

Термооптические эффекты в лазерных кристаллах и керамиках, активированных Yb^{3+} , при диодной накачке

А.В. Лаптев, Е.В. Пестряков, В.В. Петров, В.И. Трунов,
А.В. Кирпичников, М.А. Мерзляков, К.В. Поляков*

*Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 13/3*

Поступила в редакцию 12.10.2011 г.

Экспериментально определены величины тепловых линз, возникающих в анизотропных кристаллах $\text{Yb}:\text{YVO}_4$, $\text{Yb}:\text{Gd}_{0.64}\text{Y}_{0.36}\text{VO}_4$ и изотропных керамиках $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ при диодной накачке. Метод основан на смещении точки фокуса пробного луча после прохождения через активную среду. В теоретическом расчете фокусного расстояния тепловой линзы учитывались три эффекта: термооптический, упругооптический и искривление боковых торцов активной среды. Данные по величине тепловых линз в исследуемых кристаллах ванадатах иттрия, гадолиния-иттрия и лазерных керамиках $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ получены впервые и использовались при создании тераваттной фемтосекундной лазерной системы, работающей с частотой повторения импульсов до 1 кГц.

Ключевые слова: диодная накачка, среды, активированные ионами иттербия, тепловая линза, фемтосекундная лазерная система; diode pumping, Yb^{3+} -doped active media, thermal lens, femtosecond laser system.

Введение

Создание высокоэффективных и мощных фемтосекундных лазерных систем на основе кристаллов и керамик, активированных ионами иттербия Yb^{3+} , — в настоящее время одно из активно развивающихся направлений лазерной физики. Преимуществами сред, активированных Yb^{3+} , являются квазитрехуровневая схема энергетических уровней, малый квантовый дефект (менее 10%) и отсутствие эффектов поглощения из возбужденного состояния. Указанные особенности позволяют создавать лазерные системы, в которых активные элементы подвержены низким температурным нагрузкам.

В средах, активированных ионами иттербия, обладающих высокими теплофизическими параметрами, выделяют тетрагональные кристаллы $\text{Yb}:\text{Gd}_x\text{Y}_{1-x}\text{VO}_4$, $\text{Yb}:\text{YVO}_4$ и изотропные лазерные керамики $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$, $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{O}_3$. Для керамик $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{O}_3$ и $\text{Yb}:\text{Sc}_2\text{O}_3$ спектры излучения перекрываются, что является перспективным для создания комбинированных сред с широкими полосами усиления [1].

Актуальность измерения термооптического эффекта в твердотельных лазерных средах обусловле-

на важностью его учета при создании мощных высокоэффективных твердотельных лазерных систем, твердотельных лазеров сверхкоротких импульсов, усилителей излучения с использованием твердотельных активных элементов, так как термооптический эффект является одним из важнейших факторов, ограничивающих мощность и пространственное распределение излучения в таких системах.

Анализ тепловых линз в анизотропных кристаллах

При торцевой диодной накачке лазерных кристаллов, активированных ионами Yb^{3+} , фазовый фронт пучка при прохождении через кристалл изменяется под действием трех основных эффектов [2]. Первый — изменение показателя преломления с температурой, что приводит к изменению фазового профиля пропорционально распределению температурного профиля в кристалле. Второй — изменение показателя преломления за счет напряжений в кристалле, приводящих к удлинению кристалла и искривлению боковых поверхностей. Третий — изменение показателя преломления вследствие термоупругих напряжений, упругооптический эффект.

Изменения в оптической индикатрисе описываются с помощью упругооптических коэффициентов, представляющих собой тензор 4-го ранга: $\Delta B_{ij} = p_{ijkl}\epsilon_{kl}$, где ϵ_{kl} — тензор натяжений; p_{ijkl} — тензор упругооптических коэффициентов [3].

* Алексей Викторович Лаптев (alaptev@laser.nsc.ru); Ефим Викторович Пестряков (pefvic@laser.nsc.ru); Виктор Валерьевич Петров (vpetv@laser.nsc.ru); Владимир Иванович Трунов (trunov@laser.nsc.ru); Анатолий Васильевич Кирпичников (kirp@laser.nsc.ru); Михаил Александрович Мерзляков (mm@laser.nsc.ru); Кирилл Викторович Поляков (kir314@gmail.com).

В работе [2] показано, что для цилиндрически симметричного кристалла различие оптического пути в направлении вдоль радиуса определяется выражением

$$\Delta(r) = \text{OPD}(r) - \text{OPD}(0) = \chi(T(0) - T(r)), \quad (1)$$

$$\chi = \frac{dn}{dT} + (n_0 - 1)(1 + \nu)\alpha_T + 2n_0^3\alpha_T C_{r,\theta}, \quad (2)$$

где T – температура; r – радиус кристалла; $C_{r,\theta}$ – коэффициент, определяющий упругооптический эффект в приближении плоских напряжений; n_0 – показатель преломления кристалла; α_T – коэффициент теплового расширения; ν – коэффициент Пуассона. В выражении (2) χ – термооптический коэффициент, в котором каждое из слагаемых определяет эффект изменения показателя преломления с температурой, эффект искривления торцов кристалла и упругооптический эффект соответственно.

Если распределение температуры внутри области накачки является параболическим, то искажения фазового фронта аналогичны искажениям, вызванным тепловой линзой (ТЛ), оптическая сила D которой для выделенного направления обыкновенной и необыкновенной волн в одноосном кристалле дается выражением, выведенным в приближении малости расходимости пучка накачки в кристалле:

$$D_i = \frac{1}{F_i} = \frac{P_{abs}\chi_i\eta_h}{2\pi\omega_p^2 K_i} = \beta P_{abs}, \quad (3)$$

где i – индекс, соответствующий выделенному направлению относительно осей кристалла; F_i – фокусное расстояние ТЛ; P_{abs} – поглощенная мощность; η_h – коэффициент, определяющий часть поглощенной мощности, перешедшей в тепло; ω_p – радиус пучка накачки; K_i – коэффициент теплопроводности.

Относительная часть поглощенной мощности η_h , перешедшей в тепло, задается формулой [2]:

$$\eta_h = 1 - \eta_p \left((1 - \eta_l)\eta_r \frac{\lambda_p}{\lambda_f} + \eta_l \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \right), \quad (4)$$

где η_p – квантовая эффективность накачки, т.е. относительное число поглощенных фотонов накачки, вносящих вклад в инверсию населенностей; η_r – из-

лучательная квантовая эффективность, которая означает долю возбужденных атомов, излучающих спонтанно (при отсутствии вынужденного излучения); η_l – эффективность лазерной генерации (доля возбужденных ионов, появившихся при вынужденном излучении); λ_p , λ_l , λ_f – длина волны накачки, лазерной генерации и центральная длина волны контура люминесценции соответственно.

В большинстве случаев при диодной накачке кристаллов, активированных Yb^{3+} , значение dn_i/dT является положительным и вклад упругооптического эффекта в формирование ТЛ составляет менее 1% [4]. Физические параметры для исследуемых анизотропных кристаллов Yb:YVO_4 , $\text{Yb:Gd}_{0,64}\text{Y}_{0,36}\text{VO}_4$ тетрагональной системы и керамики $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ кубической системы, а также значения параметров термооптического эффекта и линейного расширения, приведенные в выражениях (2), (3), представлены в табл. 1.

Наибольший вклад в формирование ТЛ для кристаллов Yb:YVO_4 и $\text{Yb:Gd}_{0,64}\text{Y}_{0,36}\text{VO}_4$ вносит линейное расширение (табл. 1), которое составляет для обыкновенного луча \parallel оптической оси $c \sim 55\%$, необыкновенного луча \perp оптической оси $c \sim 81\%$, а для керамики $\text{Yb:Y}_2\text{O}_3$ – изменение показателя преломления от температуры, составляющее $\sim 55\%$.

Эксперимент

Разработанные в настоящее время методики измерения фокусного расстояния ТЛ, возникающих при накачке в активных лазерных элементах, можно разделить на три группы: геометрический метод, метод, основанный на изменении параметров резонатора, и метод, основанный на измерении волнового фронта [4]. Каждый из этих методов имеет преимущества и недостатки. Нами был выбран первый метод, поскольку он прост в реализации и его точность достаточна для оценки вклада ТЛ при расчете лазерного резонатора [5]. Данный метод основан на смещении точки фокуса вдоль луча после прохождения пробного пучка через ТЛ в активном элементе.

Для определения фокусного расстояния ТЛ в твердотельных активных средах была собрана экспериментальная установка, схема которой представлена на рис. 1.

Таблица 1

Физические параметры для анизотропных кристаллов

Параметр	Yb:YVO ₄		Yb:Gd _{0,64} Y _{0,36} VO ₄		Yb:Y ₂ O ₃
	$\parallel c$	$\perp c$	$\parallel c$	$\perp c$	
Коэффициент теплопроводности K , Вт/(м·К)	5,2	5,1	7,1	5,4	13,5
Показатель преломления n_{0i}	1,99	2,2	1,99	2,2	1,8
Коэффициент теплового расширения $\alpha_T \cdot 10^{-6}$, 1/К	4,4	11,3	4,4	11,3	6,5
Коэффициент Пуассона ν	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Термооптическая постоянная $dn/dT \cdot 10^{-6}$, 1/К	8,5	3	8	3	8,3
Вклад линейного расширения $(n_0 - 1)(1 + \nu)\alpha_T \cdot 10^{-6}$, 1/К	10,4	12,8	10,4	12,8	6,7
Термооптический коэффициент $\chi \cdot 10^{-6}$, 1/К	18,9	15,8	18,4	15,8	15

Термооптические эффекты в лазерных кристаллах и керамиках, активированных Yb^{3+} , ...

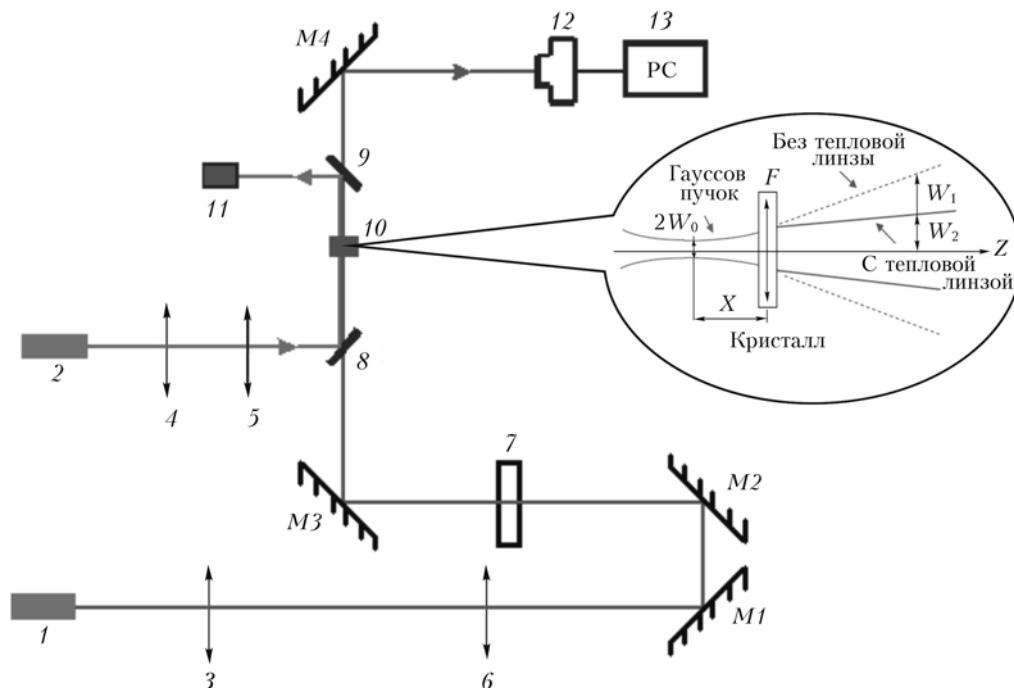


Рис. 1. Схема установки для измерения фокусного расстояния тепловой линзы геометрическим методом: 1 – He–Ne-лазер; 2 – полупроводниковый лазер накачки; 3–6 – система линз; 7 – кварцевая плоскопараллельная пластина; 8, 9 – дихроичные зеркала, пропускающие пробное излучение и отражающие излучение накачки; 10 – образец; 11 – поглотитель излучения накачки; 12 – CCD-камера; 13 – компьютер; M1, M2, M3, M4 – плоские зеркала

Эксперимент заключается в том, что на кристалл падает излучение накачки ($\lambda = 975$ нм), которое частично поглощается, что приводит к градиенту температуры, изменению показателя преломления и, как следствие, к формированию ТЛ. На рис. 1 (фрагмент) показано прохождение излучения He–Ne-лазера ($\lambda = 633$ нм) через кристалл с возникающей ТЛ и без нее. Излучение пробного лазера соосно с излучением накачки, их перетяжки совмещены в продольном и поперечном направлениях, диаметр пучка составляет ~ 115 мкм.

Используя экспериментальные зависимости радиуса пробного пучка в дальней зоне от поглощенной мощности накачки и применяя метод матричной оптики [6], мы определили зависимости оптической силы ТЛ от поглощенной мощности накачки в лазерных кристаллах Yb:YVO₄ (2,7 ат.% Yb, размеры 3×3×2 мм), Yb:Gd_{0,64}Y_{0,36}VO₄ (3 ат.% Yb, 3×3×2 мм) и лазерных керамиках Yb:Y₂O₃ (10 ат.% Yb, размеры \varnothing 10 мм, толщина 1,5 мм), Yb:Sc₂O₃ (10 ат.% Yb, \varnothing 10 мм, толщина 1,5 мм) (рис. 2–4).

Из расчетной зависимости оптической силы ТЛ для исследуемых кристаллов, с использованием выражения (3), найдены коэффициент β , определяющий величину ТЛ, и коэффициент η_h , характеризующий относительную часть поглощенной мощности накачки, перешедшей в тепло. В табл. 2 представлены термооптические параметры анизотропных кристаллов Yb:YVO₄, Yb:Gd_{0,64}Y_{0,36}VO₄ и керамики Yb:Y₂O₃.

Полученные данные по величинам ТЛ были использованы при расчете четырехзеркальных резонаторов лазеров на активных элементах Yb:YVO₄, Yb:Gd_{0,64}Y_{0,36}VO₄ и керамиках Yb:Y₂O₃ и Yb:Sc₂O₃.

Таблица 2

Термооптические параметры активных сред

Элемент	$\beta, \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$		$\eta_h, \%$	
	$\parallel c$	$\perp c$	$\parallel c$	$\perp c$
Yb:YVO ₄	2,59	2,21	6	5,9
Yb:Gd _{0,64} Y _{0,36} VO ₄	0,68	0,5	19	12
Yb:Y ₂ O ₃	1,42		9,7	

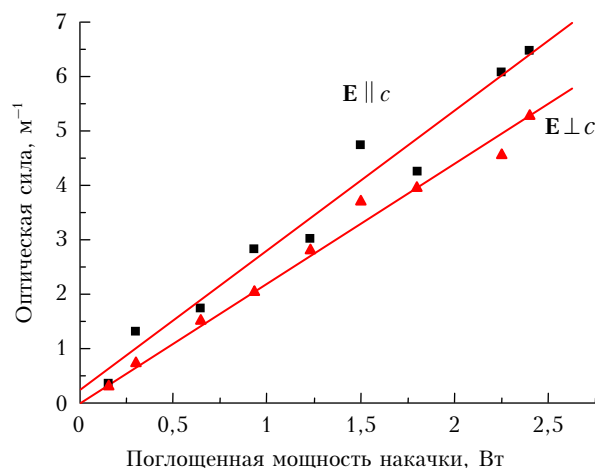


Рис. 2. Зависимость оптической силы тепловой линзы от поглощенной мощности накачки для кристалла Yb:YVO₄; E – вектор поляризации оптической волны

По измеренной зависимости оптической силы тепловой линзы в исследуемых кристаллах от поглощенной мощности накачки было определено смещение

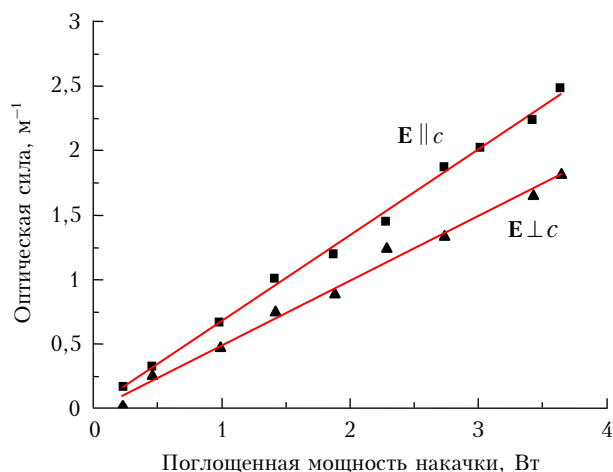


Рис. 3. Зависимость оптической силы тепловой линзы от поглощенной мощности накачки для кристалла Yb:Gd_{0.64}Y_{0.36}VO₄

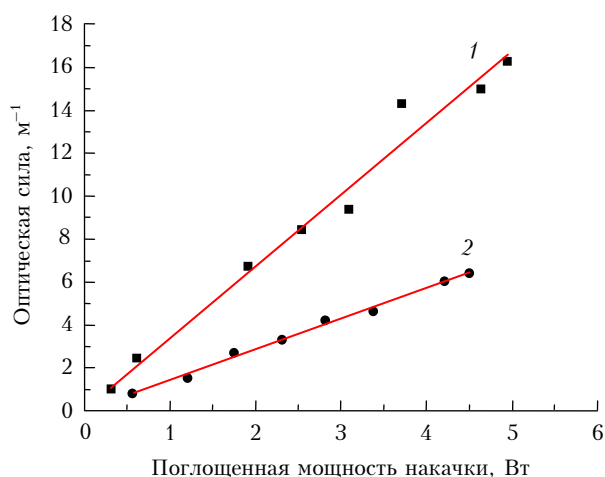


Рис. 4. Зависимость оптической силы тепловой линзы от поглощенной мощности для керамик Yb:Y₂O₃ (1) и Yb:Sc₂O₃ (2)

области устойчивости резонатора фемтосекундного лазера. По нашим расчетам для мощности накачки 10 Вт появление тепловой линзы в исследуемых кристаллах приведет к максимальному смещению области устойчивости на 20% от первоначального.

Схема лазера представляла собой четырехзеркальный X-образный резонатор. Для компенсации дисперсии групповой скорости использовался призменный компенсатор. Для пассивной синхронизации мод применялся полупроводниковый насыщающийся поглотитель, поглощение которого зависит от интенсивности падающего излучения. Радиус пучка накачки в активном элементе составлял около 50 мкм.

A.V. Laptev, E.V. Pestryakov, V.V. Petrov, V.I. Trunov, A.V. Kirpichnikov, M.A. Merzliakov, K.V. Polyakov. **Thermo-optical effects in diode end-pumped Yb-doped laser crystals and sesquioxide ceramics.**

In this work we experimentally determined values of focal length for thermal lenses in diode end-pumped Yb³⁺:YVO₄, Yb³⁺:Gd_{0.64}Y_{0.36}VO₄ crystals and Yb³⁺:Y₂O₃, Yb³⁺:Sc₂O₃ laser ceramics. A chosen method for determination of thermal lens in solid state laser media as a function of pump power was based on measurement of a focal point displacement. In theoretical calculations of focal length of thermal lens we took into account effects of temperature and stress-dependent variations of the refractive index and distortion end faces of crystal. Data of focal lengths for thermal lenses in vanadate crystals and Yb:Y₂O₃, Yb:Sc₂O₃ ceramics were obtained for the first time. Results were used for creation of terawatt femtosecond laser system with a repetition rate of 1 kHz.

Заключение

В представленной работе проведен анализ и определены основные механизмы, определяющие термооптические и термоупругие искажения при формировании анизотропных тепловых линз в лазерных анизотропных кристаллах Yb:YVO₄, Yb:Gd_{0.64}Y_{0.36}VO₄ и лазерных керамиках Yb:Y₂O₃ и Yb:Sc₂O₃. Рассчитана оптическая схема, и создана экспериментальная установка для измерения зависимости оптической силы тепловых линз в твердотельных лазерных средах от поглощенной мощности накачки. Впервые определена зависимость оптической силы тепловой линзы от поглощенной мощности накачки в исследуемых активных элементах.

Из полученной зависимости оптической силы ТЛ от поглощенной мощности накачки на основе теоретических расчетов термооптических коэффициентов определена относительная часть поглощенной мощности, перешедшей в тепло. Полученные значения совпадают с характерным значением квантового дефекта для кристаллов, активированных Yb³⁺, величина которого составляет ~ 10%.

Проведено исследование влияния тепловых напряжений и искажений на смещение области устойчивости резонатора в фемтосекундных лазерах на анизотропных кристаллах Yb:YVO₄, Yb:Gd_{0.64}Y_{0.36}VO₄ и изотропных керамиках Yb:Y₂O₃ и Yb:Sc₂O₃ при диодной накачке. Результаты работы были использованы при создании тераваттной фемтосекундной лазерной системы, работающей с частотой повторения импульсов до 1 кГц.

Работа выполнена при поддержке программы РАН «Экстремальные оптические поля и их приложения» и гранта РФФИ № 11-02-12164.

1. Tokurakawa M., Takaichi K., Kaminskii A.A. Diode-pumped mode-locked Yb³⁺:Lu₂O₃ ceramics laser // Opt. Express. 2006. V. 14, N 26. P. 12832–12838.
2. Chenais S., Balembos F., Druon F. Thermal lensing in diode – pumped ytterbium lasers – part 1: theoretical analysis and wavefront measurements // IEEE J. Quantum Electron. 2004. V. 40, N 9. P. 1217–1233.
3. Най Дж. Физические свойства кристаллов. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1960. 385 с.
4. Chénais S., Druon F., Forget S. On thermal effects in solid state lasers: the case of ytterbium-doped materials // Progr. Quantum Electron. 2006. V. 30, N 4. P. 89–99.
5. Pestryakov E.V., Petrov V.V., Trunov V.I., Kirpichnikov A.V., Merzliakov M.A., Laptev A.V., Polyakov K.V. Measurement of thermal lensing effect in end-pumped Yb:YVO₄ laser rod // XIV Int. conf. on Laser Optics. LO-2010. St. Petersburg. Russia. June 28–July 02 2010. Technical program. ThY1-18.
6. Джеррард А., Берч Дж.М. Введение в матричную оптику. М.: Мир, 1978. 341 с.