

## **ОТЖИГ НАВЕДЕННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В КВАРЦЕВЫХ СТЕКЛАХ ИЗЛУЧЕНИЕМ KrF И ArF ЛАЗЕРОВ**

**А.П.Сергеев, П.Б.Сергеев**

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

*В стеклах типа КС-4В, КУ-1 и Корнинг 7980 изучен отжиг лазерным излучением на  $\lambda=248$  и 193 нм индивидуальных полос наведенного электронным пучком поглощения в области 150-400 нм. Показано, что фототрансформация спектров связана с существенным уменьшением полос на 183.5, 213 и 260 нм.*

Прозрачная оптика из кварцевых стекол под действием интенсивного УФ лазерного излучения (ЛИ) может терять свою прозрачность из-за образования дефектов за счет многофотонной ионизации. Но ЛИ, поглощаясь дефектами, ускоряет их релаксацию. При действии на стекло одного лишь ЛИ сложно выделить роль каждого из этих двух процессов. Такая задача значительно проще решается в последовательных опытах с наработкой дефектов ионизатором, а затем их отжигом ЛИ.

В [1] было установлено, что в кварцевых стеклах типа КС-4В, КУ-1 и Корнинг 7980 наведенное электронным пучком (ЭП) поглощение (НП) под действием излучения KrF-лазера уменьшается в широком спектральном диапазоне. Цель данной работы заключалась в определении воздействия излучения ArF-лазера на НП в этих же стеклах, а также анализе полученных здесь и в [1] результатов на основе разложения спектров НП на индивидуальные полосы (ИП), интенсивности которых пропорциональны количеству соответствующих дефектов [2]. Характеристики шести ИП использованных при разложении всех изученных спектров НП приводятся в [2]. Там же даются сведения по качеству изученных образцов кварцевых стекол.

### **Методика экспериментов**

В [1] описаны результаты изучения стойкости кварцевых стекол типа КС-4В, КУ-1 и Корнинг 7980 к воздействию импульсов ЭП. У всех стекол НП с ростом флюенса ЭП выходило на насыщение. Часть этих образцов была использована в опытах по отжигу НП излучением KrF-лазера. Затем эти образцы подверглись дополнительному облучению ЭП по стандартной методике с энергией электронов около 280 кэВ и флюенсом ЭП за импульс около 2 Дж/см<sup>2</sup>. Общий дополнительный флюенс ЭП при этом составил 1 кДж/см<sup>2</sup>, а с учетом предшествующего облучения, у образца КС-4В он стал 5.1, у КУ-1 – 19.7, а у Корнинг 7980 ArF Grade (далее С8) – 7.4 кДж/см<sup>2</sup>. Затем образцы около двух лет хранились в темноте при  $\sim 0^{\circ}$  С. Дополнительное облучение и длительное хранение образцов приводило их в такое же состояние, как и перед экспериментами с излучением KrF-лазера.

Облучение образцов излучением ArF-лазера проводилось на установке ЭЛА [3]. В этих экспериментах она работала с частотой около одного импульса в 3–4 минуты. Длительность импульсов излучения ArF-лазера составляла 60 нс. Плотность лазерной энергии на образцах за импульс была около 0,2 Дж/см<sup>2</sup>. При лазерном облучении пропускание образцов на 193 нм определялось в каждом импульсе путем измерения с помощью калориметров падающей и прошедшей энергии ЛИ.

Спектры пропускания образцов  $T(\lambda)$  в цифровом формате снимались до и после лазерного облучения в области 200–1000 нм на спектрофотометре Genesys-2, а в области 150–240 нм - на монохроматоре ВМР-2. По методике, подробно изложенной в [2], эти спектры преобразовывались в спектры оптической плотности  $OD(\lambda)$ , которые затем и разлагались на индивидуальные полосы.

### Экспериментальные результаты

Эксперименты показали, что при облучении кварцевых образцов с НП излучением ArF-лазера их пропускание на 193 нм увеличивается с каждым импульсом и выходит на новый стационарный уровень. Так у образца КУ-1 величина  $T$  уже после 60 импульсов увеличивается с 54% до 70%. При дальнейшем облучении  $T$  практически не меняется. Аналогично вело себя пропускание и у других испытанных образцов. Их спектры  $T(\lambda)$  после облучения ArF-лазером представлены на рис.1 в сравнении со спектрами до облучения. Эти спектры показывают эффект отжига НП в кварцевых стеклах излучением ArF-лазера при его интенсивности около  $3 \text{ МВт/см}^2$ .

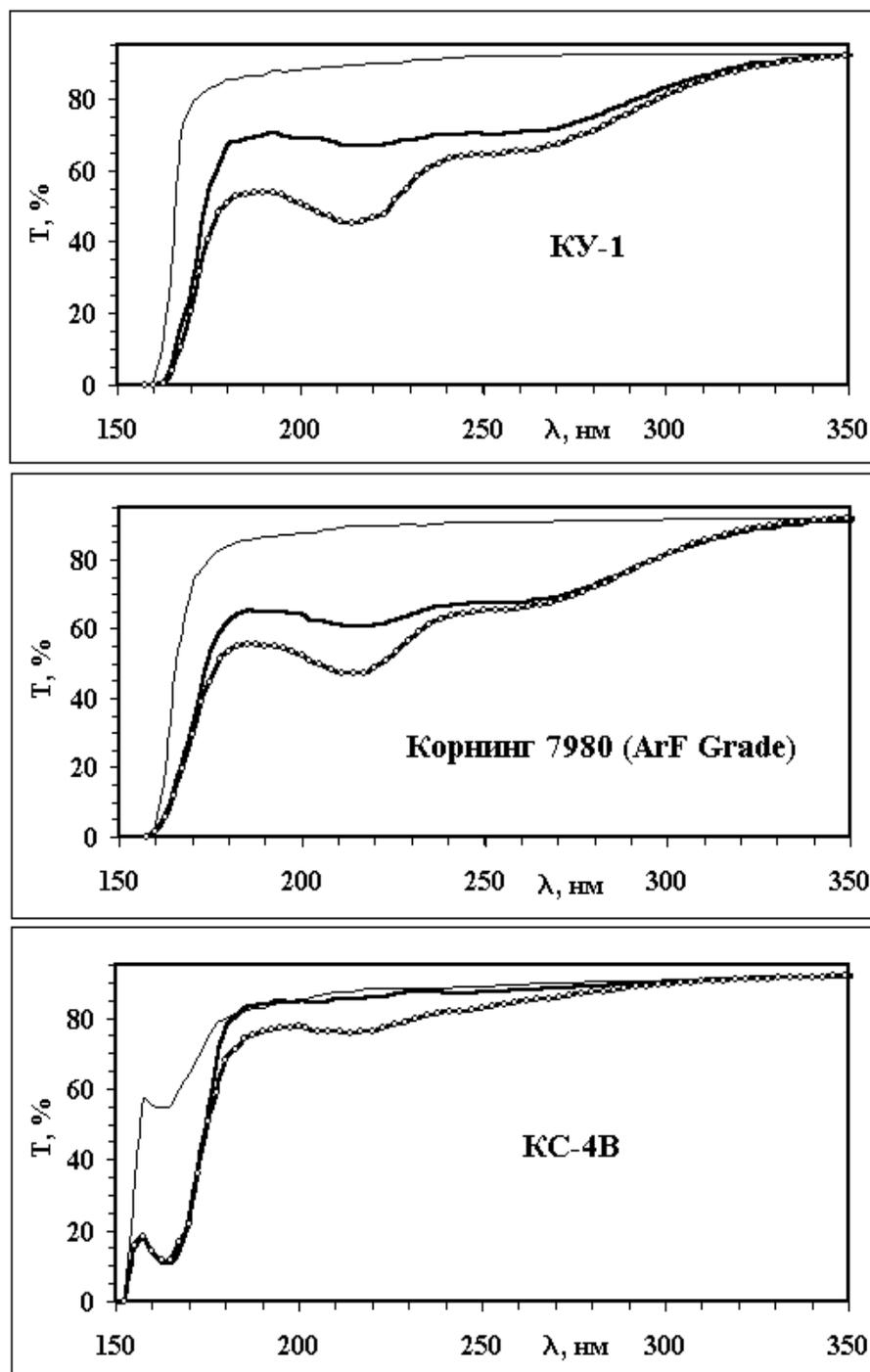


Рис.1. Пропускание образцов стекол до облучения ЭП (тонкая линия), а также до и после облучения ArF-лазером (соответственно линии с кружками и без).

Анализ этого эффекта проведём на спектрах оптической плотности, которые представлены на рис.2 для тех же стекол. Кроме спектров  $OD(\lambda)$  до и после облучения образцов ArF-лазером, здесь показана также их разность. После облучения  $OD(193)$  уменьшилась так: у КУ-1 с 0.49 до 0.22; у С8 с 0.46 до 0.29; у КС-4В с 0.089 до  $-0.007$ . Отрицательное значение  $OD$  у КС-4В говорит о просветлении всей толщины образца по отношению к исходному состоянию, бывшему до облучения ЭП и ЛИ. Такое просветление кварцевых стекол под действием ЛИ на 193 нм наблюдалось ранее в [4].

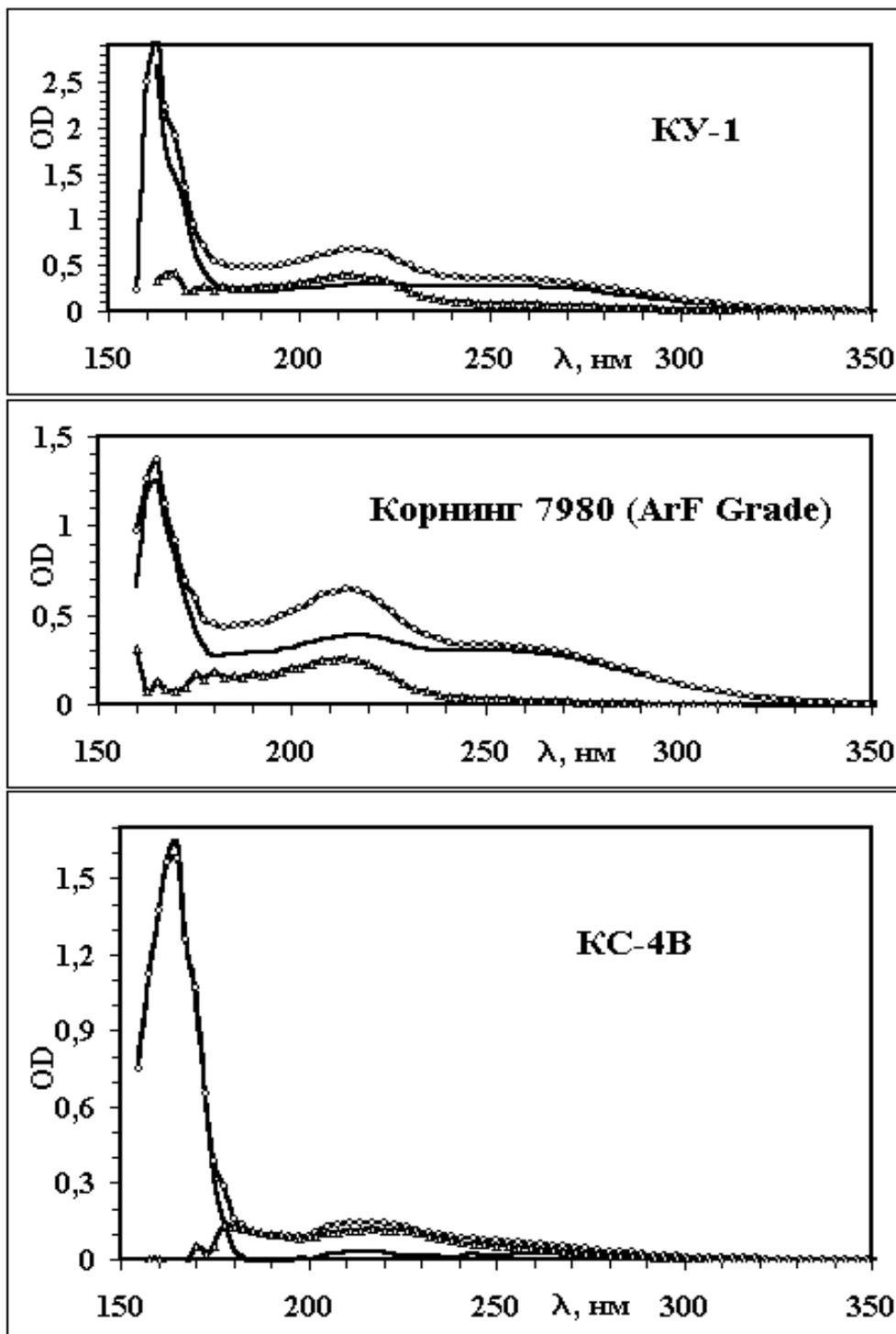


Рис.2. Спектры оптической плотности для образцов с рис.1. Обозначения те же, кроме кривых с треугольниками – это разностный спектр.

Для количественного анализа процессов фотообесцвечивания НП в стеклах все их спектры  $OD(\lambda)$  с рис.2 были разложены на ИП по описанной в [2] методике. Разложение спектров на ИП позволяет описывать их набором коэффициентов  $A_i$ , которые равны произведению сечения поглощения на  $\lambda_i$  ( $\sigma_i$ ) на поверхностную плотность ( $N_i$ ) соответствующих дефектов. В Таблице 1 и 2 представлены значения коэффициентов  $A_i$  или  $N_i$ , полученных при разложении на ИП соответствующих спектров стекол. Соответствующие значения  $\sigma_i$  были взяты из [4-5]. В таблицах значения  $A_i$  или  $N_i$  для  $\Delta OD$  спектров соответствующих образцов должны быть равны разности между их выше стоящими значениями. Имеющиеся различия связаны с точностью определения коэффициентов  $A_i$ . В среднем она не превышает 0.03.

**Таблица 1.**

Амплитуды ИП ( $A_i$ ) и значения  $N_i=A_i/\sigma_i$  для спектров НП образцов КУ-1, С8 и КС-4В до и после облучения ArF-лазером.  $\Delta OD$  - разностный спектр.

	$N_1 \cdot 10^{-16}$ см <sup>-2</sup>	$A_2$ (244)	$A_3$ (225)	$N_4 \cdot 10^{-16}$ см <sup>-2</sup>	$A_5$ (183.5)	$N_6 \cdot 10^{-16}$ см <sup>-2</sup>
<b>КУ-1</b>						
До ArF	6.2	0.03	0.08	2.3	0.47	3.6
После ArF	4.9	0.02	0.06	0.8	0.22	3.2
$\Delta OD$	<u>1.3</u>	0.01	0.02	<u>1.5</u>	0.24	0.4
<b>С8</b>						
До ArF	5.7	0,03	0.11	2.4	0.41	1.67
После ArF	5.3	0,03	0,07	1.2	0,26	1.6
$\Delta OD$	<u>0.4</u>	0	0.04	<u>0.9</u>	0.15	0.03
<b>КС-4В</b>						
До ArF	0.75	0.03	0.03	0.48	0.08	2.1
После ArF	0.38	0	0	0.12	-0.01	2.2
$\Delta OD$	<u>0.38</u>	0.03	0.03	<u>0.36</u>	0.09	-0.1

**Таблица 2.**

Все, как и в Таблице 1, но после облучения KrF-лазером.

	$N_1 \cdot 10^{-16}$ см <sup>-2</sup>	$A_2$ (244)	$A_3$ (225)	$N_4 \cdot 10^{-16}$ см <sup>-2</sup>	$A_5$ (183.5)
<b>КУ-1</b>					
До KrF	7.2	0.02	0.06	2.9	0.45
После KrF	4.4	0	0	1.6	0.29
$\Delta OD$	<u>2.8</u>	0.02	0.06	<u>1.3</u>	0.16
<b>С8</b>					
До KrF	5.5	0.02	0.06	2.1	0.4
После KrF	4.0	0	0	1.4	0.2
$\Delta OD$	<u>1.5</u>	0.02	0.06	<u>0.7</u>	0.2
<b>КС-4В</b>					
До KrF	1.4	0.03	0.03	0.88	0.15
После KrF	1.0	0	0	0.44	0.08
$\Delta OD$	<u>0.4</u>	0.03	0.03	<u>0.44</u>	0.07

### Обсуждение результатов

Примерно за два года после облучения образцов стекол ЭП к моменту их облучения ЛИ в междоузлиях могли остаться молекулы кислорода, хлора, воды, HCl и радикалы типа OH и OCl, привязанные ковалентной связью к атомам кислорода из регулярных ячеек сетки стекла [6]. Излучение ArF-лазера попадает в полосы поглощения на 183.5 нм и E'-центров. Его могут поглощать и молекулы O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O и HCl, но сечения их поглощения на 193 нм не велики. Излучение KrF-лазера поглощают лишь E'-центры, НАК и слабые 2-я и 3-я полосы. Поэтому, при использованных малых интенсивностях ЛИ наблюдаемое быстрое обесцвечивание НП в стеклах в основном связано с процессами, происходящими при поглощении квантов света их дефектами. Очевидно, что прошедшая при этом электронная и термическая “встряска” дефектов и их ближайшего окружения должна резко ускорять протекание возможных релаксационных процессов.

Представленные выше экспериментальные результаты дают возможность сделать также следующие заключения.

1. Излучение KrF- и ArF-лазеров с  $\lambda=248$  и 193 нм при интенсивностях  $\sim 3-5$  МВт/см<sup>2</sup> уменьшает наведенное ЭП поглощение в кварцевых стеклах типа КС-4В, КУ-1 и Корнинг 7980 до нового стационарного уровня, которое на лазерных длинах волн примерно в 1.5-2 раза ниже исходного.
2. В образцах КС-4В под действием обоих ЛИ выгорает примерно одинаковое количество E'-центров и НАК, а во влажных стеклах у них наблюдаются значительные различия. По-видимому, в данных стеклах и междоузельные атомы и молекулы играют важную роль в фотостимулированной релаксации дефектов.
3. Излучение KrF-лазера полностью выжигает полосы на 225 и 244 нм у всех стекол при флюенсах  $\sim 10$  Дж/см<sup>2</sup>.
4. У всех исследованных стекол ЛИ на 248 нм снижает в 1.5-2 раза интенсивности полос на 260 и 213 нм, а также примерно в 2 раза полосу на 183.5 нм, в контур поглощения которой это ЛИ не попадает.
5. Излучение ArF-лазера на 193 нм в этих стеклах уменьшает не только полосы на 213 и 183 нм, но и полосу на 260 нм, в контур поглощения которой оно не попадает.
6. Результаты пп. 4 и 5 можно объяснить тем, что близкие пары дефектов из E'-центров, НАК и центра с поглощением на 183 нм при фотовозбуждении любого из них могут соединяться. При облучении ЛИ в стеклах повышается эффективная скорость диффузии междоузельных атомов и молекул, что также повышает релаксационные процессы.

Отсутствие на данный момент четкого знания природы полосы поглощения с максимумом на 183.5 нм не позволяет производить более детальный анализ процессов лазерного отжига НП в исследованных кварцевых стеклах.

### Литература

1. *Сергеев П.Б., Сергеев А.П., Зворыкин В.Д.* Квант. электроника. 2007. **37**(8), 706-715.
2. *Сергеев П.Б., Сергеев А.П.* Квантовая электроника. 2010. **40**(9), 804-810.
3. *Sergeev P.B.* Journal of Soviet Laser Research. 1993. **14**(4), 237-285.
4. *Saito K. et al.* J. Appl. Physics. 1999. **86**, 3497-3501.
5. *Skuja L. et al.* Proc. SPIE. 2001. **V.4347**, 155-168.
6. *Дианов Е.М., Соколов В.О., Сулимов В.Б.* Труды ИОФАН. 1990. **23**, 122-158.