

宽谱平面阵列激光器的设计与实现

闫立华,程义涛,张厚博

(中国电子科技集团公司第十三研究所,河北 石家庄 050057)

摘要:在二极管泵浦的固体激光器中,由于泵源的输出波长具有温漂特性,造成了与激光晶体吸收光谱的匹配性问题,使得泵浦效率降低,影响固体激光器的输出能量。为了避免该影响,项目组采用拓宽发射光谱覆盖范围的设计思路,开展了宽光谱平面阵列的研制工作。本文分别完成了6芯平面阵列的建模、阵列中心波长的设计、以及基于高斯光谱模型的双波长叠加的仿真工作;同时采用(2.0 nm、2.4 nm、2.8 nm、3.2 nm)四个波长间隔的芯片进行了实验验证。结果表明:在波长间隔为2.0 nm和2.4 nm时,叠加后光谱呈现单一峰状态;在波长间隔为2.8 nm和3.2 nm时,叠加光谱呈现峰谷分布,相应峰谷比的测试值分别为1.03和1.14,设计仿真与实验结果基本一致。本文为宽光谱阵列激光器非温控泵浦结构的量化计算提供了思路。

关键词:激光阵列;波长叠加;热仿真;宽温工作;峰谷比

中图分类号:TN248 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.009

Design and fabrication of wide-spectrum diode array

YAN Li-hua, CHENG Yi-tao, ZHANG Hou-bo

(The 13th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050057, China)

Abstract: In diode-pumped solid-state lasers, the matching degree between the output wavelength of the pump source and the absorption spectrum of the laser crystal is caused by the thermal drift characteristic, which reduces the pumping efficiency and affects the laser output energy. In order to avoid this influence, the project team adopted the design idea of broadening the coverage range of emission spectrum, and carried out the wide-spectrum diode array. This paper completed the modeling of 6-chips planar array, the design and simulation of array center wavelength, and the design and simulation of dual-wavelength superposition based on Gaussian spectral model. At the same time, the chip with four wavelength intervals of 2.0 nm, 2.4 nm, 2.8 nm and 3.2 nm was verified experimentally. The results show that when the wavelength interval is 2.0 nm and 2.4 nm, the spectra shows one single peak after superposition. When the wavelength spacing is 2.8 nm and 3.2 nm, the spectra after superposition shows peak-valley distribution, and the corresponding peak-valley ratio test values are 1.03 and 1.14, respectively. The design simulation results are basically consistent with the experimental results. This paper provides an idea for the quantitative calculation of the non-temperature controlled pump structure of a wide spectrum array laser.

Keywords: laser array; wavelength superposition; thermal simulation; wide temperature operation; peak-to-valley ratio

基金项目:国家重点研发计划项目(No. 2020YFB1805903)资助。

作者简介:闫立华(1980-),男,硕士,高级工程师,研究方向为半导体激光器设计、半导体泵浦的固体激光器设计应用。

E-mail: yanlihua_cetc@163.com

收稿日期:2023-04-10

1 引言

二极管泵浦的固体激光器由于其自身的功率、体积、重量、性能优势,已广泛应用于激光测距、激光引燃、激光照射、激光高能装备等军事或工程领域^[1]。目前此类激光器存在诸多增益晶体类型,以实现连续和脉冲模式激光运转,其中 Nd:YAG 晶体具有较高的量子效率、较大的受激辐射截面、优良的光机性能等的优点,成为应用广泛的激光晶体^[2-3]。但是,由于二极管存在温漂特性,激光晶体 Nd:YAG 吸收峰谱宽相对比较窄,在 808 nm 附近的高吸收峰处谱宽仅为 2~3 nm,这将导致固体激光器在工作温度变化过程中出现发射波长和吸收波长的匹配性问题^[4-5]。针对这一问题的解决有主动控温技术、二极管芯片波长锁定技术、多波长宽谱泵浦设计技术等不同的技术方案^[6]。其中主动控温存在体积、功耗以及控温精度问题,波长锁定二极管的泵浦功率、成本以及仍然存在的波长漂移依旧是非控温泵浦激光器的限制因素。因此本文重点研究多波长宽谱泵浦的阵列设计方案。该方案在获得较大动态温度变化范围内泵浦“平顶发射峰”与晶体“窄带吸收峰”始终匹配效果的同时,具备易小型化、轻量化、成本折中的应用优势,在提升激光器系统稳定性上具有重要意义。

国内外多家机构针对非控温泵浦固体激光器系统进行了不同程度的研究。2006 年,美国陆军夜视与传感器实验室 Schilling B. W.^[7] 等人研发出一款多波长泵浦 Nd:YAG 激光器,此后该机构继续研究了 Nd:YAG 晶体吸收与泵源能量、晶体尺寸的关系^[8]。2012 年,波兰华沙军事科技大学的 W. Zendzian^[9] 等人使用两个波长的激光二极管阵列泵浦,研发了一款 Nd:YAG 板条激光器。2016 年,河北工业大学赵坡^[10] 等人设计了一种适用于宽温度范围内的无制冷被动调 Q 固体激光器。2020 年,华北光电技术研究所黄涛^[11] 项目组开发了无温控多波长 LD 泵浦方棒状 Nd:YAG 固体激光器,实现了该激光器在 -40℃ ~ +60℃ 温度范围内,能量的无温控稳定输出。2022 年,洛阳顶扬光电董涛^[12] 项目组开发了 -40℃ ~ +60℃ 温度范围内,小型化、大能量、无温控的侧泵 Nd:YAG 电光调 Q 激光器。可见,国内外对多波长泵浦的固体激光器系统的研究较为广泛,而对于二极管阵列设计仿真的报道相对

较少。

为了更好地实现非温控二极管泵浦的固体激光器系统的设计,本文从泵源结构入手,对平面阵列激光器进行物理建模,计算光谱参量,仿真高斯光谱叠加效果,为工程上从定性分析走向定量计算提供参考。

2 结构模型与设计仿真

2.1 结构模型

本文所设计的阵列激光器用于泵浦板条,因此采用 6 芯平面阵列作为封装形式,其中二极管芯片安装到凸型平面上。综合考量泵浦距离和快轴发散角参数,本文芯片间距设计为 0.42 mm。

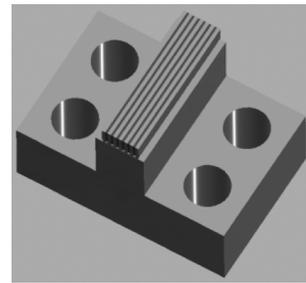


图 1 平面阵列激光器结构模型

Fig. 1 Structural model of laser diode array

2.2 中心波长设计

本节首先采用散热仿真辅助计算阵列中心波长^[11-12]。由于项目用的平面阵列为高温工作,因此,本文将制冷底面温度设定为 55℃。根据单芯片功率 145 W,工作频率 20 Hz,单脉冲宽度 250 μs,在不考虑热辐射,以热传导为主要散热渠道,进行稳态热耗散计算,得到热分布仿真结果,如图 2 所示。

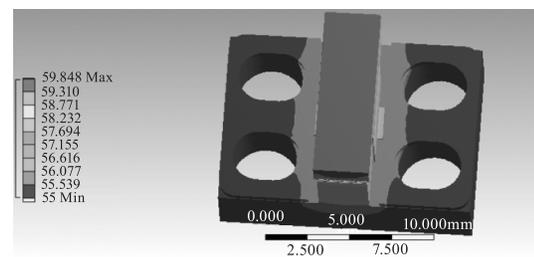


图 2 阵列热仿真图

Fig. 2 Thermal simulation diagram of laser diode array

由图得知,在本文工作条件下,阵列最高温度为 59.8℃,温升大约为 5℃,阵列发光面上未出现明显的温度梯度,芯片表面温度均匀性良好。根据文献报道二极管阵列的温漂系数取值为 0.28 nm/℃^[13-15],得到该工作条件下的波长将会红移 1.4 nm,另外,

结合该激光器高温工作 55 ℃,比室温 25 ℃ 高出 30 ℃,这一条件所涉及的波长红移量为 8.4 nm。以上两个因素导致的综合红移为 9.8 nm,该数据作为芯片初始冷波长的设计依据。

2.3 波长间隔仿真

为了减弱温度变化的影响,提升泵浦吸收稳定性,本文采用不同芯片波长叠加的方式,来实现一定温度范围内 808 nm 泵浦光对 Nd : YAG 吸收峰值的覆盖性,达到不同温度下的系统稳定输出。由于脉冲二极管芯片是由数个半导体发光单元构成,并且是多模工作,单芯片的光谱分布上已然呈现了叠加峰值,根据实际测试与高斯公式的拟合理论,仍然可以将不同芯片的光谱叠加效果采用以下公式进行表达^[1,16-18] :

$$I(x) = \sum_{i=1}^n I_i \cdot \exp\left[-2.773\left(\frac{x - (x_0 + x_d)}{w_0}\right)^2\right] \quad (1)$$

公式(1)中, $I(x)$ 为波长强度分布; w_0 为单芯片光谱宽度; n 为待叠加的波长数量; x_d 为待叠加的波长间隔; x_0 为待叠加的第一芯片波长; $x_0 + x_d$ 为待叠加的第二芯片波长,叠加前后的效果如图 3 所示。需要指出的是在以下的设计仿真过程中,将重点分析第一、二芯片之间的相对波长间隔,而不再关注各单芯片波长所在的位置。本文也将通过研究波长间隔变量 x_d 的变化来计算光谱宽度、峰谷强度比等参量。

在图 3 中,图 3(a)和图 3(b)分别是叠加前光谱状态,图 3(c)和图 3(d)是叠加后的状态。由图 3(a)、(c)可见,在波长间隔 2.5 nm 以内,双波长叠加后呈现单一峰情况,其变化趋势为,随着波长间隔的增加,叠加后光谱峰值强度逐渐降低,顶部逐渐拉平。由图 3(b)、(d)可见,当波长间隔处于 2.6 ~ 3.2 nm 之间变化时,随着波长间隔的继续增加,形成的近平顶光谱分布向中心凹陷形态的转化,其中 3.2 nm 波长间隔所对应的峰谷强度比 1.1;此时如果继续增加光谱间隔,该数值将大于 1.1,这对于 Nd : YAG 的吸收稳匹配性影响明显增加,进而对固体激光器系统的输出影响也将越来越明显,因此在本文中以此为峰谷比最大取值极限。图 4、5、6、7 是 2.0 nm、2.4 nm、2.8 nm、3.2 nm 四种不同波长间隔具体的仿真结果。

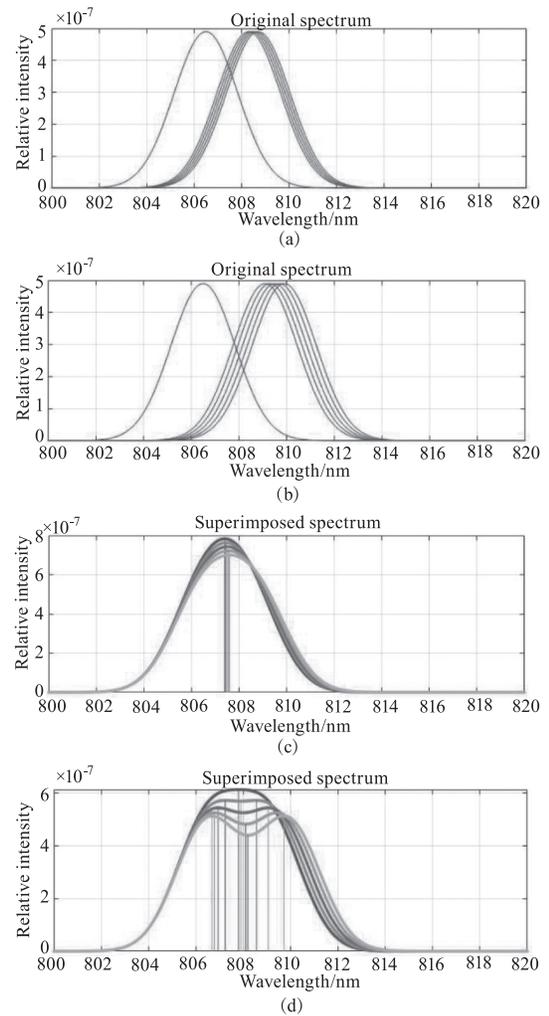


图 3 不同波长间隔叠加仿真结果

Fig. 3 Simulation results of different wavelength interval overlay

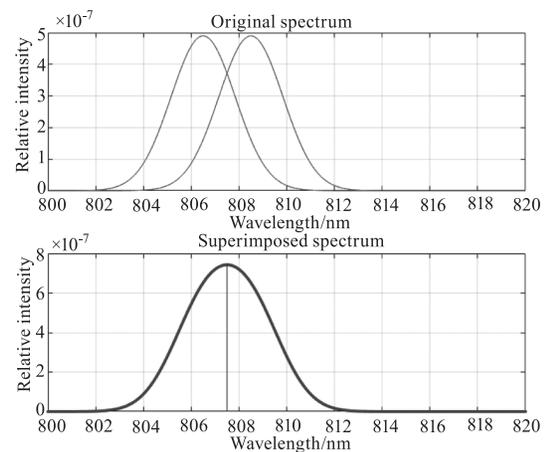
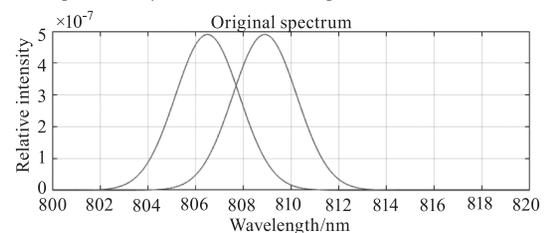


图 4 波长间隔 2.0 nm 情况下叠加效果

Fig. 4 Overlay effect with wavelength interval of 2.0 nm



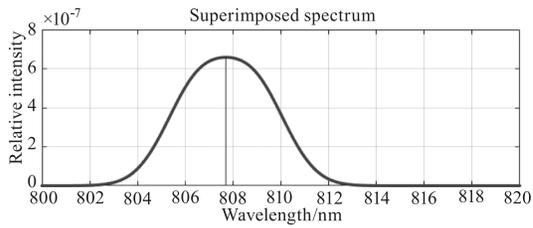


图 5 波长间隔 2.4 nm 情况下叠加效果

Fig. 5 Overlay effect with wavelength interval of 2.4 nm

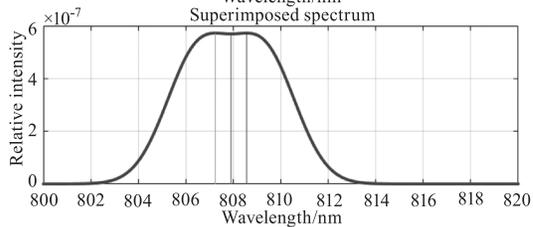
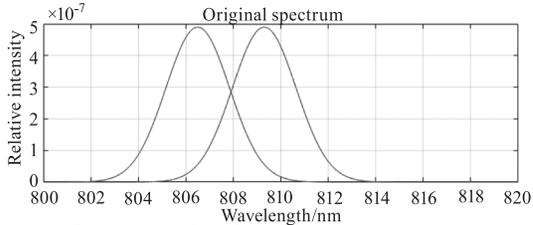


图 6 波长间隔 2.8 nm 情况下叠加效果

Fig. 6 Overlay effect with wavelength interval of 2.8 nm

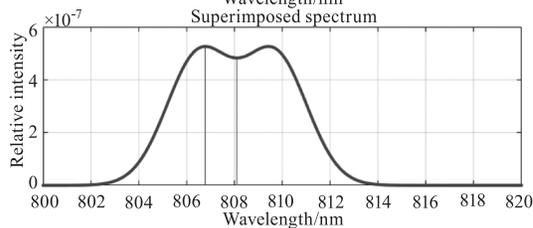
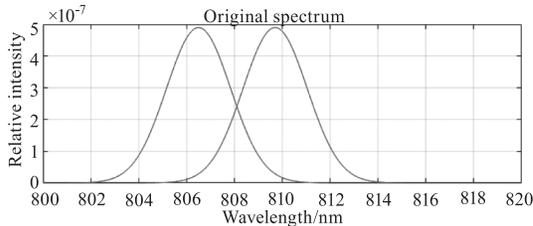


图 7 波长间隔 3.2 nm 情况下叠加效果

Fig. 7 Overlay effect with wavelength interval of 3.2 nm

通过上述仿真分析,得到光谱宽度和光谱峰谷比等仿真结果,见表 1。

表 1 不同波长间隔参数的仿真结果

Tab. 1 Simulation results of different wavelength interval parameters

波长间隔 x_d/nm	2.0	2.4	2.8	3.2
光谱宽度/nm	4.3	4.9	5.6	6.2
峰谷比/nm	单一峰值	单一峰值	1.01	1.10

3 实验结果

本文由于涉及到多波长、多芯片的共同封装,因此存在芯片排布问题。为提升泵浦均匀性,采用间隔封装形式,即:波长 1/波长 2/波长 1/波长 2/波长 1/波长 2 的“间隔排布”结构。本文共制作了 2.0 nm、2.4 nm、2.8 nm、3.2 nm 不同波长间隔的 4 种阵列,如图 8 所示。

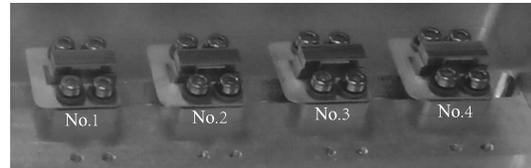
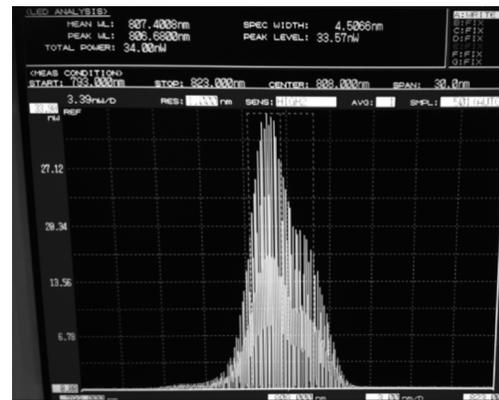


图 8 封装阵列图

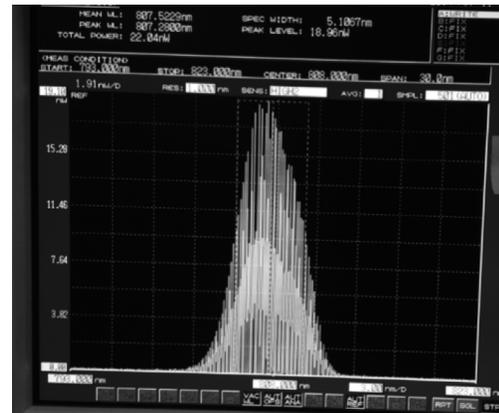
Fig. 8 Packaged arrays

从左到右,图 8 中阵列 1~4 对应的芯片波长间隔分别设计为 2.0 nm、2.4 nm、2.8 nm、3.2 nm,光谱半宽设计结果依次为 4.3 nm、4.9 nm、5.6 nm、6.2 nm,封装后光谱半宽依次为 4.5 nm、5.1 nm、5.9 nm、6.4 nm。原始光谱测试截图如图 9 所示。

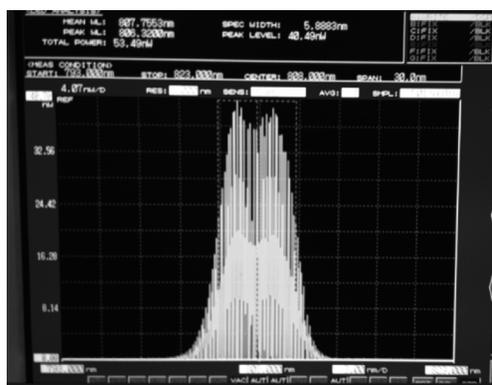
图 9(a)~(d) 依次为图 8 阵列 1~4 光谱测试结果。由图 9 可见:在整体上,随着波长间隔的增加,叠加后阵列光谱宽度呈增加趋势。图 9(a)、



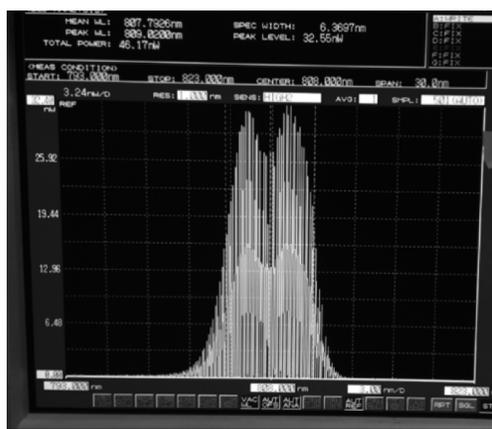
(a)



(b)



(c)



(d)

图9 封装后的阵列光谱测试图

Fig.9 Spectral test diagram after packaging

图9(b)对应于图4、图5的仿真结果,在叠加效果上未出现明显的峰谷,这是因为,这两组的波长间隔较小,处于单一峰值的叠加区间,但是波长间隔影响了最大峰值高度和叠加宽度。图9(c)、图9(d)对应于图6、图7的仿真结果,其光谱呈现越来越明显的中央凹陷,叠加后得到5.9~6.4nm不等的光谱宽度。根据仿真结果,图9(c)和图9(d)设计峰谷比为1.01和1.10,实测数据为1.03和1.14,实测效果和仿真结果基本一致。同时,图9(d)中光谱宽度6.4nm对应为最大设计波长间隔 $x_d=3.2$ nm的叠加结果,根据二极管的温漂系数,计算得到该光谱宽度所对应的温度范围为 $\pm 11.4^\circ\text{C}$,即为该阵列允许非温控工作温度范围。

4 结论

本文采用双波长叠加方式,设计实现了一种适用于 $\pm 11.4^\circ\text{C}$ 提供稳定泵浦能力的非温控宽谱二极管平面阵列激光器,满足了在该温度范围内Nd:YAG晶体稳定吸收的关系。工程化情况往往比较复杂,一是单芯片光谱宽度的离散性对设计有所影

响;二是单芯片中心波长的差异性也需要充分考虑;三是单芯片峰值功率的一致性也需要做到平衡,这均为影响设计准确性的要素。在后续研究中建议先进行封装前的单芯片参数获取,包含光谱、功率等指标测试,再根据测试结果进行基于真实数据的芯片光谱叠加,从而实现从定性设计到定量计算的提升。本文可为该类型激光器的精确设计做参考,具有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] Zhou Bingkun. Principle of laser[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
周炳琨. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2014.
- [2] Zeidler G. Pump-power-dependent efficiency in a YAG: Nd³⁺ laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1969, 4(12): 1016-1017.
- [3] Lian Wen, Wang Shouzeng, Peng tangchao, et al. Study on thermal design for diode array pumped solid-state laser[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(5): 13-16. (in Chinese)
练文,王寿增,彭堂超,等. 激光二极管阵列泵浦固体激光器热设计研究[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(5): 13-16.
- [4] Lou Kangping, Zhao Baiqin. Using multiple absorption peaks to lower DPSSL temperature control power dissipation[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4): 405004.
- [5] Kim J, Kong T, Gwak J, et al. Dependence of a Nd:YAG Laser's output characteristics on the pump diode's characteristics[J]. New Physics Sae Mulli, 2015, 65(2): 194-198.
- [6] Zhou Zhihao. Study on multi wavelength pumped Nd:YAG laser[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2022. (in Chinese)
周志豪. 多波长泵浦Nd:YAG激光器研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2022.
- [7] Bradley W. Schilling, Stephen Chinn, A D Hays, et al. END-pumped 1.5 μm monoblock laser for broad temperature operation[J]. Applied Optics, 2006, 45(25): 6607-6615.
- [8] Goldberg L. Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging[C]//International Society for Optics and Photonics, 2007.
- [9] W Zendzian, J K Jabczynski, M Kaskow, et al. 250 mJ,

- self-adaptive, diode-side-pumped Nd : YAG slab laser [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13) : 2598 – 2600.
- [10] Zhao Po, Yang Ruixia, Yan Lihua, et al. Wide-temperature-range and uncooled solid-state-laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28(10) : 18 – 21. (in Chinese)
赵坡, 杨瑞霞, 闫立华, 等. 宽温度范围无制冷固体激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28(10) : 18 – 21.
- [11] Huang Tao, Wang Keqiang, Luo Xu, et al. No-temperature-controlled multi-wavelength LD pumped square rod-shaped Nd : YAG solid state laser[J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(1) : 49 – 53. (in Chinese)
黄涛, 王克强, 罗旭, 等. 无温控多波长 LD 泵浦方棒状 Nd : YAG 固体激光器[J]. *激光与红外*, 2020, 50(1) : 49 – 53.
- [12] Dong Tao, Song Yan, Qin Hongqi, et al. Non-temperature controlled side pumped Nd : YAG solid state laser based on multi-wavelength array[J]. *Optical Technique*, 2022, 48(5) : 531 – 535. (in Chinese)
董涛, 宋艳, 秦红旗, 等. 基于多波长阵列的无温控侧泵 Nd : YAG 固体激光器[J]. *光学技术*, 2022, 48(5) : 531 – 535.
- [13] Zhang X, Bo B, Qiao Z, et al. Analysis of thermal characteristics based on a new type diode laser packaging structure[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(8) : 085105. 1 – 085105. 5.
- [14] Mathew J, Krishnan S. A review on transient thermal management of electronic devices [J]. *Journal of Electronic Packaging: Transactions of the ASME*, 2022, (1) : 144.
- [15] An Z, Ke H, Deng H. 808 nm wavelength locked high power semiconductor laser array [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2011, 48(5) : 296 – 299.
- [16] Li Min, Sheng Yi. Study on application of gaussian fitting algorithm to building model of spectral analysis [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, (10) : 2352 – 2355. (in Chinese)
李敏, 盛毅. 高斯拟合算法在光谱建模中的应用研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, (10) : 2352 – 2355.
- [17] Wu G, Lou Q, Zhou J, et al. Propagation of flat-topped beams [J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(3) : 494 – 498.
- [18] Baykal Y, Eyyuboglu H T. Scintillation index of flat-topped gaussian beams [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(16) : 3793 – 3797.