

---

---

## ЗАВИСИМОСТЬ НЕЛИНЕЙНОГО ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ ОТ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ И ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ ДЛЯ МОЩНЫХ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ

© 2022 г. В. И. Арбузов\*

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

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

Поступила в редакцию 05.08.2021 г.

После доработки 07.10.2021 г.

Принята к публикации 08.10.2021 г.

Изучено влияние показателя преломления, коэффициента дисперсии и средней дисперсии на нелинейный показатель преломления (НПП) атермальных неодимовых лазерных стекол для активных элементов мощных импульсных усилителей излучения (ИУИ) и атермальных оптических стекол. Показано, что НПП исследованных стекол не превысит  $1.18 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$ , если их показатель преломления в зеленой (желтой) области спектра будет не выше 1.54, коэффициент дисперсии – не меньше 64 и средняя дисперсия – не выше 0.0082. При выполнении этих условий атермальные лазерные и оптические стекла могут использоваться в построении мощных ИУИ. Высказано предположение, что атермальные фосфатные кроны могут служить основой для получения неодимовых стекол с низким НПП.

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

DOI: 10.31857/S0132665122010024

### ВВЕДЕНИЕ

У стекол, предназначенных для изготовления крупногабаритных активных элементов (АЭ) мощных многоканальных импульсных усилителей излучения (ИУИ), важную роль играет нелинейный показатель преломления (НПП),  $n_2$ , который индуцируется в лазерном стекле при прохождении через АЭ мощного пучка лазерного излучения. Если плотность потока мощности энергии превышает  $10^6 \text{ Вт/см}^2$ , то в материале АЭ наблюдается электрострикционное сжатие вещества и – как следствие – возрастание поляризуемости электронных оболочек ионов активатора (в нашем случае неодима). Это приводит к увеличению показателя преломления стекла на величину, пропорциональную квадрату напряженности электрического поля световой волны, умноженному на  $n_2$ .

Обычно величина  $n_2$  стекла может быть либо измерена на специальной интерферометрической установке, либо быть рассчитана по оптическим постоянным (показате-

лю преломления в зеленой области спектра и коэффициенту дисперсии) с помощью достаточно громоздкой формулы [1]:

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

В [2] эта формула была сведена к более простому выражению:

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

При этом было показано, что вместо  $n_e$  и  $v_e$  можно использовать другую пару оптических параметров, а именно  $n_d$  и  $v_d$ . При этом  $n_e$  измеряется на длине волны 546.07 нм ( $e$ -линия Hg в зеленой области спектра), а  $n_d$  — на длине волны 589.29 нм ( $d$ -линия Hg в желтой области спектра). Коэффициенты дисперсии определяются по формулам:

$$v_e = (n_e - 1)/(n_{F'} - n_{C'}) \text{ или } v_d = (n_d - 1)/(n_F - n_C). \quad (3)$$

В первом случае показатели преломления средней дисперсии, стоящей в знаменателе, измеряются на длинах волн 479.99 нм ( $F'$ -линия Cd) и 643.85 нм ( $C'$ -линия Cd), во втором случае — на длинах волн 486.13 нм ( $F$ -линия H) и 656.27 нм ( $C$ -линия Cd). Как показывает сопоставление, различие, например, между  $n_e$  и  $n_d$  составляет обычно всего лишь 1–2 единицы третьего знака. Не очень сильно различаются и коэффициенты дисперсии  $v_e$  и  $v_d$ . Поэтому в обоих случаях расчетов, как было показано в [2], получаются одни и те же значения НПП. Это облегчает сопоставление разных стекол по значениям  $n_2$ , поскольку в одних каталогах указываются одни пары оптических параметров (в каталогах лазерных стекол — пара  $n_d$  и  $v_d$ ), в других документах — вторые пары (в каталоге оптических стекол более предпочтительна пара  $n_e$  и  $v_e$ ), а в некоторых каталогах — и те, и другие.

Чем больше  $n_2$  у стекла, тем менее оно пригодно для использования в мощных высокоэнергетических ИУИ, поскольку в АЭ наводится положительная линза, фокусное расстояние которой определяется значением  $n_2$  и мощностью проходящего через АЭ излучения. Если действие этой положительной линзы превосходит расходимость генерируемого излучения, то в АЭ возникает самофокусировка излучения, которая может привести к разрушениям в объеме стекла АЭ. В силикатных стеклах значения  $n_2$  лежат в пределах от 1.40 до 1.89, а в фосфатных стеклах от 1.02 до 1.75, умноженных на  $10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$  [2]. Понятно поэтому, что для изготовления АЭ ИУИ силикатные лазерные стекла не подходят вовсе, а из фосфатных предпочтительны только лазерные стекла с низким НПП.

Как правило, лазерные стекла с низкими значениями НПП одновременно являются атермальными, т.е. стеклами с низким значением суммы термо-оптических постоянных ( $W + R$ ), которая отражает вклад в индуцированные термо-волновые искажения АЭ, соответственно, термостимулированных мощным световым полем изменений его геометрических размеров и возникающих в нем фотоупругих напряжений. Стекла, для которых значения этой суммы не превышают  $50 \times 10^{-7} \text{ К}^{-1}$ , относят к категории атермальных [3].

У стекол (в порядке возрастания НПП) КГСС 0180 (1.02), LG-760 (1.03), LF-700 (1.06), LG-750 (1.08), LHG-8 (1.14) и QX/Nd (1.18), на основе которых строятся мощные высокоэнергетические ИУИ [2, 4–6], значения  $n_2$  не превышает  $1.20 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$ . С другой стороны, в усилительном канале ИУИ, кроме АЭ, выполненных из лазерного стекла, могут располагаться и элементы так называемой “белой оптики”, которые изготавливаются из оптических стекол. Понятно, что НПП таких стекол тоже должен быть достаточно низким, поскольку элементы “белой оптики” также испытывают значительные лучевые нагрузки.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

**Выбор стекол для анализа.** Поскольку, как было установлено в [1, 2], значение  $n_2$  стекла зависит от его оптических постоянных, поэтому в связи со сказанным в работе проведен количественный анализ влияния разных оптических постоянных на НПП как лазерных, так и оптических стекол. Такой анализ может быть полезен как с точки зрения выявления оптических стекол с высокой стойкостью к развитию в их объеме самофокусировки в условиях мощных лучевых нагрузок, так и с точки зрения поиска новых стеклообразных матриц для создания на их основе, например, неодимовых лазерных стекол.

Для проведения указанного анализа из каталога оптических стекол [3] были выбраны некоторые марки атермальных стекол, по формуле (2) были рассчитаны значения их НПП, после чего были отобраны те из них, для которых  $n_2$  не превышал  $1.20 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$ . В ряду этих стекол оказались кварцевое стекло, стекла марок ОК1, ОК2, ЛК3, ЛК6, К1, К2, К8, а также фосфатные кроны ФК 516–678 (в подобном обозначении марки стекла первым трехзначным числом указан показатель преломления, уменьшенный на единицу, а второе трехзначное число равно умноженному на 10 коэффициенту дисперсии, т.е. в данном случае речь идет о стекле с показателем преломления 1.516 и коэффициентом дисперсии 67.8), ФК11, ФК 533–685 и ФК 527–674. Поскольку стекла на основе диоксида кремния (кварцевое стекло, легкие и обычные кроны) или оксида бора (особые кроны) в случае введения в их состав неодима будут уступать неодимовым фосфатным стеклам по целому ряду спектроскопических и генерационных параметров, то едва ли разумно рекомендовать такие стекла в качестве матриц для введения в них неодима, а вот перечисленные фосфатные кроны (ФК) как раз могут рассматриваться как основы для получения новых неодимовых стекол с низким значением НПП.

**Зависимость НПП стекол от показателя преломления и коэффициента дисперсии.** А теперь проведем анализ зависимости НПП лазерных и оптических стекол для мощных ИУИ от их оптических постоянных. Как следует из уравнения (2), в его правой части три члена. Первый сомножитель – 2175 – не зависит от типа стекла, поэтому он не представляет никакого интереса для нашего анализа. Далее, на первый взгляд, кажется, если судить по уравнению (2), что  $n_2$  линейно возрастает с показателем преломления  $n_d(n_e)$  стекол. Значит, для минимизации значения второго сомножителя –  $(n_e - 1.246)$  – в уравнении (2), а, следовательно, и значения самого  $n_2$  предпочтительны, казалось бы, стекла с возможно более низкими значениями  $n_d(n_e)$ . Однако, как следует из уравнений (3), коэффициенты дисперсии также зависят от показателей преломления  $n_d(n_e)$ . Если в уравнение (2) подставить значения коэффициентов дисперсии (уравнения (3)), то получится следующее выражение:

$$n_2 = 2175(n_e - 1.246)/v_e^{3/2} \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2 = 2175[(n_e - 1.246)/(n_e - 1)^{3/2}](n_{F'} - n_{C'})^{3/2} \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2 = f(n_e)(n_{F'} - n_{C'})^{3/2} \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2. \quad (4)$$

Разумеется, как уже отмечалось выше, вместо  $n_e$  можно использовать значения  $n_d$ .

Как следует из уравнения (4), зависимость НПП от показателя преломления,  $[f(n_d)]$ , оказывается более сложной. В табл. 1 представлены значения этой функции для лазерных стекол для мощных ИУИ, о которых шла речь в работе [2].

Как следует из этой таблицы, эта функция слабо растет от 0.727 до 0.742 при изменении показателя преломления от 1.515 до 1.543. При переходе к стеклам со все увеличивающимися значениями  $n_d$  рост функции  $f(n_d)$  продолжается с постепенно уменьшающимся тангенсом угла наклона. Так, для стекол типа ГЛС21–ГЛС24 ( $n_d = 1.594$ )

**Таблица 1.** Вклад показателя преломления в значение нелинейного показателя преломления лазерных стекол

$N_{\text{пп}}$	Марка стекла	$n_d$	$f(n_d)$
1	LG-700	1.515	0.727
2	LG-760	1.519	0.730
3	LG-750	1.526	0.735
4	КГСС 0180	1.528	0.735
5	LHG-8	1.530	0.736
6	QX/Nd	1.538	0.739
7	LHG-5	1.541	0.741
8	LEG-30( $\text{Er}^{3+}$ )	1.542	0.742
9	НАР-4	1.543	0.742
10	LHG-80	1.543	0.742

**Таблица 2.** Значения функции  $1/v_d^{3/2}$  для лазерных и оптических стекол

$N_{\text{пп}}$	Стекло	$v_d$	$1/v_d^{3/2}$
1	К8	63.87	0.00196
2	К2	65.84	0.00187
3	QX/Nd	66.00	0.00187
4	LHG-8	66.50	0.00184
5	ФК 527-674	67.40	0.00181
6	LG-700	67.50	0.00180
7	Кварцевое стекло	67.68	0.00180
8	ФК 516-678	67.80	0.00179
9	LG-750	68.20	0.00178
10	ФК 533-685	68.50	0.00176
11	ЛК1	68.57	0.00176
12	ФК11	68.92	0.00175
13	LG-760	69.20	0.00174
14	КГСС 0180	71.20	0.00166
15	ОК2	72.72	0.00161
16	ОК1	75.98	0.00151

$f(n_d) = 0.760$ , но у них  $n_2 = 1.65$  [2], т.е. они явно непригодны для использования в мощных ИУИ.

Что же касается члена с коэффициентом дисперсии в знаменателе уравнения (2), иными словами, функции  $1/v_d^{3/2}$ , то, как показали наши расчеты, она практически линейно уменьшается с ростом  $v_d$  (см. табл. 2 и рис. 1).

Понятно, что при этом уменьшаются и значения  $n_2$  при переходе от стекол с меньшим коэффициентом дисперсии к стеклам с большим его значением (см. уравнение (2)).

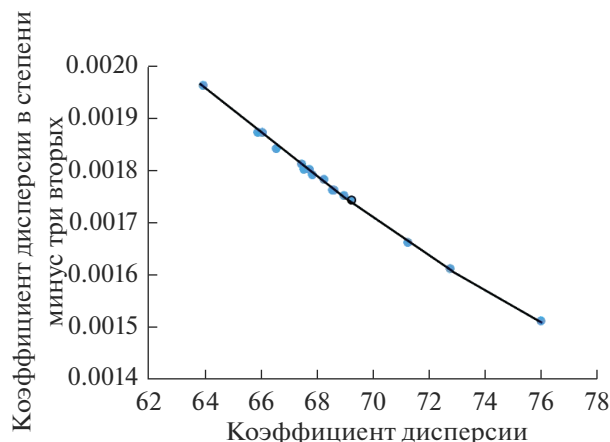


Рис. 1. График функции  $1/v_d^{3/2}$  для лазерных и оптических стекол (по данным табл. 1).

Подводя промежуточный итог, можно сказать, что НПП стекла будет тем меньше, чем меньше его показатель преломления в зеленой (желтой) области спектра и чем выше соответствующий коэффициент дисперсии.

**Зависимость НПП стекол от средней дисперсии.** В знаменателях формул для расчета коэффициентов дисперсии стекла, как было указано выше, стоит значения его средней дисперсии. Поэтому становится понятно, что, если для изготовления АЭ или элементов “белой оптики” для мощных высокоэнергетических ИУИ требуется, соответственно, лазерное или оптическое стекло с более высоким значением коэффициента дисперсии, а, стало быть, с более низким  $n_2$ , то его следует искать среди стекол с минимально возможными средними дисперсиями.

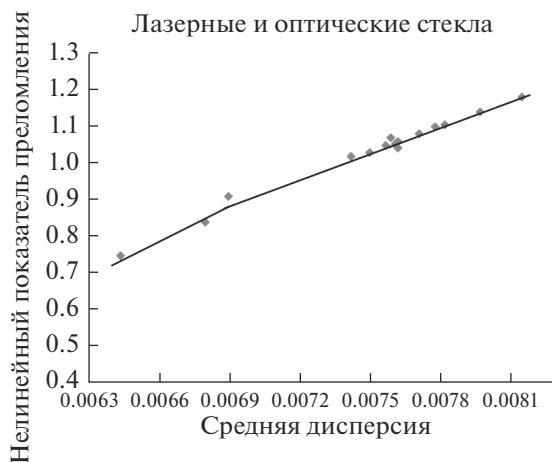
Табл. 3 демонстрирует значения нелинейных показателей преломления лазерных и оптических стекол, рассчитанных по уравнению (2), в зависимости от их средних дисперсий, а рис. 2 показывает, как соотносятся друг с другом средние дисперсии и нелинейные показатели преломления исследуемых стекол. Конечно, более корректной была бы зависимость  $n_2$  от  $(n_F - n_C)^{3/2}$ , однако, с практической точки зрения, удобнее пользоваться соотношением между  $n_2$  и  $(n_F - n_C)$ , представленным на рис. 2.

Как следует из этого рисунка, по расчетным точкам можно провести две прямые, которые под небольшим углом пересекаются в области средней дисперсии, близкой к 0.00690. На участок малых средних дисперсий от примерно 0.00630 до 0.00690 (более крутая прямая) попадают точки, отвечающие стеклам ЛК1, кварцевому стеклу и стеклу ОК1. На вторую прямую с меньшим наклоном укладываются все оставшиеся стекла – и лазерные, и оптические. При этом оказалось, что значения  $n_2$  лазерных стекол линейно возрастают от 1.02 до 1.18 при увеличении средних дисперсий стекол примерно от 0.0074 до 0.0082. На эту же линейную зависимость укладываются и фосфатные кроны, а также стекла К2 и К8, небольшие отклонения от нее демонстрируют точки, отвечающие стеклам ЛК3, ЛК6, ОК1, ОК2.

Если же по данным табл. 3 построить график зависимости  $n_2$  от  $(n_F - n_C)^{3/2}$ , то расчетные точки (за некоторыми исключениями, для которых отклонения от прямой не превысят 2.5%) идеально улягутся на одну прямую.

**Таблица 3.** Зависимость нелинейного показателя преломления лазерных и оптических стекол от средней дисперсии

$N_{\text{нп}}$	Стекло	$n_F - n_C$	$(n_F - n_C)^{3/2}$	$n_2 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$
1	ЛК1	0.00631	0.000501	0.75
2	Кварцевое	0.00680	0.000561	0.84
3	ОК1	0.00690	0.000573	0.91
4	ЛК3	0.00700	0.000586	0.91
5	ЛК6	0.00705	0.000592	0.90
6	КГСС 0180	0.00742	0.000639	1.02
7	LG-760	0.00750	0.000650	1.03
8	ФК11	0.00757	0.000659	1.05
9	ОК2	0.00759	0.000661	1.07
10	ФК 516-678	0.00761	0.000664	1.05
11	К2	0.00762	0.000665	1.04
12	LG-700	0.00762	0.000665	1.06
13	LG-750	0.00771	0.000677	1.08
14	ФК 533-685	0.00778	0.000686	1.10
15	ФК 527-674	0.00782	0.000692	1.11
16	LHG-8	0.00797	0.000712	1.14
17	К8	0.00811	0.000730	1.16
18	QX/Nd	0.00815	0.000736	1.18

**Рис. 2.** Зависимость НПП лазерных и оптических стекол от их средних дисперсий (по данным табл. 2).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывают наши исследования, нелинейный показатель преломления лазерных и оптических стекол для мощных ИУИ будет тем ниже, чем меньше у них показатель преломления в зеленой (желтой) области спектра (не выше 1.54), чем больше его коэффициент дисперсии (не меньше 64) и чем меньше средняя дисперсия (не выше

0.0082). При выполнении этих условий нелинейный показатель преломления лазерных и оптических стекол не превысит  $1.18 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$ , что позволит их использование в построении мощных ИУИ.

Представленные в табл. 3 оптические стекла типа ФК характеризуются достаточно низкими значениями НПП, лежащими в пределах от  $1.05 \times 10^{-13}$  до  $1.11 \times 10^{-13} \text{ см}^2/\text{В}^2$ , поэтому на их основе в принципе можно создать новые неодимовые фосфатные лазерные стекла, пригодные для изготовления активных элементов мощных импульсных усилителей ИК излучения. Технология их получения хорошо отработана, поэтому введение в их состав неодима не должно сильно сказаться на ней. Это значит, что на их основе можно получать высокооднородное лазерное стекло с низким значением НПП.

Что же касается “белой оптики” для мощных высокоэнергетических импульсных усилительных установок, то наряду со значением НПП оптических стекол в расчет принимаются, конечно, и другие параметры стекол, в частности их термомеханическая прочность и термостойкость. Понятно, что по этим параметрам среди перечисленных выше оптических стекол кварцевое стекло оказывается вне конкуренции, тем не менее, все оптические стекла, представленные в табл. 3, с учетом всех их характеристик тоже могут представлять интерес в вопросе изготовления элементов “белой оптики” для мощных ИУИ.

Как показывает анализ синтетических составов стекол, исследованных в настоящей работе, они относятся к стеклам силикатной, боросиликатной, фосфатной и борфосфатной систем. Объединяет их в одну группу то, что основными компонентами, модифицирующими сетку стекла, являются  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{BaO}$  [3–8]. По-видимому, наличие в составах стекол именно этих компонентов уменьшает значения их средних дисперсий, приводя к снижению их НПП.

## 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. Бесцветное оптическое стекло СССР. Каталог / Под ред. Петровского Г.Т. М.: Дом оптики, 1990. 133 с.
4. Campbell J.H., Suratwala T.I. Nd-doped Phosphate Glasses for High-energy/High-peak-power Lasers // J. Non-Cryst. Sol. 2000. V. 263–264. P. 318–431.
5. Arbuzov V.I., Fyodorov Yu.K., Lunter S.G., Nikitina S.I., Shashkin V.S., Shashkin A.V., Charukhchev A.V., Sirazetdinov V.S. Neodymium phosphate glasses for high-energy and high-pick-power lasers // Glastechnische Berichte – Glass Science and Technology. 2002. V. 75C2. P. 209–214.
6. Арбузов В.И., Вольнкин В.М., Лунтер С.Г., Никитина С.И., Петровский Г.Т., Пономарев В.Я., Семенов А.Д., Сиразетдинов В.С., Федоров Ю.К., Чарухчев А.В., Шашкин В.С., Шашкин А.В. Крупногабаритные дисковые активные элементы из неодимового фосфатного стекла для мощных высокоэнергетических лазеров // Оптический журн. 2003. Т. 70, № 5. С. 68–78.
7. US Catalog “Laser Glasses from Schott”.
8. Arbuzov V.I., Nikonov N.V. Neodymium, erbium and ytterbium laser glasses // Handbook of solid-state lasers. Materials, systems and applications. Woodhead Publishing. Oxford. Cambridge. Philadelphia. New Delhi. 2013. P. 110–138.
9. Отраслевой стандарт “Стекло оптическое бесцветное. Синтетический состав. ОСТ 3-4888-80”.