

# Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub>组合晶体激光器温度稳定性研究

屈鹏飞<sup>1</sup>, 王石语<sup>1</sup>, 邵新征<sup>2</sup>, 过 振<sup>1</sup>, 蔡德芳<sup>1</sup>, 李兵斌<sup>1</sup>

<sup>1</sup>西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

<sup>2</sup>西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065

**摘要** 在大功率端面抽运固体激光器中,传统 Nd:YAG 晶体吸收谱线较窄,极易受到抽运源因温度发生波长漂移的影响,导致激光器输出功率出现起伏变化。为了降低激光器对抽运源温度波长漂移的敏感程度,将具有优良热物性参数的 Nd:YAG 晶体和具有宽吸收谱特性的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体相结合,通过前后组合放置的方式,由前端 Nd:YAG 晶体吸收大部分抽运光能量,用后端 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体对未被吸收的抽运光能量进行补充吸收。当抽运源出现波长漂移时,两种晶体通过互补吸收的方式,使激光器吸收效率和输出功率保持稳定,从而降低抽运源温度波长漂移对激光器产生的影响。实验表明,在抽运功率 97.5 W 时,这种双晶体组合方案可在抽运源工作温度为 22~32 °C 内,实现对抽运光大于 90% 的吸收效率,同时激光器输出功率不稳定性小于 8%,有效改善了激光器对抽运源温度波长漂移的敏感程度。

**关键词** 激光器; 端面抽运; 波长漂移; 组合晶体

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0614001

## Temperature Stability of Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> Combination Crystals Laser

Qu Pengfei<sup>1</sup>, Wang Shiyu<sup>1</sup>, Shao Xinzhen<sup>2</sup>, Guo Zhen<sup>1</sup>, Cai Defang<sup>1</sup>, Li Bingbin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;

<sup>2</sup>Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an, Shaanxi 710065, China

**Abstract** In high power end-pumped solid state laser, the conventional Nd:YAG crystal can be influenced by LD wavelength shift induced by temperature shift due to its narrow absorption bandwidth, which will lead to fluctuating of output power. In order to reduce the sensitivity of laser which is influenced by LD temperature, a combination crystals scheme between Nd:YAG and Nd:YVO<sub>4</sub> is proposed. The Nd:YAG with good thermophysical parameters is placed at the front end of LD to absorb most pumped energy, and Nd:YVO<sub>4</sub> with broad absorption spectrum at the rear of Nd:YAG to absorb the rest pumped energy. The absorption efficiency and output power of the laser can be kept stable through the above complementary absorption during LD wavelength shift, and more tolerant to LD temperature variations. Experimental results show that the absorption efficiency of pumped energy can be improved to 90% by using the combination crystals at LD power 97.5 W in the range of LD work temperature 22-32 °C. And the output power fluctuation is less than 8%, which reduces the sensibility to the LD temperature.

**Key words** lasers; end pump; wavelength shift; combination crystals

**OCIS codes** 140.3580; 140.3480; 140.3320; 140.3380

## 1 引 言

激光二极管(LD)抽运全固态激光器(DPSSL)具有电光转换效率高、光束质量好、体积小等优点,在激光雷达和工业加工领域具有广阔的应用前景<sup>[1-5]</sup>。DPSSL 的这些特点,最主要的原因在于 LD 的发射谱线与增益介质的吸收谱线高度匹配,其能量转换效率高,增益介质内部热能沉积少,使激光器效率和光束质量得

**收稿日期:** 2017-01-13; **收到修改稿日期:** 2017-02-22

**基金项目:** 国家预研究基金(9140A020105)

**作者简介:** 屈鹏飞(1987—),男,博士研究生,主要从事新型光电子器件方面的研究。E-mail: qupengfei\_119@163.com

**导师简介:** 王石语(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事新型光电子器件方面的研究。

E-mail: yshi@mail.xidian.edu.cn(通信联系人)

到大幅度提升。然而,LD 输出光的中心波长会随其管芯温度的变化而发生漂移,在大功率抽运时,传统 Nd:YAG 晶体吸收谱宽为 2.5 nm,远小于 LD 发射谱宽,当 LD 的管芯温度发生变化时,其波长漂移极易引起二者谱线失配,进而导致激光器输出功率出现起伏变化<sup>[6]</sup>。

针对上述情况,目前普遍采用三种方式来减少因 LD 波长漂移导致的激光器输出功率波动。1)保持 LD 工作温度恒定。通常情况下,利用大型冷水机对 LD 工作温度进行精确控制,因此冷水机成为了激光器的组成部分,极大地增加了激光器自身的体积<sup>[7-8]</sup>;在 LD 功率不超过 50 W 时,热电制冷器(TEC)可对 LD 管芯温度进行精确控制,其体积小且稳定易控,但在 LD 高功率工作时,TEC 的散热能力则无法满足对 LD 工作温度精确调节的要求<sup>[9-10]</sup>。2)选择宽吸收谱线增益介质。传统棒状 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体具有远大于 LD 发射谱宽的吸收谱宽,LD 温度漂移对其影响较小,但是其热物性参数较差,在大功率抽运时,剧烈的热效应使得谐振腔失稳,导致激光器效率和光束质量严重下降,同时也容易引起晶体的损伤<sup>[11-13]</sup>。3)在增益介质吸收峰附近,选择多个波长的抽运光同时对增益介质进行抽运,使得抽运光的发射谱线将增益介质吸收谱线完全覆盖,进而达到激光器稳定输出的目的<sup>[14]</sup>。这种方法可以在较大温度范围内,实现激光器稳定输出。

基于上述三种方式,本文提出一种将 Nd:YAG 晶体和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体前后组合放置的方法,在大功率抽运时,降低激光器对 LD 工作温度变化的敏感程度。由于二者的吸收峰值波长相近,利用 Nd:YAG 晶体优良的热物性参数,将它置于前端,使其将吸收谱线范围内的抽运光能量全部吸收,后端的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体,由于其宽吸收谱线的性质,可以将 Nd:YAG 谱线以外的抽运光能量完全吸收。当 LD 的工作温度发生变化时,前端 Nd:YAG 晶体的吸收效率会发生变化,而后端的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体会与其形成互补吸收关系,因此激光器的总吸收效率保持不变,激光器输出功率保持稳定,进而降低 LD 波长漂移对激光器稳定性的影响。这种设计方法既防止了 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体在大功率抽运时,因强烈热效应导致的谐振腔失稳,又避免了抽运源因温度变化发生波长漂移导致 Nd:YAG 晶体吸收效率降低,使输出功率出现波动。两种晶体的组合在提升激光器转换效率的同时,又能保持激光器的输出稳定。

## 2 基本原理

LD 的发射波长随其管芯温度的变化而发生漂移,由光谱仪测量得其变化率为 0.3 nm/°C。图 1 为 LD 管芯温度由 22 °C 变化至 32 °C 时,其发射谱线的变化与 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体吸收谱线的对比图<sup>[13,15]</sup>。从图 1 可以看出,Nd:YAG 吸收谱线的半峰全宽(FWHM)仅为 1.04 nm,远小于 LD 的发射谱线,当 LD 的温度变化时,Nd:YAG 对抽运光的吸收效率也会随之发生变化,这就导致激光器输出光功率出现波动,影响了激光器的稳定性。而 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的吸收谱线全宽为 15.7 nm,远大于 LD 的发射谱线,其可将吸收谱线范围内的抽运光全部吸收,而 LD 在小范围内的温度变化对其输出功率的影响微乎其微。

一般情况下,激光器的输出功率与抽运光的抽运效率和增益介质的抽运速率有关。其中,抽运效率影响着增益介质对抽运光的吸收效率,增益介质的抽运速率则决定了其内部上能级粒子数的多少。若在保证激光器在 LD 温度变化时,输出功率保持稳定,则保证上述两个因素不变即可,现在来分析上述因素对激光器运行过程所产生的影响。

激光器谐振腔内光子数  $\phi$  与上能级粒子数密度  $n$  随时间变化的表达式为<sup>[16-17]</sup>

$$\begin{cases} \frac{dn}{dt} = -c\phi n\sigma_{21} - \frac{n}{\tau} + \omega_p(n_0 - n) \\ \frac{d\phi}{dt} = \frac{2\sigma_{21}\phi nl}{t_r} - \frac{\phi}{t_c} \end{cases}, \quad (1)$$

式中  $\tau$  为荧光寿命, $l$  为增益介质的长度, $\omega_p$  为抽运速率, $\sigma_{21}$  为增益介质的受激发射截面, $t_r$  为光在谐振腔中传输时的往返时间, $c$  为光速, $t_c = t_r/[L + \ln(1/R)]$  为腔内光子寿命,其中  $L$  为腔内损耗, $R$  为输出镜的反射率, $n_0$  为总的上能级粒子数密度。

由(1)式可知,在激光器结构保持不变的条件下,其输出功率仅与抽运速率  $\omega_p$  有关,那么只要保证当 LD 工作温度发生变化时,激光器的抽运速率  $\omega_p$  保持不变即可。抽运速率  $\omega_p$  的表达式为

$$\omega_p = \frac{\eta\sigma_{13}P}{Sh\nu}, \quad (2)$$

式中  $\sigma_{13}$  为受激吸收截面,  $S$  为增益介质的有效面积,  $h\nu$  为抽运光子能量,  $P$  为被增益介质所吸收的抽运光功率,  $\eta$  为量子效率, 对抽运速率在增益介质长度方向上求平均, (2) 式又可以表示为

$$\bar{\omega}_p = \frac{\sigma_{13}P_0}{lSh\nu} [1 - \exp(-\alpha l)], \quad (3)$$

式中  $P_0$  为进入到增益介质的总的抽运功率,  $l$  为增益介质长度。

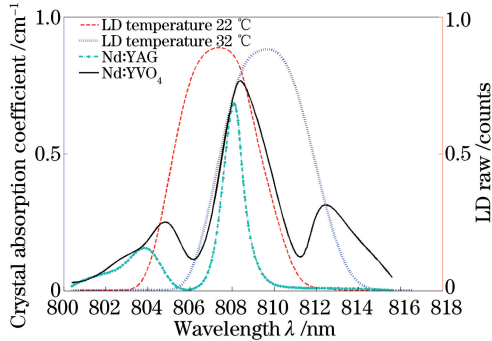


图 1 不同温度条件下 LD 发射谱线与晶体吸收谱线对比图

Fig. 1 Emission spectra of LD in different temperatures and absorption spectra of crystals

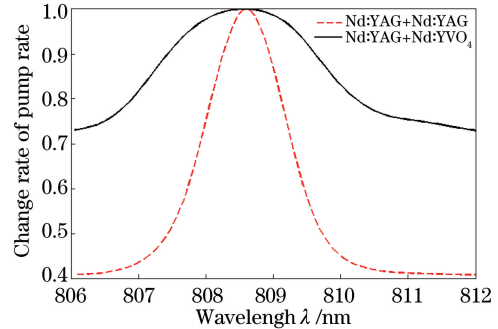


图 2 不同组合晶体抽运速率变化率随 LD 中心波长变化曲线图

Fig. 2 Change rate of pump rate with respect to central wavelength for different crystal combinations

当 LD 管芯温度发生变化时, 其输出光的中心波长会发生漂移, 在漂移过程中, 其发射谱线会偏离增益介质的吸收峰值, 即 (3) 式中的吸收系数  $\alpha$  发生改变, 进而引起平均抽运速率发生变化, 导致输出功率出现波动<sup>[18-19]</sup>。基于上述原因, 将 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 通过前后组合放置的方式结合在一起, 利用 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的宽吸收谱特性, 来稳定因激光器平均抽运功率变化导致的输出功率变化。图 2 为 LD 管芯温度 22~32 °C 范围内, 不同组合晶体的平均抽运功率变化率图。在这个温度范围内, 实测 LD 输出光的中心波长变化范围为 807.4~810 nm。在计算中选用的激光晶体参数如下: 前端晶体均为掺杂原子数分数为 0.2% 长度为 30 mm 的 Nd:YAG 晶体, 后端的晶体分别为掺杂原子数分数 0.3%、长为 20 mm 的 Nd:YAG 晶体和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体。所用晶体规格均为 3 mm×3 mm 正方形晶体, 进入晶体内部的总抽运功率为 100 W, 光斑半径为 1 mm。

由图 2 可知, Nd:YAG+Nd:YAG 组合晶体在偏离晶体吸收峰时, 激光器的抽运速率会快速下降, 当 LD 管芯温度偏离最佳匹配温度 2~3 °C 时, 即 LD 中心波长在 808 nm 和 809 nm 处时, 其抽运速率下降了近 20%; 相比而言, Nd:YAG+Nd:YVO<sub>4</sub> 组合晶体对于 LD 管芯温度变化的适应性较强, 其抽运速率呈平缓下降趋势, 当 LD 管芯温度偏离最佳匹配温度 2~3 °C 时, 其抽运速率仅下降了约 3%, 当 LD 管芯温度在 22~32 °C 范围内变化时, 其抽运速率变化率低于 15%。通过实验方式, 对上述结果进行验证。

### 3 实验系统及结果

#### 3.1 实验系统

实验装置如图 3 所示。图中 LD 输出波长为 808 nm, 经冷水机精确控温, 测量抽运源管芯在不同工作温度下, 各种组合晶体输出功率的变化情况。LD 所用光纤数值孔径为 0.22, 光纤直径为 400 μm, 进入前端晶体的抽运光半径为 1 mm。全反镜与输出镜均为平面镜, 输出镜透过率为 30%。谐振腔长度为 150 mm, 在输出端放置一个 808 nm 全反(HR)1064 nm 全透(HT)的 45°平面镜, 并在两侧放置两个功率计, 分别探测输出光和未被吸收的抽运光功率。晶体信息参数如表 1 所示, 晶体两个端面均镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 增透膜。晶体用钢皮包裹后夹持在铜热沉中, 利用传导散热方式与外界进行热交换, 达到散热目的。

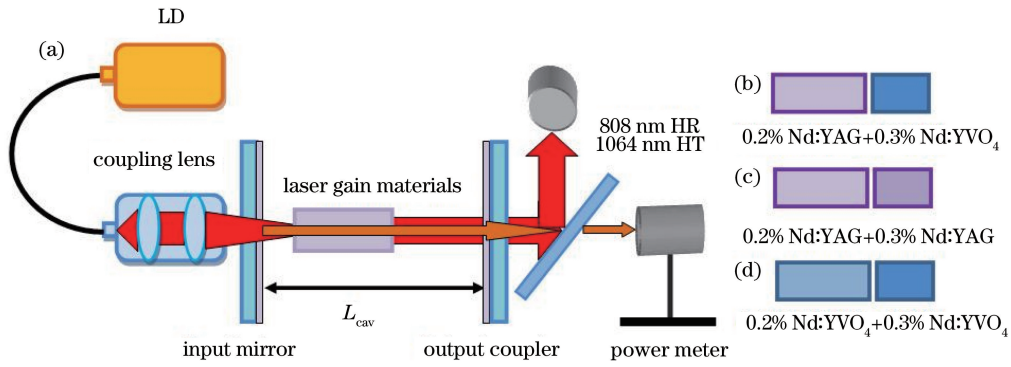


图 3 (a) 实验系统中不同晶体组合结构图; (b) 0.2%Nd:YAG+0.3%Nd:YVO<sub>4</sub>; (c) 0.2%+0.3%Nd:YAG ;(d) 0.2%+0.3%Nd:YVO<sub>4</sub>

Fig. 3 (a) Structure chart of different crystal combinations in experimental system; (b) 0.2%Nd:YAG+0.3%Nd:YVO<sub>4</sub>; (c) 0.2%+0.3%Nd:YAG; (d) 0.2%+0.3%Nd:YVO<sub>4</sub> crystals

表 1 实验中所用晶体参数表

Table 1 Specifications of crystal rods used in experiments

Crystal rods	Total dimensions / (mm×mm×mm)	Nd <sup>3+</sup> (Nd:YAG) concentration / %	Nd <sup>3+</sup> (Nd:YVO <sub>4</sub> ) concentration / %	Distance /mm
Nd:YAG+Nd:YVO <sub>4</sub>	3×3×30+3×3×20	0.2	0.3	2
Nd:YAG+Nd:YAG	3×3×30+3×3×20	0.2+0.3	—	2
Nd:YVO <sub>4</sub> +Nd:YVO <sub>4</sub>	3×3×25.2+3×3×20	—	0.2+0.3	2

### 3.2 LD 工作温度变化对输出功率的影响实验结果

图 4 为不同抽运功率条件下,不同晶体组合的激光器输出功率的对比图。由图 4 可知,0.2% Nd:YAG+0.3%Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体组合方式在抽运功率 97.5 W 时,输出功率是最高的。相比而言,0.2% Nd:YVO<sub>4</sub>+0.3%Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体组合方式在抽运功率超过 54 W 时,输出功率出现饱和和下降的趋势,并在抽运功率 83.5 W 时降至 0。

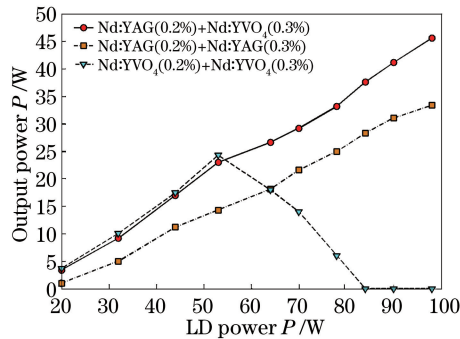


图 4 不同晶体组合条件下输出功率曲线图

Fig. 4 Output power curves with different crystal combinations

图 5 为抽运功率为 97.5W 时,两种不同组合晶体的输出功率及其波动率随 LD 温度变化曲线图。由图 5 可知,LD 工作温度在 22~32 ℃内,Nd:YAG+Nd:YAG 这种晶体组合,其输出功率的波动高达 50% 以上,LD 管芯温度的变化对其输出功率的影响非常大。而对于 Nd:YAG+Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体组合方式,输出功率的波动在 8% 以内,对 LD 管芯温度变化的适应性较强。

图 6 为在上述抽运功率条件下,两种不同组合晶体对抽运光的吸收效率随 LD 工作温度变化曲线图。当 LD 工作温度由 22 ℃变化至 32 ℃时,对于 Nd:YAG+Nd:YVO<sub>4</sub> 结构而言,其对抽运光的吸收效率可保持在 90% 以上,LD 工作温度变化对其影响较小;而在 Nd:YAG+Nd:YAG 组合结构中,其吸收效率对 LD 工作温度的变化极为敏感,同时,在最佳温度匹配状态下时,其吸收效率也远低于 Nd:YAG+Nd:YVO<sub>4</sub> 结构。

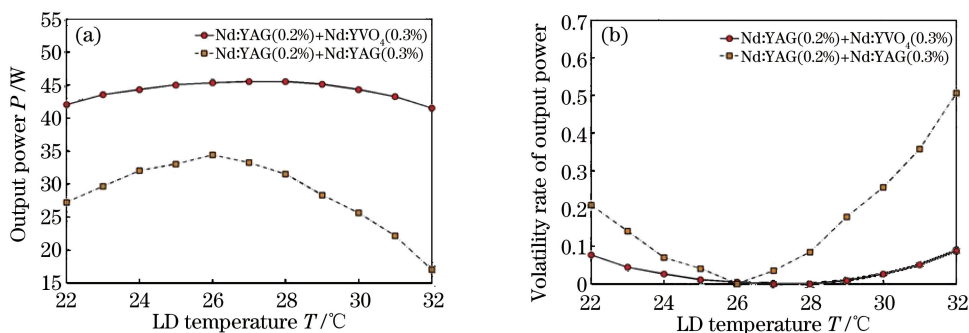


图 5 不同组合晶体(a)输出功率和(b)波动率随 LD 工作温度变化曲线

Fig. 5 (a) Output power and (b) volatility rate curves with respect to the LD temperature for different crystal combinations

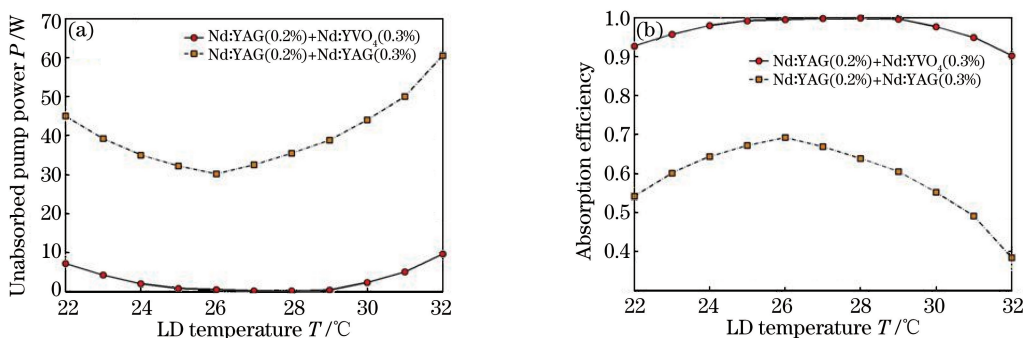


图 6 不同组合晶体中抽运光(a)未被吸收功率和(b)吸收效率随 LD 工作温度变化曲线

Fig. 6 (a) Unabsorbed pump power and (b) absorption efficiency curves with respect to the LD temperature for different crystal combinations

表 2 为不同组合晶体在输出功率 24.3 W 时,  $M^2$  因子的对应关系。由表 2 可知, Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> 组合晶体的光束质量是最好的。原因在于, Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> 组合晶体的效率较高, 其在 54.2 W 时, 输出功率便达到了 24.3 W, 而 Nd:YAG/Nd:YAG 结构在抽运功率为 78.2 W 时, 才达到与上述结构相同的输出功率, 这样的结果就导致了 Nd:YAG/Nd:YAG 结构中前端 Nd:YAG 内部热效应比 Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> 结构中的要剧烈得多, 从而引起了其光束质量的下降。同理, Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> 结构中, 其前端 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的热性能更差, 光束质量要远低于前两种组合。

表 2 输出功率 24.3 W 时不同组合晶体  $M^2$  因子对照表

Table 2  $M^2$  in different crystal combinations when output power of 24.3 W

Output power $P / W$	$M^2$		
	Nd:YAG(0.2%)+ Nd:YAG(0.3%)	Nd:YVO <sub>4</sub> (0.2%)+ Nd:YVO <sub>4</sub> (0.3%)	Nd:YAG(0.2%)+ Nd:YVO <sub>4</sub> (0.3%)
24.3	2.96	4.23	1.92

## 4 分析与讨论

表 3 为 Nd:YAG(0.2%)+Nd:YAG(0.3%) 和 Nd:YAG(0.2%)+Nd:YVO<sub>4</sub>(0.3%) 在抽运功率为 97.5 W, Nd:YVO<sub>4</sub>(0.2%)+Nd:YVO<sub>4</sub>(0.3%) 抽运功率为 53.6 W 时的实验数据表。

由表 3 可知, 与 Nd:YVO<sub>4</sub>/Nd:YVO<sub>4</sub> 结构相比, Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> 能够在高抽运功率下工作, 具有较高的输出功率和光束质量; 与 Nd:YAG/Nd:YAG 结构相比, Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> 结构受 LD 温度漂移的影响小, 对抽运光的吸收效率高, 同时光-光转换效率也较高。因此, 通过 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 前后组合放置的方式, 将两种类型晶体的优点结合在一起, 在大功率抽运工作条件下时, 大幅度降低激光器对 LD 工作温度变化的敏感程度, 提高了激光器的稳定性。

表 3 不同组合晶体实验数据表

Table 3 Experimental date of different crystal combinations

	Nd:YVO <sub>4</sub> (0.2%) + Nd:YVO <sub>4</sub> (0.3%)	Nd:YAG(0.2%) + Nd:YAG(0.3%)	Nd:YAG(0.2%) + Nd:YVO <sub>4</sub> (0.3%)
LD power $P$ /W	53.6		97.5
Output power $P$ /W	24.3	33.8	46.5
$M^2$	4.23	3.72	3.38
Optical efficiency /%	45.3	34.4	47.7
The max unabsorbed LD power (22-32 °C) $P$ /W	4.2	60.2	8.62
The max volatility of output power (22-32 °C) /%	8.2	51.2	7.9

## 5 结 论

在大功率端面抽运固体激光器中,如何降低 LD 温度波长漂移对激光器的影响,是固体激光器在大功率小体积发展过程中所面临的难题之一。提出了一种 Nd:YAG+Nd:YVO<sub>4</sub> 前后组合放置的方案,与传统 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器相比,该方案可在大抽运功率条件下,大幅度降低 LD 温度波长漂移对激光器产生的影响。研究表明,所提出的这种 Nd:YAG+Nd:YVO<sub>4</sub> 双段组合晶体,在 LD 抽运功率为 97.5 W,工作温度为 22~32 °C 内,能够实现激光器不稳定性小于 8%,增强了激光器对 LD 工作温度变化的耐受力,使其在实际应用中具有更好的环境适应性。

## 参 考 文 献

- [1] Mirzaeian H, Manjooan S, Major A. A simple technique for accurate characterization of thermal lens in solid state lasers[C]. Photonics North 2014 International Society for Optics and Photonics, 2014: 9288: 928802.
- [2] Shen Y, Bo Y, Zong N, *et al.* Experimental and theoretical investigation of pump laser induced thermal damage for polycrystalline ceramic and crystal Nd:YAG[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 160-167.
- [3] Shi Zhaohui, Liu Xuesong, Huang Yutao, *et al.* 500 kHz, 6 ns high repetition-rate electro-optical cavity dumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002006.  
石朝辉, 刘学松, 黄玉涛, 等. 500 kHz, 6 ns 高重复频率电光腔倒空 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002006.
- [4] Shibib K S, Minshid M A, Alattar N E. Thermal and stress analysis in Nd:YAG laser rod with different double end pumping methods[J]. Thermal Science, 2011, 15(s2): 399-407.
- [5] Shen Y, Liu W, Zong N, *et al.* Comparison of laser induced thermal fracture between polycrystalline ceramic and crystal Nd:YAG[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1965-1967.
- [6] Qu Pengfei, Wang Shiyu, Guo Zhen, *et al.* The combination of Nd:YAG and Nd:YVO<sub>4</sub> technology in end pumped solid-state laser[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0714002.  
屈鹏飞, 王石语, 过 振, 等. 端面抽运固体激光器中 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体组合应用技术研究[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0714002.
- [7] Tang Chun, Wu Deyong, Gao Songxin, *et al.* Package technique for CW 40W 808 nm quantum-well linear array diode laser[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(6): 514-516.  
唐 淳, 武德勇, 高松信, 等. 连续 40 W 808 nm 量子阱线阵二极管激光器封装技术[J]. 中国激光, 2002, 29(6): 514-516.
- [8] Zhao Weizu, Ma Xiuhua, HuQiquan. Developments in thermal control of laser diode for pumping [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(1): 3-6.  
赵慰祖, 马秀华, 胡企铨. 抽运用激光二极管的热控技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(1): 3-6.
- [9] 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(10): 13-16.  
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]. 光学与光电子技术, 2013, 11(10):

13-16.

- [10] Li Jianglan, Shi Yunbo, Zhao Pengfei, *et al.* High precision thermostat system with TEC for laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(6): 1745-1749.  
李江澜, 石云波, 赵鹏飞, 等. TEC 的高精度半导体激光器温控设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(6): 1745-1749.
- [11] Xu L, Zhang H, He J, *et al.* Double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser at 1064 nm[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 2012-2014.
- [12] Ai Qingkang, Chang Liang, Chen Meng, *et al.* Thermal analysis of Nd:YVO<sub>4</sub> pumped by 808nm and 888nm[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(4): 0402001.  
艾庆康, 常亮, 陈蒙, 等. 808 nm 与 888 nm 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>热效应分析[J]. *中国激光*, 2011, 38(4): 0402001.
- [13] Wang Di. The effect of Nd<sup>3+</sup> doping on the LD-pumped Nd:YAG pulsed laser output characteristics[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011: 9-10.  
王迪. Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对 LD 泵浦 Nd:YAG 脉冲激光器输出特性影响的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2011: 9-10.
- [14] Liu Xu, Wei Jingsong, Tan Chaoyang, *et al.* Theoretical analysis of multi-wavelength temperature-free-control pump source of laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0505004.  
刘旭, 魏靖松, 谭朝勇, 等. 激光器免温控泵浦源的多波长选择理论[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 0505004.
- [15] Li Jian, He Jingliang, Hou Wei, *et al.* Influence of the Nd-doped concentration on the output performance of a high-power all-solid-state Nd:YVO laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2000, 27(2): 298-302.  
李健, 何京良, 侯玮, 等. Nd<sup>3+</sup> 掺杂浓度对大功率全固态 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器输出特性影响的研究[J]. *中国激光*, 2000, 27(2): 298-302.
- [16] Li Bin, Ding Xin, Sun Bing, *et al.* Laser-diode-pumped coaxial double crystals Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> Cr:YAG passively Q-switched laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(4): 0402003.  
李斌, 丁欣, 孙冰, 等. 激光二极管抽运 Nd:YAG/Nd:YVO<sub>4</sub> 共轴双晶体 Cr:YAG 被动调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(4): 0402003.
- [17] Crepy B, Closse G, Cruz J D, *et al.* Athermal diode-pumped laser designator modules for targeting application[C]. SPIE, 2012, 8541: 85410R.
- [18] Zhang Qi, Zhang Yihao, Dong Zhen, *et al.* 980 nm high-power fundamental mode distributed-feedback laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(2): 0202004.  
张奇, 赵懿昊, 董振, 等. 980nm 大功率基横模分布反馈激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0202004.
- [19] Lu Yunfeng, Wang Yi, Liu Bin, *et al.* 1.5 MW peak power, fiber-solid hybrid amplification MOPA lasers[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0202009.  
陆云峰, 王毅, 刘斌, 等. 1.5 MW 峰值功率光纤-固体混合放大 MOPA 激光系统[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0202009.