

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ТЕРМООПТИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ В АКТИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА

В. В. БИНДЮК

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

Исследование направлено на оптимизацию рабочих параметров твердотельного лазера приведением процесса компенсации термооптических искажений в активном элементе к состоянию наибольшей эффективности. Под компенсацией термооптических искажений понимается компенсация смещения оптической оси лазера, а также устранение неравномерного распределения оптической длины пути излучения по сечению пучка. Как причина подобных явлений рассматривается наличие градиента температуры в активном элементе лазера. Проанализированы методы компенсации термооптических искажений, предложена их классификация по видам компенсируемых искажений.

Ключевые слова: *твердотельный лазер, активный элемент, термооптические искажения, адаптивная оптика*

Введение. Активный элемент твердотельного лазера выполнен из диэлектрических кристаллов либо стекол, активированных ионами редкоземельных металлов или ионами группы железа [1, 2]. Такой тип лазеров обладает рядом уникальных характеристик [3], но его негативной особенностью является наличие термооптических искажений в активном элементе, приводящих к существенному ухудшению выходных характеристик лазера [4].

Термооптические искажения (ТОИ) возникают из-за неравномерного нагрева активного элемента лазера и выражаются в неравномерном распределении оптической длины пути излучения по сечению активного элемента лазера. При этом чем ниже теплопроводность материала активного элемента, тем сильнее воздействие данных искажений на выходные характеристики лазера. Поэтому ТОИ наиболее существенны для твердотельных лазеров. Считается [5], что определить характер ТОИ и эффективно снизить влияние их распределения внутри объема активного элемента можно на стадии разработки лазера. Однако и на стадии эксплуатации воздействие ТОИ на параметры выходного излучения остается ощутимым [6]. Это приводит к необходимости использовать различные методы компенсации ТОИ, в основе которых лежит применение тех или иных устройств.

В большинстве случаев под компенсацией ТОИ понимается устранение смещения оптической оси лазера либо неравномерного распределения оптической длины пути излучения по сечению пучка. Характер распределения и величина ТОИ зависят от конструкции лазера, поэтому методы компенсации различаются как принципом действия, так и способами управления и размещения корректирующих устройств.

Классификация методов компенсации термооптических искажений. Изменение оптической длины пути излучения при изменении температуры материала активного элемента лазера обусловлено температурной зависимостью коэффициента преломления материала и возникновением температурных напряжений в материале активного элемента [7]. Изменение оптической длины пути в элементарном объеме определяется как [1]:

$$\Delta L = a(\Delta n + (n_0 - 1)\varepsilon_{ij}), \quad (1)$$

где a — длина элементарного объема вдоль соответствующей оси, n_0 — коэффициент преломления среды при начальной температуре, Δn — изменение коэффициента преломления,

обусловленное температурным фактором, ε_{ij} — соответствующий компонент тензора температурных напряжений.

Из выражения (1) следует, что распределение оптических неоднородностей напрямую связано с распределением температуры. Схема накачки и способ охлаждения твердотельного лазера определяют градиент температуры внутри объема активного элемента. Так, при односторонней схеме накачки наиболее заметно проявляются линейные ТОИ. Разные по знаку температурные напряжения со стороны элемента накачки и со стороны радиатора в материале активного элемента вызывают угловые деформации, приводящие к смещению оптической оси лазера.

При относительно равномерном нагреве в активном элементе возникает так называемая тепловая линза. Такая форма искажений обусловлена тем, что основное тепловыделение в этом случае возникает в центре активного элемента, а его края имеют более низкую температуру. При этом, в соответствии с выражением (1), оптическая длина пути в центре активного элемента больше, чем на его краях, в результате форма выходного излучения лазера будет, как после прохождения выпуклой линзы.

На рис. 1 предложен алгоритм выбора метода компенсации ТОИ.

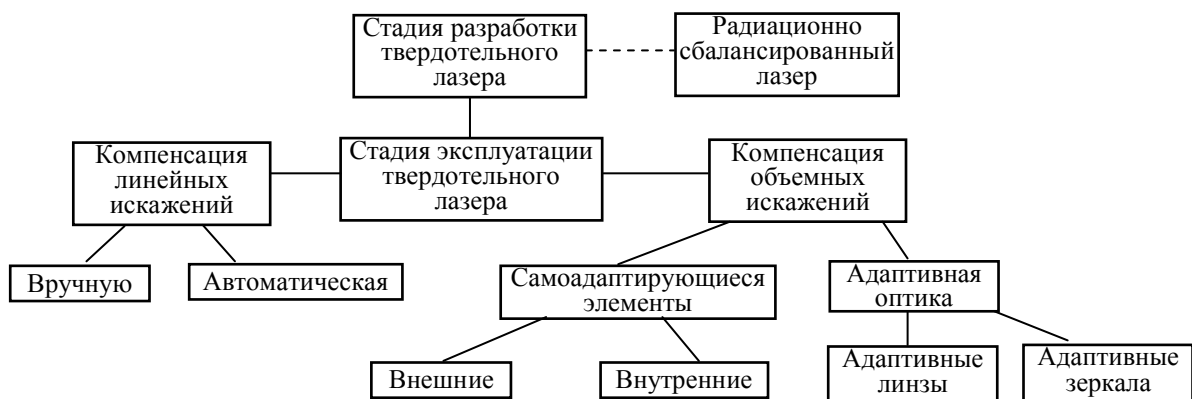


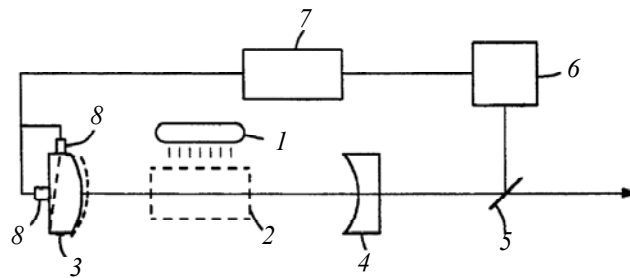
Рис. 1

Эффективность снижения влияния ТОИ во многом зависит от конструктивных решений, принятых при проектировании, а также от материала активного элемента лазера. Так, активный элемент радиационно сбалансированного лазера [8—10] содержит примесь двух видов ионов, тогда как активный элемент классического твердотельного лазера активирован только одной. Как и в обычном лазере, за счет ионов основной примеси возникает вынужденное излучение, которое усиливается в резонаторе и становится выходным излучением лазера, этот процесс сопровождается выделением тепла. При этом на ионах второй примеси реализуется антистоксов механизм охлаждения. Подбором ряда параметров в таком лазере теоретически возможно обеспечить равномерное распределение температуры во всем объеме активного элемента, что привело бы к полному устранению ТОИ. Расчет модели радиационно сбалансированного лазера основан на ряде серьезных допущений и на данный момент создание прототипа такого лазера считается нереализуемым.

Компенсация линейных ТОИ. При компенсации линейных искажений, используя перемещения оптических элементов лазера друг относительно друга, добиваются сохранения начального взаимного расположения их оптических поверхностей и оптической длины пути излучения. Примером может служить схема компенсации линейных ТОИ [11] (рис. 2).

Компенсация ТОИ осуществляется следующим образом. Излучение элемента накачки 1 падает на верхнюю поверхность активного элемента лазера 2, возбуждая в нем вынужденное излучение. Это излучение усиливается резонатором, состоящим из непрозрачного 3 и полупрозрачного 4 зеркал. Затем часть излучения выходит через полупрозрачное зеркало в виде полезного излучения, а часть — отражается обратно в резонатор для поддержания дальнейшей

генерации. При возникновении тепловых деформаций в активном элементе происходит разъюстировка лазерного резонатора, что, в свою очередь, приводит к снижению уровня энергии выходного излучения.



Коэффициент падения уровня энергии выходного излучения [1] можно вычислить по выражению:

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

где α — угол деформации активного элемента, L — длина резонатора твердотельного лазера.

При снижении уровня энергии лазера часть полезного излучения отводится светоделительным элементом 5 на фотоприемник 6, сигнал с фотоприемника обрабатывается средством обработки данных 7 и передается на устройство управления положением непрозрачного зеркала 8, приводящее в движение непрозрачное зеркало резонатора 3, при этом восстанавливается начальное взаимное расположение оптических поверхностей активного элемента 2 и непрозрачного зеркала резонатора 3.

Схемы методов компенсации линейных ТОИ различаются строением лазерного резонатора и числом корректируемых элементов. Принципиально методы компенсации линейных искажений различаются источниками движения устройства управления положением оптических элементов [12]: существуют устройства с ручным и с автоматизированным управлением. При ручной компенсации ТОИ для управления положением оптических элементов применяются различные передаточные механизмы, автоматизированное управление производится, например, пьезоактуаторами.

Компенсация объемных ТОИ. В основе метода компенсации объемных искажений лежит создание на компенсирующем устройстве профиля искажений, повторяющего профиль ТОИ в активном элементе, но с обратным знаком. При таком подходе профили искажений взаимно компенсируются, и их влияние на параметры выходного излучения минимизируется.

Компенсирующие устройства можно разделить на неуправляемые (самоадаптирующиеся) и управляемые (адаптивная оптика). В свою очередь, самоадаптирующиеся устройства могут быть внутррезонаторными (внутренними) и внешнерезонаторными (внешними) [13—19]. Такие устройства могут быть представлены слоем жидкости либо стекла. Оба типа устройств обладают схожим принципом действия: состав среды компенсирующего элемента подбирается таким, чтобы коэффициент преломления имел другой знак. Далее компенсирующий элемент поглощает либо часть генерируемого излучения, либо часть излучения накачки, что позволяет создать в нем профиль распределения температуры, повторяющий профиль распределения температуры в активном элементе. При прохождении излучения через такое устройство разность оптической длины пути излучения по сечению пучка стремится к минимуму.

К преимуществам самоадаптирующихся элементов можно отнести способность функционирования без электронной системы управления, высокую эффективность компенсации и относительно низкую стоимость. Недостатками являются: потеря мощности выходного излучения лазера, увеличение массы и размеров лазера, изменение параметров накачки и т.д.

Управляемые средства компенсации ТОИ можно разделить на адаптивные зеркала и адаптивные линзы. Оптическая сила адаптивных линз [20—22] меняется посредством изме-

нения радиуса кривизны поверхности линзы. Такие линзы устанавливаются на пути выходного излучения лазера и служат для компенсации тепловой линзы, возникающей в активном элементе при работе лазера. Современные адаптивные линзы чаще всего состоят из двух прозрачных мембран, между которыми находится оптическая жидкость. Мембраны спаяны по периметру и прикреплены к пьезокерамическим пластинам. Для коррекции радиуса кривизны поверхности линзы на пьезокерамические пластины подается соответствующая разность потенциалов, что приводит к деформации мембран и изменению толщины слоя жидкости между ними. Недостатками применения адаптивных линз для компенсации ТОИ являются невозможность компенсации сложных по структуре искажений и существенное ограничение мощности лазерного излучения вследствие высокого коэффициента поглощения материала линзы.

Применение адаптивных зеркал лишено вышеприведенных недостатков [23—31]. Этот способ компенсации ТОИ состоит в замене обычного непрозрачного зеркала лазерного резонатора адаптивным. Форма отражающей поверхности адаптивного зеркала может быть локально изменена. По тыльной стороне отражающей поверхности адаптивного зеркала распределен массив актуаторов, деформирующий соответствующий участок отражающей мембраны. Адаптивные зеркала различаются конструкцией актуаторов, которая определяет размеры, массу, быстродействие, энергопотребление и стоимость зеркала. В качестве актуаторов в таких зеркалах чаще всего применяются пьезокерамические пластины, пьезоактуаторы толкательного типа, массивы электродов, оказывающие электромагнитное воздействие на отражающую мембрану и т.д. К недостаткам адаптивных зеркал следует отнести высокую стоимость, необходимость использовать сложное вспомогательное оборудование — блоки питания и управления, приемники излучения, локальные системы охлаждения.

Компенсировать линейные ТОИ позволяет адаптивное устройство твердотельной лазерной установки [32]. При этом принципиальная схема компенсации линейных искажений (см. рис. 2) остается неизменной. Отличительной особенностью устройства является возможность одновременного углового и линейного перемещения непрозрачного зеркала лазерного резонатора относительно начального положения, при этом дискретность его перемещений и быстродействие сопоставимы с аналогичными параметрами устройств с пьезоактуаторами.

Заключение. Проведенный анализ подтвердил, что появление ТОИ вызвано неравномерным распределением температурных полей в материале активного элемента лазера. Из-за низкой теплопроводности материала не представляется возможным предотвратить появление градиента температуры в активном элементе лазера, следовательно, ТОИ неизбежны, что приводит к необходимости их компенсации с помощью разного рода компенсирующих устройств. В приведенных зарубежных работах методы компенсации ТОИ базируются на введении в конструкцию лазера самоадаптирующихся элементов, изменяющих рабочие параметры лазера. Наиболее распространенным на данный момент решением задачи компенсации ТОИ является внедрение в конструкцию лазера адаптивного зеркала. Компенсация линейных искажений с помощью адаптивных зеркал в ряде случаев нецелесообразна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мезенов А. В., Сомс Л. Н., Степанов А. И. Термооптика твердотельных лазеров. Л.: Машиностроение, 1986. 198 с.
2. Koehnner W. Solid-State Laser Engineering. NY: Springer, 2006. 765 p.
3. Кравцов Н. В. Основные тенденции развития твердотельных лазеров с полупроводниковой накачкой // Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 8. С. 661—677.
4. Гречин С. Г., Николаев П. П. Квантроны твердотельных лазеров с поперечной полупроводниковой накачкой // Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 1. С. 1—17.

5. Глухих И. В., Димаков С. А., Курунов Р. Ф., Поликарпов С. С., Фролов С. В. Мощные твердотельные лазеры на Nd:YAG с поперечной диодной накачкой и улучшенным качеством излучения // ЖТФ. 2011. Т. 81, № 8. С. 70—75.
6. Zenie H. H., Knights M. G., Mosto J. R., Chicklis E. P., Perkins P. E. Scalable Diode Array Pumped Nd-Rod Laser // Technical Digest. Advanced Solid-State Lasers. 1990. P. 257—272.
7. 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.
8. Петрушкин С. В., Самарцев В. В. Лазерное охлаждение твердых тел. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 224 с.
9. Nemova G., Kashyap R. Yb³⁺-doped fiber laser with integrated optical cooler // SPIE. 2010. Vol. 7686. P. 14—20.
10. Mu Zhou, Xiao Feng Wang, Ji Chun Tan. Feasibility analysis of radiation balanced laser // Optics Communications. 2009. Vol. 282. P. 1841—1846.
11. Pat. US 5121405 A. Alignment control system for lasers / D. K. Negus. 09.06.1992.
12. Саврасов А. Н., Биндюк В. В. Электронно-оптический регулятор направления // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 973—978.
13. Scaggs M., Haas G. Thermal lensing compensation optics for high power lasers // Laser Resonators and Beam Control XIII. 2011. Vol. 7913. P. 105—114.
14. Piehler S., Thiel C., Voss A., Abdou Ah. M., Graf T. Self-compensation of thermal lensing in optics for high-brightness solid-state lasers // SPIE. 2012. Vol. 8239. P. 114—123.
15. Graf T., Weber R., Wyss E., Weber H. P. Self-adapting thermal lens to compensate for the thermally induced lens in solid-state lasers // SPIE. 2000. Vol. 3930. P. 123—128.
16. Graf T., Wyss E., Roth M., Weber H. P. Compensation of thermal lenses in high-power solid-state lasers // SPIE. 2003. Vol. 5137. P. 18—27.
17. Roth M. S., Graf T., Weber H. P. Self-adaptive compensation of thermal lenses in an end-pumped Nd:YAG laser // SPIE. 2003. Vol. 5147. P. 236—242.
18. Jang W. K., Shin S. S., Lee S. Compensation of thermal lensing effect and TEM₀₀ mode generation in cw Nd:YAG laser // SPIE. 2003. Vol. 5175. P. 208—215.
19. Jie Lia, Xiqu Chen. Aberration compensation of laser mode using a novel intra-cavity adaptive optical system // Optik. 2013. Vol. 124. P. 272—275.
20. Kelly T.-L., Naumov A. F., Loktev M. Yu., Rakhmatulin M. A., Zayakin O. A. Focusing of astigmatic laser diode beam by combination of adaptive liquid crystal lenses // Optics Communications. 2000. Vol. 181. P. 295—301.
21. Ono H., Yoshida M., Morisaki T. Characteristics of optically controllable focusing lens generated in guest-host liquid crystals // Optics Communications. 2002. Vol. 211. P. 309—312.
22. Eberlea G., Chirona V., Wegener K. Simulation and realization of a focus shifting unit using a tunable lens for 3D laser material processing // Physics Procedia. 2013. Vol. 41. P. 441—447.
23. Шанин О. И. Адаптивные оптические системы в импульсных мощных лазерных установках. М.: Техносфера, 2012. 200 с.
24. Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Филатов А. А. Адаптивная оптика. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 297 с.
25. Алиханов А. Н., Берченко Е. А. Деформируемые зеркала для силовых лазерных систем // Лазерно-оптические системы и технологии. 2009. С. 54—58.
26. Канев Ф. Ю., Лукин В. П. Адаптивная оптика. Численные и экспериментальные исследования. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2005. 250 с.
27. Lefaudeux N., Levecq X., Dovillaire G., Ballesta J., Lavergne E., Sauvageot P., Escolano L. Development of a new technology of deformable mirror for ultra intense laser applications // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2011. Vol. A 653. P. 164—167.
28. Miks A., Novak J., Novak P. Theoretical analysis of imaging properties of a pressure-actuated deformable mirror for adaptive compensation of rotationally symmetrical wavefronts // Optics and Lasers in Engineering. 2011. Vol. 49. P. 1268—1273.

29. Xingkun Ma, Lei Huang, Mali Gong, Qiao Xue. Trans-reflection thermal driven deformable mirror with flexible bonding in high energy laser system // Optics Communications. 2014. Vol. 326. P. 166—169.
30. Ping Yang, Yuan Liu, Wei Yang, Ming-Wu Ao, Shi-Jie Hu, Bing Xu, Wen-Han Jiang. Adaptive mode optimization of a continuous-wave solid-state laser using an intracavity piezoelectric deformable mirror // Optics Communications. 2007. Vol. 278. P. 377—381.
31. Александров А. Г., Завалова В. Е., Кудряшов А. В., Панченко В. Я., Рукосуев А. Л., Самаркин В. В. Адаптивная оптика для мощных лазеров со сверхкороткими импульсами излучения // Фотоника. 2007. Т. 6. С. 16—20.
32. Пат. 2626732 РФ. Твердотельная лазерная установка / А. Н. Саврасов, В. В. Биндюк. 31.07. 2017.

Сведения об авторе

Владимир Владимирович Биндюк — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра мехатроники;
E-mail: bvvspb@yandex.ru

Поступила в редакцию
21.11.17 г.

Ссылка для цитирования: Биндюк В. В. Методы компенсации термооптических искажений в активном элементе твердотельного лазера // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т. 61, № 2. С. 100—105.

**METHODS OF COMPENSATION OF THERMO-OPTICAL DISTORTIONS
IN ACTIVE ELEMENT OF SOLID-STATE LASER****V. V. Bindyuk**

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

An approach to optimization of operational parameters of solid-state laser by means of maximization of compensation of thermo-optical distortions in the laser active element is discussed. Compensation of thermo-optical distortions is understood as compensation for the displacement of the laser optical axis, as well as elimination of the nonuniform distribution of the optical path length along the beam cross-section. As a cause of such phenomena, the presence of a temperature gradient in the active element of the laser is considered. The known methods for compensating the thermo-optical distortions are analyzed, a classification of the method according to the types of compensated distortions is proposed.

Keywords: solid-state laser, active element, thermos-optical distortion, adaptive optics

Data on author

Vladimir V. Bindyuk — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Mechatronics; E-mail: bvvspb@yandex.ru

For citation: Bindyuk V. V. Methods of compensation of thermo-optical distortions in active element of solid-state laser. *Journal of Instrument Engineering*. 2018. Vol. 61, N 2. P. 100—105 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2018-61-2-100-105