
ЗАВИСИМОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ОТ ИХ ОПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ

© 2023 г. В. И. Арбузов*

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
ул. Пилотов, 38, Санкт-Петербург, 196210 Россия*

**e-mail: viarb@yandex.ru*

Изучено влияние показателя преломления n_D и средней дисперсии ($n_F - n_C$) на нелинейный показатель преломления лазерных и оптических стекол для активных элементов и элементов “белой оптики” мощных импульсных усилителей излучения. Показано, что нелинейный показатель преломления исследованных стекол не превышает предельно допустимого значения в $1.20 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$, если их показатель преломления в зеленой (желтой) области спектра будет ниже 1.550, а средняя дисперсия — меньше 0.00820. При этом установлено, что нелинейный показатель преломления исследованных стекол практически линейно зависит как от показателя преломления, так и от средней дисперсии. Высказано предположение, что атермальные фосфатные кроны с нелинейным показателем преломления ниже указанного предельного значения могут служить основой для получения неодимовых стекол с низким нелинейным показателем.

Ключевые слова: мощные импульсные усилители излучения, лазерные и оптические стекла, нелинейный показатель преломления, оптические постоянные: показатель преломления, коэффициент дисперсии, средняя дисперсия

DOI: 10.31857/S0132665123600036, **EDN:** SPYEGW

ВВЕДЕНИЕ

Оптические постоянные (значения показателя преломления оптического материала на различных длинах волн, его средняя дисперсия, коэффициент дисперсии) играют важную роль и для оптических, и для лазерных стекол по целому ряду причин. Во-первых, от показателя преломления зависит значение коэффициента Френелевского отражения на границах раздела сред “воздух—стекло” и “стекло—воздух” как для излучения накачки активного элемента лазера или усилителя излучения, так и для генерируемого или усиливаемого излучения. Во-вторых, функцией показателя преломления является и такая важная величина лазерного стекла, как сечение стимулированного излучения. В-третьих, данные по показателям преломления используются при расчете угла Брюстера, под которым в некоторых лазерных или усилительных системах пучок излучения должен входить в активный элемент (АЭ) и выходить из него. В-четвертых, данные о показателе преломления нужны при определении термо-оптических постоянных лазерных стекол. Наконец, в-пятых, для изготовления крупногабаритных АЭ мощных импульсных усилителей излучения (МИУИ) требуются лазерные стекла с максимально низким нелинейным показателем преломления (НПП), n_2 , который индуцируется в них при прохождении через АЭ мощного пучка лазерного излучения и который зависит, с одной стороны, от показателя преломления стекла в зеленой (желто-зеленой) области спектра, а с другой стороны, от его коэффициента дисперсии [1, 2]. В свою очередь сам коэффициент дисперсии является функцией средней дисперсии и опять-

таки показателя преломления. Иными словами, имеет место явная и скрытая (через коэффициент дисперсии) зависимость НПП от показателя преломления. Поэтому представлялось целесообразным выявить характер совокупного влияния показателя преломления на этот критически важный параметр стекол для МИУИ, а также их средней дисперсии, вклад которой в НПП был отмечен в [3].

ОПТИЧЕСКИЕ ПОСТОЯННЫЕ СТЕКОЛ

Нелинейный показатель преломления и способы его определения

В нормативных документах и в научных статьях по лазерным стеклам [4–8] данные о показателях преломления, необходимые для определения n_2 , приводятся для следующих длин волн: 479.99 нм (*F*-линия Cd); 486.13 нм (*F*-линия H); 546.27 нм (*e*-линия Hg); 589.29 нм (*D*-линия Hg); 643.85 нм (*C*-линия Cd); 656.27 нм (*C*-линия Cd). Обозначение названных спектральных линий используется в качестве нижнего индекса у обозначения показателя преломления. По измеренным значениям показателей преломления в зеленой (желтой), синей и красной областях спектра рассчитываются значения *коэффициентов дисперсии (чисел Аббе – в англо- и немецкоязычной литературе)*:

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}}; \quad v_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (1)$$

Разности показателей преломления в синей и красной областях спектра, стоящие в знаменателях приведенных уравнений для коэффициентов дисперсии, называются средними дисперсиями. Показатели преломления n_e и n_D считаются *основными показателями преломления*.

Если на стекло действует мощное световое поле с плотностью потока мощности, превышающей 10^6 Вт/см², то электрострикционное сжатие вещества и возрастание поляризуемости электронных оболочек ионов приводят к увеличению показателя преломления на величину, пропорциональную квадрату напряженности E электрического поля световой волны. В этом случае выражение для показателя преломления принимает вид [9]:

$$n = n_0 + n_2 |E|^2. \quad (2)$$

В этом выражении n_0 – показатель преломления в отсутствии мощного светового воздействия на стекло, n_2 – нелинейный показатель преломления. Линеинный по E член в формуле (2) для стекла как для изотропного материала равен нулю.

Из-за появления в лазерном стекле НПП, индуцированного проходящим через АЭ мощным пучком лазерного излучения, в АЭ наводится положительная линза, фокусное расстояние которой зависит от значения n_2 и от мощности проходящего излучения. Если действие этой положительной линзы превосходит расходимость генерируемого излучения, то возникает явление, которое называется *самофокусировкой излучения*. Мощность излучения, при которой наблюдается компенсация расходимости лазерного пучка за счет фокусирующего действия нелинейной положительной линзы, называется *критической (или пороговой) мощностью самофокусировки*. При еще более высоких мощностях излучения в лазерном пучке возникают мелкомасштабные искажения, которые при достаточно большой длине пути света в стекле АЭ вызывают разбиение пучка на отдельные нити с очень высокой плотностью мощности, что может привести к *оптическому пробою стекла*. Кроме того, разбиение лазерного пучка на мелкомасштабные нити существенно искажает волновой фронт проходящего через активный элемент мощного пучка света.

Значения n_2 для лазерных стекол могут быть определены экспериментально при использовании интерференционного метода. Суть его сводится к тому, что при действии

на образец стекла, находящегося в интерферометре, короткого (10^{-10} с) мощного лазерного импульса увеличение показателя преломления с ростом интенсивности излучения сопровождается смещением интерференционных полос, пропорциональным значению n_2 . С другой стороны, значение n_2 может быть рассчитано с использованием данных по оптическим постоянным стекла [1]:

$$n_2 = 68 \times 10^{-13} (n_e^2 + 2)^2 (n_e - 1) / v_e [1.517 + v_e (n_e^2 + 2)(n_e + 1) / 6n_e]^{1/2} \text{ см}^2/\text{В}^2. \quad (3)$$

Это довольно громоздкое уравнение было сведено в [2] к более простому виду:

$$n_2 = 2175(n_D - 1.246) / v_D^{3/2} \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2. \quad (4)$$

При этом в [2] было показано, что для расчета n_2 вместо n_e и v_e можно использовать другую пару оптических постоянных: n_D и v_D , которые как раз фигурируют в уравнении (4). Это было необходимо сделать потому, что в одних каталогах указываются одни пары оптических параметров, в других документах — вторые пары, а в некоторых каталогах — приводятся и те, и другие.

Анализ явной и скрытой зависимости НПП от показателя преломления n_D

Значения n_2 , полученные в [2] с использованием уравнения (4), для всех лазерных стекол с высокой точностью (разница не превосходит 2%) совпали с литературными данными. Это обстоятельство означало, что выражением (4) можно пользоваться для экспрессной оценки НПП разрабатываемых лазерных стекол. Вместе с тем отметим, что в уравнении (4) явная зависимость n_2 от показателя преломления представлена членом $(n_D - 1.246)$ в уравнении (4), а скрытая (через стоящий в знаменателе этого уравнения коэффициент дисперсии в степени три вторых) — членом $(n_D - 1)^{3/2}$. С учетом этого обстоятельства уравнение (4) может быть представлено в ином виде:

$$n_2 = 2175[(n_D - 1.246)/(n_D - 1)^{3/2}](n_F - n_C)^{3/2} \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2. \quad (5)$$

Из этого уравнения следует, что НПП стекла будет определяться, во-первых, сложной функцией показателя преломления и, во-вторых, средней дисперсией в степени три вторых. Задача поэтому будет состоять в том, чтобы найти характер математической зависимости n_2 как от показателей преломления, так и от средних дисперсий в широком кругу специально подобранных стекол.

Известно, что лазерные стекла с низкими значениями НПП являются одновременно и атермальными стеклами. Однако в усилительном канале МИУИ, кроме АЭ, изготовленных из лазерного стекла, могут располагаться и элементы так называемой “белой оптики”, которые выполняются из бесцветных оптических стекол. НПП таких стекол тоже должен быть достаточно низким, поскольку элементы “белой оптики” в усилительном канале также испытывают значительные лучевые нагрузки. Поэтому представлялось целесообразным провести количественный анализ поведения выражения в квадратных скобках в уравнении (5) (обозначим его как функцию $f(n_D)$) при изменении n_D в широком диапазоне, имеющем место при переходе от одной марки стекла к другой. В ряд исследованных стекол были включены, с одной стороны, лазерные стекла (причем как атермальные, так и обычные), а, с другой стороны, атермальные оптические стекла [10, 11]. Это дало возможность представить графически функцию $f(n_D)$ большим числом точек при изменении показателя преломления n_D стекол в диапазоне примерно от 1.470 до 1.593 (рис. 1, на котором нижний индекс для упрощения обозначений осей опущен).

В табл. 1 представлены значения функции $f(n_D)$ для почти 30 марок стекол. Видно, что с ростом n_D они изменяются от 0.697 до почти 0.760. Как оказалось, значения $f(n_D)$

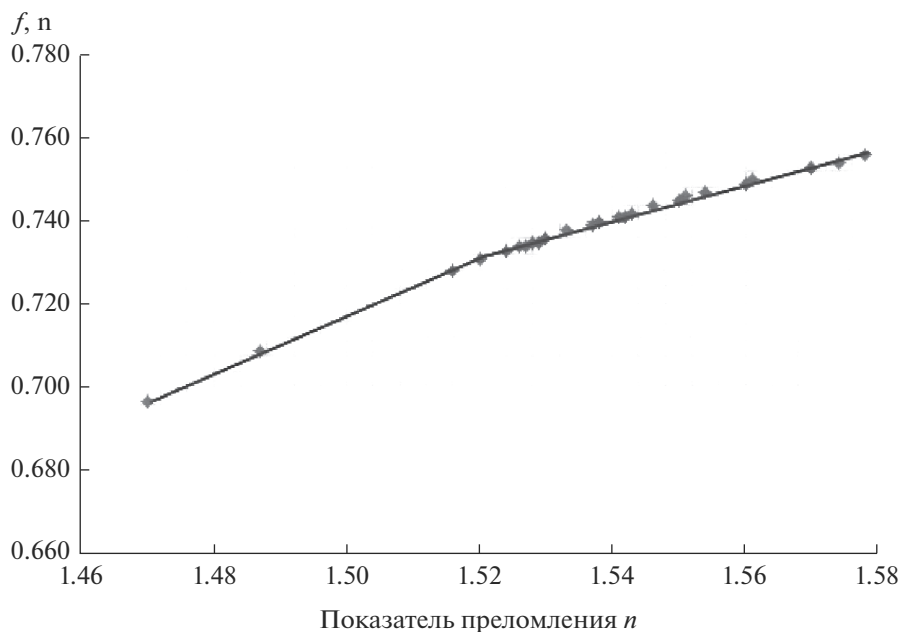


Рис. 1. Вклад показателя преломления в НПП лазерных и оптических стекол.

на графике рис. 1 с хорошей точностью укладываются на две прямые, пересекающиеся друг с другом при значении $n_D = 1.520$. Первая прямая относится к оптическим атермальным стеклам марок ЛК6, ЛК3, ФК 516–678 и ФК11, в диапазоне изменения n_D от 1.470 до 1.520 она хорошо описывается уравнением $f_1(n_D) = 0.667n_D - 0.283$ (см. рис. 1). Для второй прямой линии в диапазоне изменения показателя преломления от 1.520 до 1.580, охватывающего лазерные и оставшиеся оптические атермальные стекла, справедливо уравнение $f_2(n_D) = 0.408n_D + 0.111$ (см. рис. 1). Важно при этом отметить, что вне зависимости от того, какому из этих поддиапазонов изменения n_D отвечает то или иное стекло, значение его НПП линейно зависит от n_D .

С учетом сказанного уравнение (5) можно представить в следующем виде:

$$n_2 = 2175f(n_D)(n_F - n_C)^{3/2} \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2. \quad (6)$$

Как следует из этого уравнения, НПП зависит не только от $f(n_D)$, но и от средних дисперсий стекол в степени $3/2$. В связи с этим в табл. 1 приводятся значения средних дисперсий в степенях 1 и $3/2$, а также значения НПП, рассчитанные по уравнению (6). Следует отметить, что для лазерных стекол они с высокой степенью точности совпадают со значениями, полученными по формуле (4) [2, 3]. Данные по стеклам, НПП которых превосходят $1.20 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$, в таблице набраны жирным шрифтом. Такие стекла непригодны для использования в МИУИ. Обращает на себя внимание, что к числу таких стекол относятся и помеченные знаком (!) 4 марки атермальных оптических стекол (ОК 570–642, ФК14, ТК 593–594, ТФК11), которые, как оказалось, характеризуются достаточно высокими значениями НПП. Это означает, что не из любого атермального оптического стекла можно изготавливать элементы “белой оптики” МИУИ. В отличие от этих четырех марок другие атермальные оптические стекла (ЛК1, ЛК6, ЛК3, ФК 516–678, ФК11, ОК1, ФК 527–674, ФК 533–685 и ОК2) демон-

Таблица 1. Вклад показателей преломления и средних дисперсий лазерных и оптических стекол в значения их НПП

№	Марка стекла	n_D	$f(n_D)$	$(n_F - n_C)$	$(n_F - n_C)^{3/2}$	$n_2, 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$
1	ЛК6	1.470	0.697	0.00704	0.000591	0.90
2	ЛК3	1.487	0.709	0.00696	0.000581	0.90
3	ФК 516–678	1.516	0.728	0.00761	0.000664	1.05
4	ФК11	1.520	0.731	0.00752	0.000652	1.04
5	ОК1	1.524	0.733	0.00684	0.000566	0.90
6	LG-750	1.526	0.734	0.00771	0.000677	1.08
7	ФК 527–674	1.527	0.734	0.00782	0.000692	1.10
8	КГСС0180	1.528	0.735	0.00742	0.000639	1.02
9	ГЛС2	1.529	0.735	0.00930	0.000897	1.43
10	LHG-8	1.530	0.736	0.00797	0.000712	1.14
11	ФК 533–685	1.533	0.738	0.00778	0.000686	1.10
12	ГЛС14	1.537	0.739	0.00944	0.000917	1.47
13	QX/Nd	1.538	0.740	0.00815	0.000736	1.18
14	LHG-5	1.541	0.741	0.00852	0.000786	1.27
15	LEG-30(Er ³⁺)	1.542	0.741	0.00829	0.000755	1.22
16	НАР-4, LHG-80	1.543	0.742	0.00840	0.000770	1.24
17	ГЛС10	1.546	0.744	0.00970	0.000955	1.54
18	ОК2	1.550	0.745	0.00753	0.000653	1.06
19	ГЛС6	1.551	0.746	0.01056	0.001085	1.61
20	ГЛС7	1.554	0.747	0.01082	0.001125	1.82
21	ГЛС8	1.560	0.749	0.01107	0.001165	1.90
22	LSG-91H	1.561	0.750	0.00991	0.000987	1.61
23	LG-680	1.570	0.753	0.00993	0.000990	1.62
24	ОК 570–642 (!)	1.570	0.753	0.00888	0.000837	1.37
25	ГЛС26	1.574	0.754	0.00874	0.000817	1.34
26	ГЛС25	1.578	0.756	0.00885	0.000833	1.37
27	ФК14 (!)	1.580	0.756	0.00891	0.000841	1.38
28	ТК 593–594 (!)	1.593	0.759	0.00998	0.000997	1.65
29	ГЛС21–ГЛС24	1.594	0.760	0.01002	0.001003	1.66
30	ТФК11 (!)	1.602	0.762	0.00910	0.000868	1.44

стрируют достаточно низкие значения НПП. Именно из стекол этих марок и можно производить элементы “белой оптики” для МИУИ.

Анализ данных табл. 1 показывает, что у всех лазерных и оптических стекол, характеризующихся низкими значениями НПП, $n_D < 1.550$. Однако выполнения одного этого условия явно не достаточно для отнесения стекла той или иной марки к категории стекол, пригодных для создания АЭ или элементов “белой оптики” МИУИ, поскольку у целого ряда лазерных стекол (ГЛС2, ГЛС14, LHG-5, LEG-30(Er³⁺), НАР-4, LHG-80, ГЛС10), у которых $n_D < 1.550$, значения НПП заметно превосходят $1.20 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$. Причина этого у перечисленных стекол в значительной степени обусловлена высокими значениями члена $(n_F - n_C)^{3/2}$ в уравнении (6), а значит, и самих средних дисперсий $(n_F - n_C)$.

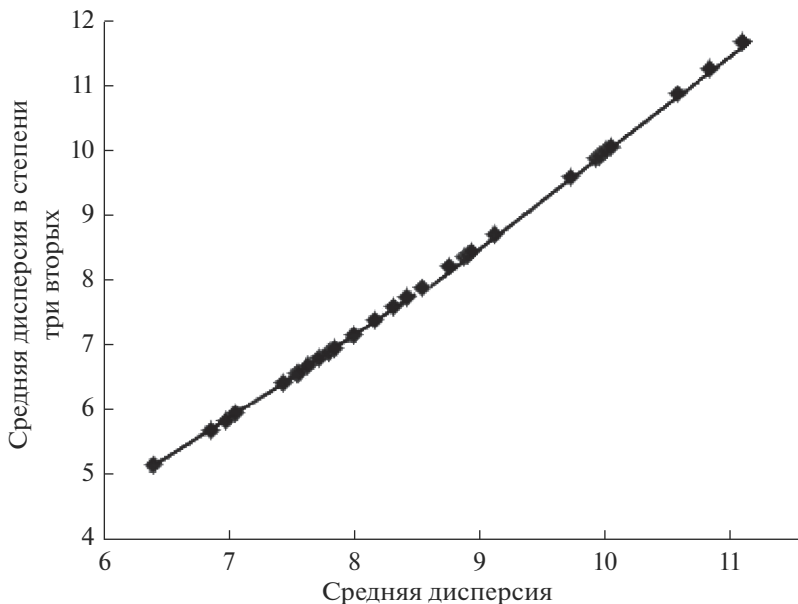


Рис. 2. Вклад средних дисперсий в НПП лазерных и оптических стекол.

Чтобы при низких значениях показателя преломления ($n_D < 1.550$) у стекла был НПП, не превышающий $1.2 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$, средние дисперсии в степенях 1 и $3/2$ не должны превышать, соответственно, значений в 0.00820 и 0.000743. На графике рис. 2, построенном по данным табл. 1, представлена зависимость $(n_F - n_C)^{3/2}$ от $(n_F - n_C)$. Чтобы не перегружать поле рисунка длинными значениями обеих величин в оцифровке осей, средние дисперсии $(n_F - n_C)$ приведены в масштабе 10^{-3} , а $(n_F - n_C)^{3/2}$ — в масштабе 10^{-4} . Из рис. 2 следует, что по мере увеличения значений средних дисперсий угол наклона зависимости $(n_F - n_C)^{3/2}$ от $(n_F - n_C)$ хоть и слабо, но монотонно возрастает. Это свидетельствует, конечно, о повышении вклада средних дисперсий в степени три вторых в значение НПП — (см. уравнение (6)), тем не менее, представленный график выглядит близким к линейному. Поэтому в первом приближении можно считать, что НПП оптических и лазерных стекол почти линейно зависит от средних дисперсий.

Роль вклада средних дисперсий в значение НПП хорошо видна при сопоставлении пар стекол с примерно одинаковыми значениями показателя преломления, но с разными по величине средними дисперсиями. Так, у стекол КГСС 0180 и ГЛС2 показатели преломления равны 1.528 и 1.529, соответственно, а средние дисперсии в степени три вторых — 0.000639 и 0.000897 (см. табл. 1). Как результат, НПП у этих стекол сильно различаются (1.02 и 1.43). Аналогичная ситуация наблюдается и в паре стекол QX/Nd и ГЛС14. Поэтому можно утверждать, что для того, чтобы у стекла той или иной марки был низок НПП, его дисперсионная кривая (зависимость показателя преломления от длины волны) должна располагаться на шкале показателя преломления как можно ниже и быть максимально пологой.

И последнее. Выше отмечалось, что у атермальных оптических стекол ЛК1, ЛК6, ЛК3, ФК 516–678, ФК11, ОК1, ФК 527–674, ФК 533–685 и ОК2 достаточно низкие значения НПП. В этот ряд попало 4 марки фосфатных кронов. Поскольку АЭ для МИУИ изготавливаются из лазерных стекол фосфатной системы, можно рассматри-

вать стекла ФК 516–678, ФК11, ФК 527–674, ФК 533–685 в качестве матриц для создания новых марок неодимовых лазерных стекол для мощных импульсных усилителей излучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования зависимости нелинейного показателя преломления (НПП) широкого круга лазерных и атермальных оптических стекол от их оптических постоянных установлено, что основными в их ряду являются показатель преломления n_D и средняя дисперсия ($n_F - n_C$).

Показано, что значения НПП стекол не превысят критического значения в $1.2 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$, если показатель преломления n_D будет меньше 1.550, а средняя дисперсия в степенях 1 и 3/2 не будет превышать соответственно значений в 0.00820 и 0.000743. Чтобы у стекла той или иной марки был низок НПП, его дисперсионная кривая должна как можно ниже располагаться на шкале показателя преломления и быть максимально пологой.

Фосфатные кроны ФК 516–678, ФК11, ФК 527–674, ФК 533–685 можно рассматривать в качестве матриц для создания новых марок неодимовых лазерных стекол для мощных импульсных усилителей излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко Н.Г., Еремина И.В., Макаров А.И. Измерение коэффициента электронной нелинейности оптического и лазерного стекла // Квантовая электроника. 1978. Т. 5. № 4. С. 841–846.
2. Арбузов В.И. К вопросу о расчете нелинейного показателя преломления лазерных стекол // Оптический журн. 2015. Т. 82. № 1. С. 61–64.
3. Арбузов В.И. Зависимость нелинейного показателя преломления от оптических параметров лазерных и оптических стекол для мощных высокоэнергетических импульсных усилителей излучения // Физика и химия стекла. 2022. Т. 48. № 1. С. 1–7.
4. Каталог “Промышленные лазерные стекла”. Москва, Дом оптики. 1982. 71 с.
5. US Catalog “Laser Glass”, Schott Glass Technologies, Inc., Duryea, PA, USA.
6. US Catalog “Laser Glasses from Schott”.
7. Japan Catalog “Laser Glass from Hoya”.
8. Catalog “Rare Earth Doped Laser Glass”, Kigre Inc. USA.
9. Алексеев Н.Е., Гапонцев В.П., Жаботинский М.Е., Кравченко В.Б., Рудницкий Ю.П. Лазерные фосфатные стекла. М.: Наука, 1080. 352 с.
10. Бесцветное оптическое стекло СССР. Каталог / Под редакцией Петровского Г.Т. М.: Дом оптики, 1990. 133 с.
11. Каталог “Оптическое стекло (Optisches Glas)” СССР (DDR).