

М. М. БУБНОВ, И. М. БУЖИНСКИЙ, Е. М. ДИАНОВ,
С. К. МАМОНОВ, Л. И. МИХАЙЛОВА, академик А. М. ПРОХОРОВ

ИЗМЕНЕНИЕ ЗНАКА ТЕПЛОВОЙ ЛИНЗЫ СТЕКЛЯННЫХ ЛАЗЕРНЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕРМООПТИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ СТЕКЛА

Известно, что неоднородный по сечению нагрев лазерного стержня светом накачки приводит к образованию тепловой линзы, что означает деформацию резонатора ОКГ^(1, 2).

Термические деформации оказывают сильное воздействие на выходные характеристики лазера. В случае лазеров на стекле имеется принципиальная возможность подбором состава стекла избавиться или существенно уменьшить термические деформации резонатора⁽²⁾. В работе⁽³⁾ был предложен подход к решению этой задачи и определен интервал значений термооптической постоянной W стекол ($|W| < 10 \cdot 10^{-7} 1/^\circ\text{C}$), для которого термические деформации должны быть минимальными. Экспериментальным подтверждением этого подхода явилась работа⁽⁴⁾, в которой приведены измеренные авторами термические деформации для ряда стекол с различными положительными значениями термооптической постоянной.

В настоящей работе описываются результаты изучения стекол как с положительными, так и отрицательными значениями термооптической постоянной, что соответствует широкому диапазону изменения составов стекол (см. табл. 1). Были измерены фокусные расстояния тепловой линзы, образующейся при периодической накачке лазерных стержней. Круглые стержни размером 20×260 накачивались ксеноновой лампой ИФП-5000 с частотой 0,1 гц, средняя мощность накачки 250 вт. В качестве осветителя использовался цилиндрический блок из стекла ЛК-318 с отражающим покрытием на его поверхности. Охлаждение стержня и лампы производилось проточной водой. В этих условиях стационарное распределение температуры в стержнях устанавливалось примерно после 30 импульсов накачки.

Измерение фокусного расстояния тепловой линзы производилось автоколлимационным методом⁽⁵⁾. Исследуемый стержень (в осветителе) по-

Таблица 1

Стекло	$W \cdot 10^7, 1/^\circ\text{C}$	$\beta \cdot 10^7, 1/^\circ\text{C}$	n	$\alpha \cdot 10^7, 1/^\circ\text{C}$	$f, \text{ м}$
ГЛС-1	45,0	-4,0	1,53	92	8,0
КГСС-3	22,0	-33,0	1,54	102	14,0
Силикатное	17,2	-42,0	1,55	108	27,0
Силикатное	12,5	-48,0	1,55	110	46,0
Борфосфатное ЛГС-41	6,6	-52,0	1,52	112	68,0
Силикатное ЛГС-44	6,4	—	1,53	—	44,0
Силикатное	2,4	—	1,56	—	>100
Фосфатное ЛГС-40	-16,0	-72,0	1,51	110	-33,0
Фосфатное	-30,0	—	1,51	—	-11,5

Примечание. Стекла ГЛС-1 и КГСС-3 серийные силикатные, остальные — опытные.

мещался между плоским зеркалом и объективом автоколлиматора. Изменялась величина дефокусировки трубы Δ , обусловленная образованием тепловой линзы при накачке стержня, при этом величина Δ меняет знак при изменении знака исследуемой линзы. Фокусное расстояние тепловой линзы определялось по формуле

$$f = F_0^2 / \Delta,$$

где F_0 — фокусное расстояние объектива автоколлиматора.

Для предотвращения образования резонатора на волну $\lambda = 1.06 \mu$ плоским зеркалом и торцом стержня, что привело бы к развитию генера-

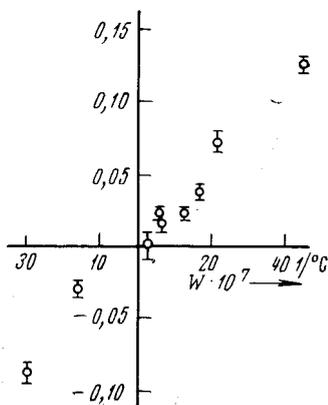


Рис. 1

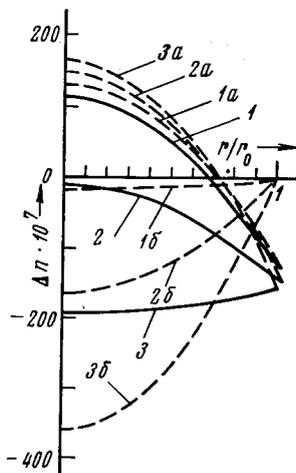


Рис. 2

ции и усложнению эксперимента, в качестве плоского зеркала использовалось диэлектрическое зеркало с максимальным отражением на волне $\lambda = 0,69 \mu$. Следовательно, измеренные значения фокусных расстояний относятся к этой длине волны.

Полученные данные приведены в табл. 1 и на рис. 1. По оси абсцисс (рис. 1) отложены значения термооптической постоянной W стекол для длины волны $\lambda = 0,63 \mu$, а по оси ординат — значения оптической силы линзы (в диоптриях D). Из графика видно, что по мере уменьшения термооптической постоянной сила тепловой линзы уменьшается и при некоторых значениях W меняет знак. Подчеркнем, что полученная четкая корреляция между силой линзы и термооптической постоянной стекла имеет место для стекол, сильно отличающихся по составу (силикатные, борфосфатное, фосфатные).

Для объяснения такой зависимости $f(W)$ рассмотрим механизмы, приводящие к образованию линзы. Основным является неоднородное по сечению стержня изменение показателя преломления $\Delta n(r)$ при наличии градиента температуры $T(r)$. Экспериментально было проверено, что изгибом торцов при образовании линзы можно пренебречь, что согласуется с литературными данными (см., например, (6)). Согласно (1),

$$\Delta n_r(r) = n_r(r) - n_0 = \beta \Delta T(r) - B_{\parallel} \sigma_{rr} - B_{\perp} (\sigma_{\theta\theta} + \sigma_{zz}), \quad (1)$$

$$\Delta n_{\theta}(r) = n_{\theta}(r) - n_0 = \beta \Delta T(r) - B_{\parallel} \sigma_{\theta\theta} - B_{\perp} (\sigma_{rr} + \sigma_{zz})$$

соответственно для радиальной n_r и тангенциальной n_{θ} компонент поляризации света. Здесь $\beta = dn/dT$, σ_{ii} — тензор температурных напряжений, B_{\parallel} , B_{\perp} — фотоупругие постоянные, $\Delta T(r)$ — изменение температуры в точке r .

Для расчета изменения показателя преломления по сечению стержня необходимо знать $T(r)$. Предположим, что имеет место равномерное теп-

ловыделение внутри стержня. Тогда при интенсивном симметричном охлаждении в стержне устанавливается параболическое распределение температуры (7). Нас интересует относительное распределение температуры по сечению стержня

$$T(r) = T_1(1 - r^2/r_0^2), \quad (2)$$

где $T_1 = 1/4 A_0 r_0^2 / K$ — разность температур на оси и на поверхности стержня, A_0 — скорость выделения тепла в единице объема, K — теплопроводность стекла.

Оценим T_1 по измеренной величине фокусного расстояния тепловой линзы следующим путем. Для секции линзоподобной осесимметричной среды длиной l с изменением показателя преломления по закону

$$n = n_0(1 - 2r^2/b^2) \quad (3)$$

фокусное расстояние (8)

$$f = b / \left(2n_0 \sin 2 \frac{l}{b} \right). \quad (4)$$

Подставив в (1) выражения σ_{ii} через градиент температуры $T(r)$ (1), можно переписать (1) в форме (3), что позволяет выразить параметр b через T_1 . Тогда, подставляя в (4) измеренные значения фокусного расстояния тепловой линзы и решая получившееся уравнение, можно найти T_1 . Вычисления показывают, что $T_1 \approx 5^\circ \text{C}$.

Зная распределение температуры $T(r)$, можно рассчитать вклады различных членов уравнения (1) в изменение показателя преломления. Расчет производился для стекол ГЛС-1, КГСС-3 и ЛГС-40. Для расчета использовались следующие параметры стекол. ГЛС-1: $\beta = -4 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\alpha = 92 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $E = 7,5 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$, $\nu = 0,229$, $B_{||} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг}$, $B_{\perp} = 3,6 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг}$; КГСС-3: $\beta = -33 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\alpha = 102 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $E = 6,5 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$, $\nu = 0,247$, $B_{||} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг}$, $B_{\perp} = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг}$; ЛГС-40: $\beta = -72 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$, $\alpha = 110 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Механические свойства стекла ЛГС-40 неизвестны, поэтому для оценки взятые соответствующие параметры типичного фосфатного промышленного стекла ФК-1: $E = 6,8 \cdot 10^5 \text{ кг/см}^2$, $\nu = 0,230$, $B_{||} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг}$, $B_{\perp} = 4,0 \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кг}$. Результаты расчета приведены на рис. 2 (ГЛС-1 (1), КГСС-3 (2) и ЛГС-40 (3)). Штриховые кривые показывают радиальную зависимость изменения показателя преломления вследствие возникающих в стержне напряжений (а) и вследствие изменения температуры стержня при нулевых напряжениях (б). Сплошные кривые изображают радиальную зависимость полного изменения показателя преломления, описываемую уравнениями (1). Чтобы не перегружать рисунок, здесь приведены средние по двум поляризациям значения изменения показателя преломления.

Рис. 2 наглядно иллюстрирует образование тепловой линзы. Видно, что при периодической накачке стержня возникающие в нем напряжения приводят к образованию положительной линзы, в то время как температурное изменение показателя преломления приводит к образованию отрицательной линзы (при отрицательных значениях β) и что суммарный эффект зависит, в основном, от соотношения между величиной β и значениями фотоупругих постоянных стекла.

Важно отметить здесь, что величины Δn , описываемые кривыми (б), сильно изменяются при переходе от стекла к стеклу и это изменение на порядок превосходит соответствующее изменение величин Δn , описываемых кривыми (а). Это объясняется тем, что фотоупругие постоянные стекол меняются незначительно даже при сильном изменении состава стекла, в то время как величина β очень чувствительна к составу. Поэтому изменение силы тепловой линзы и ее знака при изменении состава стекла практически происходит за счет изменения только величины β . Легко показать с помощью формул (1), (3) и (4), что если n , α , E , ν , $B_{||}$, B_{\perp} и гра-

дидент температуры $T(r)$ одинаковы для всех стекол, то для широкого интервала значений β оптическая сила линзы D линейно зависит от β и от $W = a(n - 1) + \beta$. Отклонение экспериментально полученной зависимости $D(W)$ от линейной объясняется небольшими вариациями указанных параметров от стекла к стеклу, а также различным тепловыделением в стеклах. Последнее обстоятельство связано с неодинаковыми спектрально-люминесцентными характеристиками исследуемых стекол.

Авторы выражают благодарность С. И. Кургачеву за помощь в экспериментах.

Физический институт им. П. Н. Лебедева
Академии наук СССР
Москва

Поступило
3 IV 1972

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ F. W. Quelle, Appl. Opt., 5, № 4, 633 (1966). ² E. Snitzer, Proc. IEEE, 54, № 10, 1249 (1966). ³ И. М. Бужинский, Е. М. Дианов и др., ДАН, 190, № 3, 558 (1970). ⁴ М. М. Бубнов, И. М. Бужинский и др., Краткие сообщения по физике, № 3, 7 (1971). ⁵ В. А. Афанасьев, Оптические измерения, М., 1968, стр. 139. ⁶ Ю. А. Ананьев, Н. А. Козлов и др., Журн. прикл. спектроскоп., 5, 51 (1966). ⁷ Г. Гребер, С. Эрк, У. Григуль, Основы учения о теплообмене, М., 1958. ⁸ H. Kogelnik, Bell Syst. Techn. J., 44, № 3, 455 (1965).