
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.01; 62-531.4
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-12-973-978

ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЙ РЕГУЛЯТОР НАПРАВЛЕНИЯ

А. Н. САВРАСОВ, В. В. БИНДЮК

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: s7251523@yandex.ru*

Исследуются термооптические искажения в активном элементе лазера, приводящие к появлению температурных напряжений и деформаций и падению качества выходного излучения. Предлагается компенсировать линейные искажения, варьируя угловое и линейное положение непрозрачного зеркала оптического резонатора лазера при помощи электронно-оптического регулятора направления. Основной особенностью такого регулятора является разработанное устройство управления положением зеркала, содержащее шарнирно закрепленную упругую балку, на консоли которой установлено зеркало резонатора. Деформация балки осуществляется дифференциальным винтовым устройством линейного перемещения. Применение упругой балки позволяет одновременно корректировать угловое и линейное положение зеркала оптического резонатора при использовании одного источника перемещения. Для контроля процесса компенсации разработан соответствующий алгоритм управления.

Ключевые слова: *твердотельный лазер, термооптические искажения, оптический резонатор, температурные напряжения, алгоритм управления.*

Введение. Регулировка направления распространения излучения является важной задачей для многих областей инженерной деятельности. Применительно к лазерной технике эта задача обретает особенно актуальный характер. Лазер — прибор, требующий высокой точности юстировки. Особенностью твердотельного лазера является возникновение во время работы термооптических искажений в активном элементе вследствие неравномерного нагрева, что приводит, например, к появлению температурных напряжений и деформаций. Для лазера с высокооднородной активной средой эти искажения служат основным источником внутрирезонаторных аберраций, которые приводят к существенному падению качества выходного излучения [1].

Постановка задачи. Характер возникающих искажений во многом зависит от схемы накачки лазера, выбранной исходя из его назначения. Лазер с продольной схемой накачки обладает наиболее высокими КПД и стабильностью выходных параметров, однако при реализации такой схемы сложно производить накачку большого объема активного элемента, что крайне затрудняет получение высокой мощности излучения. Поперечная схема накачки, напротив, позволяет выполнять относительно равномерную накачку всего объема активного элемента, что существенно снижает тепловую нагрузку и обеспечивает эффективное масштабирование выходной мощности лазера в широком диапазоне значений [2].

При продольной схеме накачки пластинчатого активного элемента лазера возбуждающее излучение подается на его торцевую поверхность, при этом основные напряжения возникают вдоль оси z [3].

На рис. 1 представлено распределение температурных напряжений по оси z в пластинчатом элементе твердотельного лазера.

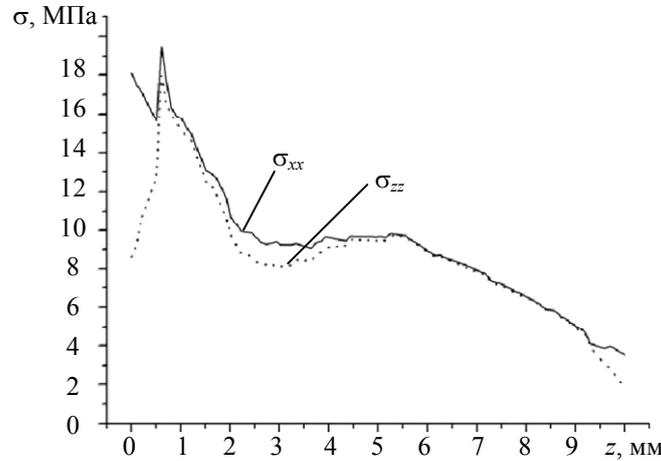


Рис. 1

В общем виде компоненты тензора напряжений, возникающих в этом случае, вычисляются из следующих зависимостей [1]:

$$\sigma_{xx} = f_1(\alpha'_x, \alpha'_z, \nu, E, T'), \quad (1)$$

$$\sigma_{zz} = f_2(\alpha'_x, \alpha'_z, \nu, E, T'), \quad (2)$$

$$\sigma_{yy} = 0, \quad (3)$$

где α'_x и α'_z — коэффициенты температурного расширения материала вдоль осей X и Z соответственно, ν — коэффициент Пуассона, E — модуль I рода, $T'(y, z)$ — функция распределения температуры внутри активного элемента. Третий компонент тензора напряжений равен нулю, так как в рассматриваемом случае величина перепада температуры по оси Y пренебрежимо мала. При поперечной схеме накачки возбуждающее излучение подается на верхнюю поверхность активного элемента, поэтому возникает его односторонний нагрев, приводящий к появлению клиновых деформаций. Деформации становятся причиной отклонения торцевой поверхности активного элемента от нормали и возникновения оптического клина (разъюстировки). При разъюстировке лазерного резонатора резко возрастают оптические потери, приводящие к повышению порога генерации и снижению уровня энергии выходного излучения лазера. Формула для расчета потерь, связанных с разъюстировкой резонатора, имеет вид [4]:

$$\Delta = 1 - \exp(-2,3 \cdot 10^{-2} \beta \sqrt{L}), \quad (4)$$

где β — угол отклонения от вертикали (в угловых секундах), L — длина резонатора твердотельного лазера. Причина столь резкого возрастания потерь заключается в том, что за один проход луч отклоняется от первоначального направления на угол 2β и быстро выходит за пределы резонатора. Следовательно, необходимо компенсировать влияние термооптических искажений на направление распространения излучения в твердотельном лазере путем регулировки взаимного расположения его оптических поверхностей.

Существует большое количество методов снижения влияния термооптических искажений на характеристики лазерного излучения, однако ни один из них не обеспечивает в полной мере решения поставленной задачи [1]. В большинстве методов используется подбор оптимальных параметров активного элемента, расчет схемы накачки, выбор системы охлаждения и т.д. Однако на практике применения таких методов недостаточно для полной компенсации искажений оптического пути, что вызывает необходимость применения регулирующих устройств.

Типичным средством компенсации меняющихся во времени искажений являются адаптивные деформируемые зеркала [5]. Наиболее распространены деформируемые зеркала с биморфными пьезоактюаторами, с пьезоактюаторами толкательного типа, электромеханические (MEMS-структуры) и т.д. Однако деформируемые зеркала обладают рядом недостатков, таких как высокое управляющее напряжение, жесткие требования к его частоте, сложность конструкции и низкое быстродействие.

Исследования. Для оптимизации процесса компенсации термооптических искажений в активном элементе твердотельного лазера предлагается регулировать угловое и линейное положение непрозрачного зеркала оптического резонатора. В результате проведенных исследований была предложена схема электронно-оптического регулятора (рис. 2), разработаны устройство управления положением непрозрачного зеркала [6] и соответствующий алгоритм управления.

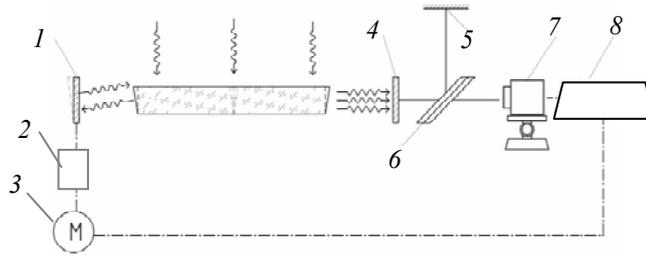


Рис. 2

Приведенная на рис. 2 схема электронно-оптического регулятора обеспечивает компенсацию разбюстировки оптического резонатора лазера и функционирует следующим образом. Излучение источника накачки падает на верхнюю поверхность активного элемента лазера, возбуждая в нем вынужденное излучение. Часть излучения, усиленного резонатором, выходит через полупрозрачное зеркало 4 в виде полезного сигнала, а часть отражается обратно в резонатор.

В процессе измерения уровня энергии часть полезного излучения пропускается светоделителем 6 на фотоприемник 7 (оставшееся излучение отводится на мишень 5), сигнал с фотоприемника анализируется средством обработки данных 8 и передается на сервопривод 3, который приводит в движение устройство управления 2 положением непрозрачного зеркала 1, восстанавливая тем самым максимальный уровень полезного сигнала.

Устройство управления положением зеркала (рис. 3) представляет собой передаточный механизм, предназначенный для регулировки линейного и углового положения зеркала 1, закрепленного на консоли упругой балки 2. Балка прямоугольного поперечного сечения деформируется при вращении дифференциального винта в плоскости наименьшей жесткости от усилия, вызванного осевым перемещением ползуна с гайкой 3, шарнирно-связанного с центром пролета балки. Винт имеет две последовательные резьбовые ступени: $M_1 \times P_1$ и $M_2 \times P_2$.

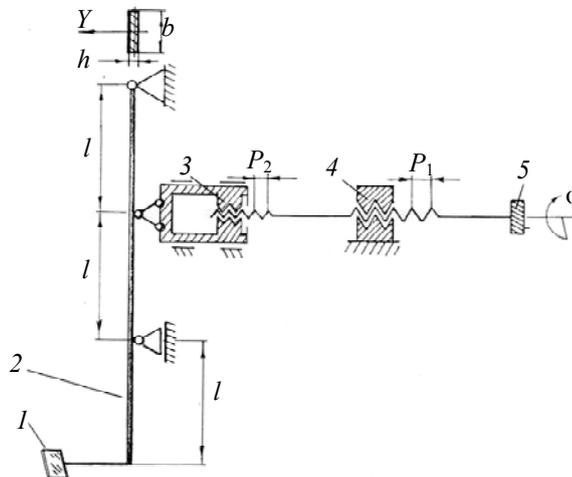


Рис. 3

Перемещение ползуна 3 передаточного механизма за один оборот дифференциального ходового винта составит

$$\Delta y = (P_1 - P_2) \frac{\Phi}{360^\circ}. \quad (5)$$

Прогиб балки 2 в центре пролета от смещения шарнира ползуна при $x_1=l$ мм будет $y=-\Delta y$. Знак минус в этой системе координат обусловлен перемещением ползуна 3 навстречу поступательному движению винта 5, который вворачивается в резьбовой кронштейн 4 по ходу часовой стрелки.

Далее необходимо определить зависимость угла поворота зеркала от параметров упругой балки:

— для первого участка

$$EI_z y = \frac{N}{2} \frac{x_1^3}{6} + c_1 x_1 + D_1, \quad (6)$$

— для второго участка

$$EI_z y = \frac{N}{2} \frac{x_2^3}{6} - N \frac{(x_2 - l)^3}{6} c_2 x_2 + D_2. \quad (7)$$

В соответствии с граничными условиями закрепления балки:

— при $x_1=0 \rightarrow y=0$ из уравнения (6) получим $D_1=0$,

— при $x_2=2l \rightarrow y=0$ из уравнения (7) получим $C_2=-1/4(Nl^2)$.

Из уравнения (7) прогиб балки в центре пролета от сосредоточенной силы N при $x_1=l$

$$y = -Nl^3 / (6EI_z). \quad (8)$$

При назначенном смещении $y=0,15$ мм из выражения (8) получим величину сосредоточенной силы

$$N = \frac{6y}{l^3} EI_z, \quad (9)$$

откуда

$$I_z = \frac{bh^3}{12}. \quad (10)$$

Угол поворота зеркала, закрепленного на конце консоли, получим из уравнения угла поворота для третьего участка при $x_3=3l$

$$\gamma = \frac{Nl^2}{4EI_z}. \quad (11)$$

Предложенное устройство компенсации имеет допустимую основную погрешность [6]. Особенность устройства управления состоит в том, что траекторией движения зеркала является дуга окружности, за счет этого появляется возможность корректировки углового и линейного положения зеркала одним источником перемещения.

В блок-схеме алгоритма управления (рис. 4) условно можно выделить две части. Левая часть выполняется однократно при включении лазера и представляет собой цикл поиска углового положения зеркала γ_{\max} , находящегося в заданном диапазоне n, \dots, m и соответствующего максимальному уровню энергии выходного излучения лазера E_{\max} . Затем полученные значения E_{\max} и γ_{\max} запоминаются средством обработки данных (e — текущий уровень энергии лазерного излучения).

Правая часть алгоритма выполняется при изменении углового положения торцевой поверхности активного элемента $\Delta\beta$, вызывающем отклонение текущего уровня энергии e от максимального значения. После регистрации изменения e происходит корректировка углово-

го положения непрозрачного зеркала γ_{\max} , что приводит к восстановлению максимального значения текущего уровня энергии $e = E_{\max}$. При разработке алгоритма предполагалось, что величина термооптических искажений строго возрастающая, поэтому возможность уменьшения угла наклона зеркала предусмотрена только при выходе значения углового положения γ_{\max} за пределы заданного диапазона n, \dots, m . В этом случае γ_{\max} возвращается к значению n .

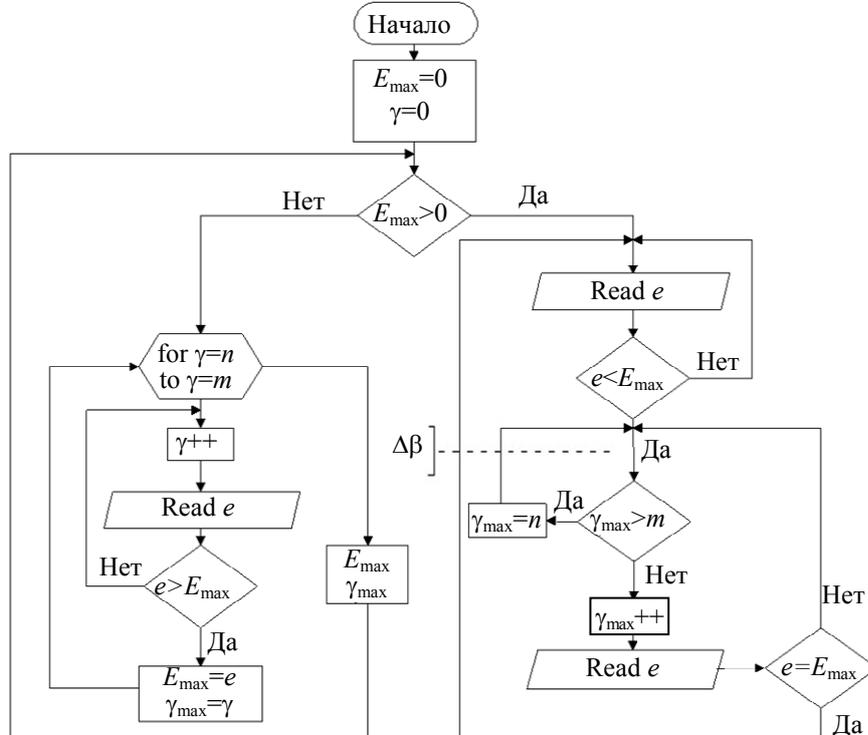


Рис. 4

Заключение. В рамках исследования проанализированы основные схемы накачки и методы снижения влияния термооптических искажений на выходные характеристики твердотельного лазера. Предложен способ компенсации линейных искажений с помощью электронно-оптического регулятора направления. Для контроля процесса компенсации разработан соответствующий алгоритм управления. В дальнейшем планируется доработка устройства управления положением зеркала с целью увеличения числа степеней свободы, что, в свою очередь, приведет к повышению эффективности использования рассмотренного регулятора направления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Koechner W. Solid-State Lasers. NY: Springer-Verlag, 2003. 409 p.
2. Гречин С. Г., Николаев П. П. Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 1. С. 1—17.
3. Zhe Ma, Daijun Li, Jiancun Gao, Nianle Wu, Keming Du. Thermal effects of the diode end-pumped Nd:YVO₄ slab // Optics Communications. 2007. N 275. P. 179—185.
4. Eichhorn M. Thermo-optical model for Er:YAG gain media // Laser Source Technology for Defense and Security. 2007. N 4. P. 198—208.
5. Алиханов А. Н., Берченко Е. А. Деформируемые зеркала для силовых лазерных систем // Адаптивная оптика. 2008. № 3. С. 54—58.
6. Саврасов А. Н. Разработка модели управления движением зеркала резонатора твердотельного лазера // Сб. тр. III Всерос. конгресса молодых ученых. СПб: Университет ИТМО, 2014. С. 131—135.

- Александр Николаевич Саврасов** — *Сведения об авторах*
аспирант; Университет ИТМО; кафедра мехатроники;
E-mail: s7251523@yandex.ru
- Владимир Владимирович Биндюк** —
канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра мехатроники;
E-mail: мехатроники; E-mail: s7251523@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
мехатроники

Поступила в редакцию
14.01.15 г.

Ссылка для цитирования: Саврасов А. Н., Биндюк В. В. Электронно-оптический регулятор направления // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 973—978.

ELECTRO-OPTICAL CONTROLLER OF DIRECTION

A. N. Savrasov, V. V. Bindyuk

ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia
E-mail: s7251523@yandex.ru

Thermo-optical inhomogeneities in active element of solid-state laser responsible for thermal stress and deformation as well as disturbances in generated radiation are studied. It is proposed to compensate for linear distortion by means of variations in angular and spatial position of opaque mirror in the laser cavity with electro-optical direction regulator. A special feature of the regulator is application of a device designed for control over the mirror position. The device contains a hinged elastic beam with a console bearing the cavity mirror; the beam deformation is performed by a differential screw device of linear movement. Application of the elastic beam makes it possible to correct simultaneously angular and linear position of the mirror with the use of a single transfer origin. An algorithm is developed for the control over the electro-optical direction regulator.

Keywords: solid-state laser, thermo-optical distortions, laser cavity, thermal stress, control algorithm.

Data on authors

- Alexander N. Savrasov** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Mechatronics; E-mail: s7251523@yandex.ru
- Vladimir V. Bindyuk** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Mechatronics; E-mail: s7251523@yandex.ru

For citation: Savrasov A. N., Bindyuk V. V. Electro-optical controller of direction // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 12. P. 973—978 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-12-973-978