

文章编号:1001-5078(2020)01-0049-05

· 激光器技术 ·

# 无温控多波长 LD 泵浦方棒状 Nd : YAG 固体激光器

黄 涛,王克强,罗 旭,何利杰  
(华北光电技术研究所,北京 100015)

**摘 要:**报道了一种多波长 LD 泵浦方棒状 Nd : YAG 无温控固体激光器。激光器采用 LD 侧面泵浦方式,LD 泵浦模块由四种不同中心波长的 LD 组合而成,常温 25 °C 时,各 bar 条中心波长分别为 802 nm、804 nm、806 nm、808 nm,LD 模块光谱半高全宽为 7 nm 左右;工作介质为侧面双通方棒状 Nd : YAG 键合晶体,通过控制光路可以增加工作介质的有效吸收长度;调 Q 方式为电光调 Q;得到一种无温控固体激光器。该激光器在 -40 ~ +60 °C 温度范围内,可以无温控稳定输出能量  $\geq 40$  mJ;输出激光水平方向发散角  $\theta_x^2 = 1.79$  mrad,垂直方向发散角  $\theta_y^2 = 1.36$  mrad;光束质量:  $M_x^2 = 4.858$ ,  $M_y^2 = 2.697$ 。

**关键词:**固体激光器;无温控;侧面泵浦;键合晶体

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2020.01.009

## No-temperature-controlled multi-wavelength LD pumped square rod-shaped Nd : YAG solid-state laser

HUANG Tao, WANG Ke-qiang, LUO Xu, HE Li-jie  
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** A multi-wavelength LD pumped square rod-shaped Nd : YAG temperature-free solid-state laser is reported in this paper. The laser adopts LD side pumping mode, and the LD pumping module is composed of four LDs with different center wavelengths. At 25 °C, the center wavelength of each bar is 802nm, 804nm, 806nm, 808nm, and the full width at half maximum of the LD module is about 7 nm. The working medium is a side double-sided square rod-shaped Nd : YAG bonded crystal, and the effective absorption length of the working medium can be increased by controlling the optical path; the Q-switching mode is electro-optic Q-switching; and a temperature-free solid-state laser is obtained. The laser can be temperature-free and stable output energy  $\geq 40$  mJ in the temperature range of -40 ~ +60°C. The horizontal divergence angle of the output laser is 1.79 mrad, and the vertical divergence angle is 1.36 mrad, the beam quality:  $M_x^2 = 4.858$ ,  $M_y^2 = 2.697$ .

**Keywords:** solid-state laser; no temperature control; side pumping; bonded crystal

### 1 引 言

相比于传统有温控激光器,无温控 LD 泵浦激光器可以完全消除主动温度控制,不需要制冷器件和温控电路,从根本上解决了温控系统易发生故障的问题,大大提高了激光器的可靠性;由于去除了复杂的温控系统,使得激光器的结构更加紧凑,不需要

温控准备时间即可工作,同时大幅度降低待机功耗,在小型无人机以及单兵装备作战等方面具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。

无温控 LD 泵浦激光器的核心技术是解决不同温度下电光效率不一致的问题,并且使全温度范围均具有较高电光效率。实现激光器无温控运转有两

种途径<sup>[2]</sup>,第一种是展宽激光二极管的发射波长,进行多波长泵浦,第二种是增加增益介质的有效吸收长度,以使泵浦光在吸收峰之外时能够充分吸收。通常两种方法结合使用效果更好。

SELXGALILIO 公司开发的 163 型激光器<sup>[3]</sup>,同时使用了多波长泵浦和增加吸收长度长度的方案。将工作物质设计成 Zig-Zag 形板条,通过控制光路增加有效吸收长度。不仅满足在  $-30 \sim +50 \text{ }^\circ\text{C}$  范围内正常使用,而且提高了激光器的整体光电效率,从而降低功耗,减少热管理问题,进而减少热交换器和底盘尺寸和电池容量。实现激光器的小型化、低功耗的要求。

由此可见,通过多波长泵浦和增加增益介质的有效吸收长度可以有效降低激光器输出能量对温度的敏感性。本文报道的激光器,采用四波长 LD 泵浦源进行侧面泵浦;增益介质为侧面双通键合方棒状 Nd:YAG 晶体,可以使泵浦光经过反射完成二次穿过晶体,增加晶体对泵浦光的有效吸收长度;通过对泵浦模块和增益介质的结构进行合理优化设计,降低了激光器对温度的敏感性。最终实现激光器在  $-40 \sim +60 \text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内,无温控稳定输出能量  $\geq 40 \text{ mJ}$ 。水平方向发散角  $\theta_x^2 = 1.79 \text{ mrad}$ ,垂直方向发散角  $\theta_y^2 = 1.36 \text{ mrad}$ ;光束质量:  $M_x^2 = 4.858, M_y^2 = 2.697$ ;光光转换效率为 12 %。

## 2 基本原理

### 2.1 增益介质的选择

掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)晶体的综合性能较好<sup>[4]</sup>,被很多激光器用作增益介质。图 1 为在 780~828 nm 光谱范围内,Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 1.0 at % 的 Nd:YAG 晶体的吸收系数随波长的变化曲线图<sup>[5]</sup>。如图 1 所示,Nd:YAG(1.0 at %) 晶体对不同波长的泵浦光吸收能力不同,吸收系数越小表示吸收能力越弱,吸收系数越大表示吸收能力越强。泵浦光强一定时,晶体对泵浦光的吸收效率与晶体的吸收系数和晶体的有效吸收长度有如下关系<sup>[6]</sup>:

$$\eta = (1 - e^{-\alpha L}) \quad (1)$$

式中, $\eta$  为晶体的吸收效率; $\alpha$  为晶体的吸收系数; $L$  为泵浦光在增益介质中传输路径的长度。

由公式(1)可知,吸收相同能量的泵浦光时,晶体的吸收能力越弱,所需要晶体的长度越长。因此当激光二极管的发射波长处于晶体吸收能力较弱的位置时,需要增加晶体的有效吸收长度来提高晶体的吸收效率<sup>[7]</sup>。

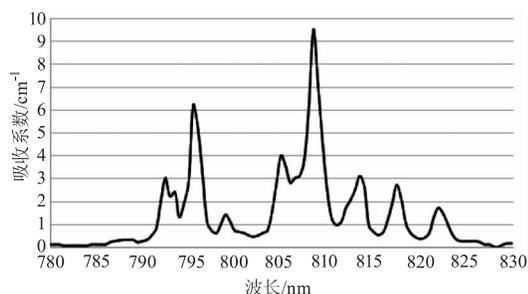
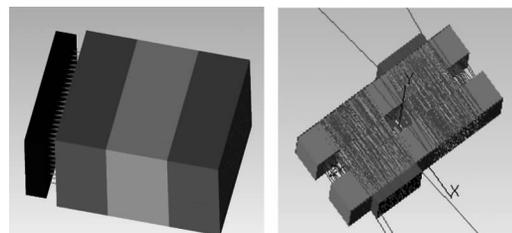


图 1 1.0 % Nd:YAG 晶体的吸收光谱

Fig. 1 Absorption spectrum of 1.0 % Nd:YAG

本文增加晶体的有效吸收长度采用的是侧面双通键合 Nd:YAG 晶体方形棒结构,其结构如图 2 所示。两侧是 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度为 1.0 at % 的 Nd:YAG 晶体,中间是非掺杂的 YAG 晶体,靠近泵浦源一侧镀(808 ± 20) nm 增透膜,远离泵浦源一侧镀(808 ± 20) nm 全反膜,泵浦光 2 次穿过晶体,理论上晶体对泵浦光的最大有效吸收长度可以达到 20 mm,经计算,该吸收长度下,即使晶体的吸收系数只有 0.7 cm<sup>-1</sup>,吸收效率也能达到 75 %,能在一定程度上满足激光器的稳定输出。



(a) 晶体图

(b) 光路模拟图

图 2 Nd:YAG 方形棒键合晶体及光路模拟图

Fig. 2 Nd:YAG square bar bonded crystal and optical path simulation

### 2.2 泵浦模块的选择

实现多波长泵浦有两种方法,第一种是展宽单波长泵浦源 LD 的谱线宽度,这种方法只能满足小温度范围内,LD 的部分发射谱线和晶体的吸收谱线相匹配,但大部分泵浦光的能量不能被利用,大大降低光光转换效率。第二种是合理选择不同 bar 条的中心波长,整合成泵浦模块,对增益介质进行同时泵浦。在不同温度下,不同波长 LD 的泵浦效率可以相互补偿,稳定泵浦模块总的泵浦效率,实现激光稳定输出。

本文采用的是四波长泵浦源,泵浦模块有 8 个 bar,分为四种不同中心波长,分别为为 802 nm @ 25 °C、804 nm @ 25 °C、806 nm @ 25 °C、808 nm @ 25 °C,其结构如图 3 所示。

多波长泵浦时,光谱线宽会对晶体的吸收效率

产生影响,因此需要对泵浦模块的光谱线宽进行筛选,LD 的发射谱线可近似看成高斯函数(如图 4 所示),其强度分布可用下列公式进行表示<sup>[8]</sup>:

$$I_{\lambda} = I_0 \cdot e^{-\frac{\lambda - \lambda_0}{\delta^2}} \quad (2)$$

式中, $I_0$  为频域中谱线中心光强; $\lambda_0$  为 LD 中心波长; $\delta$  为发射谱线的半高全宽。

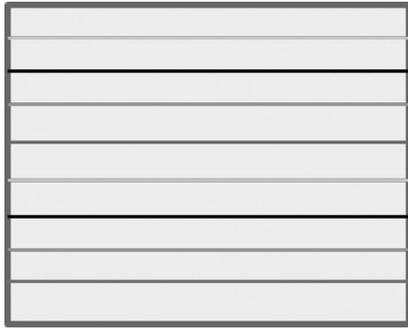


图 3 四波长泵浦模块

Fig. 3 Four-wavelength pumping module

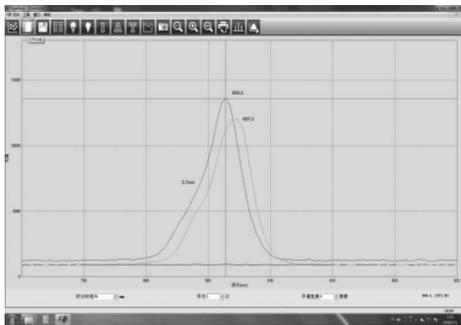


图 4 LD 泵浦光光谱图 (25 °C)

Fig. 4 LD pumped light spectrogram (25 °C)

计算多波长泵浦时增益介质吸收的总能量  $E$ , 需要对组成泵浦源的不同中心波长的 LD 被增益介质吸收的能量进行加权求和,可以用下式表示<sup>[9]</sup>:

$$E = \sum_{i=1}^n N_i \int I_0 \cdot e^{-\frac{(\lambda - \lambda_0)^2}{\delta^2} - \alpha L} d\lambda \quad (3)$$

式中, $N_i$  表示不同中心波长的 LD 在相同泵浦条件下,单个 LD 输出能量占总能量的比例,均取 0.25; $L$  表示有效吸收长度,均取 20 mm。

则晶体的吸收效率  $\eta$  可以表示为:

$$\eta = \frac{E}{E_{总}} \quad (4)$$

可以得到晶体的吸收效率与 LD 光谱线宽的关系如图 5 所示,考虑到 LD 的发射波长随温度漂移系数为 0.28 nm/°C,为保证激光器在范围 -40 ~ +60 °C 内稳定输出能量  $\geq 40$  mJ,则 LD 的发射波长波动范围需控制在 30 nm 内,为了获得较高的崩盘效率,需保证晶体的吸收效率  $\geq 75\%$ 。由此可见,

采用单波长或者宽光谱线宽泵浦时,不能同时在宽温度范围工作以及稳定输出能量方面达到要求;而将 LD 泵浦光的光谱线宽控制在 5 ~ 10 nm 范围内,可以很好的满足上述要求。

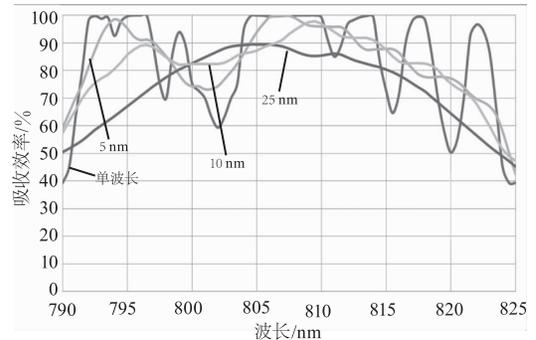


图 5 光谱线宽与吸收率的关系曲线 (吸收长度 20 mm)

Fig. 5 The relationship between spectral linewidth and absorptivity (absorption length 20 mm)

### 3 实验装置

本文中的激光器需要在严峻环境下正常工作,因此在设计谐振腔时需要考虑谐振腔对温度的敏感性。该激光器选择直角棱镜折叠腔作为谐振腔,其光路示意图如图 6 所示,主要由两个直角棱镜和两个偏振分光棱镜组成,用直角棱镜替代反射镜来改变光束的方向,可以降低激光器对大的温度变化保持不灵敏性,并且可以最大程度的缩短整个系统的长度;脉冲激光通过波片和分光棱镜组成的耦合系统输出,通过调节波片的方位角可以获得最佳耦合输出<sup>[10]</sup>。

激光二极管面阵列经过快轴准直,减小快轴发散角,使输出的能量更加集中,有利于长距离传输;泵浦光从侧面对 Nd : YAG 键合晶体进行泵浦,键合晶体中间是没有掺杂 Nd<sup>3+</sup> 的 YAG,两边是 Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度均为 1.0 at % 的 Nd : YAG 晶体。靠近泵浦源一侧镀 (808 ± 20) nm 增透膜,远离泵浦源一侧镀 (808 ± 20) nm 全反膜,泵浦光 2 次穿过晶体,晶体对泵浦光的最大有效吸收长度可以达到 20 mm,有效提高晶体在低吸收能力时对泵浦光的利用率。

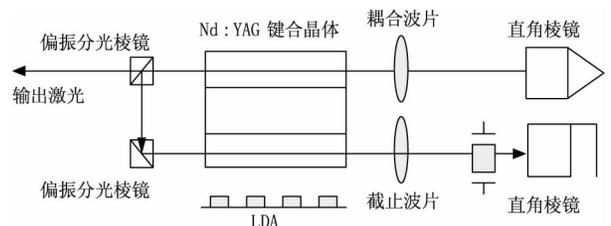


图 6 折叠型直角棱镜腔光路图

Fig. 6 Optical path of folding right angle prism cavity

## 4 实验结果

### 4.1 脉冲能量

影响单脉冲能量的因素有输出镜透过率、调 Q 晶体初始透过率、工作物质掺杂浓度以及泵浦光和产生激光的模式匹配等因素。该激光器在不需要外加温控器件的情况下,在高低温箱里做输出能量测试实验,其结果如图 7 所示。激光器在  $-40 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内,激光器输出能量  $\geq 40\text{ mJ}$ ,经计算,光光转换效率最高为 12%。

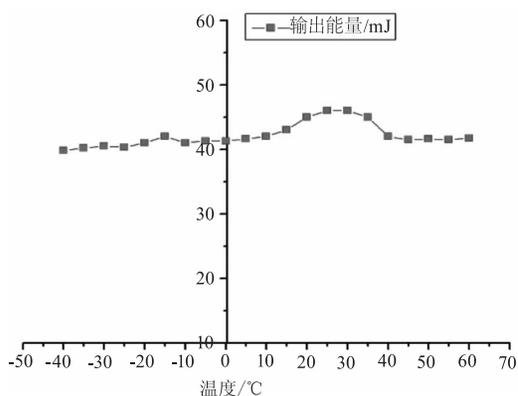


图 7 不同温度下激光器的输出能量

Fig. 7 Output energy of laser at different temperatures

### 4.2 脉冲宽度

激光器的脉冲宽度主要与输出镜透过率、腔长等有关,本文中谐振腔腔长为 300 mm,通过调节波片和分光棱镜组成的耦合系统中波片的方位角,可以改变输出镜的透过率,最终得到脉冲宽度为  $(11 \pm 1)\text{ ns}$ 。输出激光脉冲宽度测试结果如图 8 所示。

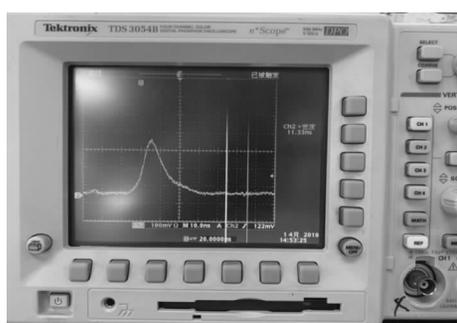


图 8 输出激光脉冲宽度测试

Fig. 8 Measurement of output laser pulse width

### 4.3 光束质量及发散角

激光器在工作频率为 20 Hz,稳定输出能量大于等于 40 mJ 工作时,原始光斑为方形光斑,用  $M^2$  光束分析仪测得水平方向发散角  $\theta_x = 1.79\text{ mrad}$ ,垂直方向发散角  $\theta_y = 1.36\text{ mrad}$ ;光束质量:  $M_x^2 = 4.858$ ,  $M_y^2 = 2.697$ 。光束质量测试结果如图 9 所示。

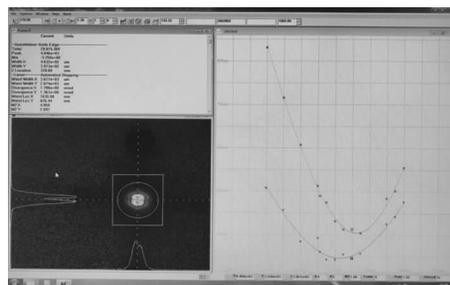


图 9 激光束光束质量测试

Fig. 9 Laser beam quality test

## 5 结论

为去除大能量激光器复杂的温控系统,实现复杂工作环境下激光器无温控运转的需求。本文采用多波长 LD 泵浦方棒状 Nd:YAG 晶体,通过模拟仿真多波长泵浦源中 LD 不同中心波长的 LD 组合以及泵浦光谱半高全宽对晶体固定吸收长度下吸收效率的影响;采用方棒状键合晶体,在一定程度上增加了工作介质的有效吸收长度;结合具体实验测试,得到一种无温控固体激光器。实现  $-40 \sim +60\text{ }^{\circ}\text{C}$  温度范围内,无温控稳定输出能量大于等于 40 mJ;水平方向发散角  $\theta_x = 1.79\text{ mrad}$ ,垂直方向发散角  $\theta_y = 1.36\text{ mrad}$ ;光束质量  $M_x^2 = 4.858$ ,  $M_y^2 = 2.697$ ;工作频率 20 Hz,脉冲宽度  $(11 \pm 1)\text{ ns}$ ;中心波长 1064 nm;光光转换效率 12%。该激光器去除了复杂的温控电路,降低了整机的功耗;并能适应严苛工作环境下的即开即用需求。

## 参考文献:

- [1] FENG Ao, LE Xiaoyun, ZHANG Xiaofu. Research progress of lasers for target indicators[J]. Advances in Laser and Optoelectronics, 2019, 56(1): 29-37. (in Chinese) 冯傲,乐小云,张小富. 用于目标指示器的激光器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(1): 29-37.
- [2] LIU Xu, CHENG Yong, WAN Qiang, et al. High temperature laser diode pumped all-solid-state laser[J]. Chin. J. Lasers, 2016, 43(7): 0701003-1-6. (in Chinese) 刘旭,程勇,万强,等. 高温激光二极管抽运全固态激光器[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0701003-1-6.
- [3] Sijan A. Development of highly compact and low power consumption athermal military laser designators[J]. Proc Spie, 2012, 8541: 85410U.
- [4] ZHAO Meng, LI Long, PAN Xiaorui, et al. Temperature field of LD double-end pumped Nd:YAG square crystal

- heat capacity laser[J]. *Laser & Infrared*,2018,48(6):45-51. (in Chinese)
- 赵萌,李隆,潘晓瑞,等. LD 双端泵浦 Nd:YAG 方形晶体热容激光器温度场[J]. *激光与红外*,2018,48(6):45-51.
- [5] Goldberg L. Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging [C]// *Defense & Security Symposium*, International Society for Optics and Photonics,2007.
- [6] Kerchner. Solid state laser engineering[M]. Beijing: Science Press,2002. (in Chinese)
- 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社,2002.
- [7] Silver M, Lee S T, Borthwick A, et al. Compact, diode-pumped, solid-state lasers for next generation defence and security sensors[J]// *Journal of Physics: Conference Series*,2015,619(1):012022.
- [8] LIU Xu, WEI Jingsong, TAN Chaoyong, et al. Multi-theory of laser-free temperature-controlled pump source[J] *Infrared and Laser Engineering*,2016,45(5):71-76. (in Chinese)
- 刘旭,魏靖松,谭朝勇,等. 激光器无温控泵浦源的多理论[J]. *红外与激光工程*,2016,45(5):71-76.
- [9] LUO Xu, WANG Pengfei. Study on polarization coupling output characteristics of right-angle prism cavity[J]. *Laser & Infrared*,2016,46(10):1244-1249. (in Chinese)
- 罗旭,王鹏飞. 直角棱镜腔偏振耦合输出特性研究[J]. *激光与红外*,2016,46(10):1244-1249.