

НЕЛИНЕЙНОЕ И НАВЕДЕННОЕ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ПОГЛОЩЕНИЕ В ЧИСТЫХ КВАРЦЕВЫХ СТЕКЛАХ НА ДЛИНАХ ВОЛН ЭКСИМЕРНЫХ ЛАЗЕРОВ

© 2009 г. П. Б. Сергеев, канд. физ.-мат. наук; А. П. Сергеев;
В. Д. Зворыкин, канд. физ.-мат. наук

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

E-mail: psergeev@sci.lebedev.ru

В стеклах типа КС-4В, КУ-1 и *Corning 7980* измерены коэффициенты двухфотонного поглощения (β) на длинах волн 248 и 193 нм при длительностях импульсов 80 и 60 нс соответственно. Значение β на 248 нм у КС-4В составила 0,16 см²/ГВт, что было примерно на 30% выше, чем у других стекол. На длине волны 193 нм значения β у всех образцов практически совпадали на уровне 1,1 см²/ГВт. Для этих же стекол с использованием излучений ХеF-, КгF- и АгF-лазеров были измерены и коэффициенты связи между наводимой электронным пучком (ЭП) квазистационарной оптической плотностью на длинах волн 353, 248 и 193 нм и плотностью мощности ЭП на образцах. У КС-4В эти коэффициенты составили 1, 4 и 6 см²/ГВт соответственно. Ошибка измерения не превышала 50%.

Коды OCIS: 160.4670, 160.4760.

Поступила в редакцию 22.10.2008.

Введение

Новое российское “Особо чистое кварцевое стекло КС-4В” относится к “сухим” стеклам 1V типа с малым содержанием гидроксила. Основной примесью в нем является хлор, до 20 ppm, а суммарное содержание металлических примесей и ОН не превышает 1 ppm [1–3]. КС-4В имеет более высокую радиационную прочность, чем “влажные” стекла типа КУ-1 и *Corning 7980* с содержанием ОН около 1000 ppm [1–2, 4–6], что открывает этому стеклу широкие перспективы использования для изготовления проходной оптики лазеров ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового диапазона. Для этого нужно знать нелинейные характеристики стекла. Их определение и было одной из целей работы. Результаты даются в сравнении с аналогичными данными по стеклам разного типа и качества, что важно в научном и в практическом плане.

На материал окон эксимерных электронно-пучковых лазеров (ЭПЛ) одновременно с лазерным (ЛИ) действует еще и ионизирующее излучение (ИИ). Это быстрые электроны, рассеянные из пучка накачки, и неотъемлемое для этих лазеров рентгеновское излучение [4–6]. Воздействие ИИ на оптические материалы (ОМ) окон лазера приводит к появлению в них наведенного поглощения. Оно разделяется на короткоживущее и остаточное, долгоживущее. Остаточное поглоще-

ние в КС-4В изучалось в работах [1–2, 4–6]. Здесь, во второй части работы, приводятся результаты по короткоживущему поглощению. Оно происходит на комплексе короткоживущих электронных состояний материала, возникающих при наработке и релаксации электронно-дырочных пар. Целью работы было измерение коэффициента связи (K) между наводимой электронным пучком (ЭП) оптической плотностью на длинах волн 353, 248, 193 нм и плотностью мощности ЭП в кварцевых стеклах КС-4В, КУ-1, *Corning 7980*. Согласно работам [7–8], эти коэффициенты являются характеристикой ОМ.

Отличие используемого метода измерения наводимого ЭП поглощения в ОМ [7–8] от общепринятых [9–11] заключается в том, что в настоящей работе оно измеряется с помощью ЛИ на квазистационарном участке импульса ЭП (с длительностью порядка 100 нс), а не после него. При временах релаксации 1 нс короткоживущих состояний, что имеет место в стеклах, это отличие является принципиально важным. Недостатком метода является то, что измерения поглощения проводятся на ограниченном наборе длин волн конкретных лазеров. Но получаемые результаты, как было показано в [12–13], 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 описании механизмов нелинейного поглощения.

Нелинейное поглощение кварцевых стекол

Определение коэффициентов двухфотонного поглощения в образцах стекол проводилось по стандартной методике нелинейного пропускания [14]. Источником лазерного излучения была установка ЭЛА [15]. 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 $\lambda = 248$ нм и около 0,15 Дж на $\lambda = 193$ 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, измерявший прошедшую энергию ЛИ (E). Длительность импульсов на полувысоте (τ) у KrF-лазера была 80 нс, у ArF-лазера – 60 нс.

На каждом лазере вначале проводилось измерение расходимости ЛИ (θ) с помощью диафрагм, располагавшихся в фокусе линзы. Значения 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 I . Значение T определялось из отношений частного между показаниями второго и первого калориметров с образцом в фокусе и без него. I изменялась введением светофильтров в тракт пучка. Далее строилась зависимость величины $1/T$ от I , по наклону которой и вычисляется β на основе выражения

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

Оно справедливо, когда линейное поглощение в образцах мало, что выполнялось для всех стекол. В (1) R – коэффициент отражения от грани образца, L – его толщина, K – коэффициент, зависящий от формы импульса мощности и распределения I по сечению каустики [14].

Измерения β проводились на образцах кварцевых стекол Corning 7980 (KrF Grade (C1/3), ArF Grade (C2/3), Standard Grade (C3)) толщиной 10,3 мм, 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 $\lambda = 193$ нм показаны на рис. 1. Подобные зависимости были и на

Таблица 1. Значения величин $\beta(\lambda)$ для стекол разных марок

ОМ	$\beta(248)$, см/ГВт	$\beta(193)$, см/ГВт
КС-4В	0,16	1,1
C1/3 (KrF Grade)	0,08	1,2
C2/3 (ArF Grade)	0,13	0,9
C3 (Standard Grade)	0,12	1,2
КУ-1	0,12	1

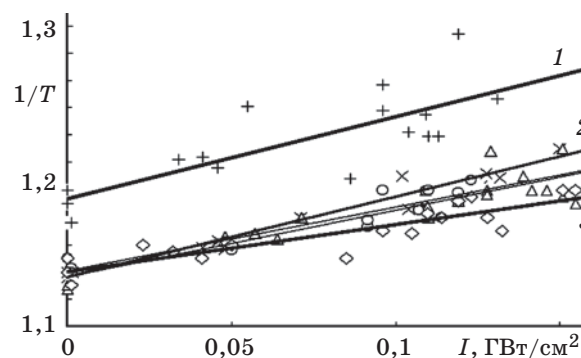


Рис. 1. Зависимости ($1/T$) от I на длине волны 193 нм для различных образцов кварцевых стекол. Прямая 1 и “+” – экстраполяция и экспериментальные точки для образца КС-4В. Прямая 2 и “x” – то же для КУ-1. Прямая 3 и “diamond” – результаты для C2/3. Две сливающиеся прямые между 2 и 3 – результаты по образцам C1/3 и C3.

$\lambda = 248$ нм [16]. Рассчитанные на основе выражения (1) значения коэффициентов β приводятся в табл. 1. Так как все образцы испытывались практически одновременно и в одинаковых условиях, относительная погрешность измерения β не превышает 10%. Полная же погрешность может достигать 50%.

Полученные результаты показывают, что нелинейное поглощение на $\lambda = 248$ нм у стекол КУ-1 и корнинговских образцов (стекла с высоким содержанием OH) составляют около 0,12 см/ГВт, что примерно на 30% ниже, чем у стекла КС-4В. На $\lambda = 193$ нм β практически у всех стекол одинаковы и равны 1,1 см/ГВт. Стоит отметить также меньшее значение величины β у специализированных марок корнинговских стекол KrF Grade и ArF Grade на длинах волн 248 нм и 193 нм соответственно.

Наведенное электронным пучком поглощение в стеклах

Измерения наведенного ЭП короткоживущего поглощения в образцах ОМ проводились на электронно-пучковой лазерной установке ЭЛА

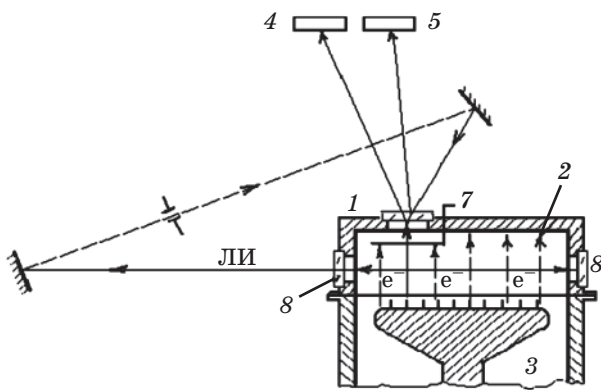


Рис. 2. Схема измерения наведенного ЭП короткоживущего поглощения в образцах ОМ.

[15] по методике, описанной в работах [7–8]. Ее суть в следующем. Испытываемый образец (1 на рис. 2) в этих экспериментах помещался на внутренней стороне торцевой стенки лазерной камеры (ЛК) напротив разделительной фольги электронной пушки (3). На стороне образца, обращенной к ЭП (2), имеется отражающее алюминиевое покрытие. Перед образцом помещается толстая стальная подвижная пластина, являющаяся затвором (7), которая открывает или закрывает доступ ЭП к образцу. Электронный пучок используется в данных экспериментах для накачки активной среды лазера и для облучения образцов ОМ, что автоматически устраняет проблему синхронизации ЭП и зондирующего ЛИ. Часть ЛИ 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 как

$$A_5 = H_5 T_1 E, \quad (2)$$

$$A_4 = H_4 R_1 R_2 \exp(-2D) E. \quad (3)$$

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

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

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

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

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

Здесь величина Δ есть средняя по длительности импульса наведенная ЭП 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. Затем результаты усреднялись.

Как было установлено ранее [7–8], процесс наведенного ЭП поглощения наилучшим образом описывается коэффициентом K , определяемым в линейном приближении как отношение наведенной оптической плотности Δ к плотности мощности ЭП (P_s)

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

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.

Расстояние от фольги электронной пушки до поверхности образцов было 8 см. При давлении рабочей газовой смеси лазеров 2,2 атм Ag плотность энергии ЭП на их поверхности за импульс 80 нс варьировалась в пределах 0,7–0,85 Дж/см². Это определялось калориметром, располагавшимся при снятой ЛК за диафрагмой с размером отверстия, равным облучаемой поверхности образцов в калибровочных сериях выстрелов. Диафрагма располагалась на расстоянии 8 см от фольги и прикрывалась дополнительным фильтром из фольг, поверхностная плотность которых с учетом воздуха равнялась поверхностной плотности газовой смеси в ЛК 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: С1 – KrF Grade, С2 – ArF Grade, С3 – Standard Grade.

Экспериментальные результаты

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

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

ОМ \ λ , нм	353	248	193
КС-4В	1	4	6
C1 (KrF Grade)	0,9	1,7	8
C2 (ArF Grade)	0,6	1,1	0,6
C3 (Standard Grade)	1	2,7	6,6
КУ-1	0,6	2	4
CaF ₂	53	64	72

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 отношения B_1/B_0 , значения которого на длинах волн 353 и 248 нм при относительно высоких использовавшихся значениях P_s в кварцевых образцах составляли около 0,99–0,97. Результаты измерения величины K представлены в табл. 2. Для сравнения приводятся результаты и по высокочистому CaF₂. Ошибка измерения величины K не превышала 50%.

Значения величин K у КУ-1 и корнинговских образцов C1 и C3 совпадают в пределах ошибки измерения. А вот у C2 (ArF Grade) на $\lambda = 248$ нм они примерно в 2 р, а на $\lambda = 193$ 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].

Результаты по K показывают, что наводимое ИИ короткоживущее поглощение УФ ЛИ в окнах ЭПЛ из кварцевых стекол практически не заметно при $P_s < 1$ МВт/см². В окнах из CaF₂ при таких P_s потери излучения могут доходить до 10%, что, очевидно, уже надо учитывать.

Заключение

У образцов “Особо чистого кварцевого стекла КС-4В” измерены коэффициенты двухфотонного поглощения на длинах волн KrF- и ArF-лазеров (248 и 193 нм соответственно) при длительностях импульсов 80 и 60 нс. Эти результаты даются в сравнении с аналогичными данными по стеклам КУ-1 и Corning 7980 (Standard Grade, KrF Grade, ArF Grade).

Для этих стекол определены также коэффициенты связи между наведенной оптической

плотностью на длинах волн 353, 248 и 193 нм и плотностью мощности ЭП, падающего на образцы. Данные коэффициенты являются характеристикой каждого стекла и отражают особенности процессов релаксации электронно-дырочных пар в них.

В заключении выражаем благодарность Евлампиеву И.К. за предоставление образцов стекла КС-4В.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов А.В., Боганов А.Г., Корниенко Л.С., Руденко В.С., Рыбалтовский А.О., Чернов П.В. Радиационные центры окраски в кварцевом стекле КС-4В и в волоконных световодах на его основе // Физика и химия стекла. 1988. Т. 14. В. 1. С. 91–96.
2. Cheremisin I.I., Ermolenko T.A., Evlampiev I.K., Popov S.A., Turoverov P.K., Golant K.M., Zabezhajlov M.O. Radiation-hard KS-4V glass and optical fiber, manufactured on its basis, for plasma diagnostics in ITER // Plasma Devices and Operations. 2004. V. 12. № 1. P. 1–9.
3. <http://www.mmz.ru>
4. Sergeev P.B., Cheremisin I.I., Ermolenko T.A., Evlampiev I.K., Popov S.A., Pronina M.S., Turoverov P.K., Sergeev A.P., Zvorykin V.D. E-beam-induced absorption in various grades of quartz // Proc. SPIE. 2004. V. 5506. P. 81–86.
5. Сергеев П.Б., Ермоленко Т.А., Евлампиев И.К., Зворыкин В.Д., Попов С.А., Пронина М.С., Сергеев А.П., Туроверов П.К., Черемисин И.И. Наведенное электронным пучком поглощение в кварцевых стеклах // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 6. С. 93–97.
6. Сергеев П.Б., Сергеев А.П., Зворыкин В.Д. Радиационная стойкость оптических материалов для окон эксимерных лазеров УФ и ВУФ диапазонов // Квант. электроника. 2007. Т. 37. № 8. С. 706–710.
7. Амосов А.В., Барабанов В.С., Герасимов С.Ю., Морозов Н.В., Сергеев П.Б., Степанчук В.Н. Наведенное электронным пучком поглощение в кварцевом стекле лазерного излучения на 193, 248 и 353 нм // Квант. электроника. 1993. Т. 20. № 11. С. 1077–1080.
8. Барабанов В.С., Сергеев П.Б. Наведенное электронным пучком поглощение в оптических материалах излучения ArF-, KrF- и XeF- лазеров // Квант. электроника. 1995. Т. 22. № 7. С. 745–748.
9. Williams R.T., Kabler M.N., Hayes W., Stott J.P. Time-resolved spectroscopy of self-trapped ex-

- citons in fluorite crystals // Phys. Rev. B. 1976. V. 14. P. 725–732.
10. Гриценко Б.П., Лисицын В.М., Степанчук В.Н. Поглощение и люминесценция кристаллического кварца при наносекундном облучении электронами // ФТТ. 1981. Т. 23. № 2. С. 393–395.
 11. Чинков Е.П., Штанько В.Ф. Создание первичной дефектности в кристаллах фторида кальция различной предыстории при импульсном облучении электронами // ФТТ. 1999. Т. 41. № 3. С. 442–450.
 12. Курбасов В.С., Сергеев П.Б. Моделирование процессов, обуславливающих нелинейное поглощение УФ лазерного излучения в ионных кристаллах // Квант. электроника. 2000. Т. 30. № 8. С. 703–709.
 13. Сергеев П.Б. Механизмы нелинейного поглощения в CaF_2 УФ лазерного излучения // Квант. электроника. 2002. Т. 32. № 4. С. 344–348.
 14. Артемьев М.Ю., Нестеров В.М., Сергеев А.П., Сергеев П.Б. Нелинейное поглощение оптических материалов на длине волны 193 нм // Квант. электроника. 2004. Т. 34. № 2. С. 147–150.
 15. Sergeev P.B. Electron-Beam Noble-Gas Halide Lasers with High Excitation Level // J. of Soviet Laser Research. 1993. V. 14. № 4. P. 237–285.
 16. Сергеев П.Б., Сергеев А.П., Зворыкин В.Д. Нелинейное и наведенное электронным пучком поглощение в кварцевых стеклах на 248 и 193 нм // Труды Оптического общества им. Д.С. Рождественского. Международная конференция Прикладная оптика-2008. Т. 2. Оптические технологии и материалы. Санкт-Петербург. 2008. С. 39–43.
-