

# LD 泵浦翠绿宝石晶体实现 760 nm、10.5 W 激光输出

关晨<sup>1</sup>, 丛振华<sup>1</sup>, 刘兆军<sup>1\*</sup>, 张行愚<sup>1</sup>, 王世武<sup>2</sup>, 聂奕<sup>2</sup>, 赵智刚<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> 山东大学信息科学与工程学院山东省激光技术与应用重点实验室, 山东 青岛 266237;

<sup>2</sup> 青岛海泰光电技术有限公司, 山东 青岛 266000

**摘要** 翠绿宝石是性能优良的宽带可调谐激光晶体, 具有荧光寿命长、饱和能量密度高、吸收带宽较宽以及热力学性能优良等诸多优点。翠绿宝石晶体独特的吸收带表明除了使用闪光灯泵浦, 还可以使用蓝光激光二极管(LD)、绿光激光器、黄光激光器、红光 LD 等多种可见光光源作为泵浦源。其中, 基于日渐成熟的高功率红光 LD 泵浦源的翠绿宝石激光器具有效率高、体积小等优势, 逐渐成为固体激光领域的研究热点。利用两台光纤耦合输出的 638 nm 高功率 LD 作为泵浦源, 使用双端偏振泵浦结构对翠绿宝石晶体进行抽运, 实现了中心波长为 760 nm、功率达 10.5 W 的可见光波段激光输出, 光-光转换效率为 20%。这是目前国内利用红光 LD 泵浦翠绿宝石晶体实现的最高输出功率。

**关键词** 激光器; 二极管泵浦; 可见光激光器; 翠绿宝石晶体

中图分类号 TN248

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.1015001

## 10.5 W Laser Output at 760 nm From LD Pumped Alexandrite Crystal

Guan Chen<sup>1</sup>, Cong Zhenhua<sup>1</sup>, Liu Zhaojun<sup>1\*</sup>, Zhang Xingyu<sup>1</sup>, Wang Shiwu<sup>2</sup>,  
Nie Yi<sup>2</sup>, Zhao Zhigang<sup>1\*\*</sup>

<sup>1</sup> Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Technology and Application, School of Information Science and Engineering, Shandong University, Qingdao, Shandong 266237, China;

<sup>2</sup> Crystech Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266000, China

**Abstract** Alexandrite is an excellent broadband tunable laser crystal with many advantages, such as long fluorescence lifetime, high saturation energy density, wide absorption bandwidth, and excellent thermodynamic properties. The unique absorption band of alexandrite crystals shows that besides flash lamp, many visible light sources such as the blue laser diode (LD), green laser, yellow laser, and red LD can be used as pump sources. Among them, the alexandrite laser based on the mature high-power red LD pump source has the advantages of high efficiency and small volume, and has gradually become a hot topic in the field of solid-state laser. Using two fiber-coupled 638 nm high-power LDs as the pump source, a double-ended polarization pumping structure is used to pump the alexandrite crystal to achieve a visible light waveband laser output with a center wavelength of 760 nm and a power of 10.5 W. The optical-to-optical conversion efficiency is 20%. This is currently the highest output power realized by red-diode-pumped alexandrite crystals in domestic researches.

**Key words** lasers; diode pumping; visible lasers; alexandrite crystal

**OCIS codes** 140.3460; 140.3480; 140.7300

翠绿宝石晶体(Alexandrite,  $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$ )是一种性能优越的宽带可调谐激光工作介质, 其波长调谐范围为 701~858 nm, 通过单次倍频即可获

得紫外激光, 其在激光雷达及激光祛斑等国防与医疗领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。与钛宝石晶体相比, 翠绿宝石晶体具有更长的荧光寿命和更大的饱和能量

收稿日期: 2020-06-24; 修回日期: 2020-06-28; 录用日期: 2020-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(11804192, 61475087)、教育部联合基金(6141A02022421, 6141A02022430)、山东省重点研发计划(2019JMRH0111)、山东省自然科学基金(ZR2019MF039)、山东大学卓越团队基金、山东大学基本科研业务费(2018JCG02, 2017JC023)、山东大学杰出中青年基金、山东大学齐鲁青年启动基金

\* E-mail: zhaojunliu@sdu.edu.cn; \*\* E-mail: zhigang@sdu.edu.cn

密度,可得到更高峰值功率的脉冲输出;另外,由于绿光激光二极管(LD)输出功率较低,目前作为钛宝石激光器泵浦源的单个绿光LD的输出功率仍被限制在1 W量级<sup>[3]</sup>,因此钛宝石激光器主要使用绿光激光器作为泵浦源<sup>[4]</sup>,但是其结构复杂、体积大、成本高、维护较困难,而翠绿宝石晶体可以使用红光LD泵浦源,其效率高、体积小。同时,翠绿宝石晶体还具有优异的热力学性能,可同时兼顾低阈值和高功率输出。然而,无论是调Q激光还是锁模激光,首先要以获得高功率的连续激光输出为前提。

近年来,随着高功率红光LD的发展,使用红光LD泵浦翠绿宝石激光器的研究逐渐成为主流方向。目前,大部分研究集中于使用非光纤耦合输出的红光LD作为泵浦源<sup>[5-7]</sup>,如:2014年,英国伦敦帝国理工学院的Teppitaksak等<sup>[6]</sup>利用非光纤耦合输出的功率为64.5 W的639 nm红光LD泵浦翠绿宝石晶体,在连续运转模式下实现了输出功率约为26 W、中心波长为759 nm的多模激光输出,但是激光光束质量较差;2020年,德国亚琛工业大学的Walochnik等<sup>[7]</sup>基于两台非光纤耦合输出的最大功率为45 W的637 nm红光LD,在折叠腔中获得了输出功率为6.5 W、波长为752 nm的基模激光输出。相对而言,光纤耦合输出的红光LD具有更好的圆对称性和可操作性,可在增益介质处获得合适的泵浦光斑尺寸<sup>[8-9]</sup>。2020年,英国伦敦帝国理工学院的Tawy等<sup>[9]</sup>利用光纤耦合输出的最大功率为34 W的636 nm红光LD泵浦翠绿宝石,实现了功率为7.4 W的757 nm基模激光输出。

国内对于翠绿宝石晶体激光器的研究还比较少,绝大多数已报道的翠绿宝石激光器仍然采用闪光灯和绿光激光器作为泵浦源<sup>[10-11]</sup>,而对基于其他泵浦源(如蓝光LD、红光LD、黄光激光器等)的翠绿宝石激光器的研究鲜有公开报道。2020年初,本课题组创新提出使用最大功率为7.7 W的589 nm

黄光激光器作为泵浦源,通过精确对准翠绿宝石吸收峰值,获得了2.51 W的基模755 nm激光输出功率,对应的斜效率约为41%;使用厚度为1 mm的双折射滤光片实现了输出激光波长的可调谐,调谐范围为727.2~787.3 nm;另外,使用9 W光纤耦合输出的红光LD作为泵浦源,实现了1.46 W的翠绿宝石激光输出<sup>[12]</sup>。

最近本课题组基于国产翠绿宝石晶体,利用两台高功率红光LD作为泵浦源,搭建了双端泵浦翠绿宝石激光器,在国内首次实现了输出功率超过10 W的翠绿宝石激光输出。实验装置如图1所示。使用两台光纤耦合输出的红光LD作为泵浦源,其中心波长为638 nm,最大输出功率约为40 W,由芯径为400 μm、数值孔径为0.22的光纤耦合输出,光经过半波片(HWP)和准直聚焦系统后入射到翠绿宝石晶体,在晶体内的聚焦光斑直径约为480 μm。准直聚焦系统由两个焦距均为50 mm的平凸透镜组成,准直镜和聚焦镜之间放置一个偏振分束器(PBS),用于控制泵浦光偏振方向,透射光为水平线偏振光,通过调节半波片,单端可提供的水平线偏振光功率高达25.7 W,且与翠绿宝石晶体的b轴平行。翠绿宝石晶体的尺寸为3 mm×3 mm×10 mm,晶体沿c轴切割,掺杂浓度(原子数分数)为0.2%,晶体对水平偏振泵浦光的吸收效率约为97%,晶体两端面均镀有700~800 nm的增透膜。为了缓解晶体的热效应,将晶体用铝箔包裹并放置于通有循环水的铜块内,水冷温度为20℃。实验采用U形对称腔结构,总腔长约为70 mm,腔镜均为平面镜。谐振腔的腔镜M<sub>1</sub>和M<sub>2</sub>均镀有对638 nm泵浦光的增透膜和对700~800 nm波段振荡光的高反膜,入射角为45°;腔镜M<sub>3</sub>镀有对700~800 nm波段振荡光的高反膜;同时,实验中分别使用了在700~800 nm振荡光波段的反射率(R)为95%、97%和99%的输出镜OC对激光输出性能进行研究。

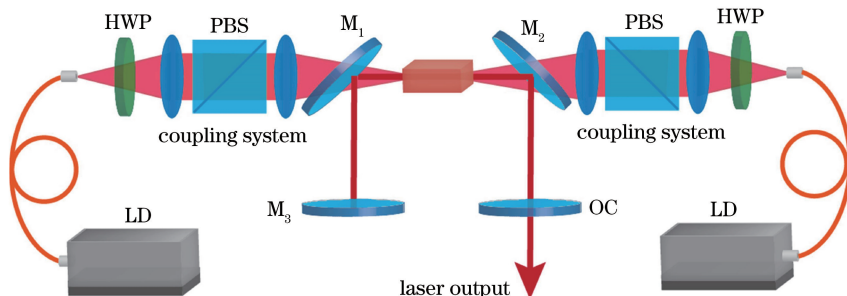


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup diagram

如图 2(a)所示,当输出镜反射率为 97%、吸收泵浦功率为 50 W 时,对应的输出激光功率为 10.5 W,光-光转换效率约为 20%。当使用反射率分别为 99%和 95% 的输出镜时,在吸收泵浦功率 50 W 下,两种输出镜对应的最大输出功率分别为 9.3 W 和 8.8 W,均小于输出镜反射率为 97%时对应的最大激光输出功率。从图 2(a)中可知,反射率为 99%、97%和 95% 的输出镜对应的吸收泵浦激光的阈值功率分别为 8.5, 11.5, 18.3 W。从图 2(a)可以看到,随着吸收泵浦功率的增大,激光输出功率并不是单调上升的,而是在吸收泵浦功率的中间部分存在一个输出功率凹陷区域,这是因为实验采用的谐振腔为对称腔,在这些吸收泵浦功率对应的热透镜焦距处,谐振腔到达了稳区边缘,输出功率会有所损耗,从而出现下降趋势;同时,由于谐振腔两臂长度近似相同,随着吸收泵浦功率的进一步增大,谐振腔很快又趋于稳定,输出激光功率继续增大;另外,反射率分别为 99%、97%和 95% 的输出镜对应的凹陷拐点不同,对应拐点的吸收泵浦功率分别为 38, 42, 44 W,其原因是谐振腔并不严格对称,更换不同的输出镜时,摆放的位置误差会使谐振腔的臂

长有些许差别,从而导致到达稳区边缘时对应的吸收泵浦功率有区别。在实验中,利用功率计测量了 10.5 W 最大激光输出功率下的功率稳定性,如图 2(b)所示,在 50 min 内的功率稳定性较好,对应的均方根值(RMS)约为 0.5%。另外,利用光谱仪测量激光输出波长时,发现随着输出激光功率的增大,输出激光波长逐渐向长波方向漂移,其原因是实验中晶体温度升高会使翠绿宝石晶体的发射谱中心波长向长波方向漂移,从而导致输出激光波长向长波方向漂移。图 3(a)为在双端偏振泵浦下最大输出功率为 10.5 W 时的激光输出光谱,对应的激光中心波长约为 760 nm,线宽(半峰全宽,FWHM)约为 1.85 nm。同时,利用 CCD 相机监测使用反射率为 97% 的输出镜时,在不同的输出功率下对应的输出激光模式,如图 3(b)所示,结果发现可获得的最大基模激光输出功率约为 5.5 W,对应的  $x$  方向的光束质量约为 1.25,  $y$  方向的光束质量约为 1.14;当输出激光功率大于 5.5 W,即吸收泵浦功率超过 35 W 时,激光为多模输出,光束质量较差,且最大输出功率为 10.5 W 时对应的  $x$  方向的光束质量约为 2.54,  $y$  方向的光束质量约为 2.19。

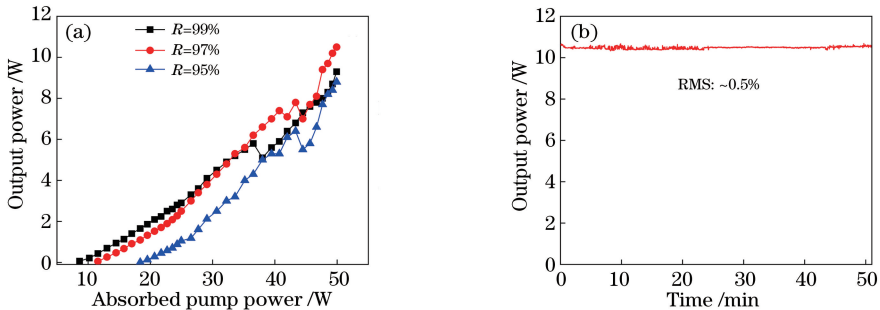


图 2 输出功率随吸收泵浦功率的变化以及最高输出功率下的功率稳定性。(a)输出功率随吸收泵浦功率的变化;(b)最高输出功率下的功率稳定性

Fig. 2 Output power versus absorbed pump power and power stability at maximum output power. (a) Output power versus absorbed pump power; (b) power stability at maximum output power

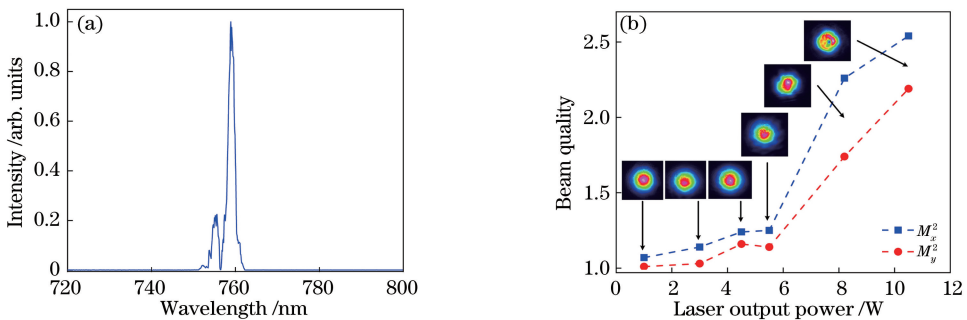


图 3 最高输出功率下的激光光谱和不同输出功率下的光束质量。(a)最高输出功率下的激光光谱;(b)不同输出功率下的光束质量

Fig. 3 Laser spectrum at maximum output power, and beam quality at different output powers. (a) Laser spectrum at maximum output power; (b) beam quality at different output powers

综上,本文使用两台高功率的红光 LD 作为泵浦源,基于国产翠绿宝石晶体搭建了双端泵浦翠绿宝石激光器系统,这是国内首次利用红光 LD 作为翠绿宝石晶体的泵浦源实现了 10 W 量级 760 nm 激光输出。进一步使用质量更佳的翠绿宝石晶体和优化谐振腔的设计,如优化谐振腔的两臂长度或使用凸面曲率腔镜等方式,以继续提升激光输出效率并使激光器在高吸收泵浦功率下仍能工作在基模输出状态,是下一步工作的重要内容。

## 参 考 文 献

- [1] Strotkamp M, Munk A, Jungbluth B, et al. Diode-pumped alexandrite laser for next generation satellite-based earth observation lidar [J]. CEAS Space Journal, 2019, 11(4): 413-422.
- [2] Lee Y J, Shin H J, Noh T, et al. Treatment of melasma and post-inflammatory hyperpigmentation by a picosecond 755-nm alexandrite laser in Asian patients[J]. Annals of Dermatology, 2017, 29(6): 779-781.
- [3] Miao Z W, Yu H J, Zhang J Y, et al. Watt-level CW Ti:sapphire oscillator directly pumped with green laser diodes module[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2020, 32(5): 247-250.
- [4] Zong Q S, Bian Q, Xu C, et al. High beam quality narrow linewidth microsecond pulse Ti:sapphire laser operating at 819.710 nm [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 52-56.
- [5] Beyatli E, Baali I, Sumpf B, et al. Tapered diode-pumped continuous-wave alexandrite laser [J]. Journal of the Optical Society of America B, 2013, 30(12): 3148-3192.
- [6] Teppitaksak A, Minassian A, Thomas G M, et al. High efficiency >26 W diode end-pumped alexandrite laser[J]. Optics Express, 2014, 22(13): 16386-16392.
- [7] Walochnik M, Jungbluth B, Huber H, et al. Diode-pumped cw alexandrite laser with temporally stable 6.5 W in TEM<sub>00</sub> operation with prospect of power scaling[J]. Optics Express, 2020, 28(11): 15761-15769.
- [8] Tawy G, Damzen M J. Tunable, dual wavelength and self-Q-switched alexandrite laser using crystal birefringence control[J]. Optics Express, 2019, 27(13): 17507-17520.
- [9] Tawy G, Minassian A, Damzen M J. High-power 7.4 W TEM<sub>00</sub> and wavelength-tunable alexandrite laser with a novel cavity design and efficient fibre-coupled diode-pumping[J]. OSA Continuum, 2020, 3(6): 1638-1649.
- [10] Liu S H, Liu J J, Wang L J. Design and experimental research of tunable alexandrite laser in the visible range [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2008, 19(3): 326-330.  
刘书航, 刘京郊, 王立军. 可见光可调谐金绿宝石激光器的设计与实验 [J]. 光电子 • 激光, 2008, 19(3): 326-330.
- [11] Xiao C L. Study on all-solid-state BeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Cr<sup>3+</sup> laser [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2011.  
肖崇溧. 全固态金绿宝石激光器研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2011.
- [12] Guan C, Liu Z J, Cong Z H, et al. Alexandrite laser on-peak pumped by a frequency doubled Raman Yb-fiber laser at 589 nm[J]. OSA Continuum, 2020, 3(5): 1204-1210.