

# 蓝光激光二极管抽运 Pr:YLF 绿光激光器

黄舜林 刘哲 曾承航 蔡志平 许惠英

(厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要** 报道了蓝光激光二极管抽运的掺镨氟化钇锂(Pr:YLF)固体绿光激光器。采用长度 5 mm、掺杂离子数分数为 0.5% 的 Pr:YLF 晶体作为激光增益介质,在中心波长 444 nm 的蓝光激光二极管抽运下,获得波长 522.4 nm 的连续绿光激光输出。应用不同透射率的输出耦合镜研究了激光器的输入输出特性。在吸收抽运光功率 530 mW, 输出镜透射率为 1.9% 时获得最大输出功率为 90.1 mW,斜效率达到 65.3%。

**关键词** 激光器;绿光激光器;掺镨氟化钇锂晶体;蓝光激光二极管;端面抽运

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1202005

## Blue Laser Diode Pumped Pr:YLF Green Laser

Huang Shunlin Liu Zhe Zeng Chenghang Cai Zhiping Xu Huiying

(Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

**Abstract** Blue laser diode pumped Pr:YLF solid-state green laser is reported. A 5 mm long Pr:YLF crystal with the doping concentration of 0.5% is used as laser gain material, pumped by a blue laser diode with emitting central wavelength at 444 nm. Continuous-wave green laser output at 522.4 nm is obtained. Input and output characteristics of the lasers are studied with different output couplers. Under an absorbed pump power of about 530 mW, the maximum output power of 90.1 mW is obtained with 1.9% transmission coupler. The slope efficiency is as high as 65.3%.

**Key words** lasers; green laser; Pr:YLF crystal; blue laser diode; end-pump

**OCIS codes** 140.3480; 140.3580; 140.7300

## 1 引言

可见光波段的激光在显示、光谱学、数据存储、全息技术、生物医学和量子光学等方面有着特殊而重要的应用。其中红绿蓝三基色激光可作为激光显示的光源,蓝绿光波段激光还可用于水下通信<sup>[1,2]</sup>和照明等。因此研究红绿蓝三基色激光光源具有重要意义,而绿光激光是限制其发展的一个重要因素。产生绿光激光的方法一般有激光二极管直接激射绿光<sup>[3~5]</sup>和通过倍频技术来获得<sup>[6~8]</sup>。但是,绿光二极管激光器当前还处于实验室阶段,且输出功率小,效率低。对于倍频技术,倍频过程中易受温度等参量的影响,转换效率低,且利用非线性倍频产生绿光

往往需要构建复杂的 V 型或者 Z 型腔,此外倍频晶体本身的温控系统也大大增加了系统的复杂性。因此,研究结构紧凑、转换效率高的绿光激光器是目前热点之一。

三价镨离子掺杂的激光材料具有丰富的位于可见光波段的跃迁<sup>[9,10]</sup>。相较于氧化物激光材料来说,氟化物材料具有较低的声子能量,这一特性不仅使得以氟化物作为基质的激光增益介质能够产生连续的激光输出,而且也大大地缓解了端面抽运激光器的热透镜效应。1977 年 Esterowitz 等<sup>[11]</sup>报道了脉冲染料激光器抽运掺镨氟化钇锂(Pr:YLF)激光器。此后出现了不同抽运源抽运的 Pr:YLF 激光

收稿日期: 2012-06-28; 收到修改稿日期: 2012-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(61275050)和厦门市科技项目(3502Z20113004)资助课题。

作者简介: 黄舜林(1986—),男,硕士研究生,主要从事固体激光器技术及其应用等方面的研究。

E-mail: huangshunlin@126.com

导师简介: 蔡志平(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事光电子技术方面的研究。E-mail: zpcai@xmu.edu.cn (通信联系人)

器<sup>[12~14]</sup>。然而这些抽运源都存在一个共同的弊端,即抽运波长不能和 Pr:YLF 晶体的吸收峰很好地匹配。随着半导体激光技术的发展,可见光波段激光二极管抽运 Pr:YLF 激光器开始出现。2004 年 Richter 等<sup>[15]</sup>报道了用蓝光 GaN 激光二极管作为抽运源。2010 年 Hansen 等<sup>[16]</sup>报道了用 1 W 的 InGaN 激光二极管作抽运源,获得了 358 mW 波长为 523 nm 的绿光输出,斜效率 54%。2011 年 Gün 等<sup>[17]</sup>用两个发射波长为 443.9 nm、输出功率各为 1 W 的 InGaN 激光二极管作抽运源,采用双端抽运方式,获得了多种波长激光输出,其中 522.6 nm 绿光斜效率为 61.5%。国内关于 Pr:YLF 绿光激光器的研究比较少<sup>[18,19]</sup>,目前也尚无关于激光二极管抽运 Pr:YLF 绿光激光器的报道。本文利用蓝光激光二极管作为抽运源,实现了高斜效率连续 Pr:YLF 全固态绿光激光器。

## 2 实验研究

### 2.1 Pr:YLF 晶体光谱特性

Pr:YLF 晶体是单轴晶体,吸收谱和发射谱存在偏振特性。图 1 是 Pr 离子能级结构及其可见光波段跃迁示意图。Pr 离子可实现红光、绿光、橙光等可见光波段谱线跃迁。

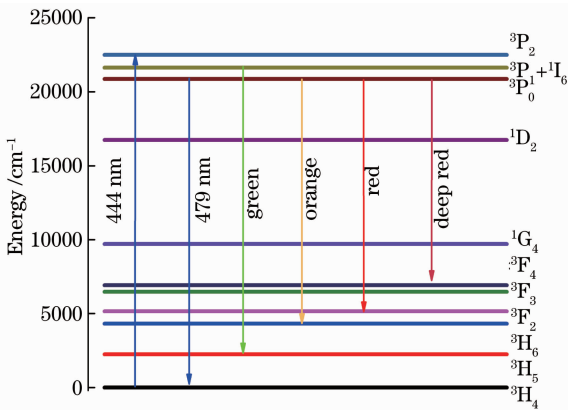


图 1 Pr 离子能级结构及可见光波段能级跃迁  
Fig. 1 Energy level scheme of Pr with transitions in the visible spectral region

图 2 是用 PerkinElmer Lambda750 分光光度计测得的 Pr:YLF 晶体偏振吸收谱线。

$\pi$  偏振表示电场  $E$  平行于晶体  $c$  轴, $\sigma$  偏振表示电场  $E$  平行于  $a$  轴。该晶体在蓝光波段存在着三条比较大的吸收谱线分别为 444.1、469.0、479.3 nm。其中在 444 nm 处的吸收最强,且适合蓝光激光二极管抽运,其吸收系数  $\alpha$  经计算约为  $3.6 \text{ cm}^{-1}$ ,此处吸

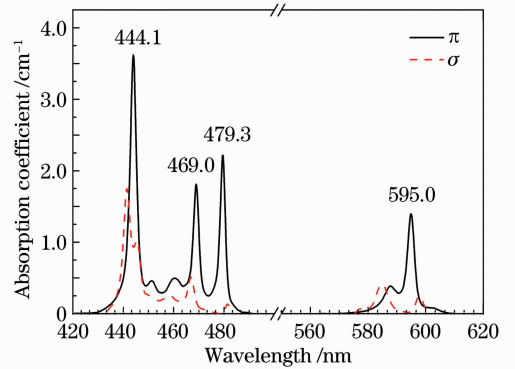


图 2 Pr:YLF 晶体的吸收谱

收谱线半峰全宽 (FWHM) 约为 3 nm,对应着  $^3H_4 \rightarrow ^3P_2$  跃迁。实验中选择波长约 444 nm 的蓝光激光二极管作为抽运源。由于晶体对  $\pi$  偏振方向抽运光吸收系数较大,所以需要调整抽运光的方向为  $\pi$  偏振,使得晶体对抽运光有较大的吸收。实验测得该晶体对 444 nm 抽运光的吸收率约为 76%,小于理论上 444 nm 峰值处吸收效率

$$\eta_a = 1 - \exp(-\alpha l) = 83.5\%$$

其中  $\alpha$  为吸收系数, $l$  为晶体长度。原因是抽运光光谱线宽比较大,抽运光不是纯线偏振等。

图 3 是在常温下用海洋光学 HR2000+ 光谱仪测得的 Pr:YLF 晶体的发射谱。

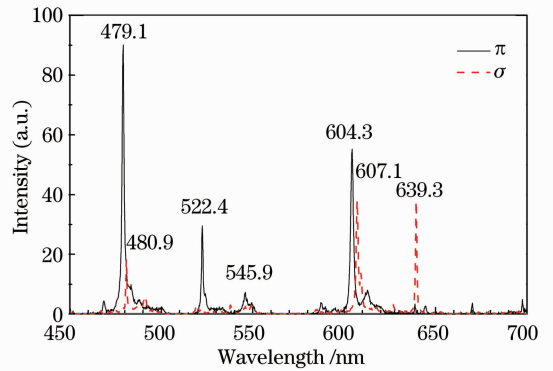


图 3 Pr:YLF 晶体的发射谱

Fig. 3 Polarized emission spectra of Pr:YLF

639.3 nm 波长对应着  $^3P_0 \rightarrow ^3F_2$  跃迁,522.4 nm 对应着  $^3P_1 \rightarrow ^3H_5$  跃迁。绿光谱线比红光谱线弱。绿光激光的产生机理是低能级粒子在抽运光作用下跃迁到高能级  $^3P_2$ ,然后粒子快速弛豫到亚稳能级  $^3P_0$ ,在热作用下粒子弛豫到  $^3P_1$  能级,最后跃迁到基态能级中的  $^3H_5$  能级从而产生波长 522.4 nm 的绿光<sup>[20]</sup>。

### 2.2 实验装置及结果分析

实验中采用由一个平面输入镜和一个曲率半径  $R_{oc}$  为 50 mm 的凹面输出镜构成的线形腔结构。实

验装置如图 4 所示。

采用国内生长的长度为 5 mm、Pr 离子数分数为 0.5% 的 Pr:YLF 晶体作为激光器的工作物质。晶体固定在铜的晶体架上,采用自然冷却。输入镜 M1 为平面镜,镀有对抽运光(444 nm)高透、对波长 522 nm 激光高反的介质膜,在 522 nm 处反射率大于 99.9%,其透射率曲线如图 5 中实线所示。

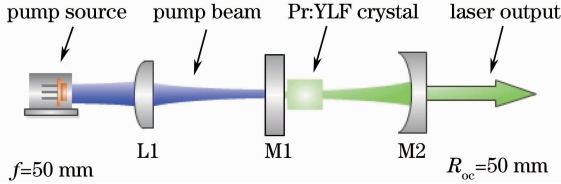


图 4 实验装置示意图

Fig. 4 Schematic setup of blue laser diode pumped Pr:YLF laser

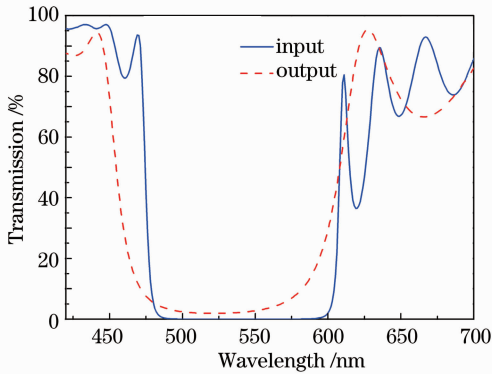


图 5 输入和输出镜透射率曲线

Fig. 5 Transmission versus wavelength for the input and output couplers

输出耦合镜 M2 为平凹镜,曲率半径  $R_{oc} = 50$  mm,镀有对 522 nm 激光部分透射的介质膜。实验所用腔镜上的膜系均为本课题组镀制。实验采用三个在 522 nm 处透射率  $T_{oc}$  分别为 0.66%、1.9%、3.2% 的输出镜。图 5 中虚线是  $T_{oc} = 1.9\%$  输出镜的透射率曲线。腔镜上介质膜的制作必须保证对所产生的激光有高的反射率,而至少有一个镜子上的膜对可能产生的其他波段的激光有高的透射率,以抑制它们的振荡。所用输入镜在 500~580 nm 波段反射率大于 99.9%,而在有较大发射截面的 640 nm 红光处的透射率为 81%。三个输出镜在绿光处的透射率都小于 4%,而在红光处也都具有较高的透射率,比如在 522 nm 绿光处  $T_{oc} = 1.9\%$  的输出镜,其在 640 nm 处透射率为 83%,可有效地抑制 640 nm 红光激光的产生。实验采用 1 W InGaN 蓝光激光二极管作为抽运源,中心波长约为 444 nm。经过聚焦准直后,通过一个焦距  $f = 50$  mm 的球面镜聚焦到晶体

上。整个激光谐振腔腔长约为 5 cm。实验中通过测量晶体后面透射的抽运光功率,使其最小来确定抽运源的放置方向。实验测得在激光二极管输出功率为 770 mW 时,发射波长与晶体吸收峰较匹配,晶体吸收的抽运光功率约为 530 mW。

激光器输入输出特性如图 6 所示,其中横坐标对应晶体吸收的抽运光功率,纵坐标对应绿光激光器的输出功率。图中直线是根据实验数据拟合出的结果。

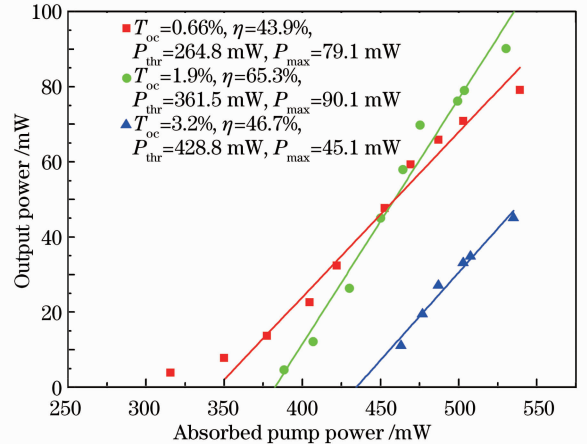


图 6 绿光激光器的输出特性曲线

Fig. 6 Output power versus absorbed pump power for green lasers

当输出镜透射率  $T_{oc} = 3.2\%$  时,最大输出功率为 45.1 mW,抽运光功率阈值  $P_{thr} = 428.8$  mW,拟合的斜效率为 46.7%;当  $T_{oc} = 0.66\%$  时,最大输出功率为 79.1 mW,  $P_{thr} = 264.8$  mW,斜效率为 43.9%。利用一个透射率  $T_{oc} = 1.9\%$  的输出镜,获得了绿光激光的最大输出功率 90.1 mW,相对于吸收功率,其斜效率达到  $\eta_s = 65.3\%$ ,此时激光器的抽运光功率阈值为 361.5 mW。由获得的最大斜效率  $\eta_s = 65.3\%$ ,计算当激光输出耦合镜  $T_{oc} = 1.9\%$  时腔内最大往返损耗  $L_i$ 。由  $\eta_s = \eta_p \eta_c \eta_q \eta_e^{[21]}$ ,其中  $\eta_p$  为抽运光效率,这里为 1;  $\eta_c$  是输出耦合效率,  $\eta_q$  是量子效率,  $\eta_q = \lambda_p / \lambda_l = 85\%$ ,  $\lambda_p$  是抽运光波长,  $\lambda_l$  是激光波长,假设抽运光与激光模式交叠效率  $\eta_t$  为 1,可计算得输出耦合效率  $\eta_c = 76.8\%$ ,再由  $\eta_c = -\ln(1 - T_{oc}) / [-\ln(1 - T_{oc}) + L_i]$  可算得腔内最大往返损耗  $L_i = 0.58\%$ 。

实验发现在吸收抽运光功率 530 mW 不变的情况下,随着输出镜透射率增大,激光器阈值也增大;输出功率则先上升后下降,因此在此抽运光功率下存在使输出功率最大的最佳透射率,通过优化输出镜透射率有望获得更大功率的激光输出。实验中没

有观察到输出功率饱和的情况,因此输出功率的提高可以进一步通过增加抽运光功率来实现。图 7 是使用分辨率为 0.22 nm 的海洋光学 HR2000+光谱仪测得的绿光激光谱线。谱线的中心波长 522.4 nm, FWHM 约为 0.42 nm。

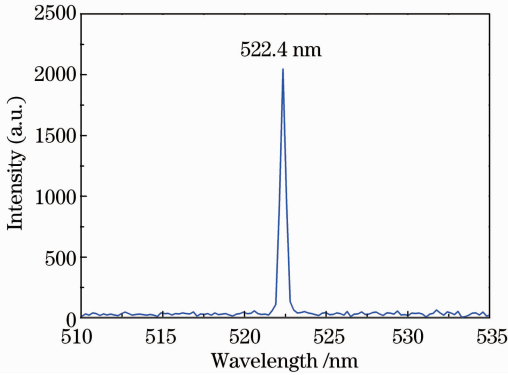


图 7 绿光激光谱线

Fig. 7 Spectrum of green laser

### 3 结 论

研究了一种高斜效率的蓝光激光二极管抽运连续 Pr:YLF 全固体绿光激光器。获得了波长 522.4 nm、最大输出功率 90.1 mW 的绿光激光输出,相对于吸收功率的斜效率为 65.3%。分析了最大输出功率时最大腔内往返损耗约为 0.58%。由于实验所用晶体蓝光吸收系数比较低,影响了光-光转换效率的提高。采用有更高吸收系数的质量更优的晶体,提高聚焦镜、输入镜的抽运光透射率,有望提高光-光转换效率。为了进一步提高绿光输出功率和斜效率,可对激光器进行优化,比如提高抽运光功率,采用谱线更窄、线偏振特性更好的 InGaN 二极管激光器,优化激光增益介质的掺杂浓度和长度,优化输出耦合镜的透射率等。

### 参 考 文 献

- 1 Liu Jintao, Chen Weibiao. Feasibility study of laser communications from satellite to submerged platform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(10): 1441~1446  
刘金涛, 陈卫标. 星载激光对水下目标通信可行性研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(10): 1441~1446
- 2 Wei Wei, Zhang Xiaohui, Rao Jionghui *et al.*. Study on computing the receiving optical power in underwater optical wireless communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0905002  
魏 巍, 张晓晖, 饶炯辉 等. 水下无线光通信接收光功率的计算研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0905002
- 3 A. Avramescu, T. Lermer, J. Muller *et al.*. InGaN laser diodes with 50 mW output power emitting at 515 nm[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(7): 071103
- 4 S. Lutgen, A. Avramescu, T. Lermer *et al.*. True green InGaN laser diodes [J]. *Physica Status Solidi (a)*, 2010, **207**(6): 1318~1322

- 5 J. Kasai, R. Akimoto, H. Kuwatsuka *et al.*. 545 nm room-temperature continuous-wave operation of BeZnCdSe quantum-well green laser diodes with low threshold current density[J]. *Appl. Phys. Express*, 2010, **3**(9): 091201
- 6 He Jingliang, Hou Wei, Zhang Hengli *et al.*. 8.8 W green laser by intracavity frequency doubling of a LD pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(6): 481~484  
何京良, 侯 玮, 张恒利 等. LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 腔内倍频连续波 8.8 W 绿光激光器 [J]. *中国激光*, 2000, **27**(6): 481~484
- 7 Yan Boxia, Bi Yong, Wang Dongdong *et al.*. Compact and highly efficient 3.8 W intracavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgLN green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(3): 0302007  
颜博霞, 毕 勇, 王栋栋 等. 紧凑高效的 Nd:YVO<sub>4</sub>/PPMgLN 腔内倍频 3.8 W 连续绿光激光器 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(3): 0302007
- 8 Li Yongliang, Jiang Huilin, Zhang Lizhong. RTP type-II critical phase-matched 542.7 nm green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1172~1175  
李永亮, 姜会林, 张立中. RTP II 类临界相位匹配 542.7 nm 绿光激光器 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1172~1175
- 9 L. Esterowitz, F. Bartoli, R. Allen *et al.*. Energy levels and line intensities of Pr<sup>3+</sup> in LiYF<sub>4</sub> [J]. *Phys. Rev. B*, 1979, **19**(12): 6442~6455
- 10 A. Richter, E. Heumann, G. Huber *et al.*. Power scaling of semiconductor laser pumped praseodymium-lasers [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(8): 5172~5178
- 11 L. Esterowitz, R. Allen, M. Krueer *et al.*. Blue light emission by a Pr:LiYF<sub>4</sub>-laser operated at room temperature [J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(2): 650~652
- 12 A. A. Kaminskii, A. Lyashenko, N. Isaev *et al.*. Quasi-cw Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> laser with  $\lambda = 0.6395 \mu\text{m}$  and an average output power of 2.3 W [J]. *Quantum Electron.*, 1998, **28**(3): 187~188
- 13 T. Sandrock, T. Danger, E. Heumann *et al.*. Efficient continuous wave-laser emission of Pr<sup>3+</sup>-doped fluorides at room temperature [J]. *Appl. Phys. B: Lasers and Optics*, 1994, **58**(2): 149~151
- 14 E. Heumann, C. Czeranowsky, T. Kellner *et al.*. An efficient all-solid-state Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> laser in the visible spectral range [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics, 1999. 86~87
- 15 A. Richter, E. Heumann, E. Osiaac *et al.*. Diode pumping of a continuous-wave Pr<sup>3+</sup>-doped LiYF<sub>4</sub> laser [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2638~2640
- 16 N. O. Hansen, A. R. Bellancourt, U. Weichmann *et al.*. Efficient green continuous-wave lasing of blue-diode-pumped solid-state lasers based on praseodymium-doped LiYF<sub>4</sub> [J]. *Appl. Opt.*, 2010, **49**(20): 3864~3868
- 17 T. Gün, P. Metz, G. Huber. Power scaling of laser diode pumped Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> cw lasers; efficient laser operation at 522.6, 545.9, 607.2, and 639.5 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(6): 1002~1004
- 18 Ruan Shuangchen, J. Sutherland, P. French *et al.*. Dual wavelength Pr:YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers B*, 1995, **4**(3): 207~210
- 19 Luo Ming. Study of the Laser Properties of the Pr<sup>3+</sup>:YLF Crystal [D]. Harbin; Harbin Institute of Technology, 2010. 40~44  
罗 明. Pr<sup>3+</sup>:YLF 晶体激光特性的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 40~44
- 20 F. Cornacchia, A. Di Lieto, M. Tonelli *et al.*. Efficient visible laser emission of GaN laser diode pumped Pr-doped fluoride crystals [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(20): 15932~15941
- 21 O. Svelto. Principles of Lasers (5th ed.) [M]. New York: Plenum Press, 2009. 256~283

栏目编辑: 宋梅梅