

# ИЗМЕРЕНИЕ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ПОСТОЯННЫХ РЯДА ПРОЗРАЧНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СТЕКОЛ

© 2003 г. Е. В. Катин; А. К. Потемкин; Е. А. Хазанов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Приведены результаты измерений фотоупругих постоянных на длине волны  $\lambda = 1,053$  мкм для ряда прозрачных оптических стекол. Приведено сравнение полученных данных с известными данными для длины волны  $\lambda = 0,532$  или  $0,555$  мкм для стекла БФ28. Подтвержден сделанный ранее вывод о незначительном (20%) уменьшении термооптической постоянной при переходе от длины волны  $\lambda = 0,555$  мкм к длине волны около 1 мкм.

Коды OCIS: 160.2750, 160.6840.

Поступила в редакцию 26.03.2002.

В работах [1-4] было установлено, что воздействие излучения на оптические компоненты лазерных установок, изготовленных из прозрачных стекол, приводит к фазовым искажениям в сравнительно маломощных лазерных пучках. В этих работах не уделяется внимания поляризационным искажениям пучков. Однако именно они зачастую становятся главным препятствием на пути создания мощных лазерных установок [5, 6]. В работах [7, 8] было показано, что в стационарном режиме уменьшение интенсивности излучения в оптических элементах при сохранении полной мощности (т. е. расширение лазерных пучков) не уменьшает самонаведенных поляризационных искажений. В [9, 10] предложен и экспериментально реализован ряд методов по компенсации поляризационных искажений в оптических элементах изоляторов Фарадея. Однако у всех методов есть предельные возможности. В общем случае, чем ниже величина фотоупругих постоянных материала, из которого изготовлены компоненты лазерных установок, тем меньше поляризационные искажения лазерных пучков. Все это делает актуальной задачу измерения фотоупругих констант оптических стекол, из которых изготавливаются большинство компонентов лазерных установок.

Существующая точность определения фотоупругих констант  $C_1$  и  $C_2$  [5] не всегда позволяет с высокой достоверностью вычислить величину коэффициента деполяризации ( $\gamma$ ), равного отношению мощности деполяризованного компонента к полной мощности излучения. Это объясняется тем, что  $\gamma$  зависит не напрямую от  $C_1$  и  $C_2$ , а от их разности,

$$\text{которая входит в параметр } Q = \frac{a_1 E(C_1 - C_2)}{2(1-n)}, \text{ где } \alpha_1$$

- температурный коэффициент линейного расширения,  $E$  - модуль Юнга,  $n$  - коэффициент Пуассона [5]. В справочнике по оптическим стеклам [11] приведены значения  $C_1$  и  $C_2$  для длины волны  $\lambda = 550$  им. Тем не менее, из-за частотной зависимости разности  $C_1 - C_2$  значение параметра  $Q$  для разных длин волн может сильно различаться. В работе [12] опи-

сывается оригинальная методика измерения термооптических констант. Там же приведены значения  $Q$  для магнитоактивных стекол и оптического стекла БФ28 для  $\lambda = 532$  нм.

Указанная методика была использована в настоящей работе, где  $\gamma$  измеряли при прохождении излучения через образцы оптических стекол. Как показано в [8, 9],  $\gamma$  квадратично зависит от произведения мощности лазерного излучения  $P$  на параметр  $Q$ . Для пучка гауссова профиля интенсивности  $I(r) = I_0 \exp[-(r/a)^2]$  коэффициент  $\gamma$  выражается через мощность в пучке  $P$  и константы, характеризующие среду. Для слабо поглощающего вещества ( $\alpha L \ll 1$ ) выражение для коэффициента деполяризации пучка гауссова профиля интенсивности сводится к простой формуле [9]

$$\gamma = 0,017(L/\lambda)^2(P\alpha Q/\kappa)^2. \quad (1)$$

где  $\alpha$  - погонный коэффициент поглощения на длине волны  $\lambda$ ,  $L$  - длина среды,  $\kappa$  - теплопроводность. На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Излучение мощного (60 Вт) непрерывного одномодового Nd:YLF-лазера 1 (CS-40-1053 CW производства "Photonics Industry"), с длиной волны  $\lambda = 1,053$  мкм, проходило через тестируемый образец 3 длиной  $L = 5$  см. Пучок в плоскости образца имел профиль, близкий к гауссову, с радиусом по уровню  $e^{-1}$  равным 0,53 мм. Два кальцитовых 5-градусных клина 2 и 4 обеспечивали в отсутствие образ-

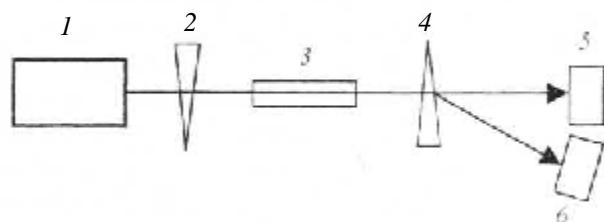


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1 - непрерывный одномодовый Nd:YLF-лазер ( $\lambda = 1,053$  мкм,  $P = 60$  Вт); 2, 4 - 5-градусные кальцитовые клинья, 3 - тестируемый образец, 5 - фотодиод, 6 - измеритель мощности.

Характеристика	Марка стекла								ГЛС21
	TK21	TK16	TK78	K8	TK5	TФ7	TФ8	Ф1	
Коэффициент поглощения $\alpha$ , $\text{м}^{-1}$ ( $\lambda = 1053 \text{ нм}$ )	0,88	1,42	0,63	0,67	0,31	0,26	0,5	0,21	0,29
Коэффициент линейного расширения $\alpha_s$ , $\alpha_s \times 10^7, \text{К}^{-1}$	75,5	69,2	61,8	71,6	89,1	90,5	78,7	72,2	80,3
Теплопроводность, $\text{Дж м}^{-1}\text{с}^{-1}\text{К}^{-1}$	0,84	0,84	0,72	1,1	0,56	0,66	0,83	0,66	0,34
Коэффициент Пуассона, $\mu$	0,288	0,267	0,238	0,249	0,240	0,249	0,229	0,221	0,240
Модуль Юнга, $E, \text{кПа} \text{мм}^{-2}$	7940	8180	6670	8230	5550	5420	5730	5760	5500
$-C_1 \times 10^7, \text{kPa}^{-1} \text{см}^2$ ( $\lambda = 550 \text{ нм}$ )	0,8	0,9	2,5	0,5	5,3	4,7	0,41	3,1	5,0
$-C_2 \times 10^7, \text{kPa}^{-1} \text{см}^2$ ( $\lambda = 550 \text{ нм}$ )	2,7	2,8	4,95	3,2	6,6	6,3	0,63	6,0	6,6
$-Q \times 10^7, \text{К}^{-1} (\lambda = 550 \text{ нм})$	8,02	7,34	6,63	10,1	3,8	5,23	0,64	7,62	4,65
$P' (\text{для } L = 1 \text{ м}), B_1 (\lambda = 1053 \text{ нм})$	$0,7 \pm 5\%$	$0,95 \pm 5\%$	$1,35 \pm 5\%$	$2,3 \pm 10\%$	$3,05 \pm 10\%$	$3,6 \pm 10\%$	$3,9 \pm 10\%$	$4,2 \pm 10\%$	$21,4 \pm 10\%$
$-Q_{\text{сум}} \times 10^7, \text{К}^{-1} (\lambda = 1053 \text{ нм})$	14,35	6,55	8,91	7,51	6,23	7,4	3,56	9,9	5,7

ца 3 контраст 50 Дб, т. е. мощность деполяризованного излучения  $P_{\text{деп}}$ , по крайней мере, на 5 порядков меньше мощности лазера  $P_L$ . Это значение ниже характерного для оптических стекол значения "холодной" деполяризации, т. е. деполяризации пучка малой мощности. Мощность поляризованного компонента  $P_0$  излучения измерялась с помощью измерителя мощности 6 UC150UV производства "Scientech Inc". Мощность деполяризованного компонента  $P_0$  измерялась фотодиодом 5 (ФД-20К). Коэффициент деполяризации вычислялся по формуле  $\gamma = P_{\text{деп}} / (P_{\text{деп}} + P_0)$ .

На рис. 2 приведена зависимость  $\sqrt{g}$  от мощности, нормированной на параметр  $P' = \frac{k}{aQ} \frac{I}{L}$ , для

всех тестированных нами оптических стекол. Для образца длиной  $L$  параметр  $P'$  численно равен мощности, которая приводит к деполяризации  $\gamma = 1,7\%$ . Для каждого стекла параметр  $P'$  выбирался таким, чтобы все точки с минимальным разбросом ложились на прямую  $g = \sqrt{0,017} \frac{L}{I} x$ , которая

является следствием теоретической зависимости (1). Отклонения от прямой при малых мощностях объясняются остаточной "холодной" деполяризацией в образцах. Это особенно хорошо заметно для стекла ТФ8. Из этих данных, по известным коэффициенту поглощения  $\alpha$  и теплопроводности  $k$  [11] вычислялся параметр  $Q$ .

Предлагаемая методика измерения параметра  $Q$  не выявляет его знак, так как абсолютная величина коэффициента деполяризации  $\gamma$  не зависит от знака  $Q$ . Для выяснения знака  $Q$  для каждого образца стекла была проанализирована картина поперечного распределения излучения деполяризованного компонента. Хорошо известно, что при аксиально-симметричном тепловыделении она имеет вид "креста" [5, 8]. Рассматривая эту картину с установленной в пучок перед вторым поляризатором дополнительной фазовой пластинкой по методике, описанной в [13], был измерен знак  $Q$ . Во всех тестируемых нами образцах знак  $Q$  отрицателен. Это согласуется с данными, приведенными в справочнике [11].

В таблице приведены значения физических констант оптических стекол, взятые из [11], значения  $Q$ , вычисленные на основе данных [11], характеристики лазерного стекла ГЛС21 из [14], измеренные в настоящей работе величины  $P'$  и  $Q_{\text{эксп}}$  характеризующие термоупругие искажения лазерных пучков. Значение  $P'$  приводится для длины образца стекла  $L_0 = 1 \text{ м}$ , т. е. оно численно равно мощности, при водящей к деполяризации излучения  $\gamma = 1,7\%$  в образце длиной  $L_0 = 1 \text{ м}$ . Для произвольной мощности  $P$  и произвольной длины образца  $L$ , зная  $P'$ , легко вычислить значение деполяризации лазерного излучения на выходе из образца  $\gamma = 0,017(L/L_0)^2(P/P')^2$ .

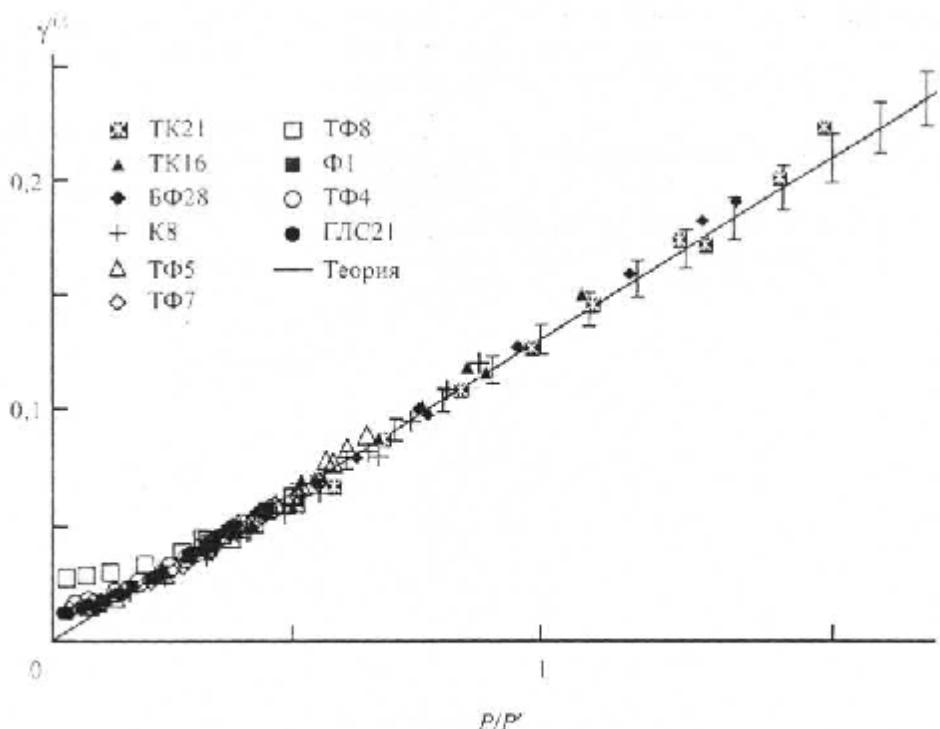


Рис. 2. Зависимость  $\sqrt{\gamma}$  от нормированной на  $P' = \frac{\lambda}{L} \frac{K}{\alpha Q}$  мощности излучения для различных оптических стекол.

Погрешность измерения величины  $P'$  приведенная в таблице, является относительной. Абсолютная погрешность измерений определялась погрешностью измерения мощности лазерного излучения. Используемый нами в экспериментах измеритель мощности UC150UV позволял проводить измерения с погрешностью  $\pm 20\%$ . Значение деполяризации для стекла БФ28, полученное в настоящей работе на длине волны  $\lambda = 1,053$  мкм, с высокой точностью согласуется с данными работы [12]. В этой работе измерения производились на длине волны  $\lambda = 0,532$  мкм, а данные для  $\lambda = 1,064$  мкм находились теоретически. Наши измерения с погрешностью 10% совпали с этими данными, что подтверждает правильность теории [12].

Данные о термооптических константах, приведенные в таблице, необходимо учитывать при конструировании мощных лазерных установок с высокими требованиями к поляризации выходного излучения. Если по конструктивным соображениям необходимо пропустить мощное лазерное излучение через слой оптического стекла и при этом не исказить его поляризацию, то необходимо использовать только стекла с низкими значениями произведения поглощения  $\alpha$  на термооптическую константу  $Q$ . Как уже указывалось выше, расширение пучка при сохранении постоянной мощности, не уменьшает поляризационных искажений, а только увеличивает время их установления.

## ЛИТЕРАТУРА

- Бондаренко И.Г., Еремина И.В. Нелинейное искажение лазерных пучков оптическими фильтрами // ОМП. 1977. № 12. С. 7-9.
- Зверев Г. М., Левчук Е.А., Малдутис Э.К., Пашков В. А. Тепловая самофокусировка лазерного излучения в веществах с отрицательным  $d\mu/dT$ . Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 11. С. 177-181.
- Зарубина Т.В., Малышаков А.Н., Пасманик Г.А.. По темкин А.К. Сравнительные характеристики магнитооптических стекол // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 11. С. 67-71.
- Бубис Е.Л., Потемкин А.К., Шубин С.В. Нелинейное искажение лазерных пучков оптическими стеклами // Опт. и спектр. 2001. Т. 90. С. 335-340.
- Мезенов А.В., Сомс Л.И., Степанов А.М. Термооптика твердотельных лазеров. Л.: Машиностроение, 1986. 198 с.
- Koechner W. Solid-State Laser Engineering. New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag, 1976. P. 355-382.
- Khazanov E., Kulagin O., Yoshida S., Reitze D. Investigation of self-induced distortion of laser radiation in lithium niobate and terbium gallium garnet // Proc. CLEO'98. San Francisco, 1998. P. CWF34.
- Khazanov E., Kulagin O., Yoshida S., Tanner D., Reitze D. Investigation of self-induced depolarization of laser radiation in terbium gallium garnet // IEEE J. Quant. Electron. 1999. V. 35. №8. P. 1116-1122.

9. Хазанов Е.А. Компенсация термонаведенных искажений в изоляторах Фарадея// Квант. электрон. 1999. Т. 26. С. 59-64.
10. Андреев И.Ф., Палашов О.В., Потемкин А.К., Райтци Д.Х., Сергеев А.М., Хазанов Е.А. Изолятор Фарадея с развязкой 45 дБ при средней мощности 100 Вт// Квант. электрон. 2000. Т. 30. №12. С. 1107-1108.
11. Оптическое стекло. Справочник. М.: Машприбориторг, 1978.
- 
12. Андреев И.Ф., Бабин А.А., Киселев А.М.. Палашов О.В., Хазанов Е.А. О термооптической постоянной магнитоактивных стекол // Опт. и спектр. 2000. Т. 67. № 6. С. 66-69.
13. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. С. 755-769.
14. Авакянц Л. И., Бужинский И.М., Коряги на Е.И., Сукова В.Ф. Характеристики лазерных стекол // Квант. электрон. 1978. Т. 5. № 4. С. 725-752.