

蓝光抽运掺镨氟化钇锂橙光激光器

闫宇¹ 刘哲^{1,2} 徐斌¹ 王凤娟¹ 蔡志平¹ 许惠英¹ 罗塞雨¹ 渠彪¹

P Camy² J L Doualan² R Moncorgé²

(¹ 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005
² 法国卡昂大学材料与光电离子研究中心, 卡昂 法国 14050)

摘要 报道了蓝光半导体激光抽运的掺镨氟化钇锂(Pr:YLF)橙光 607 nm 固体激光器。光抽运半导体激光器(OPSL)与激光二极管(LD)相比具有光束质量好、输出功率高、吸收效率高优点,因此采用 OPSL 作为抽运源有助于提高 Pr:YLF 激光器性能。分别测量了 Pr:YLF 在橙光波段内常温(300 K)和低温(12 K)时的偏振发射光谱,表明该晶体的橙光 $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$ 跃迁主要包含 6 条发射谱线。采用最高输出功率为 1.9 W,中心波长为 479.2 nm 的 OPSL 作为抽运源,以及长度为 5 mm、掺杂原子数分数为 0.5% 的 Pr:YLF 晶体作为增益介质,在平凹腔结构下获得的橙光 607 nm 最大连续输出功率为 524 mW,对应斜率效率为 39.1%。

关键词 激光器; 橙光激光器; 掺镨氟化钇锂晶体; 光抽运半导体激光器

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.s102004

Blue Laser Pumped Pr:YLF Orange Laser

Yan Yu¹ Liu Zhe^{1,2} Xu Bin¹ Wang Fengjuan¹ Cai Zhiping¹ Xu Huiying¹

Luo Saiyu¹ Qu Biao¹ P Camy² J L Doualan² R Moncorgé²

¹ Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China

² Centre de Recherches sur les Ions, les Matériaux et la Photonique (CIMAP), UMR CEA-CNRS-ENSI Caen, Université de Caen, Caen 14050, France

Abstract Blue semiconductor laser pumped Pr:YLF orange laser at 607 nm is reported. Compared to laser diodes (LDs), the optically pumped semiconductor lasers (OPSLs) have better beam quality, higher output power and higher absorption efficiency. So pumping with OPSLs can help to improve the laser performance. The polarized emission spectra of Pr:YLF in the orange band at 12 K and 300 K are measured, showing that the orange transition $^3P_0 \rightarrow ^3H_6$ consists of 6 emission lines. An OPSL providing output power of up to 1.9 W and centered at 479.2 nm is used as the pump source. With a 5 mm-long Pr:YLF crystal with a doping concentration of 0.5% and a plano-concave cavity, orange laser emission at 607 nm with an output power of 524 mW is obtained, corresponding to a slope efficiency of 39.1%.

Key words lasers; orange lasers; Pr:YLF crystal; optically pumped semiconductor lasers

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.7300

1 引言

橙光激光器在天文学、环境、生物医学以及显示等众多领域扮演着重要的角色。在过去的 10 年中,倍频与和频^[1]技术是产生可见光波段受激辐射的重

要手段,许多晶体如 LiNbO₃、KTP、LBO、BBO、BIBO 可以产生整个可见光波段的受激辐射。长春理工大学使用 18 W,1085 nm 与 11.5 W,1342 nm 的 Nd:YVO₄ 激光器在 KTP 中和频产生了 600 nm 橙光激

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(61275050)、博士点基金(20120121110034)、厦门市科技项目(3502Z20113004)

作者简介: 闫宇(1988—),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: hnqz022006@163.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)

射^[2],功率达到 1.06 W,光束质量因子 M^2 为 1.9。然而,这种方式在橙光光谱范围内连续激射的整体效率很低,而且 KTP 晶体与 Nd:YVO₄ 晶体本身的温控系统也大大增加了系统的复杂性。因此,探索一种结构紧凑、输出功率高的橙光激光器是目前的热点之一。本文使用掺镨氟化物作为增益介质搭建激光器,无需加入温控系统,结构简单,它产生 607 nm 橙光并且光束质量优于上述和频产生的激光。

三价镨离子(Pr³⁺)在可见光波段存在着不同的跃迁,因此 Pr³⁺ 掺杂的晶体材料是一种替代倍频晶体产生可见光的理想材料。掺镨氟化钪锂(Pr:YLF)晶体具有较低的声子能量,这一特性使得以该晶体作为激光增益介质的激光器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。最早作为 Pr³⁺ 抽运源的是染料脉冲激光器^[3]、闪光灯^[4]以及氙离子激光器^[5],在过去几年中,由于蓝光 InGaN 激光二极管(LD)的商业化与光泵半导体激光器(OPSL)的出现,众多研究者开始使用蓝光 LD 或 OPSL 作为 Pr³⁺ 的抽运源^[6-9]。与 LD 相比,OPSL 具有光束质量好、输出功率高、吸收效率高优点,因此采用 OPSL 作为抽运源有助于提高 Pr:YLF 激光器的性能。迄今为止,对于橙光报道的最高功率是由德国汉堡大学采用 1 W 激光二极管双端抽运获得的 418 mW 橙光 607.2 nm 激射^[9]。

本文报道在室温下的 Pr:YLF 晶体的连续橙光激光输出。分别采用蓝光 LD 与 OPSL 作为抽运源,中心波长分别为 443.8 nm 与 479.2 nm,以及长度为 5 mm 的 Pr:YLF 晶体作为增益介质。在平凹腔结构下使用 LD 作为抽运源时获得的 607 nm 橙光最大连续输出功率为 163 mW。使用 OPSL 作为抽运源时获得的 607 nm 橙光最大连续输出功率为 524 mW,对应的斜率效率为 39.1%,这是掺 Pr 材料在橙光波段(³P₀→³H₆)实现的最高功率输出。

2 实验研究

2.1 Pr:YLF 晶体中跃迁(³P₀→³H₆)光谱特性

Pr:YLF 是单轴晶体,且各向异性。该激光晶体的荧光辐射存在两个正交的偏振方向,即电矢量平行于晶体 a 轴的方向($E//a$, 简称为 σ 方向)和电矢量平行于晶体 c 轴的方向($E//c$, 简称为 π 方向)。晶体对蓝光(420~490 nm)有较大吸收,且有三个吸收带可将基态粒子激发到³P_{*J*} ($J=1, 2, 3$)激发态,其中心波长分别为 443.9、468.7、479.2 nm,其

中 479.2 nm 处吸收截面最大,达 $2.17 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$,跃迁半峰全宽(FWHM)为 0.5 nm,443.9 nm 处吸收截面为 $9.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,跃迁 FWHM 为 1.8 nm。此外,Pr:YLF 在橙光波段也存在一个吸收带,由此会引发谱线的重吸收,所以已报道橙光跃迁³P₀→³H₆的激光性能与其他谱线有明显差距,可能的解释是基态吸收跃迁³H₄→¹D₂导致该谱线存在重吸收损耗^[10]。

图 1 为 Pr:YLF 的能级图,主要展示的是³P₀→³H₆的能级跃迁,³H₆能级中共存在 6 个子能级,因此会存在 6 条³P₀→³H₆的跃迁谱线。图 2 和图 3 分别为 Pr:YLF 在室温(300 K)与低温(12 K)时的发射谱。在低温 12 K 时,物质粒子的热运动表现得很弱,可以认为所有的粒子都处于基态(³H₄),因此可以通过低温光谱来确定 Pr:YLF 晶体在橙光的跃迁。从图 3 可以看出,有明显的 5 条发射谱,分别是 604.2、607.2、609.4、613.2、626.7 nm,另外,如内插图所示还存在一条不易观察到的 610.0 nm。在³H₆中有 6 个子能级,根据 Adam 等^[11]实验结

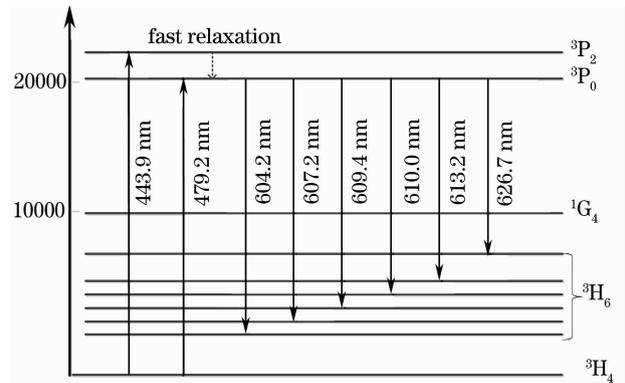


图 1 Pr³⁺ 能级结构及可见光波段能级跃迁
Fig. 1 Energy level scheme of Pr³⁺ with transitions in the visible spectral region

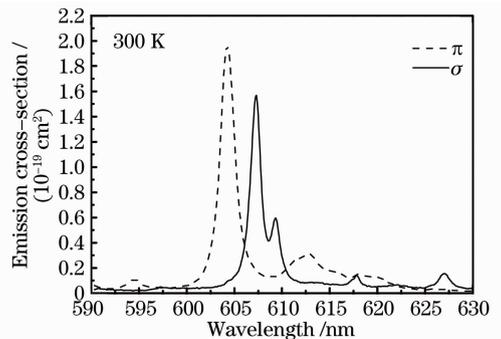


图 2 Pr:YLF 晶体可见光波段室温发射谱
Fig. 2 Emission spectra of Pr:YLF at room temperature

果,可以验证 ${}^3P_0 \rightarrow {}^3H_6$ 的6条发射谱线,分别为604.0、607.0、609.1、610.0、613.2、626.3 nm,并且根据其实验中所建立的偏振判定法则,可以推断出604.0、610.0、613.2 nm为 π 偏振,其他3条为 σ 偏振,这与本课题组所测得的低温下的发射光谱完全吻合。由图2、图3可见,604.2、607.2 nm时的跃迁所对应的发射截面积最大。基于450~750 nm范围内发射谱的测量结果,本文利用F-L方法^[12]计算Pr:YLF的受激发射截面。

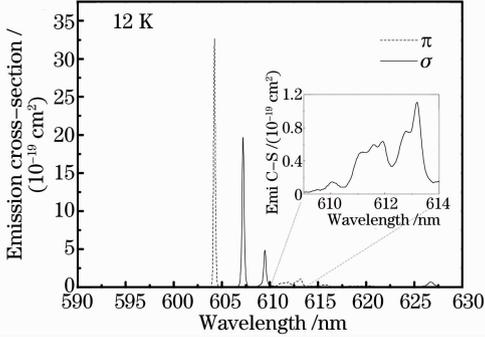


图3 Pr:YLF晶体可见光波段低温发射谱
Fig. 3 Emission spectra of Pr:YLF at low temperature

2.2 实验装置及结果分析

为了减少可能的非辐射交叉弛豫现象,应选用掺杂浓度低的晶体作为实验材料^[13-14],因此采用原子数分数为0.5%,5 mm长的Pr:YLF晶体。首先,实验采用443.8 nm蓝光LD作为抽运源,其最高输出功率为850 mW,光束质量因子 $M^2 = 2.3 \times 9.2$,光斑为长方形,因此需要加入棱镜将其整形成正方形,使用焦距 $f = 50$ mm的透镜L2聚焦。

实验装置如图4(a)所示。实验采用平凹腔,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,镀有对抽运光高透对波长607 nm橙光高反的介质膜。实验使用的输出镜M2曲率半径 $R_{oc} = 50$ mm,谐振腔的腔长约为46 mm,分别采用对607 nm光透射率为2.3%与3.5%的输出镜片进行实验,透射率未经优化。针对于晶体单层膜吸收效率为91%,光光转换效率为激光输出功率与注入晶体的抽运功率的比值。

输出特性如图5(a)所示。当输出镜透射率 $T = 2.3\%$ 时,最高输出功率为151 mW,阈值 $P_{th} = 83$ mW,拟合的斜率效率 $\eta = 25.1\%$,光光转换效率为22.6%;当 $T = 3.5\%$ 时,最高输出功率为163 mW,阈值 $P_{th} = 132$ mW,拟合的斜率效率为 $\eta = 29.3\%$,光光转换效率为24.2%。使用Spiricon

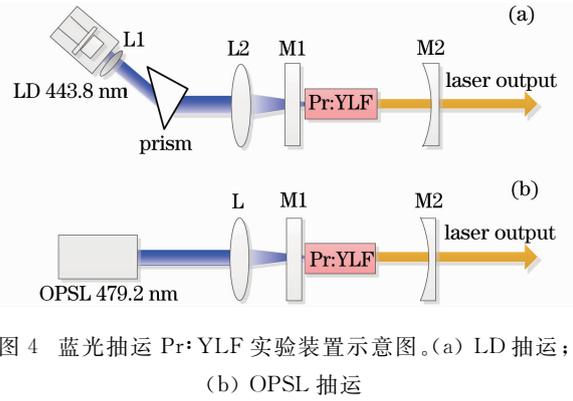


图4 蓝光抽运Pr:YLF实验装置示意图。(a) LD抽运;
(b) OPSL抽运

Fig. 4 Schematic setup of blue laser pumped Pr:YLF laser. (a) LD pumped; (b) OPSL pumped
 $M^2 = 1.11 \times 1.05$,接近于高斯光束。

蓝光OPSL由相干公司生产,中心波长为479.2 nm,与Pr:YLF的 ${}^3H_4 \rightarrow {}^3P_0$ 吸收峰位置(479.2 nm)恰好匹配。激光器的最大输出功率为1.9 W,FWHM小于30 GHz(0.023 nm),能为Pr:YLF材料提供非常有效的抽运。OPSL光束质量较好, M^2 小于1.1。图4(b)为使用OPSL作为抽运源的装置图,使用 $f = 75$ mm透镜L将抽运光聚焦进原子数分数为0.5%,5 mm长的Pr:YLF晶体中,分别采用对607 nm光透射率为2.3%与3.5%的输出镜片进行实验,此时输入输出特性如图5(b)所示。

当输出镜M2透射率 $T = 2.3\%$ 时,最高输出功率为418 mW,阈值为84 mW,拟合的斜率效率为 $\eta = 30.7\%$,光光转换效率为28.5%。当输出镜透射率 $T = 3.5\%$ 时,橙光激光的最高输出功率为524 mW,阈值为101 mW,斜率效率为39.1%,光光转换效率为36.0%。图6是使用海洋光学光谱仪(Ocean-Optics HR2000+,分辨率0.24 nm)测得的橙光谱线,谱线的中心波长607.1 nm,光谱线宽为0.4 nm。

实验中无论是LD抽运还是OPSL抽运,输出镜透射率为3.5%时的最高输出功率都优于为2.3%时,表明输出镜透射率对输出功率影响较大。与LD抽运对比,OPSL有着明显优势:OPSL的波长为479.2 nm,与Pr:YLF的吸收峰非常匹配,且具有最大的吸收截面;OPSL光束质量好, M^2 小于1.1,接近高斯光束,远远优于LD的光束质量;OPSL提供更高的抽运功率从而获得更大的输出功率。

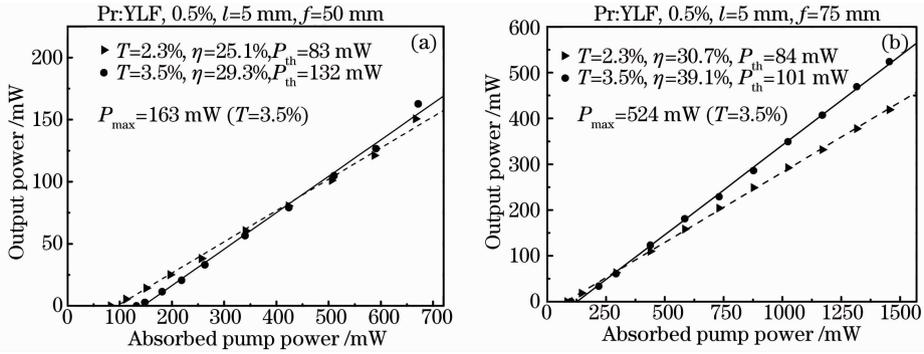


图 5 橙光激光器的输出特性曲线。(a) LD 抽运；(b) OPSL 抽运

Fig. 5 Output characteristic curves of orange lasers. (a) LD pumped; (b) OPSL pumped

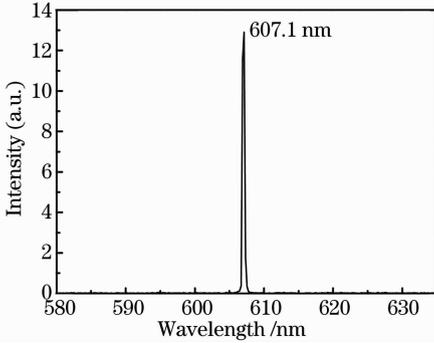


图 6 橙光激光谱线

Fig. 6 Spectra of orange laser

3 结 论

分别测量了 Pr:YLF 在常温 (300 K) 与低温 (12 K) 时的发射光谱, 通过与 Pr^{3+} 能级跃迁谱线对比发现, 共有 6 条发射谱线, 它们分别是 604.2、607.2、609.4、610.0、613.2、626.7 nm。基于 F-L 方法, 计算出了 ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ 的发射截面积。使用 LD 与 OPSL 抽运 Pr:YLF 晶体, 获得了橙光 607 nm 最大连续输出功率分别为 163 mW 与 524 mW, 对应斜率效率为 29.3% 与 39.1%。而 524 mW 是迄今为止获得的橙光的最高输出功率值。为了进一步提高橙光输出功率和斜率效率, 可对输出镜透射率以及激光腔体进行优化, 或者改变 Pr:YLF 的掺杂浓度。

参 考 文 献

1 Y F Lü, J Lu, L J Xu, *et al.*. CW light sources at the 589 nm sodium D2 line by sum-frequency mixing of diode pumped neodymium lasers[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(10): 719–721.

2 Y F Lü, X D Yin, J Xia, *et al.*. Diode-laser-pumped continuous-wave doubly linear resonator sum-frequency mixing orange laser at 600 nm[J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(1): 21–24.

3 L Esterowitz, R Allen, M Krueger, *et al.*. Blue light emission by a Pr:LiYF₄-laser operated at room temperature[J]. *J Appl Phys*, 1977, 48(2): 650–652.

4 A A Kaminskii, A Lyashenko, N Isaev, *et al.*. Quasi-cw Pr³⁺:LiYF₄ laser with $\lambda=0.6395\ \mu\text{m}$ and an average output power of 2.3 W[J]. *Quantum Electronics*, 1998, 28(3): 187–188.

5 T Sandrock, T Danger, E Heumann, *et al.*. Efficient continuous-wave laser emission of Pr³⁺-doped fluorides at room temperature[J]. *Appl Phys B*, 1994, 58(2): 149–151.

6 A Richter, E Heumann, E Osiać, *et al.*. Diode pumping of a continuous-wave Pr³⁺-doped LiYF₄ laser[J]. *Opt Lett*, 2004, 29(22): 2638–2640.

7 H Okamoto, K Kasuga, I Hara, *et al.*. Ultra-wideband tunable RGB fiber laser[C]. *Conference on Laser and Electro-Optics*, 2009, CFB7.

8 A Richter, E Heumann, G Huber, *et al.*. Power scaling of semiconductor laser pumped praseodymium-lasers [J]. *Opt Express*, 2007, 15(8): 5172–5178.

9 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.

10 W P Risk. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses[J]. *J Opt Soc Am B*, 1988, 5(7): 1412–1423.

11 J L Adam, W A Sibley, D R Gabbe. Optical absorption and emission of LiYF₄:Pr³⁺ [J]. *Journal of Luminescence* 1985, 33(4): 391–407.

12 H P Weber, P Liao, B C Tofield, *et al.*. Emission cross section and fluorescence efficiency of Nd-pentaphosphate [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1974, 10(7): 563–567.

13 J Hegarty, D L Huber, W M Yen, *et al.*. Fluorescence quenching by cross relaxation in LaF₃:Pr³⁺ [J]. *Phys Rev B*, 1982, 25(9): 5638–5645.

14 P J Deren, A Bednarkiewicz, R Maihou, *et al.*. On spectroscopic properties of the KYb(WO₄)₂:Pr³⁺ crystal [J]. *Molecular Physics*, 2003, 101(7): 951–960.

栏目编辑:张 腾