

# 蓝光 LD 抽运 $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ 604 nm 橙光激光器和 红橙多波长激射

杨 晗 徐 斌 蔡志平 钟一乐 程勇杰 渠 彪 许惠英

(厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要** 使用蓝光激光二极管抽运掺镨氟化钪锂( $\text{Pr}:\text{YLF}$ )块状晶体,获得最大输出功率为 166.6 mW 的  $\sigma$  偏振 607.4 nm 连续橙光输出。通过在谐振腔中插入厚度为 0.1 mm 的玻璃薄片,并适当调节角度,获得了  $\pi$  偏振 604.6 nm 连续橙光输出,最大功率为 60.6 mW,斜效率达到 13.6%。通过进一步调节玻璃薄片的插入角度,进而获得了 607、604、640 nm 的多波长同时激射。

**关键词** 激光器;端面抽运;掺镨氟化钪锂晶体;偏振;橙光;多波长激射

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1014003

## Orange Laser at 604 nm and Multi-Wavelength Emissions of Orange and Red Laser of $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ Pumped by Blue LD

Yang Han Xu Bin Cai Zhiping Zhong Yile Cheng Yongjie Qu Biao Xu Huiying

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

**Abstract** A maximum output power of 166.6 mW at 607.4 nm ( $\sigma$  polarization) is achieved in bulk  $\text{Pr}:\text{YLF}$  laser crystal pumped by blue laser diode (LD). An operation of 604.6 nm ( $\pi$  polarization) laser with maximum output power of 60.6 mW and slope efficiency of 13.6% is got by inserting a 0.1 mm glass plate into the laser cavity as frequency selector. Simultaneous multi-wavelength emissions at 607, 604, and 640 nm are also obtained.

**Key words** lasers; end-pumped;  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$ ; polarization; orange laser; multi-wavelength emission

**OCIS codes** 140.3480; 140.3580; 140.7300; 160.6030

### 1 引 言

在过去的近 10 年中,由于蓝光半导体激光器(InGaN LD)的商业化,众多掺杂镨离子( $\text{Pr}^{3+}$ )的材料得到了广泛的关注。因为  $\text{Pr}^{3+}$  在蓝光的抽运下,会形成粒子数反转,进而产生可见光波段(如绿、橙、红)的连续激光输出。目前对于镨离子的研究主要是氟化物与氧化物,氟化物包括  $\text{Pr}:\text{YLF}$  ( $\text{LiYF}_4$ )<sup>[1-2]</sup>,  $\text{Pr}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ <sup>[2-3]</sup>,  $\text{Pr}:\text{BYF}$  ( $\text{BaY}_2\text{F}_8$ )<sup>[4]</sup>,  $\text{Pr}:\text{LLF}$  ( $\text{LiLuF}_4$ )<sup>[5]</sup>, 氧化物包括  $\text{Pr}^{3+}, \text{Mg}^{2+}:\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$ <sup>[6]</sup> 和  $\text{Pr}:\text{YAP}$  ( $\text{YAIO}_3$ )<sup>[7]</sup>。

其中,掺镨氟化钪锂( $\text{Pr}:\text{YLF}$ )的激光特性最好,因为它具有较低的声子能量( $300\text{ cm}^{-1}$ )和优异的光谱特性。

目前,通过  $\text{Pr}:\text{YLF}$  获得的可见光波段中,深红光( ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{F}_4$ )、红光( ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{F}_2$ )激光比橙光( ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{H}_6$ )、绿光( ${}^3\text{P}_1 \rightarrow {}^3\text{H}_5$ )激光更容易获得,性能也更好。 $\text{Pr}$  离子的红光对应的  ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{F}_2$  跃迁最强,绿光  ${}^3\text{P}_1 \rightarrow {}^3\text{H}_5$  跃迁较弱。橙光  ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^3\text{H}_6$  跃迁虽然受激发射截面比较大,但已报道的激光性能不及红光和深红光。其中,所报道的橙光激射中以 607 nm 为主,鲜有关于室温下获得 604 nm 的报道。主要是因为室温下 607 nm

收稿日期: 2014-05-12; 收到修改稿日期: 2014-06-11

基金项目: 国家自然科学基金(61275050)、博士点基金(20120121110034, 20130121120043)、厦门市科技项目(3502Z20113004)、中央高校基本科研业务费专项资金(2013121022)、留学回国人员科研启动基金

作者简介: 杨 晗(1990—),女,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: yanghanhappy@sina.cn

导师简介: 蔡志平(1965—),男,博士,教授,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)

的阈值低于 604 nm 的阈值,607 nm 具有模式竞争的优势,从而抑制掉 604 nm。

本文报道的是在室温下的掺镨氟化钇锂 (Pr:YLF)晶体的  $\sigma$  偏振 607 nm 和  $\pi$  偏振 604 nm 橙光激光输出,以及红光 640 nm、橙光 604 nm 和 607 nm 的同时激射。首先,在  $\sigma$  偏振 607.2 nm 处获得了 166.6 mW 的最大输出功率;其次,通过使用玻璃薄片作为法布里-帕罗(F-P)标准具,增大 607.2 nm 的损耗,得到 604.6 nm 橙光输出,并且获得了 607.4 + 639.8、604.6 + 639.8、607.4 + 604.4、607.4 + 607.3 + 639.8 nm 的多波长同时激射。

## 2 实验研究

图 1 为实验装置示意图。使用线偏振蓝光 InGaN-LD 作为抽运源,最大输出功率为 1 W。当驱动电流最大时,LD 的中心波长约为 443.87 nm,接近 Pr:YLF 晶体的  $^3H_4 \rightarrow ^3P_2$  吸收峰位置(444 nm)。对抽运光斑进行了测量,其光斑为长方形,因此通过一个等腰直角棱镜对其进行整形,再使用焦距为 75 mm 的非球面镜将抽运光聚焦到晶体中。所使用的晶体 Pr:YLF 是单轴晶体,它的荧光辐射存在两个正交的偏振方向,即  $\sigma$  和  $\pi$  方向。由其室温下可见光波段发射谱可以看出,604 nm 是  $\pi$  偏振,607 nm 是  $\sigma$  偏振<sup>[8]</sup>。Pr:YLF 块状晶体长度为 8 mm,掺杂的原子数分数为 0.2%,晶体两端经过抛光处理并且没有镀膜。晶体固定在铜晶体架上,采用自然冷却。经测量,该晶体对抽运光的吸收率在最大抽运功率处为 80.8%。采用的激光谐振腔是一种简单的平凹腔,光腔的最终长度优化为 47 mm。因此,利用激光腔的 ABCD 定律,计算出了基模光束的光斑尺寸为 55  $\mu\text{m}$ 。为了获得红光和橙光的输出,实验所采用的腔镜通过膜系设计的方法,使平面输入镜 M1 对抽运光的透射率为 93.7%,对橙光为高反膜系,对红光 640 nm 的部分透射率为 56.8%。凹面输出镜 M2 的曲率半径为 50 mm,在 607、604、640 nm 处的透射率分别为 3.45%、3.38%、5.63%。

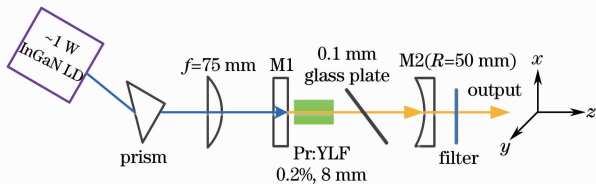


图 1 蓝光半导体抽运 Pr:YLF 晶体实验装置图

Fig. 1 Schematic setup of blue laser diode pumped Pr:YLF visible lasers

## 3 结果与分析

在激光腔自由运转,即腔内不插入任何选频器件时,获得了峰值波长为 607.4 nm 的橙光输出,为  $\sigma$  偏振。其最大输出功率为  $P_{\text{max}}=166.6$  mW,吸收的阈值抽运功率为  $P_{\text{th}}=164.3$  mW,拟合得到的斜效率为 25.6%。图 2 为被吸收的抽运功率与输出功率的关系,其中插图为该 607.4 nm 橙光的输出激光光谱。这个结果优于文献[9]中的 14%与文献[10]中的 15%的激光输出效率。

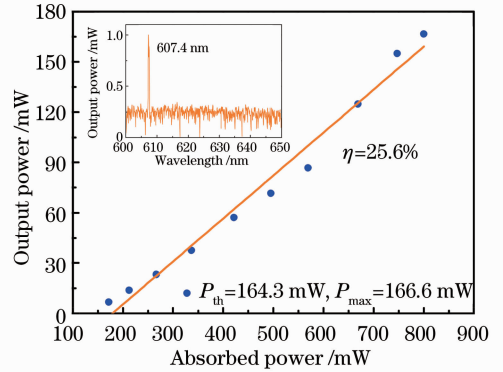


图 2  $\sigma$  偏振下 607.4 nm 输出特性曲线以及其光谱  
Fig. 2 Output characteristic of  $\sigma$ -polarized 607.4 nm orange laser. Inset is its laser spectrum

最近,Fibrich 等<sup>[11]</sup>报道了通过在 Pr:YAP 晶体的谐振腔中插入 Lyot 滤波器获得双波长激光输出的研究成果;对于 Pr:YLF 晶体,Ruan 等<sup>[12]</sup>报道了 639 nm 红光与 607 nm 橙光的双波长激射。在本文实验中,通过插入一个厚度为 0.1 mm 玻璃薄片产生 F-P 标准具效应进行频率筛选,获得了大约在 604、607、639 nm 3 个输出波长任意组合的同时激射。将厚度为 0.1 mm,自由光谱范围为 987 GHz 的玻璃(对中心波长为 604.6 nm,自由光谱范围是 1.2 nm,对中心波长为 639.8 nm,自由光谱范围是 1.35 nm)薄片垂直于光轴方向插入到 607.4 nm 功率最大时的谐振腔的腔体中,并且选取最优位置以减小插入损耗。由于插入损耗的缘故,607.4 nm 橙光的最大输出功率降低,抽运阈值增高。更进一步地,通过调节薄玻璃片的倾斜角度以及在谐振腔内的位置,可以实现波长的调谐。用 Yokogawa ANDO 6315 光谱仪记录了各多波长可见光共同激射的激光光谱图,如图 3 所示。由于多波长同时激射的现象不仅随着薄玻璃片插入角度的变化而变化,而且随着抽运功率的不同而变化,具体表现为各波长激光的输出功率比会发生波动,这是由于在抽运水平和薄玻璃片插入角度变化时,腔内结构发生的变化会使得腔内模式竞争

存在差异,而且也会导致一定程度的输出总功率不稳定。因此实验中没有记录完整的多波长激光的输出功率特性,图 3 仅记录了在各多波长激光时的总输出功率的值,从各激光强度的对比关系中,能大致推断多波长激光时的各波长激光的输出功率。稳定的多波长激光可以通过采用耦合腔或者优化腔内增益损耗平衡关系来获得。

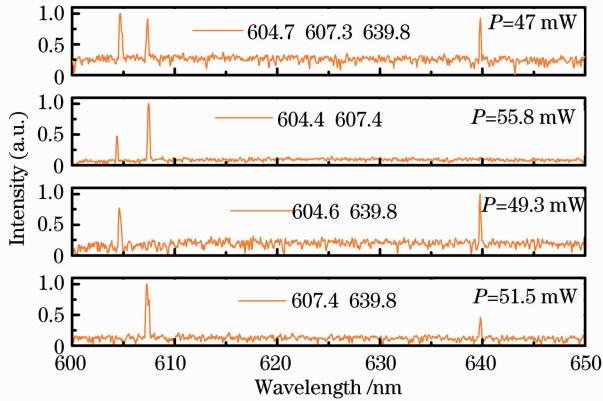


图 3 橙光与红光的多波长激光

Fig. 3 Multi-wavelength emissions of orange and red lasers

上述实验中,通过调节玻璃薄片的角度,获得了  $\pi$  偏振的 604.6 nm 橙光,其最高输出功率为 60.6 mW,如图 4 所示,对实验数据的线性拟合得到其斜效率为 13.6%,明显小于图 2 中 607.4 nm。这是由于插入标准具后引入了一定损耗的原因。由于为单一波长的激光,避免了多波长激光时的模式竞争,在 10 min 内测得的该波长的功率稳定性为 1.3% [均方根 (RMS)]。该  $\pi$  偏振的 604.6 nm 橙光的辐射截面积为  $1 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ,即为 607.4 nm 橙光辐射截面积的 73% 左右。针对这个  $\pi$  偏振的  $\sim 604 \text{ nm}$  橙

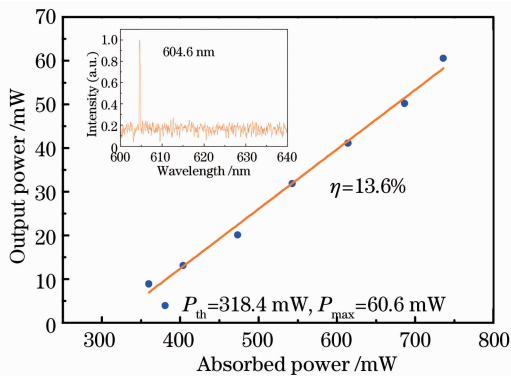


图 4  $\pi$  偏振下的 604.6 nm 橙光输出特性曲线 以及其光谱

Fig. 4 Output characteristic of  $\pi$ -polarization 604.6 nm orange laser. Inset is its laser spectrum

光,文献[14]采用的是氩离子激光器抽运,抽运波长为 476 nm,远远地偏离  $\text{Pr}:\text{YLF}$  晶体的吸收带,因此抽运效率很低,并且文献中只提到了该波长,并无具体的输出功率特性的记录报道。文献[15]和[16]关于 604 nm 的报道均为  $\text{Pr}:\text{YLF}$  波导激光器,其最大输出功率仅为 25 mW,效率仅为 5.6%。

## 4 结 论

报道了  $\text{Pr}:\text{YLF}$  块状晶体的偏振橙光输出功率的特性,以及偏振橙光和红光的共同激光研究。获得了  $\sigma$  偏振的 607.4 nm 橙光,其最高输出功率与斜效率分别为 166.6 mW 与 25.6%。通过插入玻璃薄片抑制了 607.4 nm 的增益,从而获得其他波长激光。获得了输出功率为 61.5 mW 的 607.4 nm 与 639.8 nm 的双波长激光,输出功率为 49.3 mW 的 604.6 nm 与 639.8 nm 的双波长激光,输出功率为 55.8 mW 的 604.4 nm 与 607.4 nm 的双波长激光,输出功率为 47 mW 的 604.7、607.3、639.8 nm 的三波长激光。此外,通过优化调节玻璃薄片的角度,获得了最高输出功率为 60.6 mW 的 604.6 nm 橙光,对应于吸收功率的斜效率为 13.6%。

## 参 考 文 献

- 1 A Richter, E Heumann, E Osiac, *et al.*. Diode pumping of a continuous-wave  $\text{Pr}^{3+}$ -doped  $\text{LiYF}_4$  laser [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(22): 2638–2640.
- 2 Bin Xu, Patrice Camy, Jean-Louis Doualan, *et al.*. Visible laser operation of  $\text{Pr}^{3+}$ -doped fluoride crystals pumped by a 469 nm blue laser [J]. *Opt Express*, 2011, 19 (2): 1191–1197.
- 3 P Camy, J L Doualan, R Moncorgé, *et al.*. Diode pumped  $\text{Pr}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$  red laser [J]. *Opt Lett*, 2007, 32(11): 1462–1464.
- 4 David Pabceuf, Oussama Mhibik, Fabien Bretenaker, *et al.*. Diode-pumped  $\text{Pr}:\text{BaY}_2\text{F}_8$  continuous-wave orange laser [J]. *Opt Lett*, 2011, 36(2): 280–282.
- 5 F Cornacchia, A Richter, E Heumann, *et al.*. Visible laser emission of solid state pumped  $\text{LiLuF}_4:\text{Pr}^{3+}$  [J]. *Opt Express*, 2007, 15(3): 992–1002.
- 6 F Reichert, D T Marzahl, P Metz, *et al.*. Efficient laser operation of  $\text{Pr}, \text{Mg}^{2+}:\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$  [J]. *Opt Lett*, 2012, 37(23): 4889–4891.
- 7 M Fibrich, H Jelinkova, J Sulc, *et al.*. Diode-pumped  $\text{Pr}:\text{YAP}$  lasers [J]. *Laser Phys Lett*, 2011, 8(8): 559–568.
- 8 Yan Yu, Liu Zhe, Xu Bin, *et al.*. Blue laser pumped  $\text{Pr}:\text{YLF}$  orange laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(s1): s102004.
- 9 闫宇,刘哲,徐斌,等. 蓝光抽运掺镨氟化钪铈橙光激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(s1): s102004.
- 9 F Cornacchia, A D Lieto, M Tonelli, *et al.*. Efficient visible laser emission of GaN laser diode pumped Pr doped fluoride scheelite crystals [J]. *Opt Express*, 2008, 16(20): 15932–15941.
- 10 A Richter, E Heumann, G Huber, *et al.*. Power scaling of GaN laser diode pumped Pr-lasers [C]. *OSA/ASSP*, 2008, MB2.
- 11 M Fibrich, J Sulc, H Jelinkova, *et al.*. Two wavelength generation of  $\text{Pr}:\text{YAlO}_3$  laser by Lyot filter tuning [J]. *Laser*

- Phys Lett, 2010, 7(4): 290–293.
- 12 Ruan Shuangchen, J M Sutherland, P M W French, *et al.*. Dual wavelength Pr:YLF laser [J]. Chinese J Lasers, 1995, B4(3): 207–210.
- 13 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 nm, 545.9 nm, 607.2 nm, and 639.5 nm [J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 1002–1004.
- 14 J M Sutherland, P M W French, J R Taylor, *et al.*. Visible continuous-wave laser transitions in Pr<sup>3+</sup>:YLF and femtosecond pulse generation [J]. Opt Lett, 1996, 21(11): 797–799.
- 15 Sebastian Müller, Thomas Calmano, Philip Metz, *et al.*. Femtosecond-laser-written diode-pumped Pr:LiYF<sub>4</sub> waveguide laser [J]. Opt Lett, 2012, 37(24): 5223–5225.
- 16 Florent Starecki, Western Bolaños, Alain Braud, *et al.*. Red and orange Pr<sup>3+</sup>:LiYF<sub>4</sub> planar waveguide laser [J]. Opt Lett, 2013, 38(4): 455–7.

栏目编辑: 张 雁