

НЕЛИНЕЙНОЕ И НАВЕДЕННОЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПОГЛОЩЕНИЕ В КВАРЦЕВЫХ СТЕКЛАХ НА 248 И 193 НМ

П.Б.Сергеев, А.П.Сергеев, В.Д.Зворыкин
Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

В стеклах типа КС-4В, КУ-1 и Корнинг 7980 измерены коэффициенты двухфотонного поглощения на $\lambda=248$ и 193 нм и коэффициенты связи между наводимым электронным пучком (ЭП) квазистационарным поглощением излучения ХеF-, KrF- и ArF-лазеров и плотностью мощности ЭП на образцах.

Новое российское высокочистое кварцевое стекло КС-4В относится к “сухим” стеклам 1V типа с малым содержанием ОН. Всех примесей в нем не более 20 ppm. Оно имеет более высокую радиационную прочность, чем “влажные” стекла КУ-1 и Корнинг 7980 с содержанием ОН около 1000 ppm [1]. Это открывает данному стеклу широкие перспективы использования для изготовления проходной оптики лазеров УФ и ВУФ диапазона. При этом нужно знать и нелинейные характеристики стекла, что и была целью этой работы. Результаты даются в сравнении с аналогичными данными по стеклам разного типа и качества, что важно и в научном, и в практическом плане.

1. Нелинейное поглощение кварцевых стекол

Определение коэффициентов двухфотонного поглощения (β) в образцах оптических материалов (ОМ) проводилось по стандартной методике нелинейного пропускания [2-3]. Источником лазерного излучения (ЛИ) была установка ЭЛА [4]. Из всего ее лазерного пучка диафрагмой диаметром 1 см расположенной на расстоянии 4 м от выходного окна вырезалась часть с энергией около 0.4 Дж на 248 нм, и около 0.15 Дж на 193 нм. Часть этого пучка отводилась на первый калориметр, контролировавший входную энергию ЛИ в каждом импульсе. Оставшаяся часть пучка фокусировалась кварцевой линзой с фокусным расстоянием ~ 770 мм. За фокусом располагался второй калориметр, контролировавший прошедшую энергию ЛИ (E). Длительность импульсов мощности ЛИ KrF-лазера на полувысоте (τ) составляла 80 нс, ArF- лазера – 60 нс.

На каждом лазере вначале проводилось измерение расходимости излучения ЛИ (θ) с помощью диафрагм, располагавшимися в фокальной плоскости линзы. Величины θ по уровню 0,65 от полной энергии E составляли около 0.6 и 2 мрад, соответственно для KrF- и ArF-лазеров. Площади фокальных пятен (S), в которых было сосредоточено до 65% от полной энергии, равнялись 0.2 и 2 мм². Длина каустики превышала 3 см. Максимальная интенсивность ЛИ в каустике (I) определялась по формуле: $I=(E/S\tau)$.

Для определения β по методике нелинейного пропускания надо знать зависимость пропускания образцов (T) от интенсивности ЛИ. Далее строится зависимость величины $1/T$ от I , по наклону которой и вычисляется β на основе выражения

$$\beta=[d(1/T)/dI][(1-R)/l] \cdot K \quad (1)$$

Оно справедливо, когда линейное поглощения в образцах мало, что выполнялось для всех стекол. В (1) R , это коэффициент отражения от грани образца, l – его толщина, K – коэффициент, зависящий от формы импульса мощности и распределения I по сечению каустики [3]. Измерения β проводились на образцах кварцевых стекол Corning 7980 (Standard Grade, KrF Grade, ArF Grade) толщиной $l=10.3$ мм (далее Сх), КУ-1 с $l=14.6$ мм и КС-4В с $l=13.3$ мм. Полученные зависимости величины $1/T$ исследованных образцов от I на 248 нм показаны на рис.1. Такие же зависимости были и на 193 нм. Рассчитанные на основе (1) значения коэффициентов β приводятся в таблице 1.

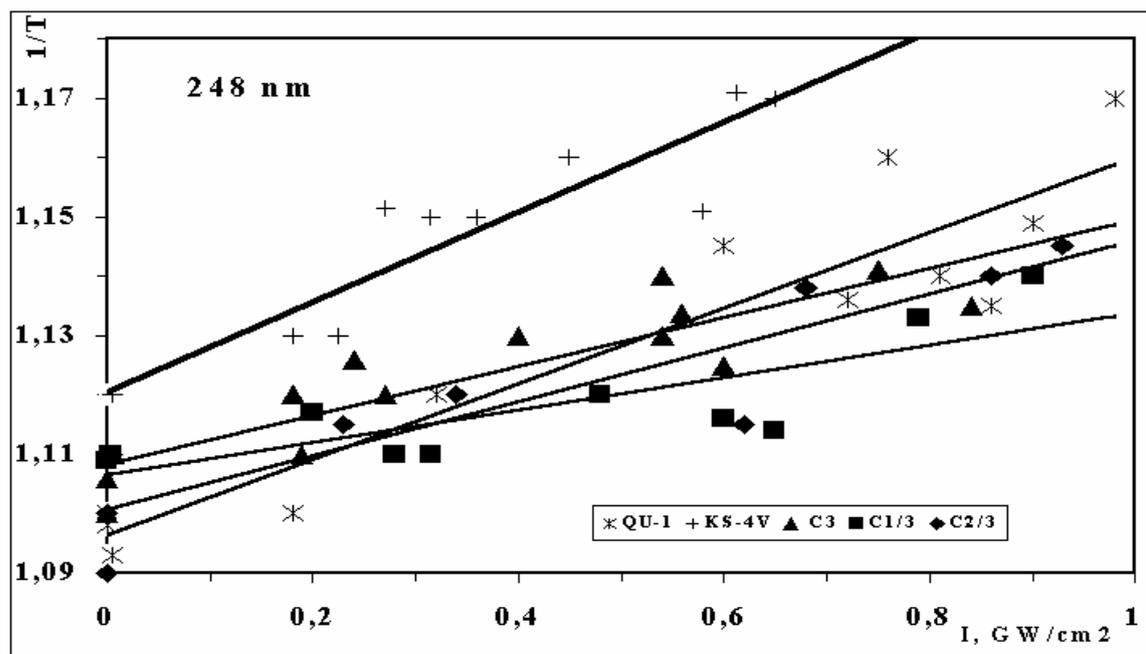


Рис.1. Зависимости $(1/T)$ от I на 248 нм для различных образцов кварцевых стекол.

Так как все образцы испытывались практически одновременно и в одинаковых условиях, относительная погрешность измерения β не превышает 10%. Абсолютная же погрешность может достигать 50%.

Таблица 1.

ОМ	l , см	$\beta(248)$ [см/ГВт]	$\beta(193)$ [см/ГВт]
КУ-1	1,46	0,12	1
КС-4В	1,33	0,16	1,1
С3 (Standard Grade)	1,03	0,12	1,2
С2/3 (ArF Grade)	1,03	0,13	0,9
С1/3 (KrF Grade)	1,03	0,08	1,2

Полученные результаты показывают, что нелинейное поглощение на 248 нм у стекло КУ-1 и корнинговских образцов (стекла с высоким содержанием ОН) составляют около 0.12 см/ГВт, что примерно на 30% ниже, чем у стекла КС-4В. На 193 нм β практически у всех стекол одинаково и равно 1 см/ГВт. Стоит отметить также меньшее значение величины β у специализированных марок корнинговских стекол на соответствующей длине волны, чем у других родственных марок.

2. Наведенное электронным пучком поглощение в кварцевых стеклах

На материал окон эксимерных электронно-пучковых лазеров (ЭПЛ) одновременно с ЛИ действует ещё и ионизирующее излучение (ИИ). Это излучение состоит из быстрых электронов, рассеянных из пучка накачки, а также неотъемлемого для этого типа лазеров рентгеновского излучения [5-7]. Воздействие ИИ на оптические материалы (ОМ) приводит к появлению в них наведенного поглощения. Оно разделяется на короткоживущее и остаточное, долгоживущее. Первое происходит на комплексе короткоживущих электронных состояний материала, возникающих при наработке и

релаксации электронно-дырочных пар. В связи с этим оно широко используется для изучения кинетики релаксации первичных продуктов воздействия ИИ на ОМ [8-10].

Целью данной работы было измерение коэффициента связи (**К**) между наводимой электронным пучком (ЭП) оптической плотностью на 353, 248, 193 нм и плотностью мощности ЭП в кварцевых стеклах КУ-1, КС-4В, Corning 7980. Согласно [6, 11-12], эти коэффициенты являются характеристикой ОМ.

Отличие используемого метода измерения наведенного ЭП короткоживущего поглощения в ОМ [5-7], от общепринятых [8-10], заключается в том, что здесь оно измеряется с помощью ЛИ на квазистационарном участке импульса ЭП (с длительностью ~100 нс), а не после него. При временах релаксации короткоживущих состояний порядка или менее 1 нс, что имеет место в стеклах, это отличие является принципиально важным. К недостаткам метода можно отнести то, что измерения поглощения проводятся на ограниченном наборе длин волн конкретных лазеров. Но получаемые результаты, как было показано в [11-12], важны и при разработке мощных ЭПЛ, и при моделировании процессов релаксации электронных возбуждений в ОМ при одновременном воздействии на них ИИ и ЛИ, и при расчетах нелинейного поглощения.

2.1 Методика эксперимента

Измерения наведенного ЭП короткоживущего поглощения в образцах ОМ проводились на электронно-пучковой лазерной установке ЭЛА [4] по методике, которая подробно излагалась ранее [5-7]. Напомним кратко её суть. Испытываемый образец (1 на рис.2) в этих экспериментах помещался на внутренней стороне торцевой стенки лазерной камеры напротив разделительной фольги электронной пушки (3).

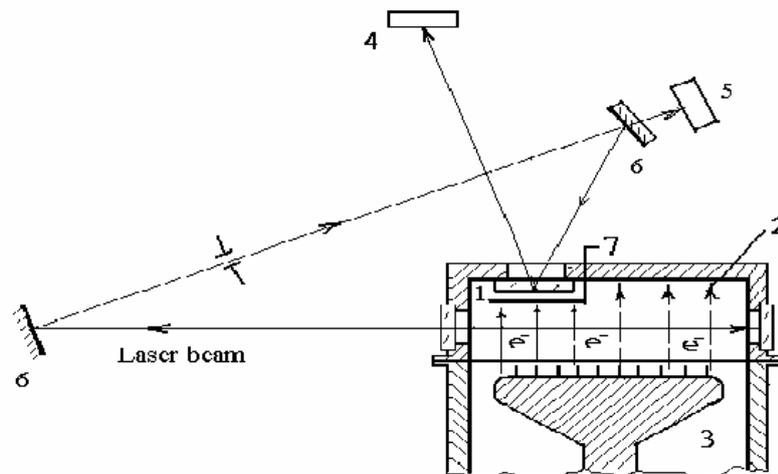


Рис.2. Схема измерения наведенного ЭП короткоживущего поглощения в образцах ОМ.

На стороне образца, обращенной к ЭП (2), имеется отражающее алюминиевое покрытие. Перед образцом помещается толстая стальная подвижная пластина. Этот затвор (7) открывает или закрывает доступ ЭП к образцу. Электронный пучок используется в данных экспериментах и для накачки активной среды лазера и для облучения образцов ОМ, что автоматически устраняет проблему синхронизации ЭП и зондирующего ЛИ. Часть лазерного пучка системой зеркал (6) заводится на опорный калориметр (5) контролирующей энергию ЛИ, падающую на образец, а вторая часть ЛИ проходит через образец и попадает на второй калориметр (4).

Показания калориметров 5 и 4 (A_5 и A_4) определяются так:

$$A_5 = H_5 \cdot T_1 \cdot E_L \quad (2)$$

$$A_4 = H_4 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \exp(-2D) \cdot E_L \quad (3)$$

Здесь H_4 и H_5 – чувствительности калориметров, T_1 , R_1 и R_2 соответственно пропускание и отражение полупрозрачного зеркала, а также алюминиевого покрытия, D - оптическая плотность.

В каждом импульсе определялось отношение

$$B = A_4 / A_5 = (H_4 / H_5) \cdot (R_1 R_2 / T_1) \cdot \exp(-2D) \quad (4)$$

Величина B измерялась при закрытом (B_0), и открытом (B_1) затворе, когда ЭП попадал на пластину. При постоянстве величины R_2 получаем

$$B_1 / B_0 = \exp[-2(D_1 - D_0)] = \exp(-2\Delta) \quad \text{или}$$

$$D_1 - D_0 = \Delta = \int_0^l \gamma(x) dx = (1/2) \ln(B_0 / B_1) \quad (5).$$

Здесь величина Δ есть средняя по длительности импульса наведенная электронным пучком оптическая плотность на лазерной длине волны, γ - наведенный коэффициент поглощения на глубине x образца. Повторение закрытия и открытия затвора после каждого импульса позволяет получить $N-1$ значений Δ после N выстрелов установки. Затем производилось усреднение результатов.

Как было установлено ранее [6, 11-12], процесс наведенного ЭП поглощения наилучшим образом описывается коэффициентом K , определяемым в линейном приближении как отношение наведенной оптической плотности Δ к удельной плотности мощности P_s ЭП, падающего на образец и полностью поглощаемого в нем.

$$K = \Delta / P_s = \gamma / P, \quad (6)$$

Здесь γ коэффициент наведенного поглощения в том месте образца, где мощность поглощенной дозы равна P . Первая часть выражения (6) отражает метод измерения K , вторая – его физический смысл. Распределение поглощенной дозы от используемого ЭП и, соответственно, ее мощности по толщине образца x было измерено ранее [13].

В данных экспериментах, как видно из рисунка 2, образцы ОМ размещались внутри лазерной камеры. Расстояние от фольги электронной пушки до поверхности образцов составляло около 8 см. При давлении рабочей газовой смеси лазеров 2.2 атм плотность энергии ЭП на их поверхности (E_{is}) за импульс с длительностью 80 нс варьировалась в пределах 0.7-0.85 Дж/см². Это определялось в калибровочных сериях выстрелов калориметром, располагавшимся при снятой лазерной камере за диафрагмой с размером отверстия равным облучаемой поверхности образцов. Диафрагма располагалась на расстоянии 8 см от фольги и прикрывалась дополнительным фильтром из 1 слоя Al фольги и двух слоев Ti фольги толщиной по 14 мкм. Поверхностная плотность этих фильтров с учетом воздуха равнялась поверхностной плотности газовой смеси в лазерной камере перед образцами.

Эксперименты проводились на образцах стекол КУ-1 толщиной 8 мм, КС-4В толщиной 22 мм, трех образцах Corning 7980 разных марок толщиной 10.3 мм. Рабочие обозначения этих образцов здесь были такими: C_0 – Standard Grade; C_KrF – KrF Grade; C_ArF – ArF Grade.

2.2. Экспериментальные результаты

Измерения величины K на образцах ОМ проводились с помощью излучения ArF-лазера (193 нм), KrF-лазера (248 нм) и XeF-лазера (353 нм). Интенсивность зондирующего ЛИ в данных экспериментах была около 2 МВт/см².

В процессе измерений с каждым из кварцевых образцов производилось до 25 пар импульсов установки ЭЛА с открытием и закрытием затвора. Это было обусловлено необходимостью повышения точности измерения величины B_1/B_0 , значения которых на 353 и 248 нм при относительно высоких использовавшихся значениях W_s в кварцевых образцах составляли около 0.99–0.97. Результаты измерения величины K представлены в Таблице 2. Для сравнения приводятся результаты и по высокочистому CaF₂.

Таблица 2.
Значения величин K [$\text{см}^2/\text{ГВт}$] для образцов ОМ на разных длинах волн λ .

ОМ/ λ	353 нм	248 нм	193 нм
КУ-1	0.6	2	4
КС-4В	1	4	6
С_0	1	2.7	6.6
С_KrF	0.9	1.7	8
С_ArF	0.6	1.1	0.6
CaF ₂	53	64	72

Ошибка измерения величины K не превышала 50%.

Значения величин K у КУ-1 и корнинговских образцов С_0 и С_KrF совпадают в пределах ошибки измерения. А вот у С-ArF на 248 нм они примерно в 2, а на 193 почти на порядок меньше. Отметим также, что величины K у КС-4В совпали с аналогичными данными у другого российского “сухого” кварцевого стекла марки КУВИ [7]. Значения K у высокочистого CaF₂ близки к данным, которые можно получить из [10], и чуть отличаются от результатов, полученных ранее на более “грязных” образцах [7].

Полученные результаты показывают, что наведенное ИИ короткоживущее поглощение УФ ЛИ в окнах ЭПЛ из кварцевых стекол практически не заметно при $W_s < 1 \text{ МВт}/\text{см}^2$. В окнах из CaF₂ при таких W_s потери излучения могут доходить до ~10%, что, очевидно, уже надо учитывать.

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

Литература

1. *Сергеев П.Б., Сергеев А.П., Зворыкин В.Д.* Квант. электроника, 2007, **37**(8), 706-715.
2. *Морозов Н.В., Рейтеров В.М., Сергеев П.Б.* Квант. электр., 1999, **29**(11), 141-144.
3. *Артемьев М.Ю. и др.* Квант. электроника, 2004, **34**(2), 147-150.
4. *Sergeev P.B.* J. of Soviet Laser Research, 1993, **14**(4), 237-285..
5. *Барабанов В.С., Морозов Н.В., Сергеев П.Б.* Квант. электр., 1991, **18**(11), 1364-1366.
6. *Амосов А.В. и др.* Квантовая электроника, 1993, **20**(11), 1077-1080.
7. *Барабанов В.С., Сергеев П.Б.* Квантовая электроника, 1995, **22**(7), 745-748.
8. *Williams R.T. et. al*, Phys.Rev.B, 1976, **B14**, 725-732.
9. *Гриценко Б.П., Лисицын В.М., Степанчук В.Н.* ФТТ, 1981, **23**(2), 393-395.
10. *Чинков Е.П., Штанько В.Ф.* ФТТ, 1999, **41**(3), 442-450.
11. *Курбасов В.С., Сергеев П.Б.* Квантовая электроника, 2000, **30**(8), 703-709.
12. *Сергеев П.Б.* Квантовая электроника, 2002, **32**(4), 344-348.
13. *Сергеев П.Б. и др.* Оптический журнал, 2004, **71**(6), 93-97.