

УДК 535.327

## Прибор для измерения параметров термической линзы в лазерных активных элементах методом пробного пучка

Захарова А.Н., Лойко П.А., Маляревич А.М., Юмашев К.В.

Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

Поступила 21.09.2015

Принята к печати 03.11.2015

Разработан прибор, предназначенный для измерения параметров термической линзы (ТЛ) в лазерных активных элементах при продольной диодной накачке. Измерения основаны на методе пробного пучка. Прибор позволяет определять знак и оптическую силу ТЛ в главных меридиональных плоскостях, коэффициент чувствительности к изменению поглощенной мощности накачки и степень астигматизма, коэффициент тепловыделения в лазерном материале, что дает возможность оценивать интегральный вклад фотоупругого эффекта в ТЛ, наведенную в лазерном элементе. Измерения проводятся в линейно поляризованном свете на длине волны 0,53 мкм. Накачка активного элемента осуществляется на длине волны 0,96 мкм, что позволяет исследовать лазерные среды, активированные ионами  $\text{Yb}^{3+}$  и  $(\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+})$ . Точность определения коэффициента чувствительности ТЛ к мощности накачки –  $0,1 \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$ , степени астигматизма ТЛ –  $0,2 \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$ , коэффициента тепловыделения –  $5 \%$ , вклада фотоупругого эффекта в ТЛ –  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ . С помощью данного прибора проведены исследования ТЛ в лазерном активном элементе на основе кристалла иттриевого ванадата  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ .

**Ключевые слова:** термическая линза, лазерные активные элементы, продольная диодная накачка, кристалл иттриевого ванадата.

---

**Адрес для переписки:**

Юмашев К.В.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь  
e-mail: kyumashev@bntu.by

**Address for correspondence:**

Yumashev K.V.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus  
e-mail: kyumashev@bntu.by

---

**Для цитирования:**

Захарова А.Н., Лойко П.А., Маляревич А.М., Юмашев К.В.  
Прибор для измерения параметров термической линзы в лазерных  
активных элементах методом пробного пучка  
Приборы и методы измерений  
2015. – Т. 6, № 2. – С. 127–138

**For citation:**

Zakharova A.N., Loiko P.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.  
Device for measuring of thermal lens parameters in laser active elements  
with a probe beam method  
Devices and Methods of Measurements  
2015, vol. 6, No. 2, pp. 127–138

## Введение

Оптическая накачка лазерного активного элемента приводит к возникновению в нем неоднородного распределения температуры, следствием которого, в свою очередь, является возникновение в нем термически обусловленных деформаций (напряжений) и изменение показателя преломления, обусловленного действием фотоупругого эффекта [1]. Такие фотоупругие искажения вызывают возникновение в лазерном элементе термической линзы (ТЛ), под действием которой могут существенно ухудшаться выходные характеристики лазера. В частности, ТЛ приводит к изменению условий устойчивости лазерного резонатора, искажению пространственного профиля пучка лазерного излучения, рассогласованию мод накачки и генерации и т.д. [1]. Все это особенно ярко проявляется для лазерных элементов на основе анизотропных кристаллов, использование которых является одной из тенденций современной лазерной физики. Анизотропные кристаллы обладают рядом привлекательных спектроскопических свойств по сравнению с высокосимметричными кристаллами и позволяют существенно расширить область применения лазеров на их основе, а также получать лазерную генерацию в более широком временном и спектральном диапазонах.

Расчет параметров ТЛ в лазерных элементах (в особенности на основе анизотропных кристаллов) в настоящее время представляется трудновыполнимой задачей. Это связано, главным образом, с отсутствием информации о компонентах тензоров податливости и фотоупругих постоянных, необходимых для таких расчетов. Определение фотоупругих постоянных требует использования довольно сложных экспериментальных методик, образцов специальной формы и размеров, которые часто не могут быть реализованы в силу особенностей выращивания материала. Кроме того, аналитические выражения для определения вклада фотоупругого эффекта в ТЛ в настоящее время существуют только для высокосимметричных сред.

Поэтому задача создания относительно простого и компактного прибора для измерения параметров ТЛ в лазерных элементах является весьма актуальной. В настоящее время подобные коммерчески выпускаемые приборы отсутствуют, в некоторых научных центрах имеются экспериментальные установки, позволяющие проводить такие измерения.

Целью данной работы являлась разработка прибора для измерения параметров ТЛ в лазерных активных элементах при продольной диодной накачке (знака и оптической силы в главных меридиональных плоскостях, коэффициента чувствительности к изменению поглощенной мощности накачки, степени астигматизма) [2], коэффициента тепловыделения в лазерном материале [3] и определения на этой основе интегрального вклада фотоупругого эффекта [4] в термически наведенную линзу лазерного элемента. Совокупность такой информация является весьма востребованной при конструировании лазерных систем. Известен ряд методов измерения параметров ТЛ в лазерных элементах. В частности, методы пробного пучка, интерференционные методы, ряд методик, основанных на анализе изменения различных характеристик выходного лазерного излучения [1]. В основу разрабатываемого в данной работе прибора положен метод пробного пучка, преимуществами которого являются относительная техническая простота реализации, высокая надежность и достоверность измерений.

## Термическая линза

В процессе работы лазера активный элемент испытывает значительные термооптические искажения. Для описания влияния данных искажений на волновой фронт лазерного пучка используется модель термической линзы – линзы, влияние которой на волновой фронт пучка эквивалентно воздействию на него термически искаженного лазерного элемента. При этом имеет место прямо пропорциональная зависимость между оптической силой  $D$  ТЛ и мощностью накачки  $P_{abs}$ , поглощенной в лазерном элементе. В случае продольной диодной накачки выражение, описывающее данную зависимость, имеет вид [1]:

$$D = \frac{P_{abs} \eta_h}{2\pi\kappa w_p^2} \cdot \left[ \frac{dn}{dT} + X_{PHE} + Y_{DIST} \right], \quad (1)$$

где  $\eta_h$  – коэффициент объемного тепловыделения, показывающий, какая часть поглощенной мощности  $P_{abs}$  рассеивается в лазерном элементе в виде тепла;  $\kappa$  – «эффективный» коэффициент теплопроводности для плоскости, перпендикулярной оптической оси лазерного элемента (т.е. перпендикулярной распространению излучения);  $w_p$  – радиус

моды накачки в лазерном элементе. Сумма  $\Delta = dn/dT + X_{PHE} + Y_{DIST}$  представляет собой «обобщенный» термо-оптический коэффициент [4], в котором  $dn/dT$  описывает вклад температурной зависимости показателя преломления;  $X_{PHE}$  – вклад фотоупругого эффекта;  $Y_{DIST}$  – вклад искажения плоскости торцов лазерного элемента. Величина  $Y_{DIST}$  описывается выражением  $Y_{DIST} = (1+\nu)(n-1)\alpha$  [1], где  $\nu$  – «эффективный» коэффициент Пуассона;  $n$  – показатель преломления активной среды;  $\alpha$  – коэффициент термического расширения в направлении, параллельном оптической оси лазерного элемента (т.е. параллельном распространению излучения).

Термическая линза в лазерном элементе в общем случае является астигматической, т.е. ее оптическая сила имеет различные значения для разных меридиональных плоскостей – плоскостей, содержащих направление распространения излучения и некоторое направление в ортогональной ему плоскости [1]. Поэтому измерение знака и оптической силы ТЛ производится для двух ортогональных друг другу главных меридиональных плоскостей, для которых оптическая сила ТЛ будет наибольшей и наименьшей. Данным плоскостям в дальнейшем будут ставиться в соответствие лежащие в каждой из них направления  $A$  и  $B$ , перпендикулярные направлению распространения излучения.

Параметрами ТЛ, кроме её знака и оптической силы  $D_A$  и  $D_B$ , являются также коэффициенты чувствительности к изменению поглощенной мощности накачки  $M_A = dD_A/dP_{abs}$ ,  $M_B = dD_B/dP_{abs}$  и степень астигматизма  $S = |M_A - M_B|$  [2]. Параметры  $M_{A(B)}$  характеризуют скорость изменения оптической силы ТЛ при изменении поглощенной мощности накачки. Степень астигматизма характеризует различие коэффициентов чувствительности  $M_{A(B)}$  для главных меридиональных плоскостей. Интегральный вклад фотоупругого эффекта в ТЛ, наводимой в лазерном элементе, определяется по формуле:

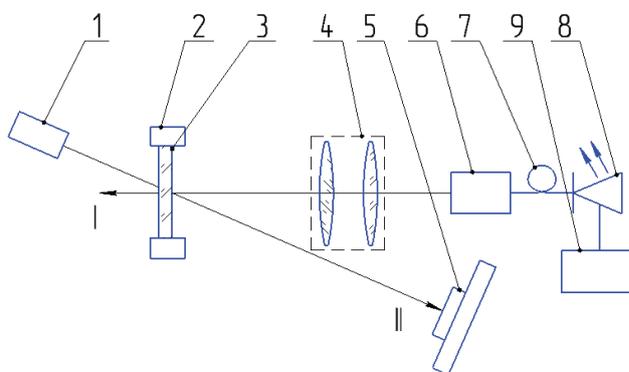
$$(X_{PHE})_{A(B)} = \frac{2\pi k \omega_p^2 M_{A(B)}}{\eta_h} - \frac{dn}{dT} - Y_{DIST}. \quad (2)$$

## Метод измерения

На рисунке 1 приведена оптическая схема измерения параметров ТЛ в лазерных элементах при продольной диодной накачке с помощью метода пробного пучка. Излучение накачки лазерного ди-

ода 8, выходящее из SMA-разъема 6 оптического волокна 7, при помощи фокусирующей системы 4 доставляется к поверхности исследуемого образца лазерного элемента 3, представляющего собой плоскую полированную пластинку. Образец закреплен в радиатор 2, обеспечивающий отток от него тепла. Зондирующее излучение лазера 1 проходит через исследуемый лазерный элемент 3, перекрываясь в нем с пучком накачки. При этом в области их перекрытия размер зондирующего пучка меньше размера пучка накачки.

Под действием излучения накачки в лазерном элементе формируется ТЛ, которая искажает поперечный профиль зондирующего пучка. Эти изменения регистрируются при помощи ПЗС-камеры.



**Рисунок 1** – Оптическая схема измерения параметров термической линзы в лазерных элементах при продольной диодной накачке с помощью метода пробного пучка: 1 – лазер-источник зондирующего излучения; 2 – радиатор; 3 – исследуемый лазерный элемент; 4 – фокусирующая система; 5 – ПЗС-камера; 6 – SMA-разъем; 7 – оптическое волокно; 8 – лазерный диод; 9 – блок питания; I – пучок накачки; II – зондирующий пучок

**Figure 1** – Optical scheme for the determination of the thermal lens parameters in laser elements under longitudinal diode pumping by a probe beam method: 1 – laser-source of probe radiation; 2 – heat sink; 3 – studied laser element; 4 – focusing system; 5 – CCD camera; 6 – SMA-slot; 7 – optical fiber; 8 – laser diode; 9 – power supply; I – pump beam; II – probe beam

Изменение поперечного профиля пучка зондирующего излучения моделируется с помощью метода матричной оптики [5]. Оптическая схема распространения зондирующего пучка через термически возмущенный лазерный элемент показана на рисунке 2. При диодной накачке концентрация ионов-активаторов подбирается таким образом, чтобы обеспечить высокое поглощение излучения накачки на малой длине активной сре-

ды. Это приводит к тому, что объемное тепловыделение в лазерном элементе локализовано вблизи его «входного» торца, через который производится накачка. Поэтому ТЛ формируется в тонком слое, расположенном вплотную к «входному» торцу лазерного элемента.

Лучевые матрицы, описывающие распространение пробного пучка от выходного зеркала лазера 1 (см. рисунок 2) до плоскости измерения 4, для лучей, лежащих в сагиттальной ( $xz$ ) и тангенциальной ( $yz$ ) плоскостях, имеют вид [5]:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{xz(yz)} = \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -D_{xz(yz)} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & d_{xz(yz)} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В этой формуле  $D_{xz} = D \cos \theta$ ,  $D_{yz} = D \cos^{-1} \theta$ ,  $d_{xz} = d(n^2 - \sin^2 \theta)^{-1/2}$ ,  $d_{yz} = dn^2(1 - \sin^2 \theta (n^2 - \sin^2 \theta)^{3/2})^{-1}$  – соответственно оптические силы ТЛ и «эффективные» толщины пластинки лазерного элемента, наклоненного под углом  $\theta$  к направлению распространения излучения, для лучей, лежащих в плоскостях ( $xz$ ) и ( $yz$ ), а  $d$  и  $n$  – соответственно толщина пластинки и показатель преломления материала лазерного элемента. ABCD-закон распространения гауссова пучка имеет вид [5]:

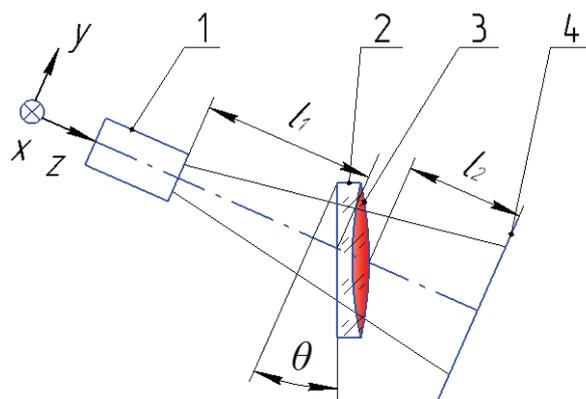
$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad \frac{1}{q_{1(2)}} = \frac{1}{R_{1(2)}} - i \frac{\lambda}{\pi w_{1(2)}^2}, \quad (4)$$

где  $R_{1(2)}$ ,  $w_{1(2)}$ ,  $q_{1(2)}$  – соответственно радиус кривизны волнового фронта, радиус пятна гауссова пучка, комплексный параметр (индексы 1 и 2 соответствуют параметрам пучка на входе и на выходе рассматриваемой оптической системы). Решая уравнение (4) с использованием выражения (3) и принимая во внимание, что волновой фронт гауссова пучка на входе оптической системы (т.е. на выходе из лазера-источника зондирующего излучения) плоский, получаем формулы для измеряемых радиусов гауссова пучка:

$$(w_2)_{xz(yz)} = w_1 \sqrt{\frac{(1 - l_2 D_{xz(yz)})^2 + \left\{ \frac{\lambda}{\pi w_1^2} [l_2 + (l_1 + d_{xz(yz)}) (1 - l_2 D_{xz(yz)})] \right\}^2}{(1 - l_2 D_{xz(yz)})^2}}. \quad (5)$$

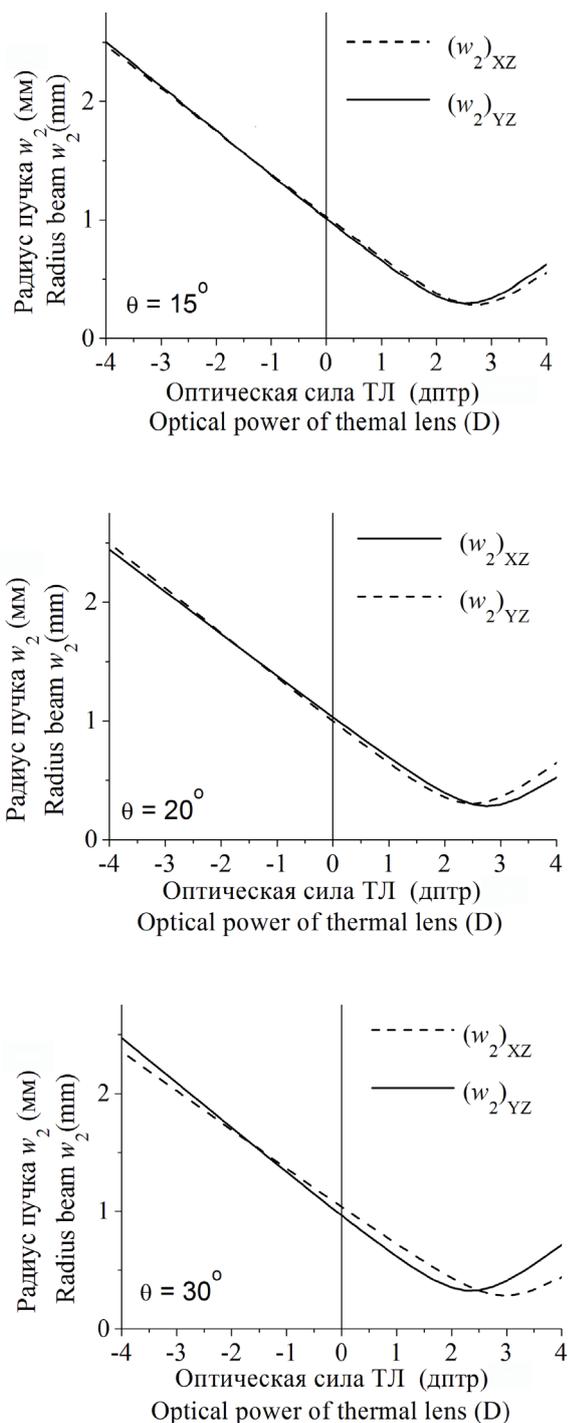
Таким образом, радиус регистрируемого зондирующего пучка имеет различные значения

для лучей, лежащих в сагиттальной ( $xz$ ) и тангенциальной ( $yz$ ) плоскостях, и соотношение между этими значениями радиусов пучка зависит от угла наклона  $\theta$  исследуемой пластинки лазерного элемента. На рисунке 3 приведены зависимости радиусов пучка  $(w_2)_{xz}$  и  $(w_2)_{yz}$  от оптической силы  $D$  ТЛ при различных углах наклона  $\theta$ , полученные с помощью формулы (5) при значениях  $w_1 = 0,23$  мм,  $l_1 = 6$  см,  $l_2 = 80$  см,  $d = 1,0$  мм,  $n = 2,0$ , которые являются типичными для подобных измерений. Результаты этих расчетов показывают, что угол  $\theta$  (т.е. угол между пучком накачки и зондирующим пучком) не должен превышать  $\cong 15^\circ$ , чтобы избежать влияния астигматизма наклоненной исследуемой пластинки лазерного элемента на результаты измерения оптической силы наводимой в нем ТЛ.



**Рисунок 2** – Оптическая схема распространения зондирующего пучка через исследуемый лазерный элемент: 1 – лазерный источник зондирующего пучка; 2 – лазерный элемент с наведенной в нем термической линзой; 3 – термическая линза (ТЛ); 4 – плоскость измерения поперечного профиля зондирующего пучка;  $l_1$  – расстояние от выходного зеркала лазера 1 до лазерного элемента;  $\theta$  – угол наклона лазерного элемента по отношению к направлению распространения зондирующего пучка;  $l_2$  – расстояние от лазерного элемента до плоскости измерения; ( $xyz$ ) – декартова система координат, в которой ось  $z$  параллельна направлению распространения зондирующего пучка

**Figure 2** – Optical scheme of propagation of the probe beam through the studied laser element: 1 – laser source of the probe beam; 2 – laser element with an induced thermal lens; 3 – thermal lens (TL); 4 – plane of measurements of the cross-section of the probe beam;  $l_1$  – distance between the laser output coupler 1 and laser element,  $\theta$  – angle of inclination of laser element with respect to the probe beam propagation direction;  $l_2$  – distance between the laser element and measurement plane; ( $xyz$ ) – Cartesian coordinate system, wherein axis  $z$  is parallel to the propagation direction of the probe beam



**Рисунок 3** – Зависимость радиусов зондирующего пучка  $(w_2)_{XZ}$  и  $(w_2)_{YZ}$  от оптической силы термической линзы при различных углах наклона  $\theta$  пластинки лазерного элемента, полученные с помощью формулы (5) при  $w_1 = 0,23$  мм;  $l_1 = 6$  см;  $l_2 = 80$  см;  $d = 1,0$  мм;  $n = 2,0$

**Figure 3** – Dependence of radii of the probe beam  $(w_2)_{XZ}$  and  $(w_2)_{YZ}$  on the optical power of the thermal lens for various inclination angles  $\theta$  for the laser element derived with the formula (5) when  $w_1 = 0,23$  мм;  $l_1 = 6$  см;  $l_2 = 80$  см;  $d = 1,0$  мм;  $n = 2,0$

Для того чтобы определить интегральный вклад фотоупругого эффекта в ТЛ лазерного элемента, необходимо знать коэффициент объемного тепловыделения  $\eta_h$ , см. формулу (2). Нижнюю границу для его значения можно оценить по величине квантового дефекта как  $\eta_h = (1 - \lambda_p/\lambda_g)$ , где  $\lambda_p$  – длина волны накачки;  $\lambda_g$  – длина волны генерации. Однако достоверно рассчитать коэффициент  $\eta_h$  не представляется возможным, поскольку для этого необходимо знать численные значения различных постоянных, описывающих такие процессы, как, в частности, поглощение из возбужденного состояния, перенос энергии и кросс-релаксация, совокупность которых и определяет значение коэффициента  $\eta_h$  для конкретного лазерного материала. Поэтому актуальной задачей является экспериментальное определение коэффициента  $\eta_h$  для конкретного лазерного материала.

Разработанный в настоящей работе прибор позволяет осуществлять измерение коэффициента объемного тепловыделения  $\eta_h$  в лазерном элементе с помощью метода лазерной калориметрии по импульсной методике [3]. Для таких измерений используется оптическая схема, приведенная на рисунке 1, в которой распространяется только пучок накачки II (лазер 1 не включен), а исследуемый лазерный элемент закрепляется на теплоизолирующем основании, препятствующем оттоку от него тепла. Дополнительно в тепловом контакте с исследуемым лазерным элементом находится термопара для измерения его температуры. Регистрируется зависимость температуры лазерного элемента от времени после включения источника накачки и после его выключения до полного восстановления начальной температуры. Значение коэффициента  $\eta_h$  рассчитывается по формуле [3]:

$$\eta_h = \frac{T_p(m_1c_1 + m_2c_2)}{t_p P_{abs}}, \quad (6)$$

где  $m_1$  и  $c_1$  – соответственно масса и удельная теплоёмкость материала лазерного элемента;  $m_2$  и  $c_2$  – масса и удельная теплоёмкость термопасты, с помощью которой термопара прикрепляется к лазерному элементу для обеспечения надежного с ним теплового контакта;  $t_p$  – интервал времени, в течение которого включена накачка;  $T_p$  – температура в момент времени  $t = t_p/2$ , определяемая путем экстраполяции кривой релаксации температуры, полученной после выключения накачки.

## Устройство комплекса

В состав разработанного прибора входят: блок продольной диодной накачки, источник зондирующего лазерного излучения, узел крепления и юстировки исследуемого лазерного элемента и блок регистрации зондирующего лазерного излучения. Принципиальная схема прибора приведена на рисунке 4.

Блок продольной диодной накачки обеспечивает оптическую накачку исследуемого лазерного элемента и состоит из:

- блока питания и управления лазерным диодом 5, который позволяет осуществлять изменение тока через лазерный диод, а также контролировать температуру лазерного диода и температуру лазерного элемента с точностью не хуже  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , для чего предусмотрено подключение данного блока к двум элементам Пельтье 2, 19 и двум термисторам 3, 20;

- узла крепления лазерного диода, включающего непрерывный полупроводниковый лазерный диод 1 на основе структуры InGaAs с мощностью до 5 Вт на длине волны  $0,96\text{ }\mu\text{m}$ , с волоконным выводом излучения; массивное металлическое основание 4, предназначенное для отвода тепла от лазерного диода 1; элемент Пельтье 2, предназначенный для поддержания требуемой температуры лазерного диода 1; термистор 3 для контроля температуры лазерного диода, кулер 6 для охлаждения данного узла, подключенный к блоку питания 5;

- узла крепления оптического волокна 8, состоящего из SMA-разъема 9, юстировочного столика 10 и трансляционной подвижки 11;

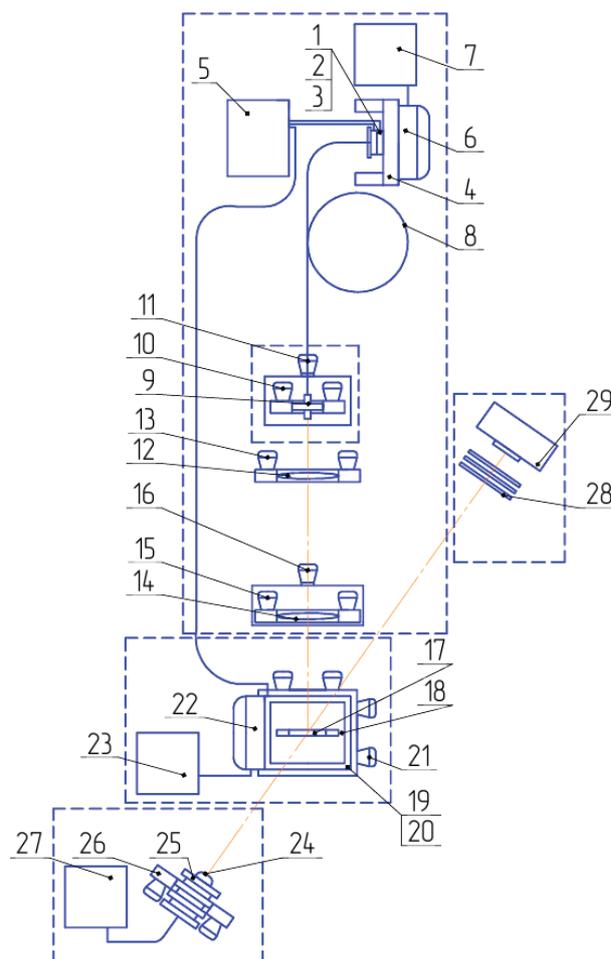
- коллимирующей линзы 12, закрепленной в юстировочном столике 13;

- фокусирующей линзы 14, закрепленной в юстировочном столике 15, установленном на трансляционной подвижке 16.

Источник зондирующего лазерного излучения включает: твердотельный лазер 24 (выходное излучение – непрерывное, поляризация – линейная, выходная мощность – 20 мВт, длина волны выходного излучения –  $0,53\text{ }\mu\text{m}$ ); радиатор 25 для пассивного охлаждения лазера; юстировочный столик 26; блок питания лазера 27.

Узел крепления и юстировки лазерного элемента включает: радиатор 18 для отвода тепла от лазерного элемента 17; элемент Пельтье 19, предназначенный для его охлаждения и термистор 20 для контроля его температуры; юстировочный

столик 21, позволяющий осуществлять плавную юстировку в горизонтальной и вертикальной плоскостях; кулер 22 для охлаждения данного узла, подключенный к блоку питания 5.



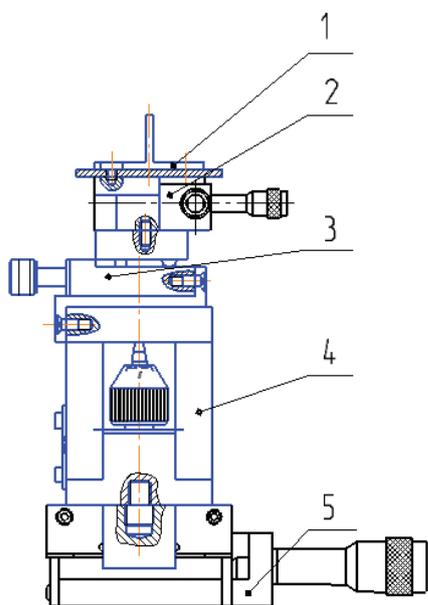
**Рисунок 4** – Принципиальная схема прибора: 1 – лазерный диод; 2, 19 – элементы Пельтье; 3, 20 – термисторы; 4 – основание; 5 – блок питания; 6, 22 – кулеры; 7, 23 – блоки питания; 8 – оптическое волокно; 9 – SMA-разъем; 10, 13, 15, 26 – юстировочные столики; 11, 16 – трансляционные подвижки; 12 – коллимирующая линза; 14 – фокусирующая линза; 17 – исследуемый лазерный элемент; 18, 25 – радиаторы; 21 – узел юстировки лазерного элемента; 24 – твердотельный лазер; 27 – блок питания лазера; 28 – набор нейтральных светофильтров; 29 – ПЗС-камера

**Figure 4** – Principle scheme of device: 1 – laser diode; 2, 19 – Peltier elements; 3, 20 – thermistors; 4 – base; 5 – power supply; 6, 22 – coolers; 7, 23 – power supplies; 8 – optical fiber; 9 – SMA-slot; 10, 13, 15, 26 – alignment tables; 11, 16 – translation stages; 12 – collimation lens; 14 – focusing lens; 17 – studied laser element; 18, 25 – heat sinks; 21 – alignment block of the laser element; 24 – solid-state laser; 27 – laser power supply; 28 – set of neutral filters; 29 – CCD camera

Блок регистрации зондирующего лазерного излучения предназначен для регистрации пространственного профиля пучка зондирующего лазерного излучения, прошедшего через оптически накачиваемый исследуемый лазерный элемент. Он представляет собой ПЗС-матрицу с набором нейтральных светофильтров 28 и систему передачи данных на персональный компьютер.

Все элементы прибора закреплены на массивной металлической плите, препятствующей разъюстировке комплекса в течение времени проведения измерений. Прибор содержит металлическую крышку для защиты оптических элементов от неблагоприятных внешних воздействий.

На рисунке 5 показана оригинальная схема узла крепления и юстировки исследуемого лазерного элемента.

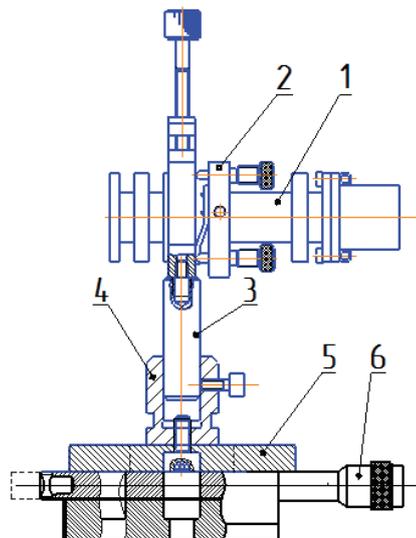


**Рисунок 5** – Схема узла крепления и юстировки исследуемого лазерного элемента: 1 – крепление лазерного элемента; 2 – поворотная микроплатформа; 3 – держатель с боковой регулировкой; 4 – вертикальный транслятор; 5 – транслятор двухкоординатный

**Figure 5** – Scheme of fixation and alignment block for the laser element: 1 – stage for fixing of the laser element; 2 – rotary micro-platform; 3 – holder with a side adjustment; 4 – vertical translation stage; 5 – two-axis translation stage

На рисунке 6 показана оригинальная схема узла крепления источника зондирующего лазерного излучения.

Технические характеристики разработанного прибора приведены в таблице 1.



**Рисунок 6** – Схема узла крепления источника зондирующего лазерного излучения: 1 – радиатор лазера; 2 – юстировочный столик; 3 – стержень; 4 – стакан; 5 – основание; 6 – трансляционная подвижка

**Figure 6** – Scheme of fixation block for the source of probe laser radiation: 1 – heat sink of the laser; 2 – alignment table; 3 – bar; 4 – shell; 5 – basement; 6 – translation stage

Таблица 1 / Table 1

**Технические характеристики разработанного прибора/Technical characteristics of the developed device**

Рабочая длина волны Operating wavelength	0,53 мкм 0,53 μm
Поляризация света Light polarization	линейная Linear
Тип накачки Type of pumping	продольная диодная longitudinal diode
Длина волны накачки Pump wavelength	0,96 мкм 0,96 μm
Радиус пучка накачки в активном элементе, $w_{нак}$ Radius of the pump beam in the active element $w_{pump}$	0,1–1 мм 0,1 – 1 mm
Мощность накачки, $P_{нак}$ Pump power, $P_{pump}$	до 5 Вт up to 5 W
Точность определения М-фактора Precision of determination of M-factor	0,1 м <sup>-1</sup> /Вт 0,1 m <sup>-1</sup> /W
Точность определения степени астигматизма S Precision of determination of the astigmatism degree S	0,2 м <sup>-1</sup> /Вт 0,2 m <sup>-1</sup> /W
Точность определения вклада фотоупругого эффекта Precision of determination of the impact of photoelastic effect	$0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ $0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Точность определения коэффициента тепловыделения Precision of determination of the fractional heat load	0,05 0,05

## Результаты измерений

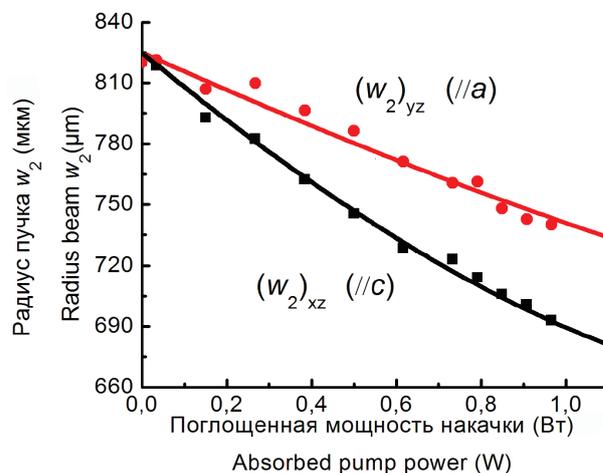
С помощью разработанного прибора были проведены исследования параметров ТЛ в лазерном элементе на основе кристалла иттриевого ванадата  $YVO_4$ , активированного ионами  $Er^{3+}$  (0,7 ат.%) и  $Yb^{3+}$  (3 ат.%). Кристалл  $Er^{3+}, Yb^{3+}:YVO_4$  в настоящее время широко используется в лазерных системах, генерирующих условно безопасное для органов зрения излучение с длиной волны в области 1,5–1,7 мкм [6]. Такие лазеры находят применение, в частности, в дальнометрии, зондировании атмосферы, воздушной навигации, медицине.

Иттриевый ванадат  $YVO_4$  является тетрагональным кристаллом (параметры его кристаллической решетки:  $a = b = 7,1183 \text{ \AA}$ ,  $c = 6,2893 \text{ \AA}$  [6]), что обуславливает анизотропию его оптических свойств: кристалл является оптически одноосным, его оптическая ось параллельна кристаллографической оси [001] (оси  $c$ ). Исследования параметров ТЛ проводились для пластинки лазерного элемента из кристалла  $Er^{3+}, Yb^{3+}:YVO_4$ , вырезанного таким образом, что направление распространения излучения было параллельно кристаллографической оси [100] (оси  $a$ ). При этом вектор напряженности электрического поля линейно поляризованного зондирующего излучения был перпендикулярен кристаллографической оси [001] (оси  $c$ ). Данная поляризация соответствует наибольшим поперечным сечениям вынужденного испускания в кристалле  $Er^{3+}, Yb^{3+}:YVO_4$  [6].

Пластинка лазерного элемента, имевшая толщину 1 мм и поперечные размеры  $5 \times 5$  мм, закреплялась в медном радиаторе, температура которого поддерживалась на уровне  $14^\circ\text{C}$  при помощи элемента Пельтье. Для улучшения теплового контакта между радиатором и лазерным элементом находилась теплопроводящая паста. Пластинка лазерного элемента ориентировался таким образом, что кристаллографическая ось [001] (ось  $c$ ) находилась в сагиттальной ( $xz$ ), а кристаллографическая ось [100] ( $a$ ) – в тангенциальной ( $yz$ ) плоскостях (рисунок 7). Радиусы пучка накачки и зондирующего пучка в области их перекрытия в лазерном элементе составляли соответственно 0,60 мм и 0,24 мм. Радиус зондирующего пучка  $w_1$ , расстояния  $l_1$  и  $l_2$  (рисунок 7) составляли соответственно 0,23 мм, 6 см и 52 см.

На рисунке 7 показана зависимость радиуса зондирующего пучка  $w_2$ , прошедшего через лазерный элемент, от поглощенной мощности накачки  $P_{abs}$ . Увеличение мощности  $P_{abs}$  приводит к сжатию

пучка зондирующего излучения (уменьшению  $w_2$ ), что свидетельствует о положительной (фокусирующей) ТЛ лазерного элемента. При этом сагиттальная ( $xz$ ) и тангенциальная ( $yz$ ) плоскости соответствуют главным меридиональным плоскостям его ТЛ.



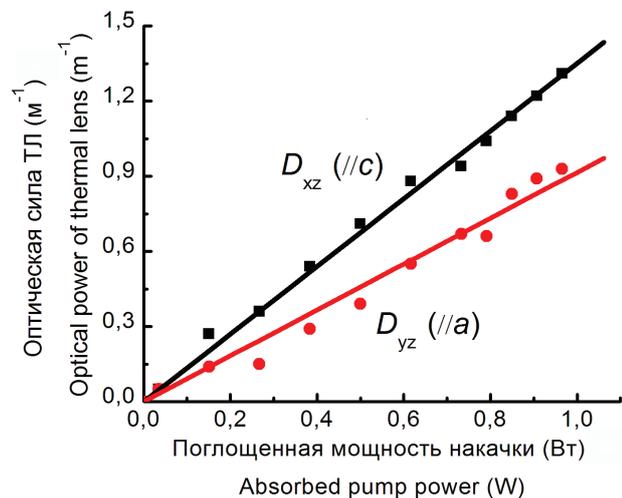
**Рисунок 7** – Зависимость радиуса пучка зондирующего излучения, прошедшего через лазерный элемент из  $Er^{3+}, Yb^{3+}:YVO_4$ , от поглощенной мощности накачки для поляризации света  $E \perp [001]$  ( $c$ ). Точки – эксперимент, линии – расчет по формуле (5)

**Figure 7** – Dependence of radius of the probe radiation passed through the  $Er^{3+}, Yb^{3+}:YVO_4$  laser element on the absorbed pump power for light polarization  $E \perp [001]$  ( $c$ ). Points – experimental data, lines – modeling with Eq.(5)

На рисунке 8 показана зависимость оптической силы ТЛ в лазерном элементе из кристалла  $Er^{3+}, Yb^{3+}:YVO_4$  от поглощенной мощности накачки. В соответствии с формулой (1) данная зависимость описывается прямой линией, выходящей из начала координат. По тангенсу наклона прямых, проведенных через экспериментальные точки на рисунке 8 с помощью метода наименьших квадратов, рассчитаны коэффициенты чувствительности ТЛ к изменению поглощенной мощности накачки, которые составили  $M_{yz} = (0,9 \pm 0,1) \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$  и  $M_{xz} = (1,3 \pm 0,1) \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$ . Соответственно, степень астигматизма ТЛ составляет  $S = |M_A - M_B| = (0,4 \pm 0,2) \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$ .

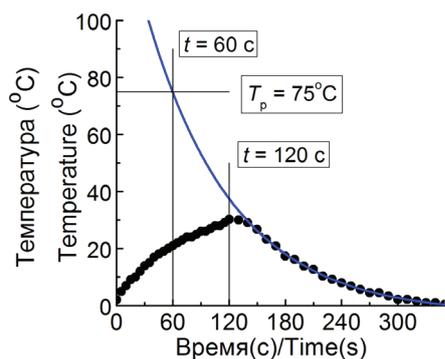
Для измерения коэффициента объемного тепловыделения  $\eta_h$  в исследуемом лазерном материале вначале накачка включалась на промежуток времени  $t_p = 120$  с, в течение которого регистрировалась температура лазерного элемента. Затем накачка отключалась и измерение температуры продолжались в течение 200 с. Данные по зависимости температуры от времени при такой проце-

дуре измерения «включение-отключение» накачки представлены на рисунке 9. Температура  $T_p$  в момент времени  $t = t_p/2$  (формула (6) и пояснения к ней) составила  $75^\circ\text{C}$ . Поглощенная мощность накачки составляла  $P_{abs} = 0,3$  Вт. Значение коэффициента  $\eta_h$ , рассчитанное по формуле (6), составило  $\eta_h = 0,63 \pm 0,05$ .



**Рисунок 8** – Зависимость оптической силы термической линзы для лазерного элемента из  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$  от поглощенной мощности накачки для поляризации света  $E \perp [001]$  (с). Точки – экспериментальные данные, линии – моделирование линейной зависимостью в соответствии с формулой (1)

**Figure 8** – Optical (refractive) power of the thermal lens vs. the absorbed pump power for the  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$  crystal for light polarization  $E \perp [001]$  (c). Points – experimental data, lines – linear fitting in accordance with Eq. (1)



**Рисунок 9** – Зависимость температуры кристалла  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$  от времени: время  $t = 0$  соответствует моменту включения накачки,  $t = 120$  с – отключению накачки

**Figure 9** – Dependence of temperature of the  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$  crystal on time: time  $t = 0$  corresponds to the moment when the pump is switched on,  $t = 120$  s corresponds to the moment when the pump is switched off

При расчете использовались следующие значения констант, входящих в данную формулу:  $m_1 = 0,48$  г;  $c_1 = 0,59$  Дж/г · С (для кристалла лазерного элемента);  $m_2 = 5,0$  мг;  $c_2 = 0,89$  Дж/г · С (для теплопроводящей пасты). Полученное значение коэффициента  $\eta_h = 0,63$  превышает значение, которое дает расчет по квантовому дефекту (см. раздел «Методика измерения» настоящей статьи):  $\eta_h = (1 - \lambda_p/\lambda_g) = (\lambda_c - 0,96 \text{ мкм}/1,54 \text{ мкм}) = 0,38$ . Это свидетельствует о том, что для кристалла  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$  поглощение из возбужденного состояния и кросс-релаксационные процессы вносят существенный вклад в безызлучательную релаксацию энергии возбуждения.

Вклад фотоупругого эффекта  $X_{PHE}$  в ТЛ лазерного элемента определялся по формуле (2) с использованием полученных в данной работе значений коэффициентов чувствительности ( $M_{yz}$  и  $M_{xz}$ ) и коэффициента объемного тепловыделения ( $\eta_h$ ), а также известных в литературе для кристалла иттриевого ванадата значений  $dn/dT$ , «эффективного» коэффициента теплопроводности  $k = (k_o + k_c)/2 = 10,5$  Вт/(м·К) и вклада искажений торцов лазерного элемента  $Y_{DIST}$  в ТЛ [7, 8]. Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

**Вклад различных эффектов\* в формирование термической линзы в кристалле  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$  для поляризации света  $E \perp c$**

**Contribution of different effects to the formation of thermal lens in the  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$  crystal for light polarization  $E \perp c$**

Меридиональная плоскость Meridional plane	$dn/dT$	$X_{PHE}$	$Y_{DIST}$	$\Delta$
(xz),    c	13,8	10,6	2,7	27,1
(yz),    a	13,8	2,0	3,0	18,8

\* $\Delta$  – «обобщенный» термо-оптический коэффициент;  $dn/dT$  – вклад температурной зависимости показателя преломления;  $X_{PHE}$  – вклад фотоупругого эффекта;  $Y_{DIST}$  – вклад искажения торцов активного элемента. Значения всех величин приведены в  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$

\* $\Delta$  – «generalized» thermo-optic coefficient,  $dn/dT$  – contribution of temperature dependence of the refractive index,  $X_{PHE}$  – contribution of the photoelastic effect,  $Y_{DIST}$  – contribution of distortion of endfaces of the active element. All values are in  $10^{-6} \text{ K}^{-1}$

Вклад фотоупругого эффекта  $X_{PHE}$  в ТЛ является положительным и существенно зависит от выбранной меридиональной плоскости, что обуславливает достаточно заметный астигматизм ТЛ.

## Заключение

Разработан прибор для измерения параметров ТЛ в лазерных активных элементах при продольной диодной накачке. Измерения основаны на методе пробного пучка. Прибор позволяет определять знак и оптическую силу ТЛ в главных меридиональных плоскостях, коэффициент чувствительности к изменению поглощенной мощности накачки и степень астигматизма, коэффициент тепловыделения в лазерном материале, что позволяет оценивать интегральный вклад фотоупругого эффекта в ТЛ, наведенную в лазерном элементе. Измерения проводятся в линейно поляризованном свете на длине волны 0,53 мкм. Накачка активного элемента осуществляется на длине волны 0,96 мкм, что позволяет исследовать лазерные среды, активированные и соактивированные ионами иттербия. Точность определения коэффициента чувствительности ТЛ к мощности накачки – 0,1 м<sup>-1</sup>/Вт; степени астигматизма ТЛ – 0,2 м<sup>-1</sup>/Вт; определения коэффициента тепловыделения – 5 %; вклада фотоупругого эффекта в ТЛ – 0,5 × 10<sup>-6</sup> К<sup>-1</sup>. С помощью данного прибора проведены измерения ТЛ в лазерном активном элементе из кристалла иттриевого ванадата Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub>, ориентированного вдоль кристаллографической оси [100] (оси *a*) для поляризации света  $E \perp c$ . Определены коэффициенты чувствительности ТЛ к изменению поглощенной мощности накачки ( $M_{yz} = 0,9$  м<sup>-1</sup>/Вт,  $M_{xz} = 1,31$  м<sup>-1</sup>/Вт), степень астигматизма термической линзы (0,4 м<sup>-1</sup>/Вт), коэффициент тепловыделения в лазерном материале ( $\eta_h = 0,63$ ), вклад фотоупругого эффекта в ТЛ [ $(X_{PHE})_{xz} = 10,6 \times 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>,  $(X_{PHE})_{yz} = 2,0 \times 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>].

## Благодарности

Данные исследования выполнены при финансовой поддержке ГНТП «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» (подпрограмма «Научно-учебное оборудование», задание № 21), а также гранта Президента Республики Беларусь в науке, образовании, здравоохранении, культуре на 2015 год, предоставленного одному из авторов (К.В. Юмашев).

## Список использованных источников

1. *Chenais, S.* On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials / S. Chenais [et al.] // Progress in Quant. Electr. – 2006. – Vol. 30. – P. 89–153.
2. *Loiko, P.A.* Thermo-optic characterization of Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> laser crystal / P. Loiko [et al.] // Opt. Mater. Express. – 2014. – Vol. 4, No. 11. – P. 2241–2249.
3. *Willamowski, U.* Measuring the absolute absorptance of optical laser components / U. Willamowski, D. Ristau, E. Welsh // Appl. Opt. – 1998. – Vol. 37. – P. 8362–8370.
4. *Loiko, P.A.* Anisotropy of the photo-elastic effect in Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser crystals / P.A. Loiko [et al.] // Laser Phys. Lett. – 2014. – Vol. 11. – P. 055002-1–7.
5. *Hodgson, N.* Optical resonators: fundamentals, advanced concepts and applications / N. Hodgson, H. Weber // Springer. – 1997.
6. *Tolstik, N.A.* Spectroscopy, continuous-wave and Q-switched diode-pumped laser operation of Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> crystal / N.A. Tolstik [et al.] // Appl. Phys. B. – 2006. – Vol. 86, No. 2. – P. 275–278.
7. *Loiko, P.A.* Dispersion and anisotropy of thermo-optic coefficients in tetragonal GdVO<sub>4</sub> and YVO<sub>4</sub> laser host crystals: Errata / P.A. Loiko [et al.] // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54, No. 15. – P. 4820–4822.
8. *Yumashev, K.V.* Thermal stresses and end-bulging in the laser disc from a tetragonal [100]-cut crystal / K.V. Yumashev, P.A. Loiko // Laser Physics. – 2015. – Vol. 25, No. 1. – P. 015003-1–9.

# Device for measuring of thermal lens parameters in laser active elements with a probe beam method

Zakharova A.N., Loiko P.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.

Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

Received 21.09.2015

Accepted for publication 03.11.2015

**Abstract.** We have developed a device for measuring of parameters of thermal lens (TL) in laser active elements under longitudinal diode pumping. The measurements are based on the probe beam method. This device allows one to determine sign and optical power of the lens in the principal meridional planes, its sensitivity factor with respect to the absorbed pump power and astigmatism degree, fractional heat loading which make it possible to estimate integral impact of the photoelastic effect to the formation of TL in the laser element. The measurements are performed in a linearly polarized light at the wavelength of 532 nm. Pumping of the laser element is performed at 960 nm that makes it possible to study laser materials doped with  $\text{Yb}^{3+}$  and ( $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Yb}^{3+}$ ) ions. The precision of measurements: for sensitivity factor of TL –  $0,1 \text{ m}^{-1}/\text{W}$ , for astigmatism degree –  $0,2 \text{ m}^{-1}/\text{W}$ , for fractional heat loading – 5 %, for the impact of the photoelastic effect –  $0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . This device is used for characterization of thermal lens in the laser active element from an yttrium vanadate crystal,  $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ .

**Keywords:** thermal lensing, laser active materials, longitudinal diode-pumping, yttrium vanadate crystal.

---

**Адрес для переписки:**

Юмашев К.В.  
Белорусский национальный технический университет,  
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь  
e-mail: kyumashev@bntu.by

**Address for correspondence:**

Yumashev K.V.  
Belarusian National Technical University,  
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus  
e-mail: kyumashev@bntu.by

---

**Для цитирования:**

Захарова А.Н., Лойко П.А., Мальяревич А.М., Юмашев К.В.  
Прибор для измерения параметров термической линзы в лазерных  
активных элементах методом пробного пучка  
Приборы и методы измерений  
2015. – Т. 6, № 2. – С. 127–138

**For citation:**

Zakharova A.N., Loiko P.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.  
Device for measuring of thermal lens parameters in laser active elements  
with a probe beam method  
Devices and Methods of Measurements  
2015, vol. 6, No. 2, pp. 127–138

## Acknowledgments

This study was supported by Belarusian State Scientific and Technical Program «Development and Manufacturing of Etalons, Unique Devices and Set-ups for Scientific Research» (subprogram «Etalons and Scientific Devices», project No. 21) and grant from the President of Republic of Belarus in science, education, public health and culture for the year of 2015 which was awarded to one of the authors (K.V. Yumashev).

## References

1. Chenais, S. On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials / S. Chenais [et al.] // *Progress in Quant. Electr.* – 2006. – Vol. 30. – P. 89–153.
2. Loiko, P.A. Thermo-optic characterization of Yb:CaGdAlO<sub>4</sub> laser crystal / P. Loiko [et al.] // *Opt. Mater. Express.* – 2014. – Vol. 4, No. 11. – P. 2241–2249.
3. Willamowski, U., Measuring the absolute absorptance of optical laser components / U. Willamowski, D. Ristau, E. Welsh // *Appl. Opt.* – 1998. – Vol. 37. – P. 8362–8370.
4. Loiko, P.A. Anisotropy of the photo-elastic effect in Nd:KGd(WO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> laser crystals / P.A. Loiko [et al.] // *Laser Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 11. – P. 055002-1–7.
5. Hodgson, N. Optical resonators: fundamentals, advanced concepts and applications / N. Hodgson, H. Weber // *Springer.* – 1997.
6. Tolstik, N.A. Spectroscopy, continuous-wave and Q-switched diode-pumped laser operation of Er<sup>3+</sup>, Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> crystal / N.A. Tolstik [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2006. – Vol. 86, No. 2. – P. 275–278.
7. Loiko, P.A. Dispersion and anisotropy of thermo-optic coefficients in tetragonal GdVO<sub>4</sub> and YVO<sub>4</sub> laser host crystals: Errata / P.A. Loiko [et al.] // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54, No. 15. – P. 4820–4822.
8. Yumashev, K.V. Thermal stresses and end-bulging in the laser disc from a tetragonal [100]-cut crystal / K.V. Yumashev, P.A. Loiko // *Laser Physics.* – 2015. – Vol. 25, No. 1. – P. 015003-1–9.