

# ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ ЛАЗЕРЫ И НЕЛИНЕЙНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ЧАСТОТЫ

УДК: 53.082.532

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЛИНЗЫ В КРИСТАЛЛЕ Tm:YLF ПРИ ИНТЕНСИВНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКЕ

© 2009 г. О. Н. Еремейкин, канд. физ.-мат. наук; Н. А. Егоров; Н. Г. Захаров;  
А. П. Савикин, канд. физ.-мат. наук; В. В. Шарков, канд. физ.-мат. наук

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

E-mail: eon@rambler.ru, savikin@rf.unn.ru

Проведены экспериментальные исследования тепловой линзы, наводимой в кристалле Tm:YLF под действием непрерывной продольной накачки линейкой диодных лазеров. Описана методика измерения параметров тепловой линзы. Выявлено, что в кристалле Tm:YLF в плоскости главной оптической оси кристалла образуется слабая положительная линза, оптическая сила которой мало зависит от мощности накачки, а в плоскости, перпендикулярной оптической оси кристалла, формируется отрицательная линза, сильно зависящая от мощности накачки.

**Ключевые слова:** лазерные кристаллы, тепловая линза, оптическая сила, мощность накачки.

Коды OCIS: 190.0190, 140.0140, 350.6830

Поступила в редакцию 26.03.2009

### Введение

Известно, что тепловые эффекты, возникающие в активных элементах оптических квантовых генераторов вследствие поглощения интенсивной накачки, могут приводить к сильным изменениям параметров резонатора и существенно ограничивать предельные мощности лазеров, что наиболее резко проявляется в непрерывном и квазинепрерывном режимах генерации [1–3].

Знание параметров тепловой линзы для данного активного образца в определенных условиях накачки необходимо для расчетов и оптимизации параметров резонатора с целью достижения наилучшего согласования моды резонатора и возбужденной области активного элемента и, тем самым, увеличения коэффициента преобразования мощности накачки в излучение генерации лазера. Для достижения эффективной генерации на лазерных кристаллах, работающих по квази-трехуровневым схемам и, вследствие этого, обладающих большим поглощением на длине волны генерации, согласование моды резонатора с областью накачки является практически определяющим.

К таким кристаллам относятся лазерные кристаллы, легированные ионами туния, в частности Tm:YLF, высокий интерес к которому в последние годы обусловлен возможностью получения высокоэффективной генерации в среднем инфракрасном диапазоне [4–7]. Это диктуется широкими возможностями применения приемно-передающих устройств этого диапазона для решения ряда важных задач, таких как мониторинг загрязнения атмосферы, медицинская диагностика и хирургия, тепловидение с повышенным температурным контрастом, беспроводная оптическая связь и др.

Несмотря на наблюдающийся высокий интерес к кристаллу Tm:YLF, в настоящее время в литературе отсутствуют достаточные данные по физике тепловых процессов, возникающих в этом кристалле под действием диодной накачки и, соответственно, однозначные данные о параметрах наводимых линз [7–10]. В существующих работах при расчете тепловой линзы не учитываются изменения показателя преломления под действием термических напряжений в кристалле Tm:YLF.

Одни из существующих методов измерения параметров наводимой линзы основаны на ис-

пользовании дополнительной фокусирующей линзы с известной оптической силой. При этом параметры искомой линзы определяются либо по изменению положения перетяжки тестирующего пучка, либо по изменению радиуса тестирующего пучка в дальней зоне [11]. В обоих случаях используют дискретные фотоприемники, что позволяет исследовать динамические характеристики наводимой линзы (времена формирования и релаксации). Исследование пространственной структуры наводимой линзы (в частности, для обнаружения астигматизма) требует сканирования тестирующего пучка по поперечным координатам.

Другая методика основана на тестировании наводимой линзы коллинированным пучком зондирующего лазера, при этом поперечные размеры тестирующего пучка значительно превышают размеры активного элемента [12]. Эффективное фокусное расстояние определяется по местоположению минимального диаметра тестирующего пучка. Для регистрации распределения интенсивности в поперечном сечении пучка используется либо фотопленка, либо ПЗС матрица. Эффекты дифракции и интерференции на активном элементе существенно осложняют обработку получаемых изображений, что является основным недостатком указанного метода.

В настоящей работе использовалась методика контроля параметров тестирующего пучка после прохождения наводимой в активном элементе линзы. Представлены результаты экспериментального исследования тепловой линзы, наводимой в кристалле Tm:YLF в схеме продольной оптической накачки линейкой непрерывных диодных лазеров с волоконным выводом излучения.

### **Метод определения параметров линзы**

Тепловые эффекты, возникающие в кристалле под действием оптической накачки, приводят к возникновению внутри кристалла линзы, изменяющей расходимость и диаметр тестирующего пучка. В качестве тестирующего источника применяется He-Ne-лазер с практически гауссовым пучком генерации.

Изменение диаметра можно регистрировать с помощью ПЗС линеек или матриц, позволяющих восстанавливать поперечное распределение интенсивности тестирующего пучка. Диаметр тестирующего пучка должен быть соизмеримым с поперечными размерами оптической накачки и не превышать размеры активного элемента, при

этом исключаются возможные искажения по-перечной структуры поля вследствие дифракции на границах активного элемента.

Однозначно определить связь изменения диаметра тестирующего пучка с фокусным расстоянием наводимой линзы, т. е. откалибровать измерительную систему, можно как экспериментально, так и с помощью моделирования. Для экспериментальной калибровки активный элемент заменяется линзами с известной оптической силой, после чего измеряются параметры прошедшего тестирующего пучка.

Теоретический расчет действия наводимой в активной среде линзы на проходящий пучок тестирующего лазера проводится с помощью модели распространения гауссовых пучков, при этом активный элемент представляется тонкой линзой с неким фокусным расстоянием  $F$ . Обозначим расстояние от перетяжки до линзы и конфокальный параметр для падающего пучка через  $d$  и  $R_\Theta$ . Преобразованный пучок характеризуется другими значениями –  $d'$  и  $R'_\Theta$  [1]

$$R'_\Theta = R_\Theta / \left[ (1 - d/F)^2 + (R_\Theta / 2F)^2 \right], \quad (1)$$

$$1 - d'/F = (1 - d/F) / \left[ (1 - d/F)^2 + (R_\Theta / 2F)^2 \right]. \quad (2)$$

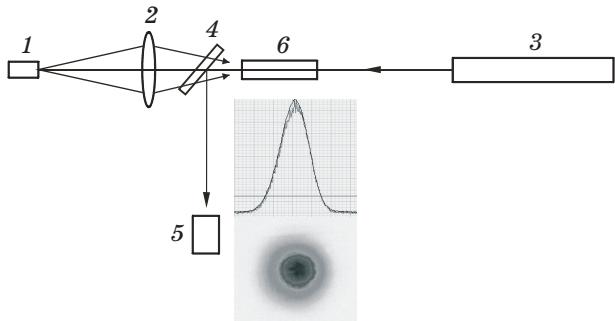
Для расчетов необходимо определить конфокальный параметр резонатора зондирующего лазера и местоположение перетяжки. Радиус сечения пучка на расстоянии  $z$  от плоской перетяжки изменяется по закону

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (2z/R_\Theta)^2}. \quad (3)$$

Но в данном случае интересна обратная задача, когда по известной (из эксперимента) зависимости диаметра тестирующего пучка можно определить фокусное расстояние линзы. Подобное достаточно простое моделирование, а также калибровка системы линзами с известными фокусными расстояниями позволяют достаточно быстро проводить измерения параметров наводимой линзы. Точность нахождения параметров исследуемой линзы определяется методикой получения и обработки изображений.

### **Описание экспериментальной установки**

Исследуемый кристалл Tm:YLF (концентрация активных ионов  $Tm^{3+} \approx 3\%$ ) был вырезан в виде цилиндра диаметром 4 мм и длиной 14 мм, продольная ось которого перпендикулярна оптической оси кристалла, и закреплен в радиатор для стабилизации температуры кристалла с



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки для исследования тепловой линзы. 1 – блок оптической накачки, 2 – фокусирующая линзовая система, 3 – тестирующий He-Ne-лазер, 4 – дихроичное зеркало, 5 – измерительная система, 6 – кристалл Tm:YLF.

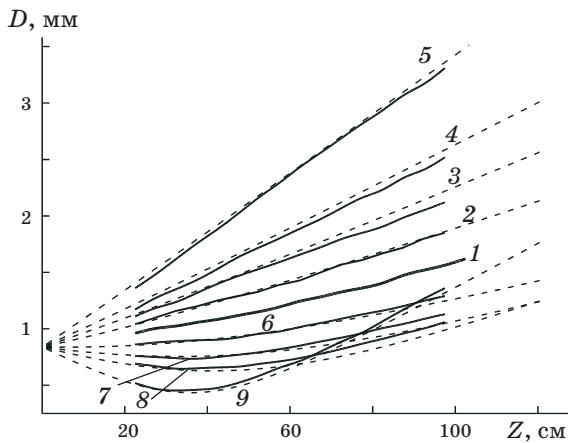
помощью элементов Пельтье. Торцы кристалла имели просветляющее покрытие на длину волны накачки.

Оптическая накачка 1 осуществлялась коммерческой линейкой диодных элементов (FAP-795-40C-800B, *Coherent*) с волоконным выходом (диаметр волокна 0,8 мм, длина 1 м), генерирующих на длине волны 795 нм (рис. 1). Для охлаждения диодной линейки использовался радиатор с элементами Пельтье и воздушным охлаждением. Фокусирующая линзовая система 2 позволяла формировать внутри кристалла радиально-симметричный пучок накачки диаметром 1 мм.

Пучок тестирующего He-Ne-лазера 3 (длина волны генерации 632,8 нм, диаметр пучка на выходном зеркале резонатора 0,8 мм) после прохождения через исследуемый кристалл Tm:YLF отражался от дихроичного зеркала 4. Тестирующий пучок направлялся на измерительную систему 5, состоящую из набора светофильтров и ПЗС камеры (PULNIX\_TM-8, эффективный размер пикселя – 0,8 мкм), регистрирующей поперечное распределение интенсивности.

Сигнал с камеры поступал на компьютерную плату захвата видеоизображения (NI\_PCI-1409). Далее с помощью программы, написанной в среде LabVIEW, проводилась компьютерная обработка изображения пучка. Измерение диаметра велось одновременно по поперечным координатам X и Y. Влияние засветки со стороны источника накачки минимизировалось использованием полосовых фильтров и программным вычитанием шумового фона, что значительно повышало точность проводимых измерений.

Пучок He-Ne-лазера имел практически гауссово поперечное распределение интенсивности,



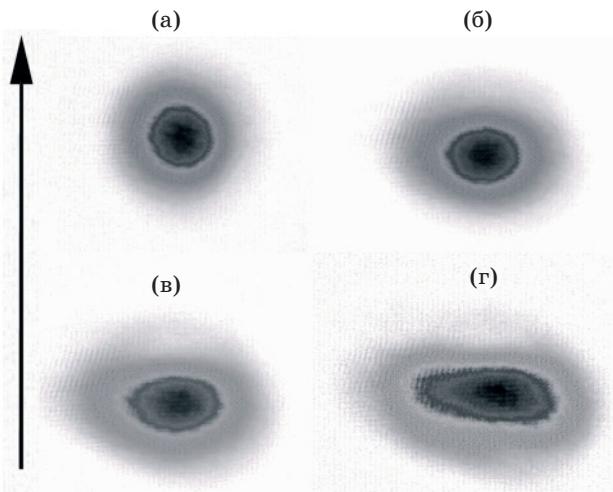
**Рис. 2.** Зависимости диаметра тестирующего пучка от продольной координаты после прохождения линз с известным фокусным расстоянием (сплошные кривые – экспериментальные данные, штриховые кривые – моделирование). 1 – без линзы, 2 – линза  $F = -200$  см, 3 – линза  $F = -100$  см, 4 – линза  $F = -67$  см, 5 – линза  $F = -40$  см, 6 – линза  $F = 200$  см, 7 – линза  $F = 100$  см, 8 – линза  $F = 67$  см, 9 – линза  $F = 40$  см.

при этом искомый диаметр определялся по уровню  $(1/\exp)^2$ . Калибровка измерительной системы осуществлялась путем замены активного элемента линзами с известным фокусным расстоянием (положительными и отрицательными) и измерения диаметра  $D$  пучка He-Ne-лазера в зависимости от продольной координаты  $Z$  (рис. 2). Полученные зависимости использовались для определения конфокального параметра резонатора тестирующего лазера и положения перетяжки пучка. Было достигнуто достаточно хорошее согласование данных экспериментальной калибровки и моделирования параметров тестирующего пучка после прохождения линз с известным фокусным расстоянием.

Составленная модель позволяла в дальнейшем решать обратную задачу, а именно задачу нахождения параметров исследуемой линзы по известным параметрам прошедшего тестирующего пучка.

## Экспериментальные результаты и обсуждение

Поперечное распределение контролировалось при различных мощностях накачки, поглощение которой в кристалле за один проход составляло 89%. С увеличением мощности накачки радиально-симметричный пучок тестирующего



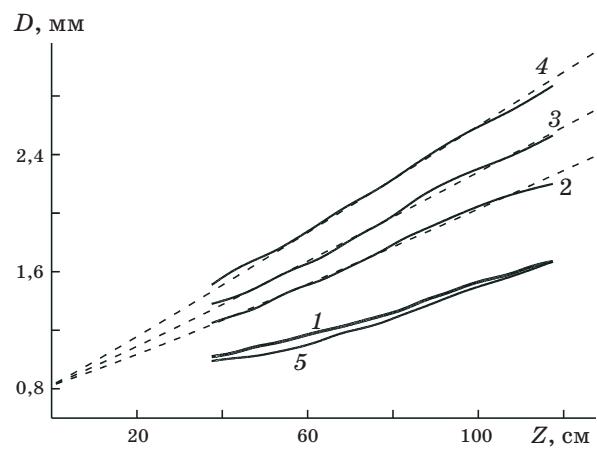
**Рис. 3.** Изменение профиля пучка Не-Не-лазера (стрелкой указана ориентация оптической оси кристалла). а – без накачки, отношение диаметров  $D_x/D_y = 1$ , б – при накачке 15 Вт, отношение  $D_x/D_y = 1,47$ , в – при накачке 20 Вт, отношение  $D_x/D_y = 1,69$ , г – при накачке 25 Вт, отношение  $D_x/D_y = 1,92$ .

лазера становился эллиптическим, сжимаясь в плоскости главной оптической оси кристалла и расширяясь в плоскости, ей перпендикулярной (рис. 3).

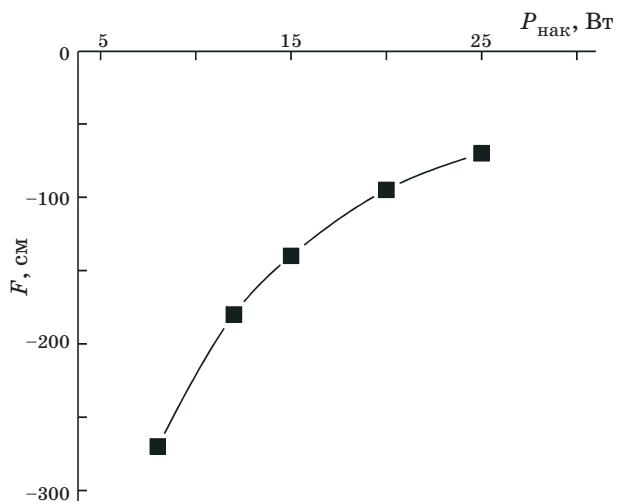
Вращение кристалла вокруг оси распространения тестирующего пучка приводило к повороту осей эллипса, что указывало на возникновение несимметричной тепловой линзы именно внутри активного элемента.

Исследованы зависимости диаметра тестирующего пучка при различной мощности накачки и продольной координаты (рис. 4). Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования и калибровки показало, что при мощности накачки  $P_{\text{нак}} = 25$  Вт в плоскости, перпендикулярной оптической оси кристалла, образуется отрицательная линза с фокусным расстоянием  $F = -70$  см (рис. 5). В плоскости, параллельной оптической оси кристалла, при тех же значениях накачки образуется слабая положительная линза с фокусным расстоянием  $F > 400$  см.

Наблюдаемый астигматизм может быть объяснен несимметричными фотоупругими напряжениями в кристалле Tm:YLF. Вследствие разных значений теплового расширения активной среды вдоль и поперек оптической оси кристалла, обусловленных анизотропными свойствами кристалла Tm:YLF, возникают несимметричные изменения показателя преломления [12–14].



**Рис. 4.** Зависимости диаметра тестирующего пучка от продольной координаты при различных мощностях накачки (сплошные кривые – экспериментальные данные, штриховые кривые – моделирование). 1 – по обеим осям без накачки, 2, 3, 4 – поперек оптической оси при 15 Вт, 20 Вт и 25 Вт соответственно, 5 – вдоль оптической оси кристалла при 25 Вт.



**Рис. 5.** Зависимость фокусного расстояния тепловой линзы, наводимой поперек оптической оси кристалла Tm:YLF, от мощности накачки.

Следует отметить, что при расчетах резонаторов необходимо пересчитывать параметры наводимых линз на реальные длины волн генерации с учетом дисперсии среды, поскольку измерения проведены на длине волны 632,8 нм.

## Заключение

Для исследования теплой линзы, наводимой в активном элементе под действием оптической накачки, использовалась методика, основанная

на моделировании параметров прошедшего через линзу гауссова пучка тестирующего лазера и калибровке измерительной системы линзами с известными параметрами.

Обнаружено, что в кристалле Tm:YLF при продольной диодной накачке формируется несимметричная тепловая линза, причем в плоскости главной оптической оси кристалла образуется слабая положительная линза, оптическая сила которой мало зависит от мощности накачки, а в перпендикулярной плоскости образуется отрицательная линза, параметры которой сильно зависят от мощности накачки.

Исследованная схема оптической накачки является наиболее приближенной к реально используемым схемам при построении Tm:YLF-генераторов с диодной накачкой.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента РФ (грант НШ-2786.2008.2).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ищенко Е.Ф. Открытые оптические резонаторы: Некоторые вопросы теории и расчета. М.: Сов. радио, 1968. 208 с.
2. Быков В.П., Вахитов Н.Г., Новокреценов В.К., Шкунов Н.В. Влияние согласования резонатора на мощность твердотельных ОКГ // Квант. электрон. 1971. № 2. С. 53–56.
3. Тарасов Л. В. Физика процессов в генераторах когерентного оптического излучения. М.: Радио и связь, 1981. 440 с.
4. Schellhorn M. High-power diode-pumped Tm:YLF laser // Appl. Phys. B. 2008. V. 91. P. 71–74.
5. Schellhorn M., Hirth A., Kieleck C. Ho:YAG laser intracavity pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser // Opt. Lett. 2003. V. 28. P. 1933–1935.
6. Budni P.A., Lemons M.L., Mosto J.R., Chicklis E.P. Efficient mid-infrared laser using 1.9- $\mu$ m-pumped Ho:YAG and ZnGeP<sub>2</sub> optical parametric oscillators // Opt. Soc. Am. B. 2000. V. 17. P. 723–728.
7. Antipov O.L., Eremeykin O.N., Frolov Yu.N., Freidman G.I., Garanin S.G., Il'kaev R.I., Konyushkov A.P., Lazarenko V.I., Mischenko G.M., Savikin A.P., Sergeev A.M., Velikanov S.D., Volkov R.Yu. Mid-IR ZnGeP<sub>2</sub>-parametric oscillator with laser pumping at 2.1- $\mu$ m // Technical Digest of Intern. Conf. "MICS2005". Barcelona, 2005. Paper № 10.
8. So S., Mackenzie J.I., Shepherd D.P., Clarkson W.A., Betterton J.G., Gorton E.K. A power-scaling strategy for longitudinally diode-pumped Tm:YLF lasers // Appl. Phys. B. 2006. V. 84. P. 389–393.
9. Xinlu Zhang, Yuezhu Wang, Li Li, Youlun Ju. Heat generation and thermal lensing in end-pumped Tm, Ho:YLF laser crystals // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 6930–6935.
10. Schellhorn M. High-power diode-pumped Tm:YLF laser // Appl. Phys. B. 2008. V. 91. P. 71–74.
11. Клайджер Д. Сверхчувствительная лазерная спектроскопия: Пер. с англ./ Под ред. Летохова В.С. М.: Мир, 1986. 520 с.
12. Дмитриев В.Г., Уманский Б.М., Шкунов Н.В. Термические напряжения в активных элементах в непрерывном режиме накачки // Квант. электрон. 1971. № 2. С. 80–86.
13. Боли Б., Уэйнер Дж. Теория температурных напряжений. М.: Мир, 1964. 520 с.
14. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Мир, 1967. 385 с.