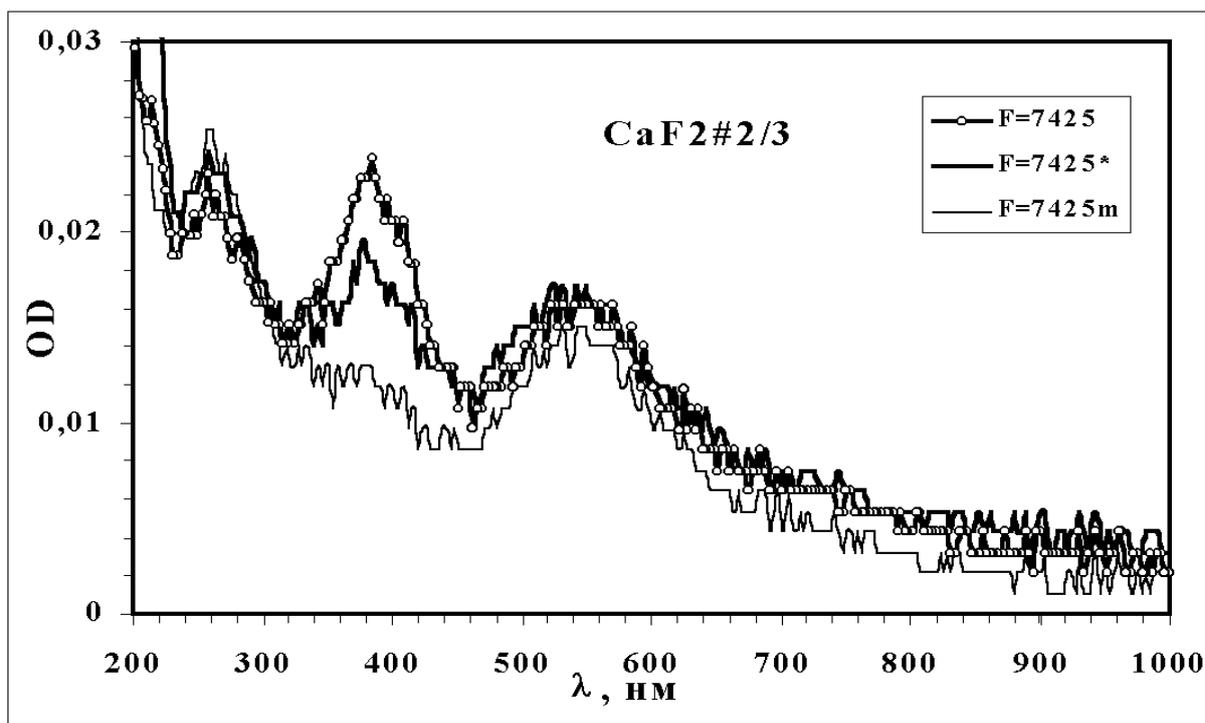


Рисунок 1.9 - Спектры OD у образца CaF₂ №2/3 через 2 часа после последнего импульса и получения общего F=7425 Дж/см², через сутки (*) и через месяц (m).

Для количественного описания конкретных графиков была выбрана величина провала в спектрах пропускания на 379 нм ($\Delta D(379 \text{ nm}) = \Delta D$), которая определялась так:

$$\Delta D = [(T_1 - T_m) + (T_2 - T_m)] / 2. \quad (1.3)$$

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

На рисунке 1.10 представлена вся совокупность данных по ΔD усредненных по группе из 6 “старых” образцов (Ср.) и для образца №2/3 при различных F. Все эти данные получены при суточной задержке в прописывании 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 этого 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. Более высокие результаты по ΔD были при мощностях облучения $\sim 100-150$ имп./день. Аналогичная

корреляция между данными по ΔD и средней мощностью облучения за серию наблюдалась и у образца №2/3, но при меньших максимальных значениях ΔD .

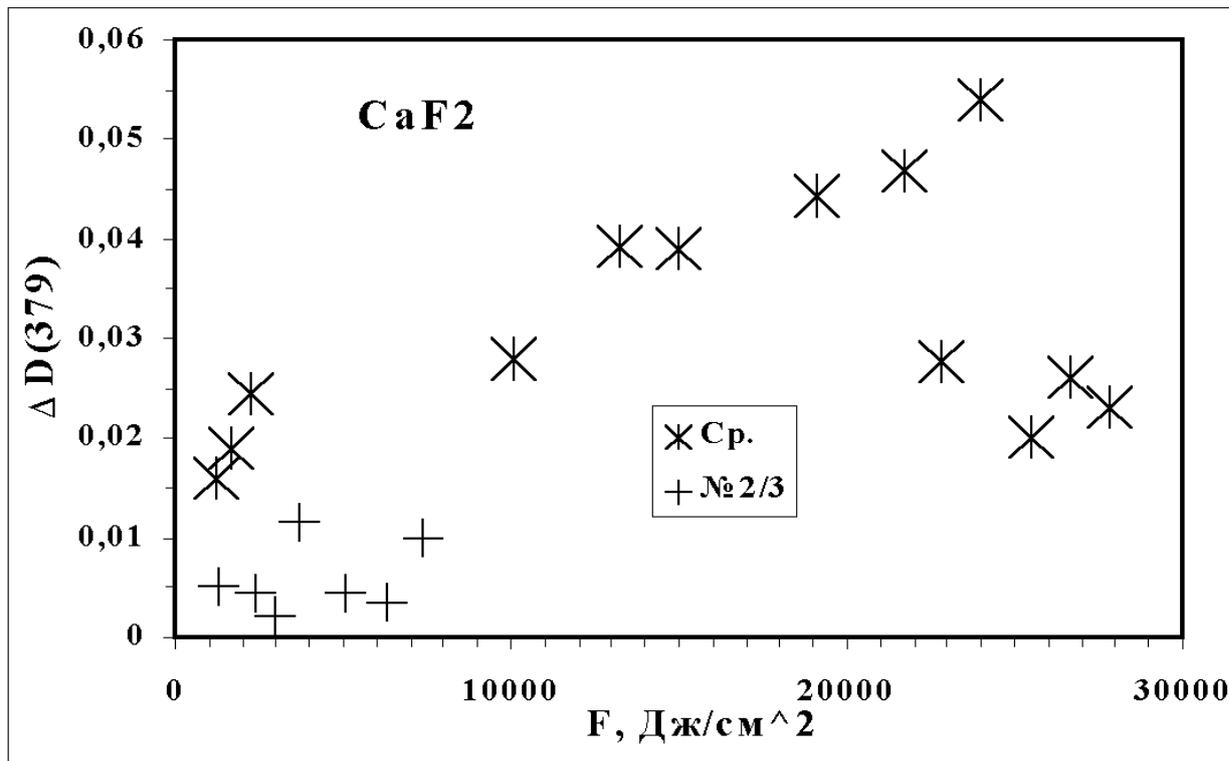


Рисунок 1.10 - Зависимости ΔD на 379 нм для среднего значения по шести «старым» образцам CaF_2 (Ср.) и для образца №2/3 от F.

Причина сильного разброса данных на рисунке 1.10 может быть обусловлена быстрой релаксацией наводимых центров окраски и различной задержкой в прописывании образцов после их облучения, изменявшейся в разных экспериментах от 2 часов до 5 суток. Из рисунка 1.9 отчетливо заметна релаксация этой полосы поглощения у образца №2/3. Для выяснения этого вопроса после последней серии облучения 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 зависимости величины $\Delta D(t)$, показанные на рисунке 1.11. Здесь значком «Ср» обозначены средние значения ΔD по 6 старым образцам, а крестом обозначены данные для образца №2/3. Видно, что за первые сутки после облучения величина ΔD у них падает в среднем на 30%, а за трое суток она уменьшается практически вдвое. Величина ΔD у старых образцов за год уменьшилась в среднем в 3,2 раза.

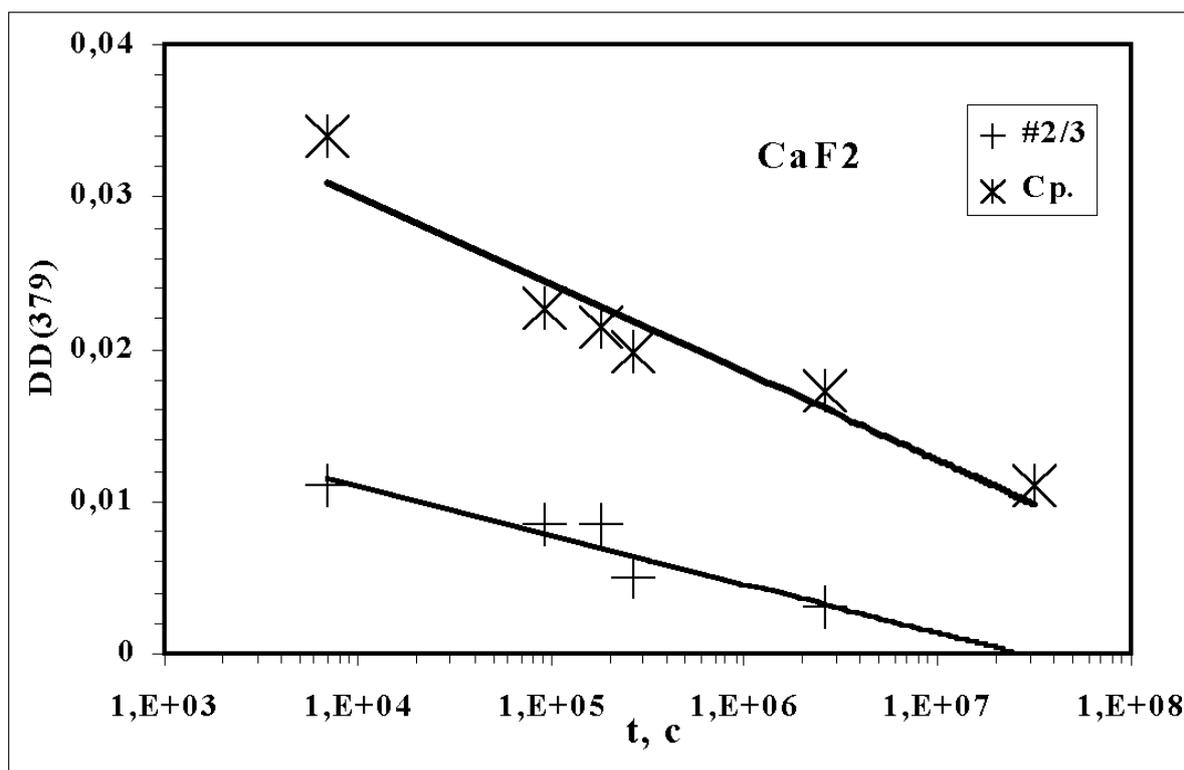


Рисунок 1.11 - Релаксация ΔD на 379 нм для среднего значения по шести “старым” образцам CaF_2 (Ср.) и для образца №2/3.

Экстраполяционные зависимости $\Delta D(t)$ на 379 нм (линии на рисунке 1.11) описываются, как и у кварцевых образцов, выражениями (1.2). 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, соответственно.

Уменьшение со временем величины поглощения в F-полосе должно сопровождаться уменьшением концентрации и, соответственно, поглощения Н-центров, чьи полосы расположены в области 310 и 700 нм [20, с.115]. Но, по-видимому, это поглощение мало и мы его не видим. Наблюдаемые же полосы с максимумами на 260 и 540 нм принадлежат не френкелевским дефектам. Они могут быть связаны с примесью кислорода, диффундирующего в образцы в процессе облучения [3, 21], или принадлежать другим примесным или поверхностным центрам окраски [5, 6]. Стоит отметить, что проведенное нами сравнение облученной и не облученной поверхности образцов CaF_2 под электронным микроскопом показало заметное повышение шероховатости облученной поверхности. Аналогичные эффекты наблюдались ранее при облучении образцов CaF_2 синхротронным излучением [5-6]. У кварцевых образцов, как и у MgF_2 , и Al_2O_3 , изменений в структуре облученной электронным пучком поверхности не было.

Из полученных результатов по образцам высокочистого CaF_2 можно сделать следующие выводы.

1. Величина наведенного электронным пучком собственного поглощения во флюорите выходит на насыщение, определяемое средней мощностью облучения. Это обусловлено быстрой релаксацией образующихся F-H пар 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 электронным пучком долгоживущего поглощения в CaF_2 связана с примесями, имеющимися в кристалле, или диффундирующими в объем с поверхности в процессе облучения [3].

И из всего этого следует, что окна из высокочистых кристаллов CaF_2 могут длительное время работать без существенного падения прозрачности и в электронно-пучковых эксимерных лазерах УФ и ВУФ диапазона. А в электроразрядных эксимерных лазерах эти окна уже достаточно долго демонстрируют свою надежность даже при работе с излучением на 157 нм [22, 23].

1.4 Наведенное электронным пучком поглощение в MgF_2

Образцы MgF_2 из ГОИ имели толщину 4 мм. На этих образцах было проведено сравнение наводимых ЭП спектров при облучении в 1-ом и 2-ом режимах. Спектры практически совпали. Следовательно, вероятность ударных механизмов образования дефектов в MgF_2 электронами с энергией около 280 кэВ если и есть, то очень низка по сравнению с их наработкой в процессе релаксации электронно-дырочных пар.

Спектры пропускания образцов MgF_2 из различных фирм после облучения ЭП представлены на рисунке 1.12. Из него видно, что с ростом F пропускание всех образцов падает. В максимуме наиболее сильной полосы поглощения на 255 нм величина T приближается к нулю уже при $F \sim 1000$ Дж/см².

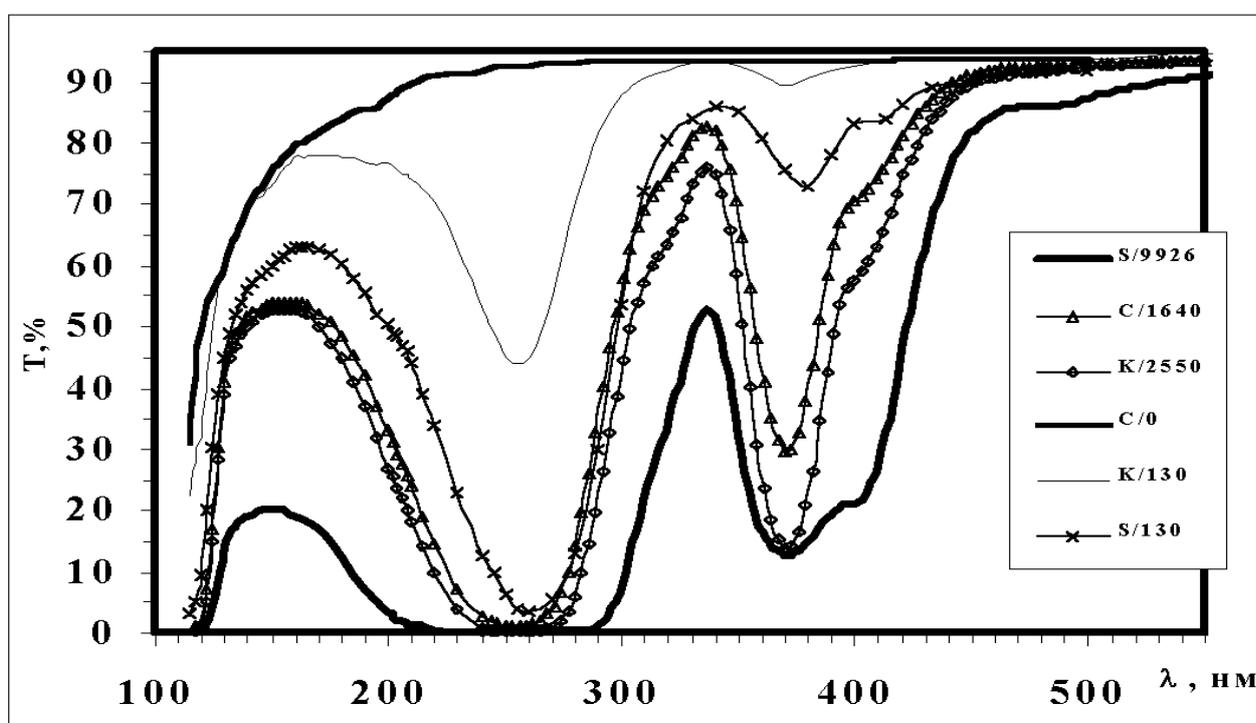


Рисунок 1.12 - Спектры пропускания образцов MgF_2 до и после облучения ЭП.
Обозначения: S- образцы из ГОИ, C-Corning, K-Korth Kristalle /F [Дж/см²].

Спектры OD для тех же образцов, что и на рисунке 1.12 представлены на рисунке 1.13. Здесь мы видим, что уже при флюенсах ~ 1 кДж/см² оптическая плотность в области 250 нм выходит на уровень 4, что находится на пределе точности определения этой величины. В связи с этим зависимость наведенной OD от F мы искали на длине волны 301 нм. Здесь поглощение не выходило на насыщение даже при максимально достигнутых $F=10$ кДж/см². На этой λ у края основной полосы поглощения величина OD в 10,7 раза меньше, чем OD на 255 нм [3].

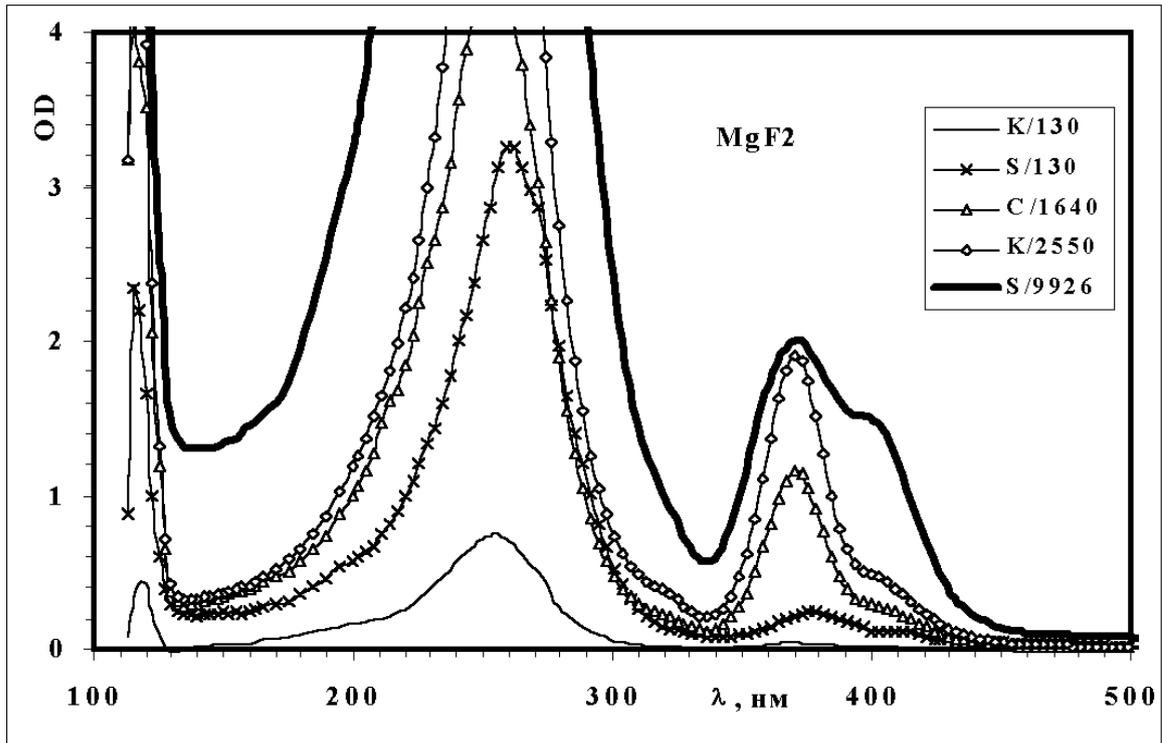


Рисунок 1.13 – Спектры OD для тех же образцов MgF_2 , что и на рисунке 1.12.

На рисунке 1.14 представлена сводная картина зависимостей $OD(301)$ от F для всех испытанных образцов MgF_2 . Цифра в скобочках на рисунке обозначает режим облучения.

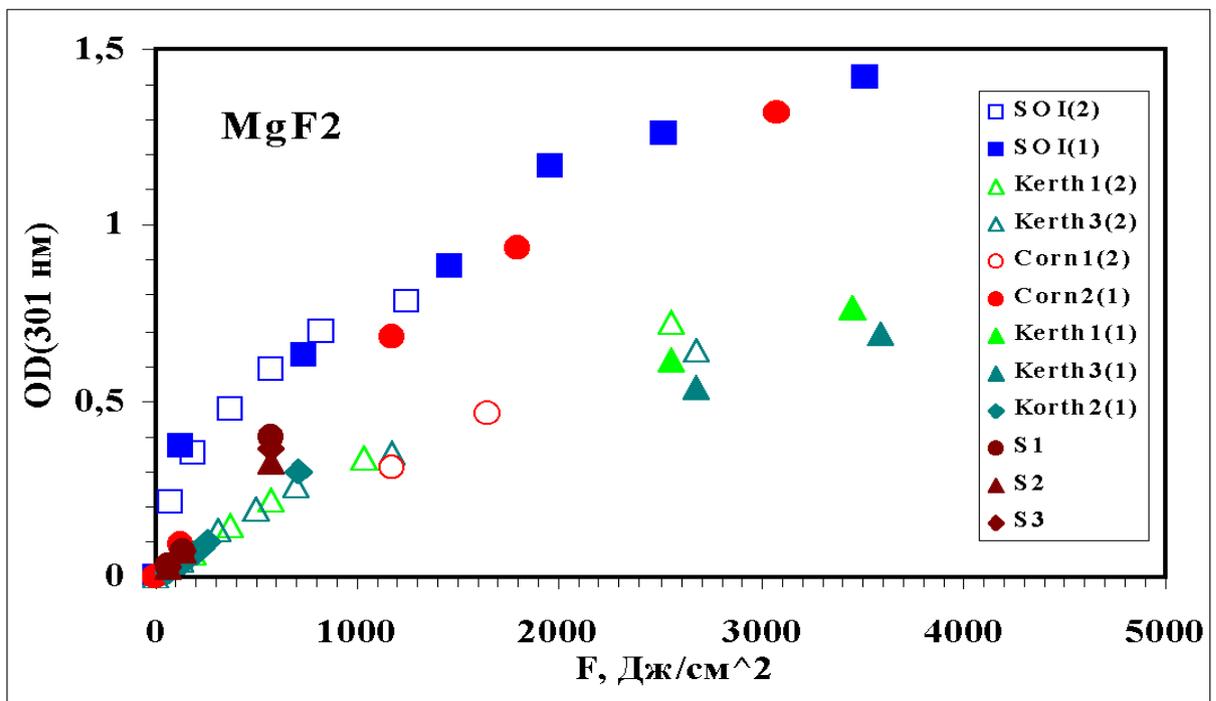


Рисунок 1.14 – Зависимости OD от F для всех испытанных образцов MgF_2 . Образцы из ГОИ первой партии обозначены SOI, второй – S. Цифра в скобках обозначает режим облучения. Цифра после названия – рабочий номер образца.

Из рисунка 1.14 видно, что наилучшие результаты по радиационной прочности показали все три немецких образца и один образец Corning. Другие испытанные образцы имеют худшие показатели. Но у всех образцов в области $\lambda < 300$ нм наблюдается монотонный, а у наиболее чистых образцов практически линейный рост OD с ростом F. Обусловлено это очень низкой скоростью его релаксации. При нормальных условиях хранения в темноте в течение года после облучения поглощение образцов из ГОИ на 255 нм уменьшилось примерно на 2-3%. У образцов из Kerth Kristalle падение поглощения после года хранения отражено скачками в OD при одинаковых значения F в области 2600 Дж/см². Этим поведение MgF₂ под действием ЭП резко отличается от CaF₂.

Считается, что полоса поглощения с максимумом на 260 нм в MgF₂ связана с F-центрами. Однако в этой же области поглощают H- и V_k-центры [20]. Как соотносятся их вклады и каковы контуры поглощения этих центров - вопрос открытый. Отметим, что максимум основной полосы поглощения у образцов из ГОИ (256 нм) отличен от максимума поглощения у образцов из Kerth Kristalle и Corning (253 нм), а в [24] этот максимум находится на ~261 нм. У образцов из этих фирм и кристаллами из ГОИ есть также различия в величине и виде полос поглощения с максимумами на 370 и ~400 нм, которые приписываются более сложным комплексам типа M-центров [25-28].

Полученные сравнительные результаты по образцам MgF₂ разного качества указывают на то, что радиационная прочность этого материала сильно зависит от его чистоты, а также, возможно, от его первичной дефектности. Очевидно также, что не последнюю роль в относительно низкой радиационной прочности MgF₂ по сравнению, в частности, с CaF₂, играет и очень малая скорость релаксации его собственных дефектов при нормальных условиях. Причина последнего может быть связана с эффектами агрегатизации F-центров, на которые указывают постоянно присутствующие в спектрах наведенного поглощения полосы в области ~370-500 нм. Данные эффекты, как известно [29], существенно замедляют скорости диффузионной рекомбинации собственных дефектов. Но для того, чтобы детально разобраться во всех этих вопросах, необходима разработка моделей кинетики рекомбинации дефектов в данном кристалле.

1.5 Наведенное электронным пучком поглощение в Al_2O_3

Радиационная стабильность высокочистых образцов лейкосапфира известна давно. Ни электронные пучки с энергиями <500 кэВ, ни, тем более, рентгеновское излучение не могут создавать в нем новых дефектов. Однако при воздействии этих излучений, а также УФ и ВУФ квантов возможна перезарядка уже имеющихся в кристалле дефектов. За счет этого воздействие данных ИИ на образцы Al_2O_3 вызывает небольшие изменения в их прозрачности. Это было обнаружено и в наших экспериментах. С сентября 2001 г на установке ЭЛ-1 испытывался один высокочистый образец Al_2O_3 диаметром 18 и толщиной 1.8 мм. Облучение его проводилось в первом режиме с энергией электронов около 280 кэВ. Максимальный флюенс ЭП на данный момент у этого образца достиг 30 кДж/см². Сводная картинка из спектров пропускания, накопленных за все время испытаний этого образца, представлена на рисунке 1.15.

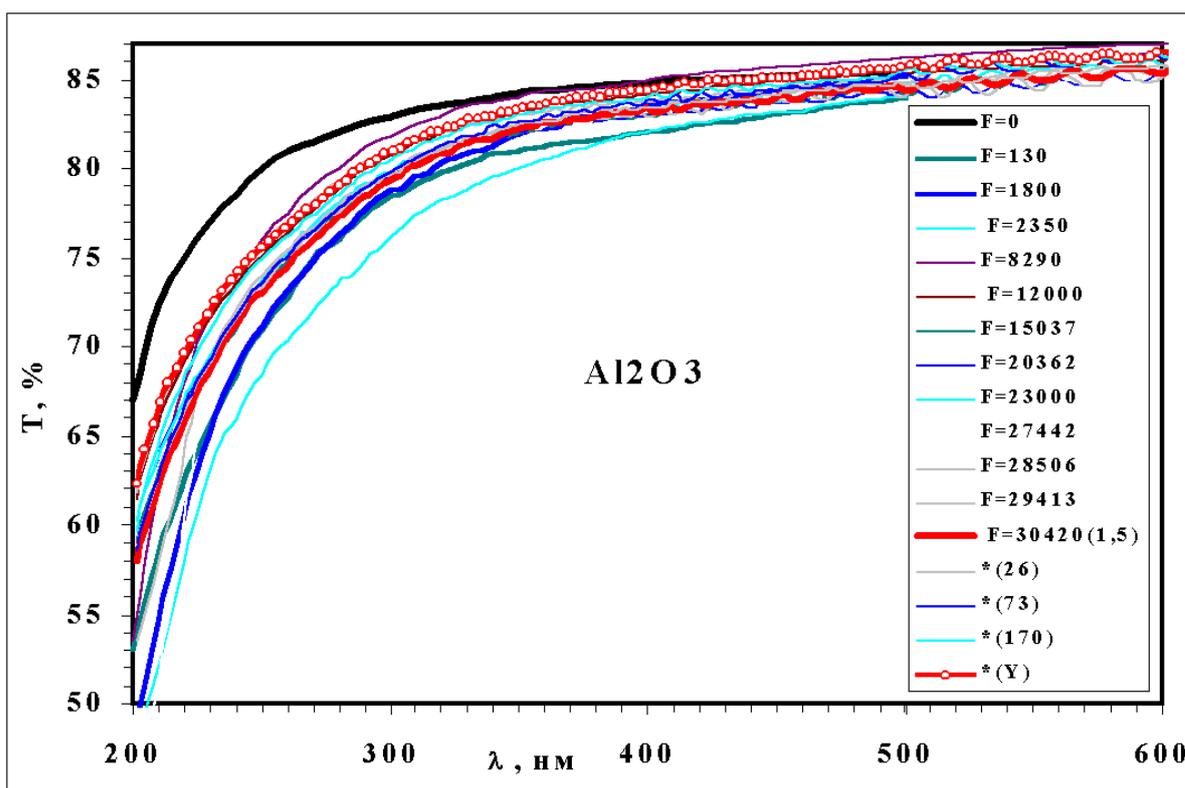


Рисунок 1.15 - Спектры пропускания образца Al_2O_3 толщиной 1.8 мм до и после облучения ЭП с соответствующими флюенсами в [Дж/см²]. Цифра в скобках показывает часы задержки в прописывании после последнего выстрела, (Y) – год.

Видно, что пропускание образца уже после первого облучения с $F=130 \text{ Дж/см}^2$ вышло на новый уровень, возле которого и оставалось все последующее время. Наиболее точно спектр этого нового состояния описывается красной кривой, полученной при $F=30420 \text{ Дж/см}^2$ через 1.5 часа после последнего выстрела электронной пушки. Спектры с обозначениями $F=30420(N)$ отражают релаксацию спектра через N часов после облучения, (Y) - год. Все остальные кривые, сильно отличающиеся от этих последних, имеют неповторяющийся характер. Это указывает на наличие некоторых случайных факторов, сказавшихся на их структуре. Это могла быть плохая калибровка спектрофотометров или наличие загрязнений поверхности образца.

Таким образом, стационарный уровень пропускания образцов лейкосапфира при воздействии ионизирующих и лазерных излучений будет несколько отличаться от исходного. Уровень этого различия зависит от толщины и качества образца: количества примесей в нем и исходной дефектности структуры. По нашим результатам, эти спектральные различия при толщине образца около 2 мм не превысили 10% в УФ области при флюенсах ЭП до 30 кДж/см^2 . Изучение под электронным микроскопом облученной и не облученной поверхности образца показало отсутствие каких-либо различий. Следовательно, полученные результаты по стабильности пропускания исследованного образца Al_2O_3 под действием ЭП не являются предельными.

Кроме высокой радиационной стабильности, лейкосапфир обладает и высокой стойкостью к воздействию фтора. В связи с этим и возникла идея использовать тонкие пластины высокочистого Al_2O_3 для защиты основного материала окон эксимерных ЭПЛ от воздействия ИИ и агрессивной газовой среды. Использовать толстые окна из Al_2O_3 не выгодно из-за значительного линейного и нелинейного поглощения УФ ЛИ в них. Использование тонких защитных пластин лейкосапфира с толщиной до 1 мм, которые уже сейчас изготавливаются с размерами ~ 40 см, позволяет, согласно рисунку 1.2, более чем на 2 порядка уменьшить радиационную нагрузку на основной материал окна.

Эта идея будет полезной при решении нескольких задач: необходимо найти способ крепления тонких пластин Al_2O_3 на поверхности основного окна, а также необходимо разработать просветляющие покрытия для снижения френелевского отражения от его граней. Для работ в этом направлении мы купили партию пластин Al_2O_3 толщиной 0,37 мм и диаметром 52 и 12 мм. Качество полировки их поверхностей было 60/40. Пропускание этих пластин в УФ и ВУФ диапазоне показано на рисунке 1.16.

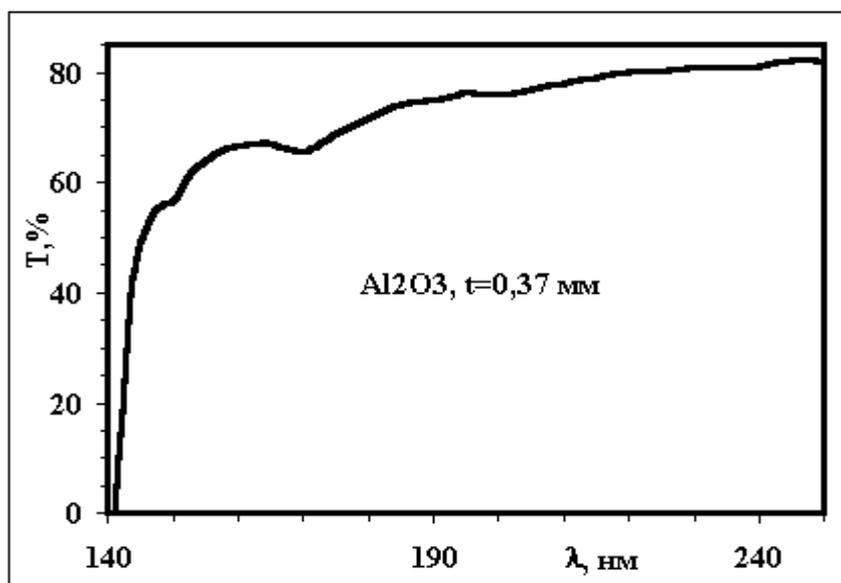


Рисунок 1.16 – Спектр пропускания тонких пластин Al_2O_3 .

Маленькие пластинки лейкосапфира диаметром 12 мм мы использовали для отладки технологии их крепления на кварцевых подложках с использованием оптического клея УФ215. Проверка поведения нескольких таких склеенных двухслойных окон с основным материалом из КУ-1 под действием ЭП должна была позволить оценить перспективы такого решения первой задачи перед экспериментами с большими окнами.

Склеивание пластин было выполнено в ГОИ им. С.И.Вавилова, где оптический клей марки УФ215 был разработан наряду с технологией его использования. На рисунке 1.17 показано изменение пропускания двухслойного склеенного окна под действием ЭП установки ЭЛА. Для сравнения другой такой же образец, начальное пропускание которого на рисунке 1.18 отмечено как F4_0, не облучался, а хранился 16 месяцев при комнатных условиях. Как видим, за это время произошло небольшое падение его пропускания в области 200-300 нм, что однозначно связано со “старением” клеевого слоя. У облучавшегося образца прозрачность после первой серии также немного упала, после чего не менялась при дальнейшем облучении. Но все эти изменения значительно меньше, чем падение прозрачности образца из КУ-1 при таком же облучении.

Проведенные эксперименты с двухслойным окном из КУ-1 и Al_2O_3 подтвердили перспективность этого подхода. Но испытанное клеевое крепление на крупногабаритных окнах явно не проходит из-за сильных деформаций тонких пластин Al_2O_3 и деградации клеевого слоя со временем. Здесь требуется поиск новых решений. Эксперименты в этом направлении будут нами продолжены.

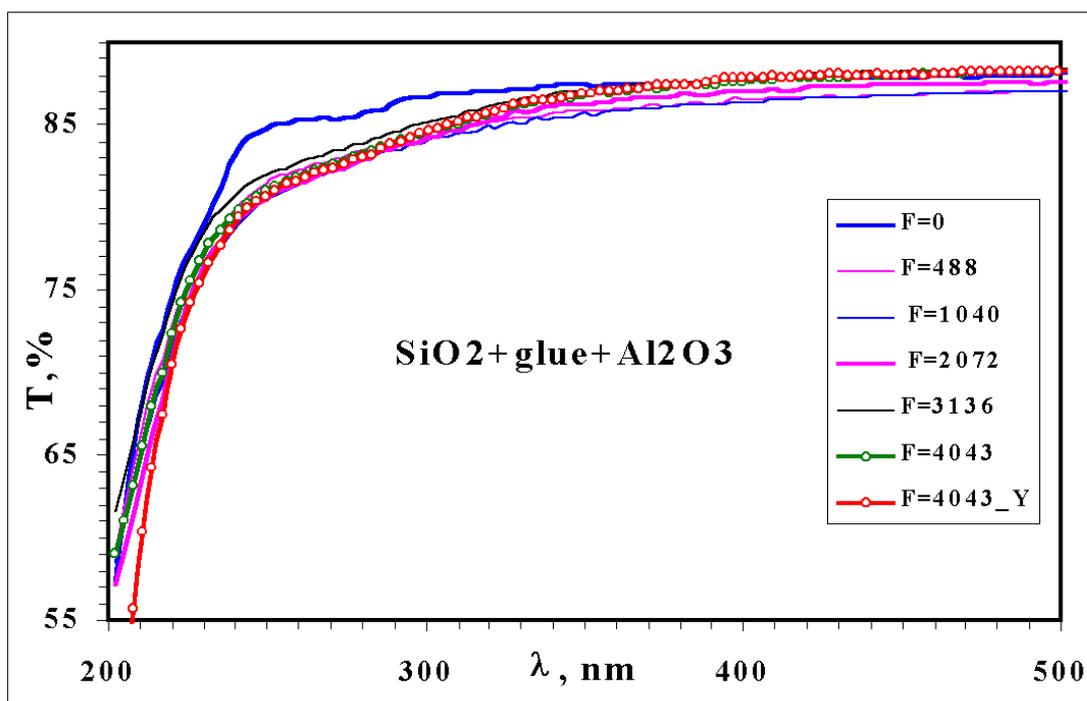


Рисунок 1.17 – Пропускание двухслойного образца, склеенного из 3 мм пластины КУ-1 и 0,37 мм пластины Al₂O₃ после облучения ЭП с разным флюенсом. Красная линия показывает пропускание образца через год после облучения.

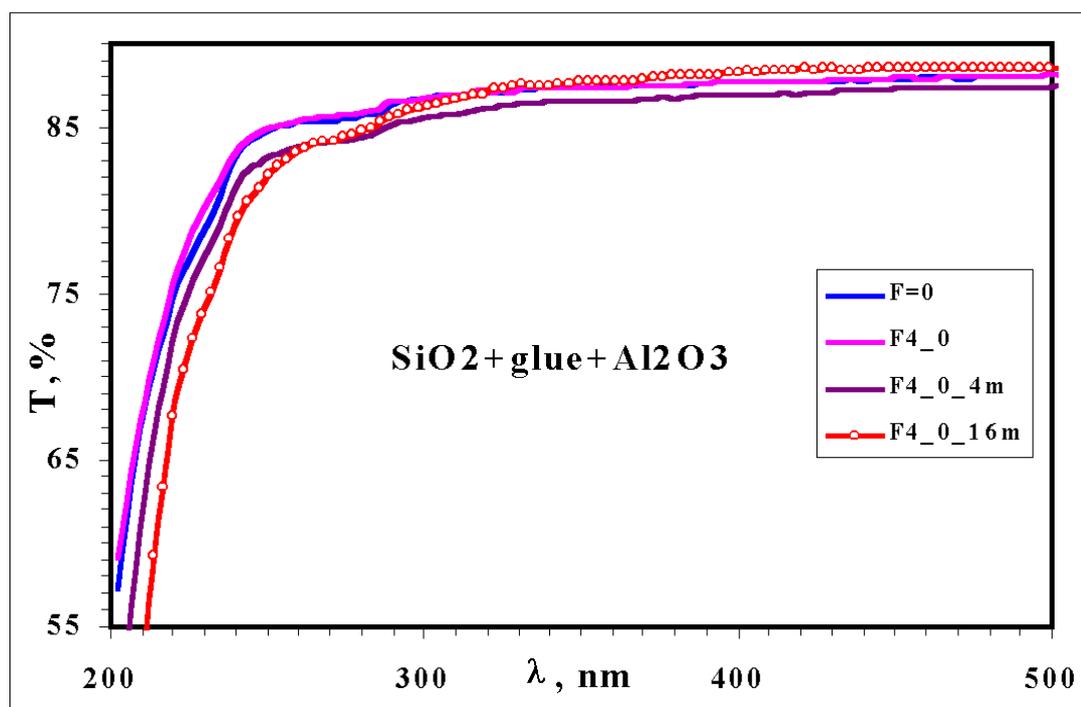


Рисунок 1.18 – Поведение пропускания склеенного окна в течении 16 месяцев хранения.

2. Влияние излучения KrF-лазера на наведенное электронным пучком поглощение в ОМ

Как было показано выше, при длительном облучении образцов кварцевых стекол и высококчистого флюорита электронным пучком их прозрачность уменьшается и выходит на новый стационарный уровень. Но окна электронно-пучковых лазеров облучаются не только ионизирующим, но и лазерным излучением. И вопрос о том, что будет с ОМ при таком комплексном воздействии, интересен не только в практическом, но и научном плане. В данном разделе приводятся экспериментальные результаты, дающие ответ на этот вопрос для кварцевых стекол, облучаемых электронным пучком одновременно с излучением KrF-лазера.

2.1 Радиационная прочность кварцевых стекол при одновременном воздействии электронного пучка и излучения KrF-лазера

Эксперименты выполнялись на установке ЭЛА [17]. В обычных условиях работы плотность ИИ на окне лазерной камеры за импульс составляет $F_1 \sim 0,1$ Дж/см² [1]. При обычном темпе стрельбы установки ($5 \cdot 10^{-3}$ Гц) и таком F_1 величина максимального наведённого поглощения даже в образцах КУ-1, который является наименее радиационно прочным из испытываемых кварцевых стекол, не превышает 9%. У стекла КС-4В наведенное поглощение при таких значениях F_1 не превышает 2-3%, что находится на грани чувствительности спектрофотометров. Для повышения величины наводимого ИИ поглощения необходимо было повысить величину F_1 .

Для реализации этого в лазерной камере установки ЭЛА были установлены постоянные магниты. Их магнитное поле, перпендикулярное направлению распространения электронного пучка накачки, заворачивало его часть в сторону одного из выходных окон лазера. Измерения плотности энергии ЭП с помощью калориметра показали, что величина 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 винипластовой пластине, устанавливавшейся вместо окна в отладочных экспериментах. Затем в этом месте устанавливалось выходное окно из исследуемого оптического материала.

На втором окне лазера устанавливалось 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.

Основная тонкость данного эксперимента заключалась в том, что дополнительной диафрагмой, установленной возле 100% зеркала внутри лазерной камеры, перекрывалась половина лазерного пучка. В результате лазерная генерация происходила на одной половине круга – сечения световой апертуры лазера. При этом только половина исследуемого образца, служившего окном, облучалась лазерным излучением, в то время как электронный пучок облучал его полностью. Сравнение наведенного поглощения в каждой из половинок окна после серии выстрелов установки ЭЛА и 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 KrF-лазер работал на газовой смеси из Ar/Kr/F₂ при соотношении Ar/Kr=10/2 и общем давлении 1,1 атм. Именно при этом давлении газа плотность энергии ЭП на окне составляла в среднем 0,4 Дж/см². Различие в плотностях газовой смеси лазера и воздуха, в котором и проводилось измерение энергии ЭП в области окна в калибровочных экспериментах, компенсировалось при этом введением перед калориметром дополнительного фильтра из алюминиевой фольги.

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

$$E_w = E_o(1+R_o)/(1-R_o) \quad (2.1).$$

С учетом того, что R_o=44% получаем

$$E_w = 2,57 \cdot E_o \quad (2.2).$$

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 выходного ЛИ. Интенсивность ЛИ на окне (I_w) вычислялась из выражения

$$I_w = E_o/\tau \quad (2.3),$$

где τ=80 нс – длительность импульса ЛИ.

По данной методике было испытано пять образцов кварцевых стекол. Это три образца Корнинг 7980 (Standard Grade – C-0, KrF grade –C-KrF, ArF grade –C-ArF), КУ-1 и КС-4В. В связи с тем, что диаметр корнинговских образцов 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. Образцы КУ-1 и КС-4В были диаметром 60 мм при толщине 17 мм. Они работали с обычной световой апертурой 50 мм.

Испытываемые образцы окон работали на лазерной камере в течении 6-7 дней. За это время на установке производилось около 400 импульсов. Полная плотность энергии ЭП на поверхности окон за это время достигала значения $F \sim 160$ Дж/см². Средняя плотность энергии излучения KrF-лазера на облучавшейся половинке окна за импульс составляла в этих экспериментах $E_w \sim 0,3$ Дж/см² при интенсивности $I_w \sim 4$ МВт/см². Примерно через час и через день после последнего выстрела каждая половинка окна прописывалась на спектрофотометре Spectronics Genesys-2 в области 200-1000 нм. Типичные спектры пропускания одного из исследованных образцов до (C-ArF_0) и после воздействия только ЭП (E) и ЭП+ЛИ (L) представлены на рисунке 2.1.

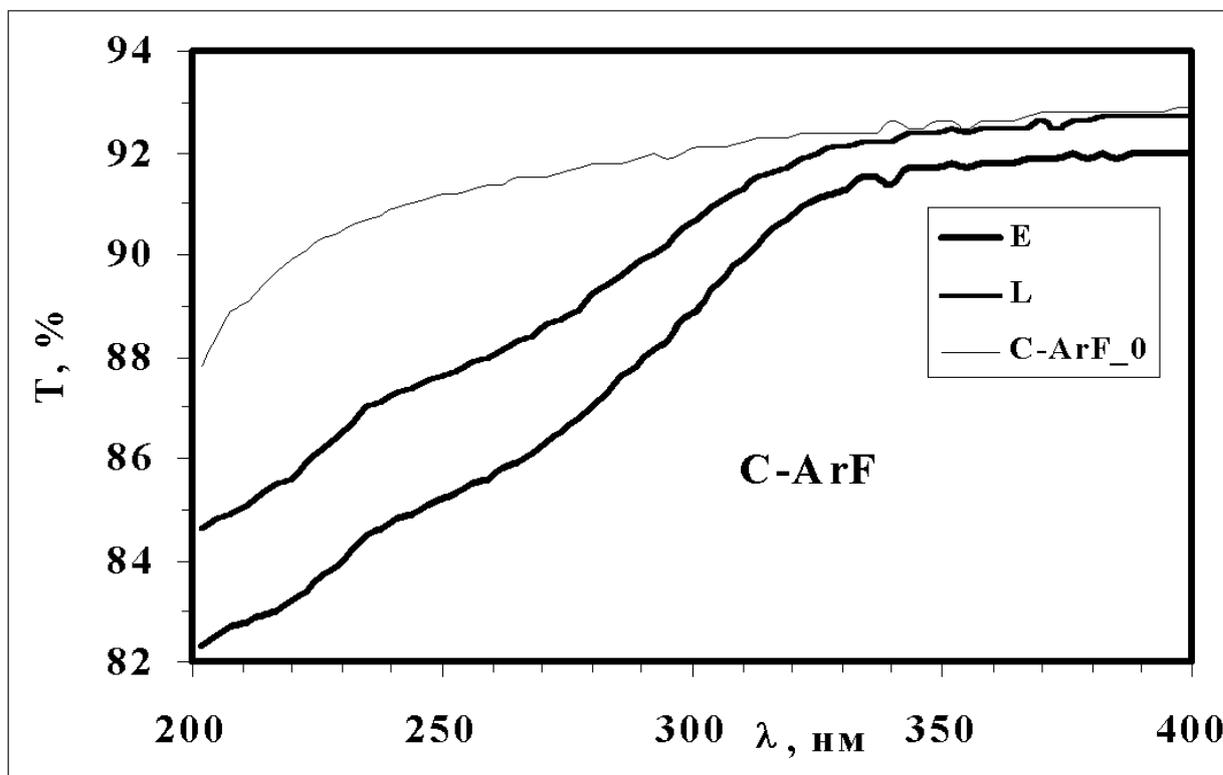


Рисунок 2.1 - Спектры пропускания соответствующих половинок образца стекла Корнинг 7980 (ArF Grade) (C-ArF) до (..._0) и после облучения ЭП (E) и ЭП одновременно с излучением KrF-лазера (L).

Из рисунка 2.1 видно, что область, подвергшаяся воздействию ЭП и ЛИ, имеет лучшее пропускание, чем область, облучавшаяся только ЭП. Это различие наблюдалось во всем видимом диапазоне спектра при $\lambda > 350$ нм, где, как было показано ранее, наведенное ЭП поглощение отсутствует. По-видимому, это различие связано с лазерной очисткой поверхности. Этот эффект наблюдался на всех испытанных кварцевых образцах.

Из спектров пропускания на основе поточечного преобразования по формуле (1.1) были построены спектры оптической плотности для соответствующих кривых E и L. Они представлены на рисунке 2.2.

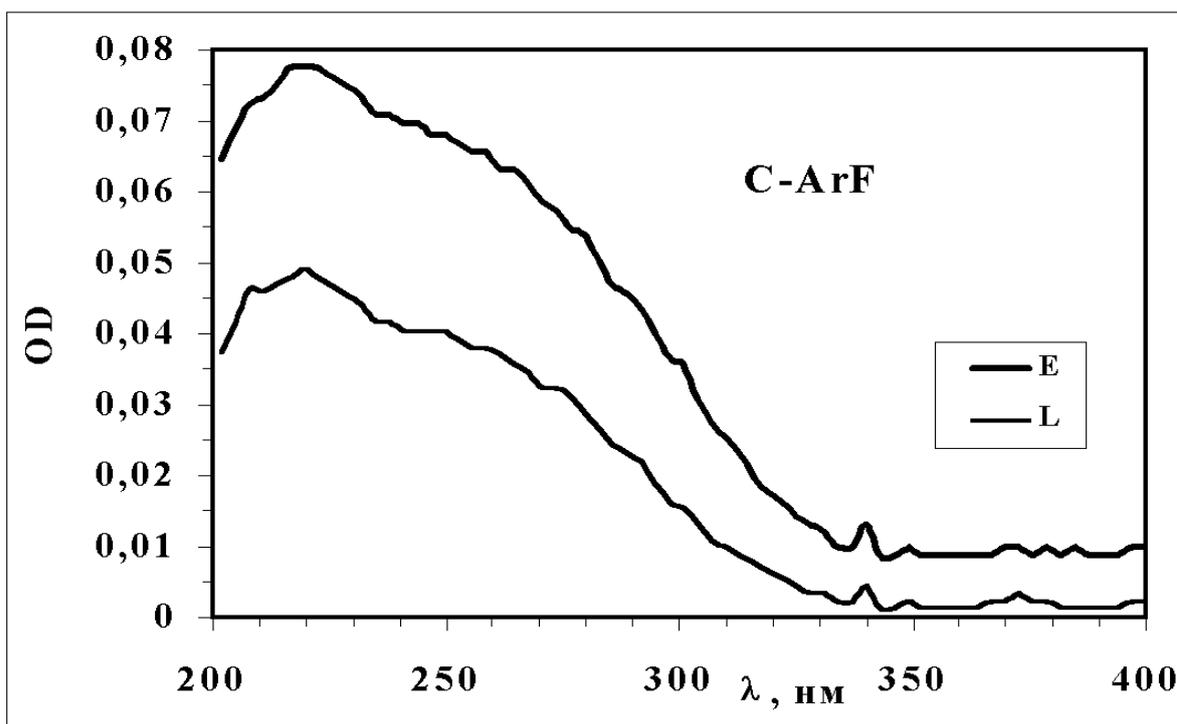


Рисунок 2.2. - Спектры оптической плотности для разных половинок образца C-ArF, облученных только ЭП (E) и и ЭП одновременно с излучением KrF-лазера (L).

Здесь наглядно 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} , величина которого определялась следующим образом:

$$K_{EL} = (OD(250) - OD(400))_L / (OD(250) - OD(400))_E \quad (2.4)$$

Такое определение величины K_{EL} позволяет устранить неопределенность, связанную с выбором нулевого уровня для участков образца с разной чистотой поверхности.

Полученные в данных экспериментах значения коэффициентов K_{EL} для всех исследованных образцов кварцевых стекол представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Марка стекла	K_{EL}
С-0	2
С-KrF	1,32
С-ArF	1,5
КС-4В	1,55
КУ-1	1,2

Среднее по всем образцам значение $\langle K_{EL} \rangle = 1,5$. Ошибка определения величины K_{EL} не превышает 20%. Следовательно, с точностью до ошибки измерения величина K_{EL} у всех исследованных образцов стекол одинакова и равна 1,5. Другими словами, в окнах электронно-пучковых KrF-лазеров изготовленных из исследованных кварцевых стекол наведенное ИИ поглощение будет в 1,5 раза меньше, чем в случае воздействия на них в том же режиме лишь одного ИИ.

Аналогичные эксперименты с образцами кристаллов высокочистого флюорита не выполнялись. Это связано с тем, что при использовавшемся в экспериментах режиме облучения образцов ЭП, наводимое в CaF_2 поглощение составляло не более 1%, что находится на пороге чувствительности спектрофотометра. Выявить различия в поглощении для разных режимов облучения здесь было практически невозможно.

2.2. Отжиг наведенного ЭП поглощения в ОМ излучением KrF-лазера

Уменьшение наведенного ИИ поглощения в кварцевых стеклах в случае одновременного воздействия на них ИИ и излучения KrF-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. Ответить на эти вопросы можно с помощью экспериментов по раздельному воздействию на образцы ОМ сначала ИИ, а потом ЛИ.

2.2.1 Отжиг наведенного ЭП поглощения в кварцевых стеклах

В процессе длительных экспериментов по изучению поведения ОМ под действием ЭП, о которых говорилось в первом разделе, 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 KrF-лазера на величину наведенного ЭП остаточного поглощения.

В этих экспериментах были использованы 2 образца стекол КУ-1 с №2/2 ($F=18,7$ кДж/см²) и №2/3 ($F=3,2$ кДж/см²), 2 образца стекла КС-4В с №1 ($F=20,6$ кДж/см²) и №2 ($F=4,1$ кДж/см²). Облучение этих образцов на установке ЭЛА было завершено 1.03.2004. Образцы с большим флюенсом облучались в первом режиме, с меньшим – во втором. Около полутора лет на этих образцах отслеживалась релаксация наведенного ЭП поглощения. Кроме этого испытывались также 3 образца стекол Корнинг 7980 (С-0, С-KrF, С-ArF). Эти образцы облучались ЭП с одинаковым $F=6,4$ кДж/см² в первом режиме. Их облучение ЭП было завершено 5.7.05. Примерно через два месяца, в течение которых отслеживалась релаксация их наведенного поглощения, с ними были начаты эксперименты по лазерному отжигу.

Облучение образцов проводилось на электроразрядном эксимерном лазере EMG 150 MSC фирмы "Lambda Physik". За импульс длительностью 20 нс плотность энергии излучения KrF-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 ЛИ ($F(ЛИ)=F_L$)), как правило ~ 100 Дж/см², образцы промерялись 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 на KrF-лазере с соответствующими флюенсами (цифра в таблице после $_$, Дж/см²) показана на рисунке 2.3. Здесь видно, что с ростом флюенса ЛИ спектры пропускания сходятся к определенному пределу, т.е. пропускание выходит на новый стационарный уровень.

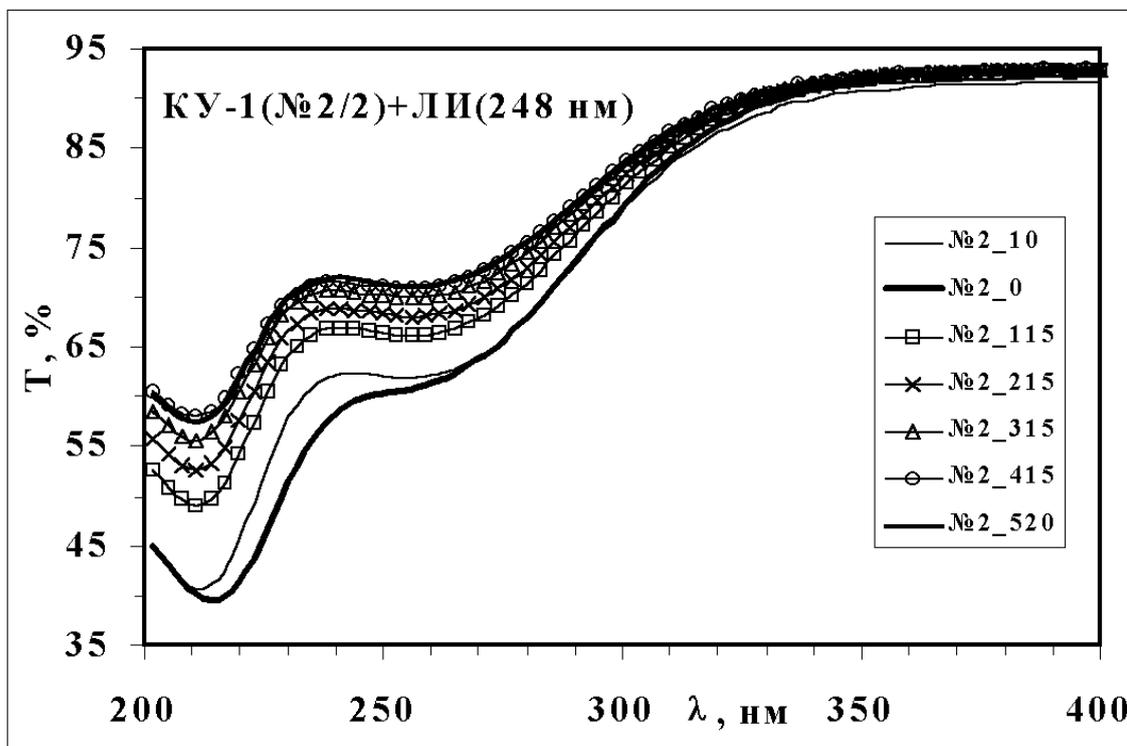


Рисунок 2.3 - Спектры пропускания образца КУ-1 №2/2 перед облучением излучением KrF-лазера (№2_0) и после. Флюенс ЛИ – цифра после $_$ в [Дж/см²].

Для упрощения анализа происходящих в образцах процессов из измеренных спектров пропускания были построены спектры оптической плотности с помощью поточечного преобразования на основе выражения (1.1). Отметим, что на рисунках 2.3 и последующих под обозначением ..._0 представлены соответствующие спектры образцов перед началом их лазерного отжига, а предыстория их облучения ЭП была описана выше. Отдельные спектры OD после соответствующего лазерного облучения для образца КУ-1 №2/2 показаны на рисунке 2.4, а для образца КС-4В №1 на рисунке 2.5.

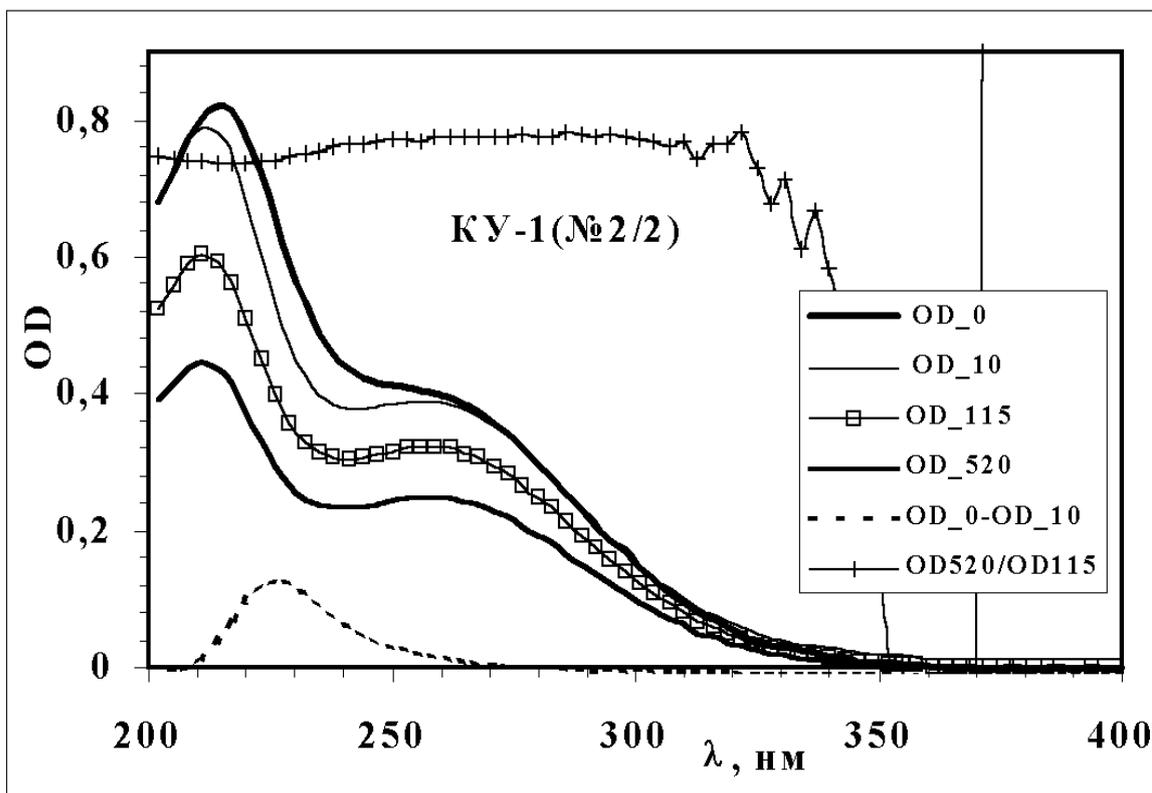


Рисунок 2.4 - Спектры OD образца КУ-1 №2/2 при разных F_L . Пунктиром показана разница между OD_0 и OD_10. Кривая с крестиками – отношение (OD520)/(OD115) без шкалы значений.

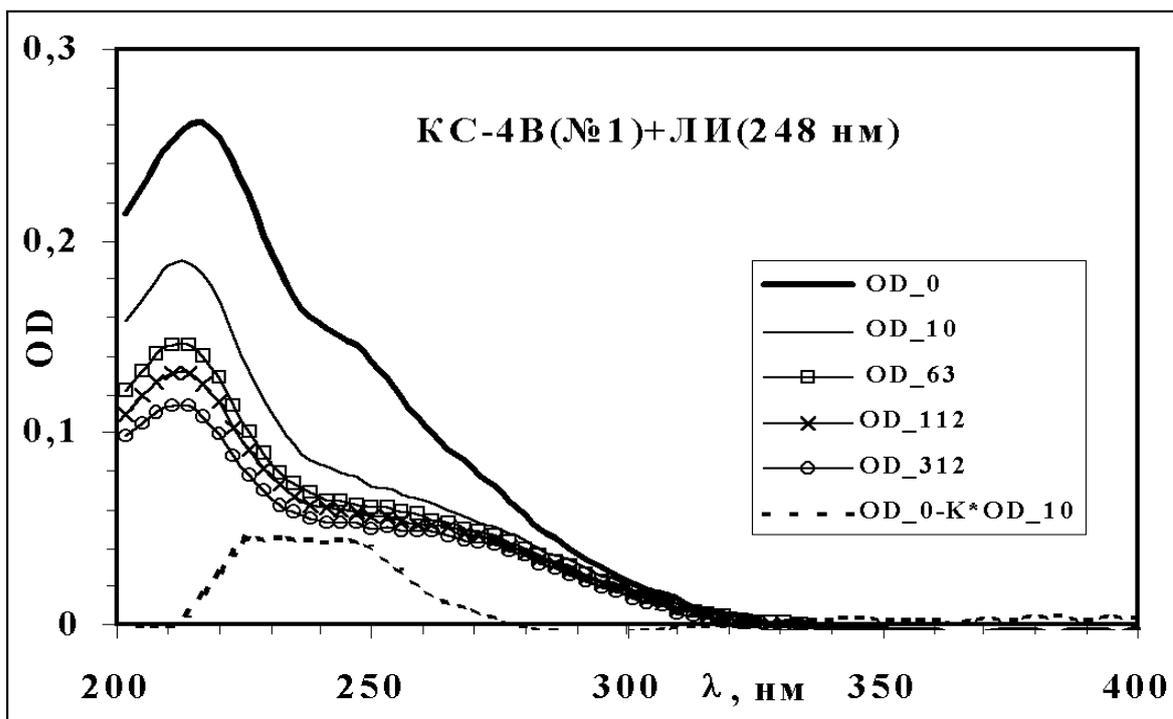


Рисунок 2.5 - Спектры OD образца КС-4В №1 перед облучением излучением KrF-лазера (OD_0) и после. Флюенс ЛИ – цифра после _ в [Дж/см²]. Пунктиром показан соответствующий разностный спектр, где $\kappa = OD_0(200 \text{ нм})/OD_{10}(200 \text{ нм})$.

Из рисунков 2.3 и 2.4 видно, что вначале лазерного облучения у образцов КУ-1 при флюенсах ЛИ около 10 Дж/см^2 происходит выжигание полосы, спектр которой (OD_0-OD_10) представлен пунктирной линией на рисунке 2.4. Эта полоса поглощения имеет максимум на 226 нм при ширине на полувысоте 23 нм. Она наблюдалась и у образца КУ-1 №2/3 и у корнинговских образцов. Эта характерная для стекол 111 группы полоса, по-видимому, принадлежит поверхностным центрам, которые до сих пор экспериментально не наблюдались [30]. После выжигания этой полосы с ростом F(ЛИ) происходит однородное уменьшение поглощения по всей УФ области спектра, на что указывает постоянство отношения OD_520/OD_115 в области 200-330 нм, рисунок 2.4. Аналогичное поведение поглощения с ростом флюенса ЛИ было и у образцов стекол Корнинг 7980.

У стекла КС-4В так же присутствует быстро выжигаемая излучением КгF-лазера полоса, но она имеет несколько другую форму (пунктирная кривая на рисунке 2.5). Она была получена при вычитании из OD_0 кривой OD_10 домноженной на коэффициент $k=(OD_0(200 \text{ нм}))/OD_10(200 \text{ нм})$, который обеспечивал совмещение “хвостов” соответствующих спектров. Полученная полоса с широким максимумом в области 226-250 нм явно состоит из нескольких элементарных полос. При дальнейшем увеличении F_L у образцов КС-4В, как и у других стекол, происходило однородное уменьшение поглощения по всей УФ области с выходом на квазистационарный уровень.

На рисунке 2.6 представлены экспериментальные зависимости OD(250 нм) от F_L на 248 нм для всех исследованных образцов кварцевых стекол. Они наглядно показывают, что наведенное поглощение в кварцевых образцах под действием излучения КгF-лазера уменьшается до нового квазистационарного уровня.

Определим это уменьшение коэффициентом K_L :

$$K_L=[OD(250)_{\max}-\Delta OD(250)_S]/OD(250)_{\min} \quad (2.5)$$

Здесь $OD(250)_{\max}$ есть оптическая плотность образца на 250 нм перед началом его лазерного облучения, $\Delta OD(250)_S$ – изменение OD(250), связанное с выжиганием поверхностного поглощения, $OD(250)_{\min}$ – минимальное значение OD(250) после облучения образца с максимальным флюенсом ЛИ. Значения коэффициентов K_L для всех испытанных кварцевых образцов представлены в Таблице 2.2.

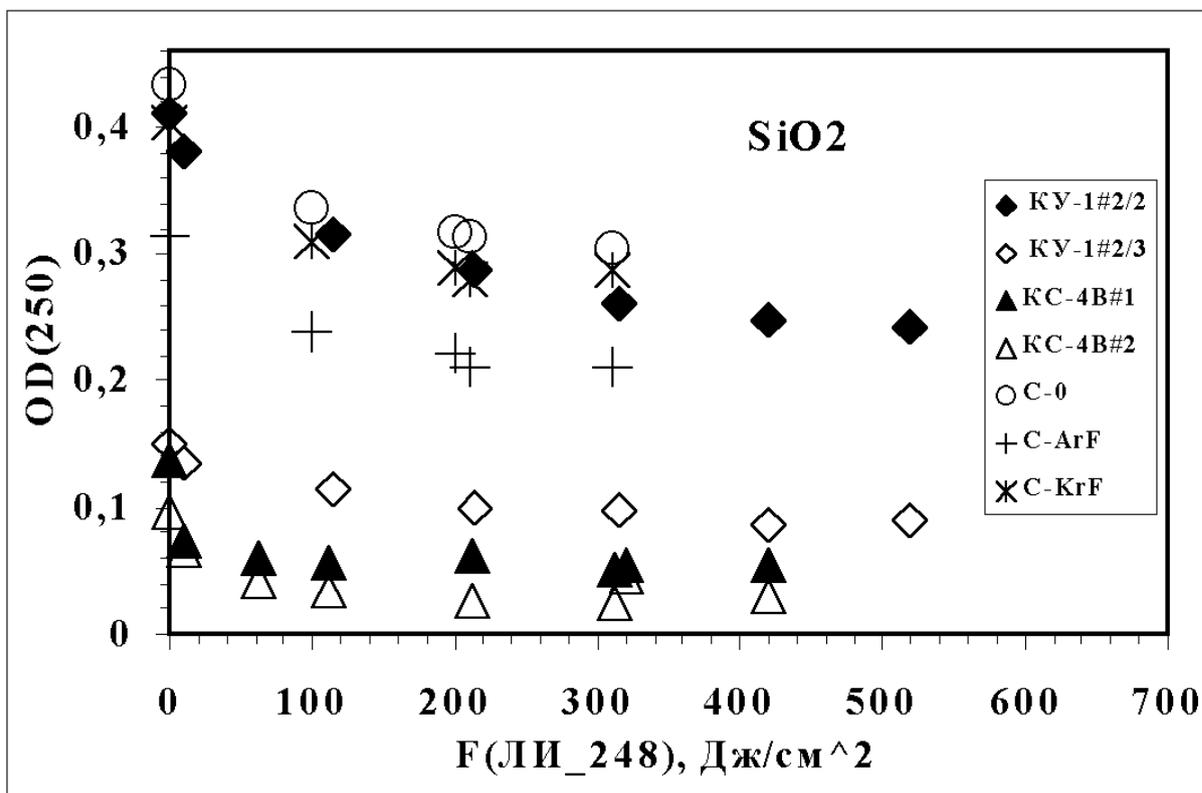


Рисунок 2.6 - Зависимости OD на 250 нм от флюенса ЛИ на 248 нм для всех испытанных образцов кварцевых стекол.

Таблица 2.2.

Образец	K_L
КУ-1 №2/2	1,7
КУ-1 №2/3	1,7
С-0	1,5
С-KrF	1,4
С-ArF	1,5
КС-4В №1	1,8
КС-4В №2	2

Отметим, что значения K_L у корнинговских образцов получены при $F_L=300$ Дж/см², что, по сравнению с экспериментами по КУ-1, дает несколько заниженное значение. У образцов КС-4В, особенно у №2, из-за малости $OD(250)_{min}$ ошибка определения величины K_L примерно вдвое выше, чем у других образцов, у которых она не превышает 10%. По результатам видно, что средняя величина K_L по всем испытанным образцам составляет 1,7. В пределах ошибки эксперимента с ней совпадают все полученные

значения. Следовательно, с помощью излучения КгF-лазера можно выжигать УФ полосы наведенного ИИ поглощения в кварцевых стеклах до уровня не менее чем в 1,7 раза меньшее, чем исходное.

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 эффективности их образования.

2.2.2 Отжиг наведенного ЭП поглощения в CaF_2

Аналогичные эксперименты были проведены с тремя образцами высокочистого CaF_2 из тех шести, которые были облучены электронным пучком на установке ЭЛА с общим флюенсом $26,2 \text{ кДж/см}^2$, раздел 1. Промежуток между окончанием облучения этих образцов электронным пучком и началом экспериментов с ЛИ составлял 38 дней. Это позволило устранить влияние естественной релаксации наведенного поглощения на результаты экспериментов с ЛИ..

На рисунке 2.7 показаны спектры пропускания одного из исследованных образцов CaF_2 с №4 до лазерного облучения (#4), и после облучения излучением КгF-лазера с общим флюенсом 50 Дж/см^2 (#4*), 150 Дж/см^2 (#4**) и 250 Дж/см^2 (#4***). Как видно, по этим спектрам сложно судить что-то о влиянии ЛИ на наведенное поглощение из-за систематической ошибки, связанной с параллельным смещением спектров пропускания при разных прописываниях на спектрофотометре.

Поэтому как и ранее в разделе 1, для количественного описания происходящих с образцами CaF_2 изменений, но уже под действием ЛИ, была использована величина провала в спектрах пропускания в области поглощения F-центров на 379 нм ($\Delta D(379 \text{ нм}) = \Delta D$), которая определяется выражением (1.3) Использование этой величины для количественной характеристики наведенного поглощения в CaF_2 позволяет устранить систематическую ошибку, связанную с параллельным смещением спектров в процессе прописывания образцов.

На рисунке 2.8 представлены экспериментальные зависимости ($\Delta D(379 \text{ нм})$) от флюенса ЛИ ($F(\text{ЛИ}=248)$) для трех исследованных образцов CaF_2 с №4, 12 и 14, а также соответствующие средние по трем значениям величины (A).

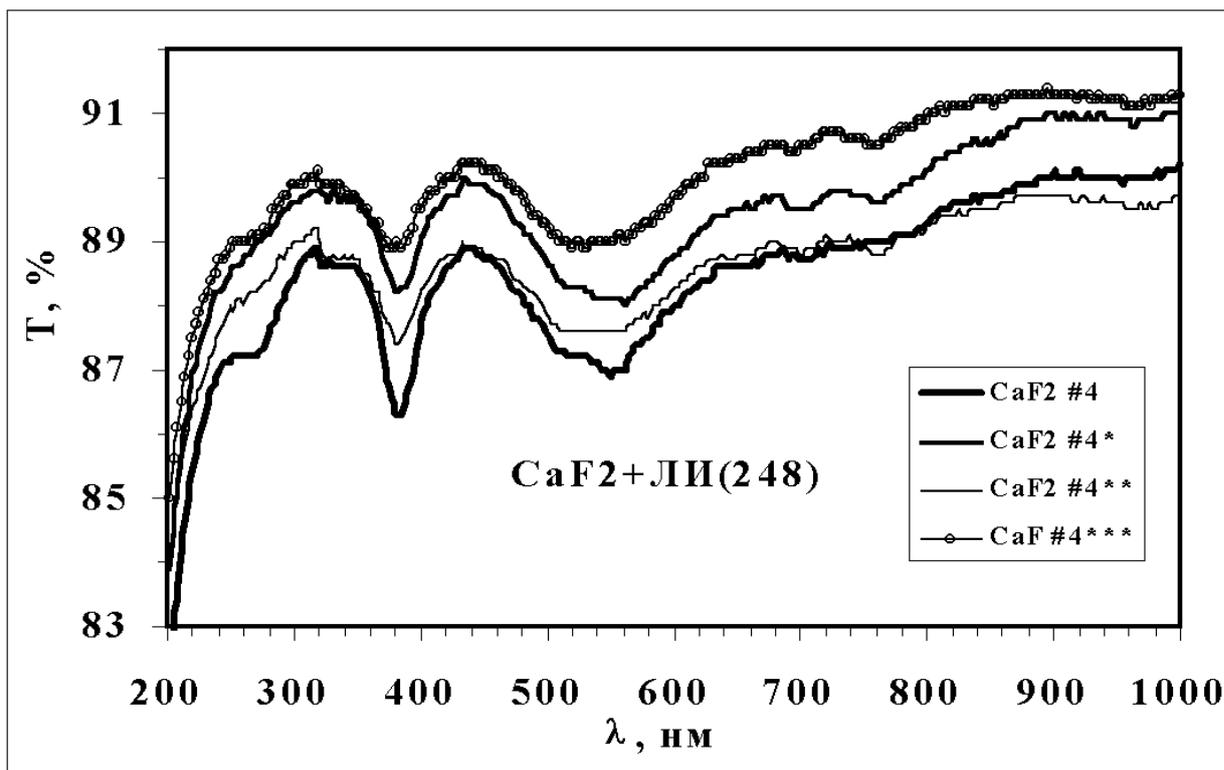


Рисунок 2.7 - Спектры пропускания образца CaF_2 №4 перед началом облучения излучением KrF-лазера (CaF_2 #4) и после облучения ЛИ с флюенсом 50 Дж/см^2 (#4*), 150 Дж/см^2 (#4**) и 250 Дж/см^2 (#4***).

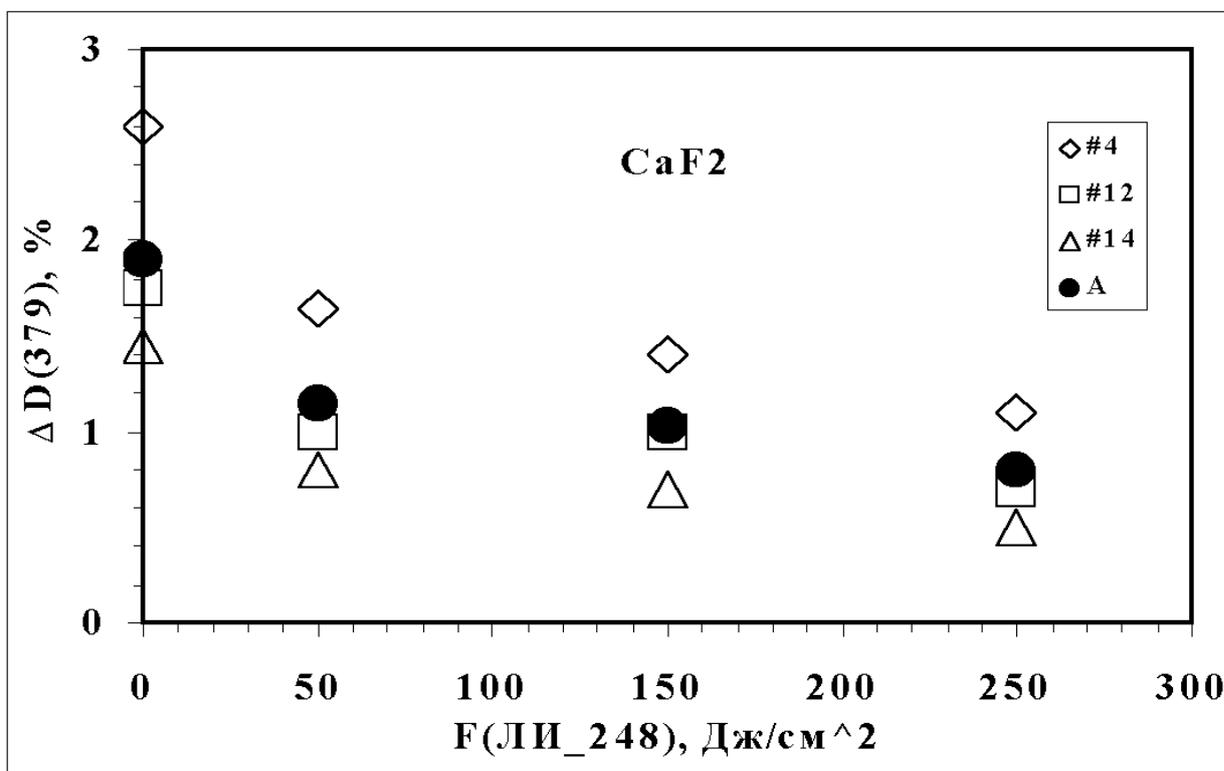


Рисунок 2.8 - Зависимости $\Delta D(379 \text{ nm})$ от флюенса излучения KrF-лазера для трех образцов CaF_2 с №4, 12 и 14, а также соответствующие средние по трем значениям величины (A).

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 :

$$K_C = \Delta D(379)_{\max} / \Delta D(379)_{\min} \quad (2.6)$$

Здесь $\Delta D(379)_{\max}$ – соответствующая величина до лазерного облучения, $\Delta D(379)_{\min}$ – после облучения ЛИ с максимальным флюенсом. Для средних значений на рисунке 2.8 величина $K_C=2,4$. Отметим, что это наблюдается на образцах с заметными следами примеси кислорода [3]. На предельно чистых образцах CaF_2 уменьшение величины $\Delta D(379)$ и без ЛИ происходит примерно в 2 раза за 3 дня после окончания воздействия ЭП, о чем говорилось в разделе 1. Облучение таких образцов излучением КгF-лазера при интенсивностях $\sim 5 \text{ МВт/см}^2$ еще больше ускорит релаксацию наведенного поглощения.

2.2.3 Отжиг наведенного ЭП поглощения в MgF_2

В случае с MgF_2 , излучение КгF-лазера ($\lambda = 248 \text{ нм}$) практически попадает в максимум полосы поглощения F – центров. Эффект выжигания F-полосы светом изучался на спектрах наведенного поглощения кристаллов MgF_2 во многих работах, в частности [25-28]. Поэтому при описании наших экспериментов мы остановимся на новых фактах.

При изучении воздействия ЛИ в F-полосу поглощения образцов MgF_2 использовалось излучение КгF- лазера (248 нм) установки ЭЛА [17]. Плотность энергии ЛИ на образцах была $0,1 \text{ Дж/см}^2$ при длительности импульса 80 нс. По образцам было сделано две серии импульсов ЛИ с суммарным флюенсом в первой серии 5, а во второй - 6 Дж/см^2 . После каждой серии измерялись спектры пропускания образцов и строились соответствующие спектры их оптической плотности.

На рисунке 2.9 показаны спектры пропускания второго образца MgF_2 от Corning (C2) до (C2(0)), и после облученного ЭП с $F=3080 \text{ Дж/см}^2$ и пролежавшего в темноте до облучения ЛИ около года (кривая C2(3080)). Кривая LR=5 и кривая LR=11 есть спектры того же образца после первой и второй серий импульсов ЛИ. Из этих спектров видно, что под действием ЛИ пропускание образца в области 110-300 нм значительно увеличилось. При этом уменьшилось пропускание в области 420 нм, а также явно обозначилась новая полоса поглощения с максимумом в области 460 нм.

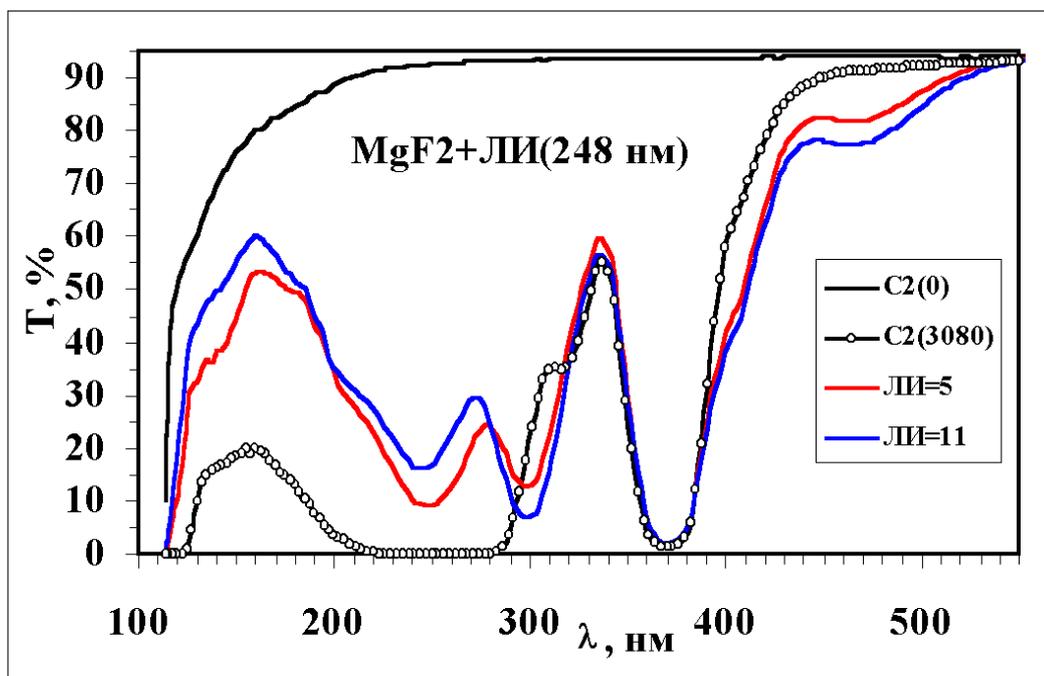


Рисунок 2.9 - Спектры пропускания образца MgF_2 до облучения ЭП (C2(0)) и после (C2(3080)). Красная и синяя линии – это спектры образца после лазерного облучения с общим флюенсом 5 и 11 Дж/см², соответственно.

Количественно эти изменения можно увидеть из рисунке 2.10, где представлены спектры оптической плотности для соответствующих спектров T с рисунка 2.9. Здесь приводятся также разностные спектры между C2(3080) и LR-5, а так же LR-5 и LR-11, обозначенные соответственно DOD1 и DOD2.

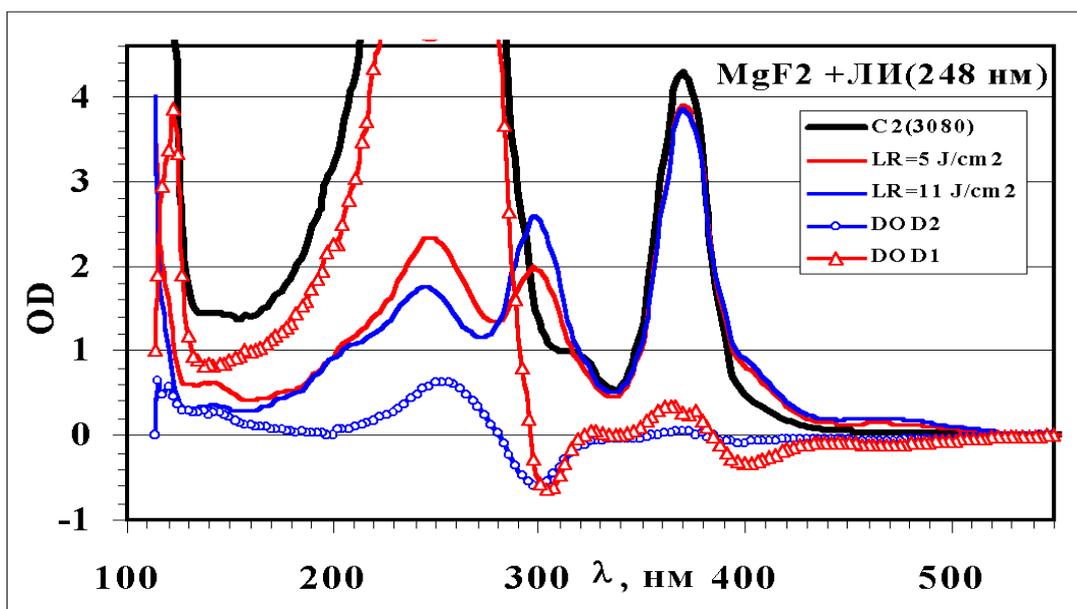


Рисунок 2.10 - Спектры оптической плотности образца C2 после облучения ЭП с $F=3080$ Дж/см² (C2(3080)) и последующего облучения KrF лазером с флюенсом 5 Дж/см² (LR-5 J/cm²) и 11 Дж/см² (LR-11 J/cm²). Кривая DOD1 – разность между спектрами C2(3080) и LR-5, а DOD2 разность между LR-5 и LR-11.

Из последнего рисунка видно, что после первой серии импульсов поглощение очень сильно падает на всех линиях в области <280 нм, причем примерно одинаково «выгорают» как F- центры, так и α -центры (120 нм). Наблюдалось так же незначительное падение поглощения на линии 370 нм. Рост OD наблюдался на линиях 300, 400 и 460 нм. После второго облучения направление изменений в спектральных компонентах сохраняются (см. DOD2), но интенсивность всех процессов, резко сокращается. Исключением является линия 300 нм, рост которой сохраняется.

Спектр OD LR-5 очень похож на спектр из [25], полученный после облучения образца MgF_2 с наведенным поглощением маломощным светом с $\lambda=254$ нм. Но в нашем случае наблюдается не рост как в [25], а падение поглощения на 370 нм. Это указывает на то, что концентрация M-центров, обуславливающих поглощение на 370 нм, может выходить на насыщение.

Стоит отметить также появление и возрастание новой полосы поглощения с максимумом на 460 нм при облучении излучением Krf-лазера образцов MgF_2 с очень сильным наведенным поглощением на 260 и на 370 нм. Она наиболее ярко видна на рисунке 2.9. Эта полоса, по-видимому, принадлежит R-центрам (комплексам из трех F-центров [20, с.87]). Указаний на ее существование по литературным источникам мы не нашли. Однако, только гипотеза о формировании R-центров при F-подсветке в образцах с высокой концентрацией F- и M-центров позволяет объяснить одновременное уменьшение их концентрации.

Нами были проведены также эксперименты по селективному воздействию излучения второй гармоники титан-сапфир лазера с $\lambda=372$ нм в полосу поглощения MgF_2 с максимумом на 370 нм. Облучался образец из Kerth Kristalle (K3), имевший флюенс от ЭП 2680 Дж/см². В этих экспериментах плотность энергии ЛИ за импульс длительностью 50 фс составляла 2 мДж/см², частота следования импульсов была 10 Гц. Суммарная плотность энергии ЛИ на образце за серию импульсов составила 10 Дж/см².

На рисунке 2.11 представлены произошедшие изменения в спектре OD образца K3 после такого лазерного облучения. Видно, что все изменения в поглощении происходят в диапазоне ~ 300 -500 нм. Лазерная подсветка привела к падению поглощения в полосах 320 и 370 нм, причем у последней в 4 раза. При этом увеличилось поглощение в полосах на 400 и 460 нм. Но уже через 5 дней после этого эксперимента OD на 370 нм увеличилось

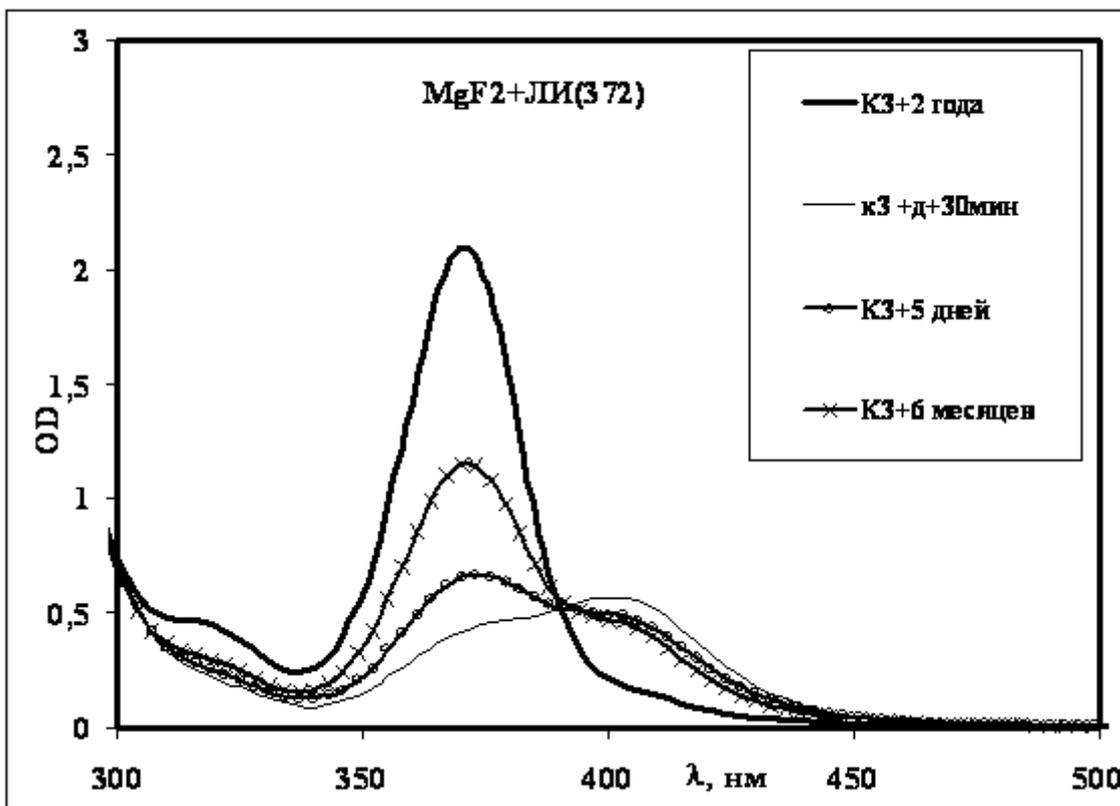


Рисунок 2.11 - Спектры OD образца MgF₂ К3 спустя 2 года после облучения ЭП с $F=2680 \text{ Дж/см}^2$ (К3+2 года), через 30 минут после облучения ЛИ(372 нм) с $F_L=10 \text{ Дж/см}^2$ (К3+д+30 мин), спустя 5 дней (К3+5 дней) и 6 месяцев (К3+6 месяцев) после лазерного облучения.

примерно в 1,5 раза, а через 6 месяцев – в 3 раза от начального уровня после лазерного облучения. При этом интенсивность поглощения на более длинноволновых полосах в течении этого времени падала.

Полученные результаты по отжигу наведенного ЭП поглощения в образцах MgF₂ лазерным излучением с длиной волны 248 и 372 нм показывают, что в данном кристалле при подсветке в F-полосу происходит релаксация френкелевских дефектов и образование различных комплексов из F-центров. M-центры, в свою очередь, могут преобразовываться при подсветке в их полосы поглощения. Все эти элементарные процессы, частично еще не совсем изученные, необходимо учитывать при создании моделей поведения кристаллов MgF₂ под действием ионизирующих и лазерных излучений.

2.3 Выводы по результатам раздела 2

Представленные в данном разделе экспериментальные результаты показывают, что длительное облучение кварцевых стекол типа КУ-1, КС-4В, Корнинг 7980 импульсами излучения КrF-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 стационарного 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 стационарного поглощения в исследованных ОМ под действием излучения КrF-лазера позволяют повысить прогнозы по ресурсным возможностям окон мощных электронно-пучковых КrF-лазеров, предназначенных, в частности, в качестве драйверов для лазерного термоядерного синтеза. Среди испытанных, российское стекло КС-4В является наилучшим материалом для крупногабаритных окон таких лазеров. Данные эффекты повышают и без того уникально высокую стойкость высокочистых кристаллов CaF_2 к воздействию электронного пучка и рентгеновского излучения.

Воздействие излучения КrF-лазера на образцы MgF_2 с наведенным поглощением приводит к просветлению поглощения на всех его полосах в области 110-300 нм. При этом происходит нарастание поглощения на полосах в области ~ 340 -500 нм. При подсветке лазерным излучением в полосу поглощения MgF_2 с максимумом на 370 нм происходит ее просветление и просветление полосы на 320 нм. При этом, однако, возрастает поглощение на 420 и 460 нм. После облучения ЛИ(372 нм) новая структура полос поглощения MgF_2 в области 300-500 нм начинает медленно релаксировать в первоначальному виду. Все эти процессы необходимо принимать во внимание при создании численных моделей поведения кристаллов MgF_2 под действием ионизирующих и лазерных излучений.

Заключение

В рамках изучения свойств современных оптических материалов, пригодных для изготовления окон мощных электронно-пучковых KrF- и других эксимерных лазеров, по оригинальной методике было экспериментально исследовано поведение кварцевых стекол КУ-1, КС-4В, Корнинг 7980, а также высокочистых кристаллов CaF₂, MgF₂ и Al₂O₃ при длительном воздействии импульсов электронного пучка с энергиями электронов до 280 кэВ и общем флюенсе F до ~30 кДж/см².

Обнаружено, что у кварцевых стекол и CaF₂ с ростом F наведенное поглощение выходит на насыщение, величина которого определяется мощностью облучения. У образцов CaF₂ при максимально жестких режимах облучения электронным пучком на установке ЭЛА с общим флюенсом до 30 кДж/см² предельные изменения пропускания не превышали 10% в видимом УФ и ВУФ диапазоне. В насыщенном режиме наведенное ЭП поглощение в области 180-300 нм у стекла КС-4В было в 4 раза меньше, чем у КУ-1, и примерно в 2 раза меньше, чем у стекол Корнинг 7980. Исходя из этих показателей стекло КС-4В (или подобные ему марки) является наиболее перспективным (после CaF₂) материалом для изготовления окон мощных KrF-ЭПЛ.

Экспериментально установлено, что окна KrF-ЭПЛ из кварцевых стекол и флюорита при импульсно-периодическом режиме работы со временем выходят на стационарный уровень поглощения. Величина этого поглощения из-за наличия эффекта лазерного отжига в стеклах будет примерно в 1.5, а в CaF₂ в 2 раза меньше, чем в случае воздействия на них одного лишь ионизирующего излучения, создаваемого электронным пучком накачки лазера.

У всех испытанных образцов высокочистого MgF₂ с ростом флюенса ЭП наблюдалось монотонное нарастание поглощения на серии полос в ВУФ, УФ и видимом диапазоне. При воздействии излучения KrF-лазера на кристаллы MgF₂ с наведенным ЭП поглощением происходит уменьшение их поглощения на полосах в области 110-300 нм, но при этом повышается поглощение на полосах в области 300-500 нм.

У Al₂O₃ с ростом флюенса ЭП наведенное поглощение тоже насыщается, но обусловлено это перезарядкой исходных дефектов кристалла. На исследованных образцах предельные изменения пропускания в УФ диапазоне не превышали 10% при росте флюенсов ЭП свыше 30 кДж/см². Тонкие слои Al₂O₃, в силу их высокой радиационной прочности, можно использовать для защиты основного окна лазера от ИИ. Однако здесь

необходимы дальнейшие эксперименты по поиску оптимальных способов крепления тонких лейкосапфировых пластин на подложки большого диаметра, а также решение вопросов их просветления.

Полученный в процессе данной работы большой комплекс экспериментальных результатов по поведению современных высокочистых ОМ под действием ИИ и ЛИ послужит углублению понимания физики радиационных процессов в них. Эти результаты будут полезны также производителям ОМ и разработчикам мощных электронно-пучковых эксимерных лазеров, а также других источников мощного излучения УФ и ВУФ диапазона.

Данная работа выполнялась при большой материальной и технической помощи группы Зворыкина В.Д. из лаборатории Газовых лазеров ОКРФ ФИАН, за что мы выражаем им глубокую признательность. Необходимо поблагодарить также Миронова И.А., Рейтерова В.М., Евлампиева И.К., Giuliani J.L., Sethian J.D., Wolford M.F. за предоставление образцов оптических материалов, а также Стародубцева Н.Ф. и Дубровскую Г.Г. за помощь в спектральных измерениях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №05-02-16195-а, а также Naval Research Laboratory Program.

Список использованных источников

1. Барабанов В.С., Морозов Н.В., Сергеев П.Б. Наведенное ионизирующим излучением поглощение в окнах K_rF-лазеров. - Квантовая электроника, 1991, т.18, 1364-1366.
2. Сергеев П.Б., Ермоленко Т.А. и др. Наведенное электронным пучком поглощение в кварцевых стеклах. - Оптический журнал, 2004, т.71, №6, 93-97.
3. Сергеев П.Б., Зворыкин В.Д. и др. Наведенное электронным пучком поглощение в кристаллах фторидов щелочноземельных элементов.-Оптический журнал, 2005, т.72, №6, 85-89.
4. Sethian J.D., Myers M.C., Juliani, J.L. et. al Electron Beam Pumped Krypton Fluoride Lasers for Fusion Energy. - Proc. IEEE, 2004, 92 (7), 1043-1056.
5. Gatto A. et. al Synchrotron-radiation-induced damages in optical materials. - Proc. SPIE, Vol. 4932, p. 366-373. Laser-Induced Damage in Optical Materials: 2002.
6. Guenster S. et. al Radiation resistance of optical materials against synchrotron radiation. - Ibid. p. 422-428.
7. Marshall C.D., Speth J.A., Payne S.A. Induced optical absorption in gamma, neutron and ultraviolet irradiated fused quartz and silica. - J. of Non-Cryst. Solids, 1997, V.212, 59-73.
8. Latkowski J.F. et. al Fused silica final optics for inertion fusion energy: Radiation studies and system-level analysis. - Fusion science and technology, 2003, V.43, 540-558.
9. Mironov I.A., Reiterov V.M. et.al High-purity CaF₂ as a material for windows of powerfull excimer lasers.- Proc. of SPIE, 2004, V.5479, p.135-140.
10. Sergeev P.B., Mironov I.A. et.al High-purity CaF₂ as a material for windows of powerfull excimer lasers.- Proc.of 12th Intern. Confer. on Radiation Physics and Chemistry of Inorganic Materials. Tomsk, September 23-27, 2003. p.82-86.
11. Sergeev P.B., Cheremisin I.I., et.al E-beam-induced absorption in various grades of quartz. - Proc. of SPIE, V.5506, 2004, p.81-86.
12. Курбасов В.С., Сергеев П.Б. Моделирование процессов, обуславливающих нелинейное поглощение УФ лазерного излучения в ионных кристаллах. - Квантовая электроника, 2000, т.30., №8, 703-709.
13. Сергеев П.Б. Механизмы нелинейного поглощения в CaF₂ УФ лазерного излучения. - Квантовая электроника, 2002, т.32, №4, 344-348.

14. Черемисин И.И. Развитие принципиальных основ и промышленное внедрение новой технологии синтеза особо чистого кварцевого стекла КС-4В и его аналогов. «В сб.РАН. Физикохимия силикатов и оксидов. - 1998, С.-Пб.: Наука, с.253.»
15. Леко В.К., Мазурин О.В. Свойства кварцевого стекла. – 1985, Л. Наука.
16. <http://www.corning.com/>
17. Sergeev P.V. Electron-Beam Noble-Gas Halide Lasers with High Excitation Level. - J. of Soviet Laser Research, 1993, V.14, N.4, p.237-285.
18. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики.-1991, М.Энергоатомиздат, с.12.
19. Jani M.G. and Hallibuto L.E. Point defects in neutron-irradiated quartz. - J.of Appl.Phys. 1984, V.56(4), 942-946.
20. Стоунхэм А.М. Теория дефектов в твердых телах. – 1978, М. Мир, Т.2, с.16.
21. Чередов В.Н. Дефекты в синтетических кристаллах флюорита. - 1993, С.-П. Наука, с.99.
22. Тоерке I., Cope D.R. Improvements in crystal optics for excimer lasers. - Proc.SPIE. 1993, Vol.1835, p.89-97.
23. Webb J. All-calcium fluoride system uses 157-nm light. - Laser Focus World. 2000. V.36. №9, p. 87-89.
24. Смушков И.В., Сойфер Л.М., Шахнович М.И. Кристаллические оптические материалы для вакуумной ультрафиолетовой области спектра. Физика вакуумного ультрафиолетового излучения.- 1974, К. Наукова думка, с.59-68.
25. Blunt R.F., Cohen M.I. Irradiation-Induced Color Centers in Magnesium Fluoride. - Phys. Rev. 1967, V.153, 1031-1038.
26. Sibley W.A., Facey O.E. Color Centers in MgF₂. - Phys. Rev. 1968, V.174, 1076-1082.
27. Facey O.E., Sibley W.A. Optical Absorption and Luminescence of Irradiated MgF₂. - Phys. Rev. 1969, V.186, 926-932.
28. Никанович М.В. и др. Спектрально-люминесцентные свойства электронных центров окраски в кристаллах MgF₂. -Оптика и спектроскопия. 1986, т.60, 307-312.
29. Закис Ю.Р., Канторович Л.Н., Котомин Е.А. и др. Модели процессов в широкощелевых твердых телах с дефектами. – 1991, Рига, Зинатне, с.157.
30. Skuja L. Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide. - J. of Non-Crystalline Solids. 1998, V.239, p.16-48.



УДК 621.373.826

№ гос. регистрации 0120.0411318

Инв.№ 11220-ОКРФ-8.2

УТВЕРЖДАЮ

Директор ОКРФ ФИАН

академик

_____ **О. Н. Крохин**

« ___ » _____ 2006 г.

**ОТЧЕТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
СОЗДАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ
И НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

(заключительный)

Часть 2

**СОЗДАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИХ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Руководитель темы, д-р физ.-мат.наук,
профессор, зав. лаб. ПЛ _____

_____ **А.З.Грасюк**

МОСКВА 2006

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы,

д-р физ. мат. наук, профессор

А. З. Грасюк

Исполнители темы

д-р физ. мат. наук

Л. Л. Лосев

к-т физ. мат. наук

С. В. Курбасов

А. А. Антипов

Реферат

Отчет 13 с., 6 рис., 10 источников

КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ, МНОГОЧАСТОТНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ, ПИКОСЕКУНДНЫЕ ИМПУЛЬСЫ, ЭКСИМЕРНЫЕ ЛАЗЕРЫ

Объектом исследования являются комбинационные преобразователи лазерного излучения.

Цель работы – разработка способов генерации ультракоротких световых импульсов и многочастотного излучения на основе вынужденного комбинационного рассеяния света.

В результате исследований создан мощный пикосекундный эксимерный лазер и многочастотный лазер, перекрывающей спектральный диапазон от 490 до 640 нм.

Содержание

	Стр.
2.1 Пикосекундный КгF лазер с задающим ВКР генератором	55
Введение	55
Основная часть	55
Заключение	58
2.2 Многочастотная ВКР генерация в жидком четыреххлористом углероде при двухчастотной накачке	59
Введение	59
Основная часть	59
Заключение	60
Список использованных источников	63

2.1 Пикосекундный K_rF лазер с задающим ВКР-генератором

Введение

Прогресс в развитии лазеров ультракоротких импульсов (пикосекундной и фемтосекундной длительности) открывает новые возможности их использования в ряде приложений, таких как микротехнологии, медицина, мониторинг окружающей среды и т.д. [1-4]. Для многих применений часто требуется энергии лазерных импульсов на уровне 1 мДж. В ИК диапазоне импульсы с такой энергией и длительностью могут быть достаточно легко получены с использованием хорошо разработанных лазеров на титанате сапфира. Что касается импульсов УФ диапазона, то стандартные методы генерации высших гармоник существенно усложняют оптическую схему и имеют невысокую эффективность преобразования. Поэтому разработка мощных, надежных, простых и дешевых пикосекундных лазерных систем УФ диапазона является актуальной задачей.

Основная часть

Разработанная нами пикосекундная лазерная система основана на формировании импульса пикосекундной длительности с высоким значением контраста при ВКР-компрессии без частотного сдвига [5] и усилении такого импульса в режиме глубокого насыщения в активной среде электроразрядного K_rF лазера. Оптическая схема лазерной системы показана на рис.1.

На первом этапе короткий импульс (длительностью 3 нс) с крутым передним фронтом ~ 300 пс выделяется с помощью ячейки Погкельса из 20 нс импульса, излучаемого узкополосным K_rF генератором.

На втором этапе выделенный импульс усиливается в K_rF усилителе в режиме насыщения до энергии ~ 1 мДж. Это позволяет сконцентрировать основную часть энергии в коротком пике на фронте импульса длительностью 350 пс.

Третий этап преобразования заключается в ВКР компрессии усиленного импульса при встречном рассеянии в сжатом метане. Применение метана в качестве активной среды обусловлено коротким временем дефазировки T_2 , которое в диапазоне давлений (1-10) атм составляет ~ 30 пс, и позволяет проводить процесс ВКР преобразования пикосекундных импульсов в режиме близком к стационарному. В нашем случае, эффективность ВКР-компрессии составила ~ 30%. Энергия стоксова импульса на длине волны 268 нм составила 0,3 мДж при его длительности 22 пс.

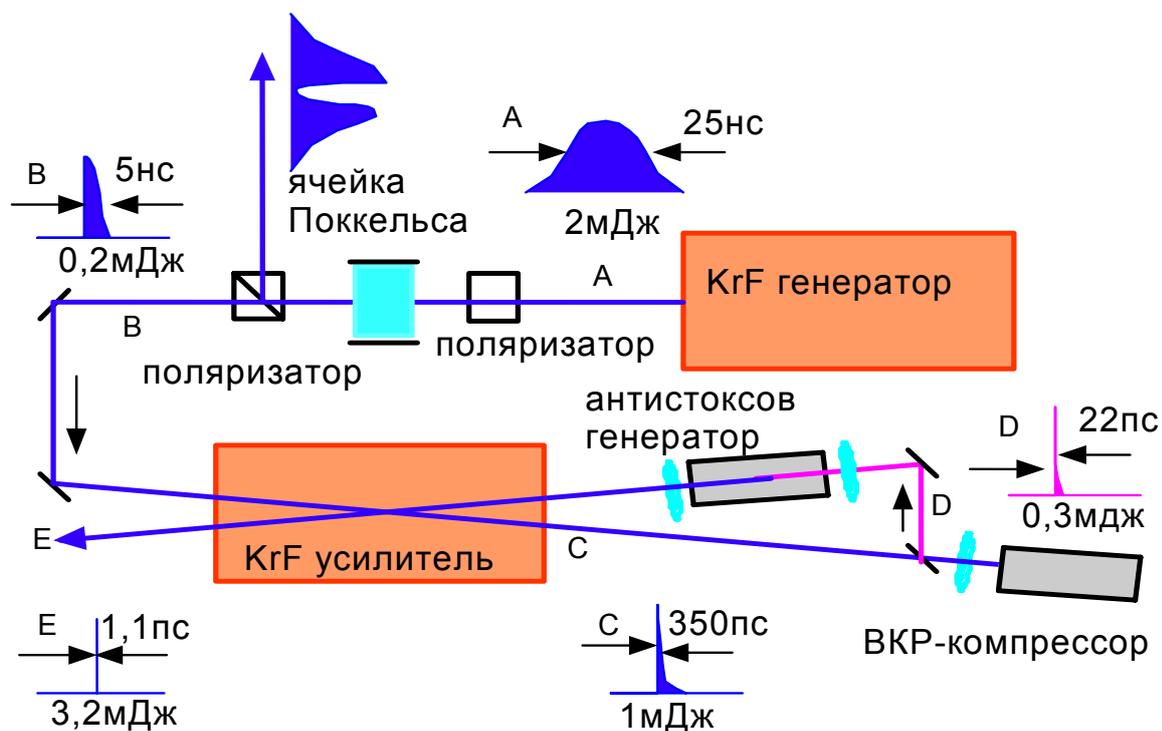


Рис. 1. Оптическая схема пикосекундного KrF лазера. KrF генератор и KrF усилитель – электроразрядные лазеры Lambda Physics: Complex150T и Complex102, соответственно.

На четвертом этапе осуществлялась генерация первой антистоксовой компоненты компрессированного импульса при попутном ВКР в метане. Это позволяло получить короткий импульс на длине волны KrF лазера 248 нм с целью его дальнейшего усиления. При оптимальных условиях [6] эффективность преобразования достигала 5%. Длительность импульса антистоксова излучения с крутым передним фронтом ~ 1 пс составляла ~ 7 пс.

На заключительном этапе осуществлялось усиление в электроразрядном KrF усилителе. В результате насыщенного усиления длительность импульса на выходе усилителя сокращалась до величины сравнимой с длительностью переднего фронта входного импульса. Измеренная методом двухфотонной люминесценции в кристалле BaF_2 длительность выходного импульса составила 1,1 пс (рис.2). Максимальное значение энергии импульса достигало 3.2 мДж. Диаметр светового пучка составлял ~ 1 см. Измеренное значение расходимости излучения не превышало 1,2 дифракционных пределов (рис.3).

Двухкаскадное нелинейное преобразование дало возможность обеспечить эффективную оптическую развязку задающего генератора и усилителя и позволило, таким образом, достичь высокого значения контраста. Измеренное значение контраста по яркости (отношение яркости усиленного импульса к яркости усиленного спонтанного

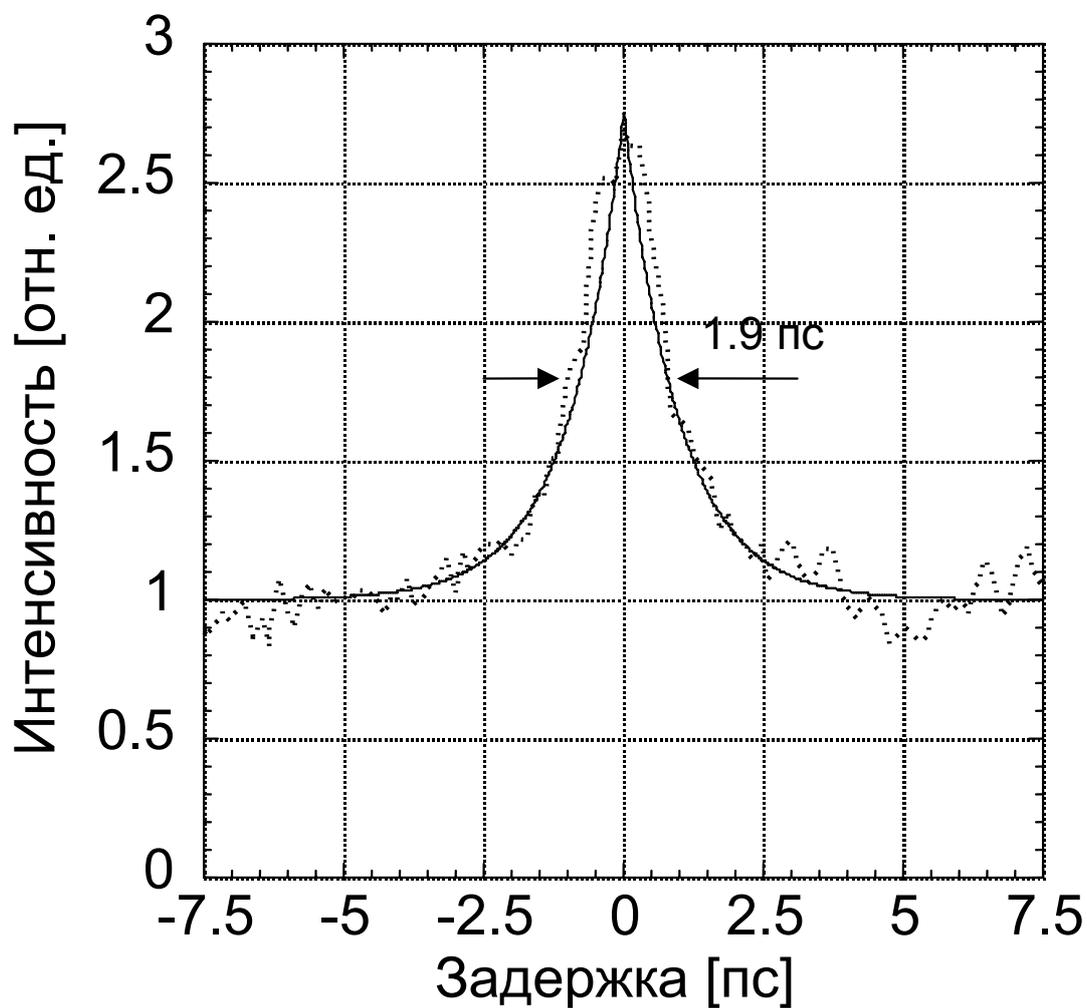


Рис. 2. Автокорреляционная функция импульса на выходе усилителя, полученная методом двухфотонного поглощения в кристалле ВаF₂. Точки – экспериментальные данные, сплошная линия – расчет в предположении импульса экспоненциальной формы длительностью 1,1 пс.

излучения) превысило величину 10^{10} . Такое высокое значение контраста также является результатом высокой мощности импульса на входе усилителя.

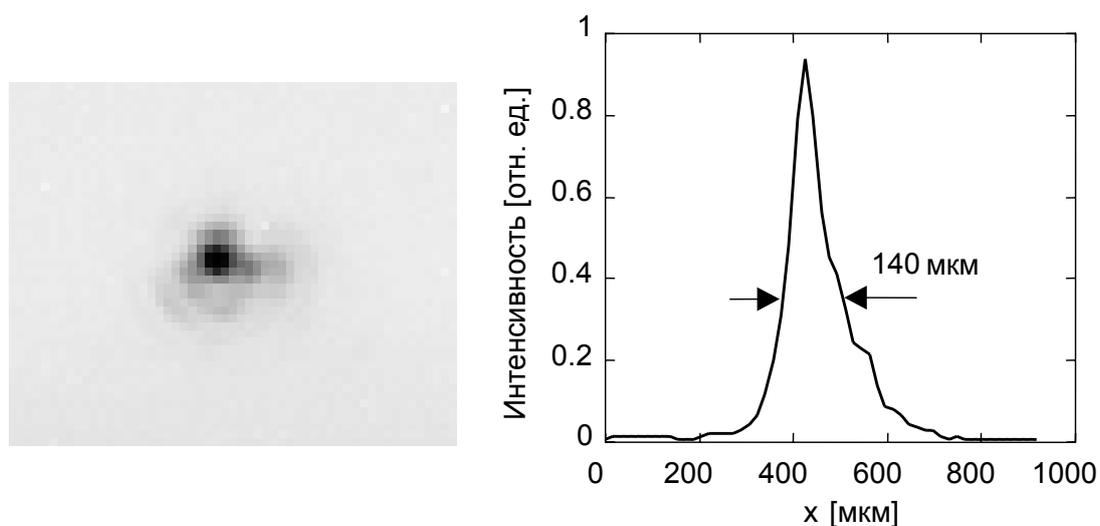


Рис. 3. Распределение интенсивности в фокальной плоскости при фокусировке выходного светового пучка диаметром 1 см линзой с фокусом 1,8 м.

Заключение

Новая простая схема пикосекундного KrF лазера была разработана на основе насыщенного усиления импульса с крутым передним фронтом, сформированного с использованием ячейки Поккельса, ВКР-компрессии и генерации антистоксова излучения в метане. Получены световые импульсы длительностью 1,1 пс с энергией 3,2 мДж и с расходимостью близкой к дифракционной. Частота повторения импульсов достигала 10 Гц. Измеренное значение контраста по яркости превысило 10^{10} . Высокое значение мощности, дифракционная расходимость светового пучка и высокая величина контраста импульса позволяет использовать данную лазерную систему в экспериментах по взаимодействию сверхсильных световых полей с твердым телом вплоть до интенсивностей $\sim 10^{17}$ Вт/см².

2.2 Многочастотная ВКР генерация в жидком четыреххлористом углероде при двухчастотной накачке

Введение

Многочастотная комбинационно-параметрическая генерация интенсивно исследуется в последние годы. Показано, что при фокусировке двухчастотного излучения накачки, резонансного частоте комбинационного перехода, в активную среду возможно генерация множества комбинационных компонент, перекрывающих спектральный интервал равный частоте накачки [7]. Обычно в такой схеме используются наносекундные лазерные импульсы с энергией (10-100) мДж, что необходимо для достижения требуемого значения комбинационного инкремента усиления. Частота повторения импульсов таких многочастотных лазеров ограничивается их средней мощностью и обычно не превышает 100 Гц. Для достижения более высокой частоты повторения импульсов, что требуется в целом ряде прикладных задач, может быть использован путь уменьшения энергии одиночного импульса накачки. При этом для сохранения высокой пиковой мощности необходимо уменьшать длительность импульса. В связи с этим весьма привлекательным выглядит использование пикосекундных световых импульсов накачки. Однако для газовых активных сред, которые используются в комбинационно-параметрических многочастотных лазерах, данный метод не приводит к уменьшению энергии импульса накачки и, как следствие, повышению частоты повторения импульсов. Причина заключается в нестационарном режиме комбинационного рассеяния в пикосекундном диапазоне. Нестационарность процесса рассеяния ведет к повышению мощности импульса накачки и его энергии. Выходом из данной ситуации может быть использование комбинационно-активных сред с коротким временем поперечной релаксации T_2 , в частности, жидкостей. Проведенный нами анализ показал, что наиболее перспективным является жидкий четыреххлористый углерод. CCl_4 имеет высокий коэффициент комбинационного усиления – (2-4) см/МВт [8] при пикосекундном T_2 ($T_2 \approx 1$ пс [9]). Стоксов сдвиг в CCl_4 составляет 459 см^{-1} . Исследование многочастотного комбинационно-параметрического лазера на жидком четыреххлористом углероде составляло цель данной работы.

Основная часть

На рис.4 показана схема экспериментальной установки. Источником накачки служила вторая гармоника Nd:YAG лазера (длина волны 532 нм), работающего в режиме пассивной синхронизации мод. Энергия одиночного импульса с длительностью 30 пс достигала 2 мДж. Часть

энергии импульса накачки отводилась с помощью стеклянного клина в генератор первой стоксовой компоненты. Первая стоксова компонента (длина волны 545 нм) генерировалась при фокусировке накачки в кювету длиной 30 см, заполненную жидким CCl_4 . На рис.5 показана зависимость энергии первой стоксовой компоненты от энергии импульса накачки. Затем излучение первой стоксовой компоненты совмещалось с накачкой на поверхности стеклянного клина и фокусировалось во вторую кювету с CCl_4 длиной 5 мм. Спектральный состав выходного излучения анализировался с помощью призмной дисперсионной системы и CCD камеры.

На рис.6 представлен спектр выходного излучения. Комбинационные компоненты, занимающие спектральный интервал от 490 до 640 нм, генерировались в виде коллимированного светового пучка, что позволяет существенно расширить область применения такого многочастотного комбинационного лазера. Энергетическая эффективность преобразования накачки в многочастотное излучения составила 80%.

Следует также отметить возможность создания многочастотного комбинационного лазера на CCl_4 , позволяющего реализовать высокую частоту повторения импульсов, что требуется, в частности, для лазерного цветного дисплея. В таком лазере вместо использованных нами стеклянных клиньев предполагается применить дихроичные зеркала, а вместо второй короткой кюветы – струю жидкого четыреххлористого углерода. Это позволит снизить необходимую энергию импульса накачки и избежать нагрева активной среды в многочастотном комбинационном лазере. Оценки показывают, что для достижения частоты повторения импульсов в 0,1 МГц требуется пикосекундный лазер со средней мощностью в 10 Вт, что на сегодня является вполне выполнимой задачей [10].

Заключение

Многочастотная комбинационно-параметрическая генерация была осуществлена в жидком четыреххлористом углероде при двухчастотной накачке излучением второй гармоники 30 пс Nd:YAG лазера и ее первой стоксовой компонентой в CCl_4 . Достигнута 80% эффективность преобразования по энергии импульса накачки с энергией 50 мкДж в 10 комбинационных компонент, перекрывающих спектральный диапазон от 490 до 640 нм. Предложена схема многочастотного комбинационно-параметрического лазера, работающего с частотой повторения импульсов до 0,1 МГц.

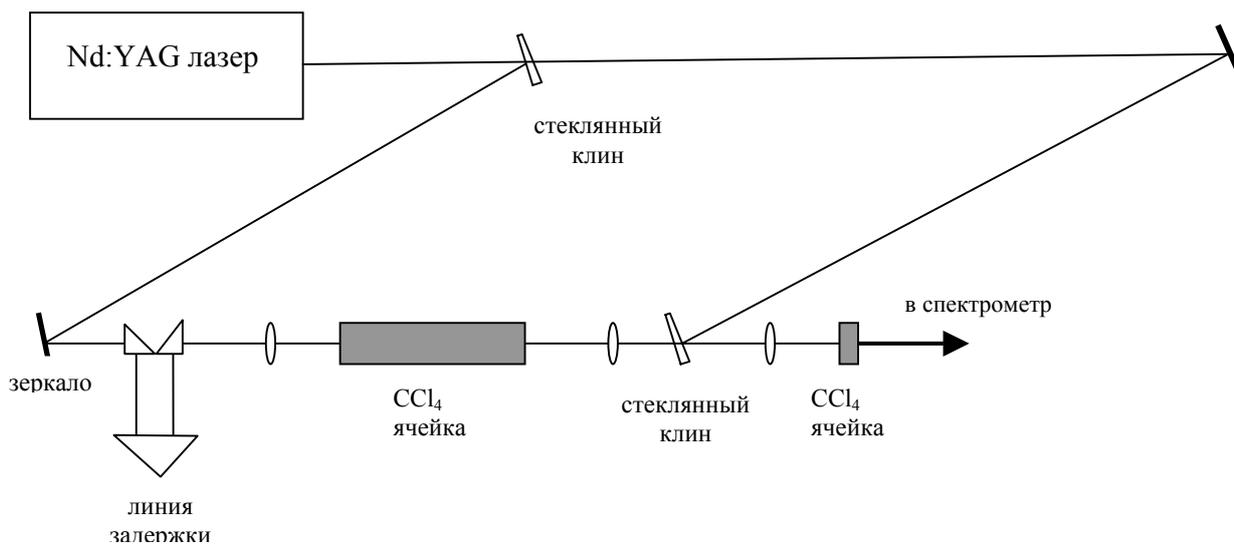


Рис. 4. Оптическая схема многочастотного комбинационно-параметрического лазера на жидком четыреххлористом углероде.

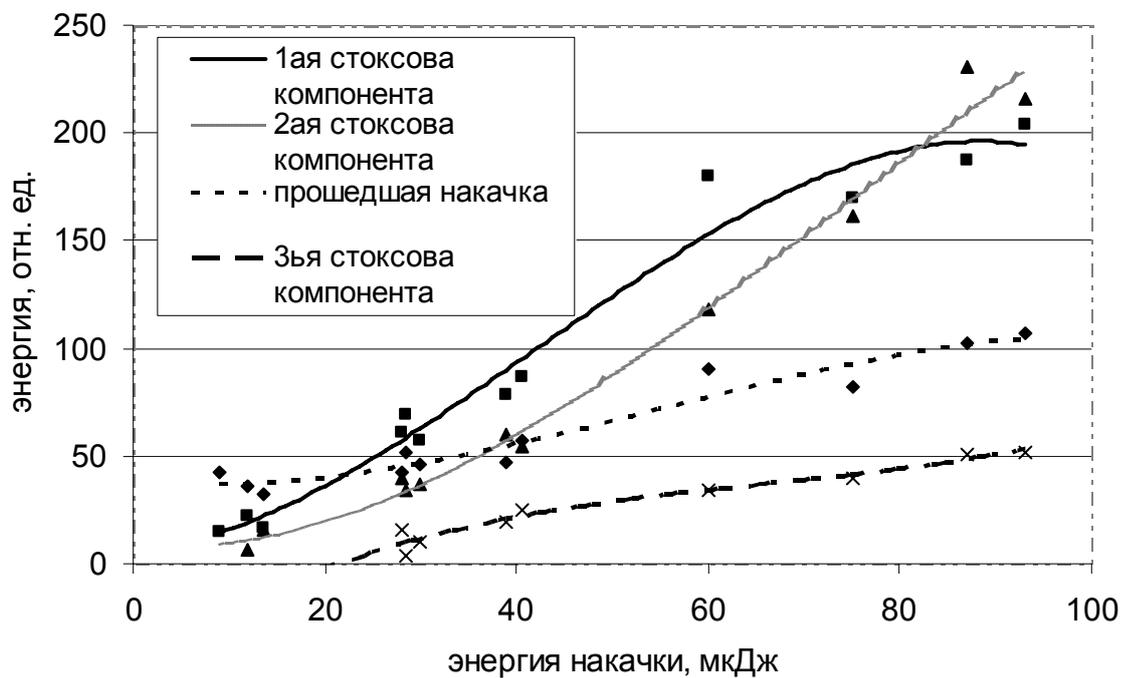


Рис. 5. Энергетические характеристики генератора стоксова излучения.

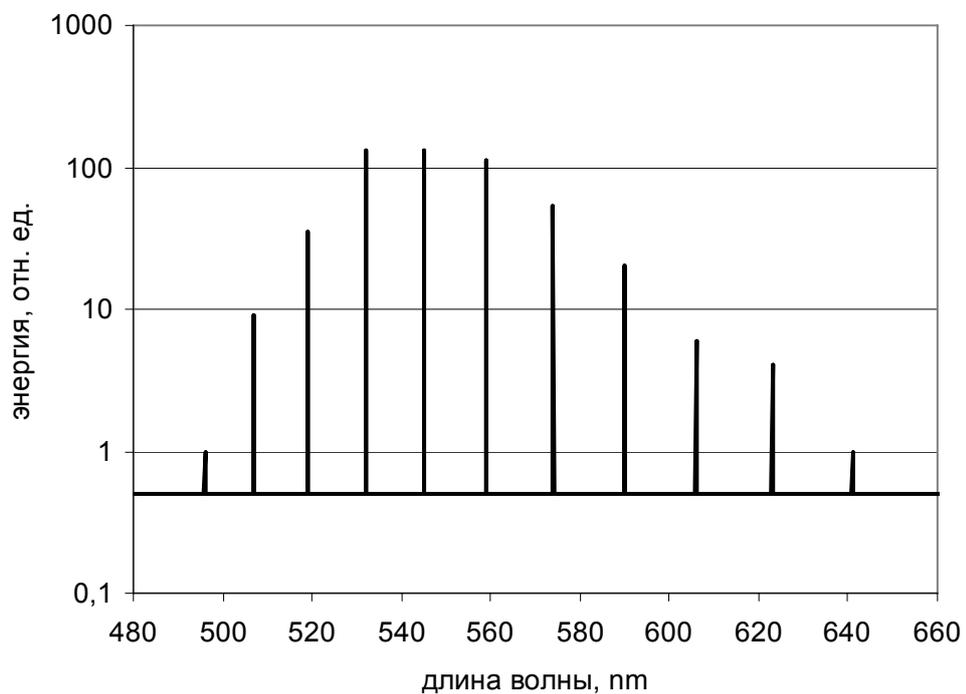
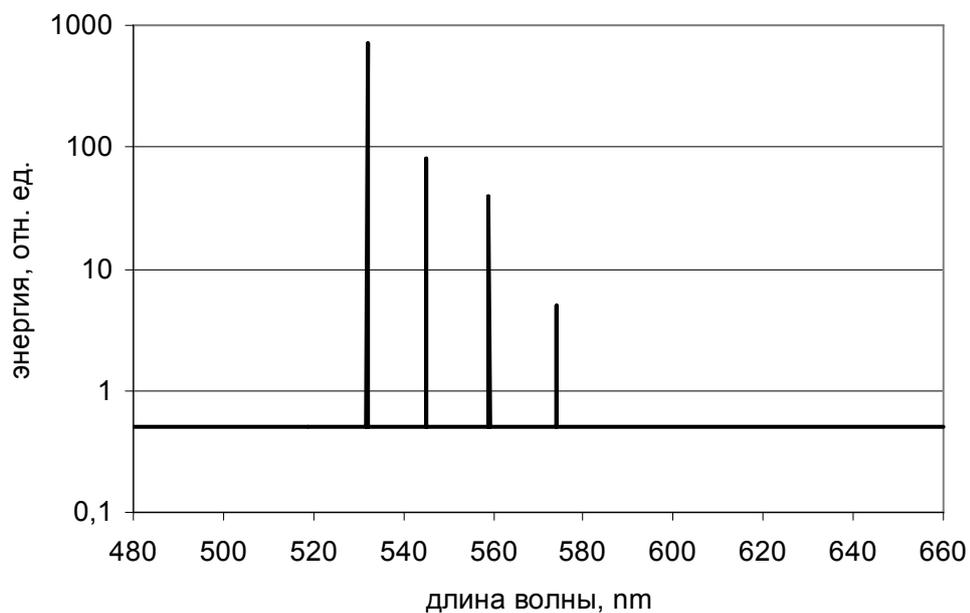


Рис.6. Спектры накачки (А) и выходного излучения (Б) комбинационно-параметрического лазера на жидком CCl_4 . Энергия накачки (А): 44 мкДж (532 нм) и 6 мкДж (545 нм).

Список использованных источников

1. J. Ihlemann, B. Wolff-Rottke, “Excimer laser micromachining of inorganic dielectrics”, *Appl. Surface Sci.*, **106**, 282-286 (1996).
2. E. G. Gamaly, A.V. Rode, B. Luther-Davies, V. T. Tichonchuk, “Ablation of solids by femtosecond lasers: Ablation mechanism and ablation thresholds for metals and dielectrics”, *Phys. Plasma*, **9**, 949-957 (2002).
3. N. Saito, K. Koyama, M. Tanimoto, “Development of a compact time-of-flight mass spectrometer with a high mass resolution and wide mass range”, *J. Mass Spectr. Soc. Jpn.*, **48**, 241-247 (2000).
4. A. V. Rode, E. G. Gamaly, “Subpicosecond laser ablation of dental enamel”, *J. Appl. Phys.*, **92**, 2153-2158 (2002).
5. А. З. Грасюк, Л.Л. Лосев, А. П. Луценко, С. Н. Сазонов, “ ВКР-компрессия без частотного сдвига”, *Квантовая электроника*, **16**, 1623-1625 (1989).
6. L. L. Losev, S. V. Kurbasov, “Optimizing the on-axis anti-Stokes generation of four-wave stimulated Raman scattering with a focused pump beam”, *Optics Communications*, **254**, 203-206 (2005).
7. Л. Л. Лосев, А. П. Луценко, “Генерация излучения с дискретным спектром, ширина которого равна частоте накачки, в комбинационно-параметрических лазерах”, *Квантовая электроника*, **20**, 1054-1062 (1993).
8. A. R. Chraplyvy, T. J. Bridges, “Infrared generation by means of multiple-order stimulated Raman scattering in CCL₄- and CBrCl₃-filled hollow silica fibers”, *Opt. Lett.* **6**, 632-633 (1981).
9. D. Von der Linde “Picosecond interactions in liquids and solids”, in *Ultrashort Light Pulses*, S. L. Shapiro, ed. (Springer-Verlag, Berlin, 1977), 203-273.
10. J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein, “A powerful diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and ultraviolet”, *Appl. Phys. B* **80**, 315-320 (2005).