

# 蓝光激光二极管抽运 $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$ 固体红光激光器

张玉霞<sup>1</sup> 于浩海<sup>1\*</sup> 张怀金<sup>1</sup> Mauro Tonelli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山东大学晶体材料国家实验室, 山东 济南 250100

<sup>2</sup> 比萨大学物理系, 意大利, 托斯卡纳大区, 比萨 56127

**摘要** 报道了 444 nm 蓝光激光二极管抽运的掺镨氟化锂钷( $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$ ) 固体红光激光器。实验采用掺杂粒子数分数为 1.01% 的  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  晶体, 样本沿  $a$  切方向, 尺寸大小为 2.7 mm×2 mm×4 mm( $a\times c\times a$ ), 在激光二极管抽运下通过设计的平凹腔获得了波长为 639.3 nm 的连续红光输出。通过多次优化, 当抽运光输入功率为 3 W, 输出镜透射率为 3% 时, 获得了最大输出功率 153 mW, 其斜率效率约为 6.78%, 抽运阈值达到 750 mW。

**关键词** 激光器; 红光激光器; 固体激光器; 掺镨氟化锂钷晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.s102010

## Blue Laser-Diode Pumped Solid-State Red Laser of $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$

Zhang Yuxia<sup>1</sup> Yu Haohai<sup>1</sup> Zhang Huaijin<sup>1</sup> Mauro Tonelli<sup>2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Crystal Materials and Institute of Crystal Materials, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

<sup>2</sup> Department of Physics, University of Pisa, Large Bruno Pontecorvo 3, Pisa 56127, Italy

**Abstract** The 444 nm blue laser diode pumped  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  solid-state red laser is reported. The  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  crystal with the  $\text{Pr}^{3+}$  doped concentration of 1.01% is cut along  $a$  direction with the dimensions of 2.7 mm×2 mm×4 mm( $a\times c\times a$ ). Under the laser diode pumped, a continuous wave red light of 639.3 nm is obtained through the plane concave cavity. Several of laser input and output characteristics are gained through optimization of many times. The maximum output power is 153 mW when the pump power at 3 W and the transmittance of the output coupler is 3%. The slope efficiency is 6.78%, and the pump threshold is 750 mW.

**Key words** lasers; red laser; solid-state laser;  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  crystal

**OCIS codes** 140.3460; 140.3480; 140.3580; 140.7300

## 1 引 言

近年来,三价镨离子( $\text{Pr}^{3+}$ )作为激活离子掺杂至基质材料吸引了越来越多的关注,其主要原因是它可以产生几乎涉及整个可见光波段的各色光,同时还是直接倍频产生紫光和紫外光激光器的潜在能量来源<sup>[1-2]</sup>。就抽运源而言,过去掺  $\text{Pr}^{3+}$  可见光晶体激光器一般是以氙离子激光器或倍频激光器为抽运源<sup>[3-5]</sup>,随着激光二极管技术的发展,蓝光激光二极管抽运掺  $\text{Pr}^{3+}$  晶体激光器由于其紧凑的结构、较高的效率而在科学应用中彰显出绝对的优势,广泛应用于光谱学、显微荧光学、全息技术、生物医学和生物光子学等新兴领域<sup>[6-7]</sup>。对于基质材料,声子能量是衡量其发光效率的一个重要参数,最大声子能量和非辐射弛豫速度成正相关而和发光效率成负相关<sup>[8]</sup>。和氧化物相比,氟化物晶体具有较低的声子能量,这也使得氟化物吸引了研究者的兴趣。同时,作为稀土离子的代表, $\text{Pr}^{3+}$  的四能级结构决定了它可以产生多种可见光,因此掺  $\text{Pr}^{3+}$  氟化物晶体

收稿日期: 2015-02-15; 收到修改稿日期: 2015-03-15

基金项目: 国家自然科学基金(51025210, 51102156, 51272131)、山东省中青年科学家研究奖励基金(BS2011CL024)

作者简介: 张玉霞(1990—),女,硕士研究生,主要从事可见光激光器方面的研究。E-mail: yuxia.mm@163.com

导师简介: 张怀金(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事人工晶体的制备和表征方面的研究。

E-mail: huaijinzhang@sdu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail: haohaiyu@sdu.edu.cn

激光器逐渐成为现在研究的热点。目前为止,人们已经研究了像掺镨氟化钪( $\text{Pr}^{3+}:\text{YLiF}_4$ ),掺镨氟化镱( $\text{Pr}^{3+}:\text{LuLiF}_4$ )以及掺镨氟化镧( $\text{Pr}^{3+}:\text{LaF}_3$ )等多种晶体激光器。相关文章也报道出  $\text{Pr}^{3+}$  能够同时激发出 522、545、604、607、638、697、720 nm 等波长附近的各色可见光<sup>[3,9-13]</sup>。

在白钨矿晶体中,如  $\text{Pr}^{3+}:\text{YLiF}_4$ ,  $\text{Pr}^{3+}:\text{LuLiF}_4$  以及掺镨氟化钪( $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$ ),  $\text{Pr}^{3+}$  和三价钪离子( $\text{Gd}^{3+}$ )的离子半径相对差异较小,因此,以氟化钪( $\text{GdLiF}_4$ )作为  $\text{Pr}^{3+}$  的基质材料可以在较低量子缺陷和较高光学质量的前提下获得较高浓度的掺杂,通过改善抽运功率和量子缺陷还能得到更高功率的输出。1993年, T Danger 等<sup>[9]</sup>首次报道了中心波长为 468 nm 的染色激光器抽运  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  晶体得到 522、545、604.5、607、639、697 nm 6 种可见光波长输出的实验,其中最大输出功率为 98  $\mu\text{J}$  (639 nm),最大斜效率为 37% (604.5 nm); 2004年, T Sandrock 等<sup>[5]</sup>又用中心波长为 457.9 nm 的氩离子激光器抽运  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  晶体得到 639 nm 的连续光输出; 2008年, F Cornacchia 等<sup>[14]</sup>报道了中心波长约为 444 nm 的激光二极管抽运  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  得到 522、607、640、720 nm 连续光输出,其中最大输出功率为 175 mW (640 nm),最大斜效率为 53% (640 nm)。国内目前关于  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  红光激光器的研究比较少,相关报道也很有限。本文选用蓝光激光二极管作为抽运源,实现了激光二极管抽运的连续  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  红光激光器。

## 2 实验装置

实验采用简单的平凹线形腔结构,由一个平面镜作为输入镜和一个曲率半径为 30 mm 的平凹镜作为输出耦合镜。蓝光激光二极管抽运  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  产生红光激光的实验装置示意图如图 1 所示。

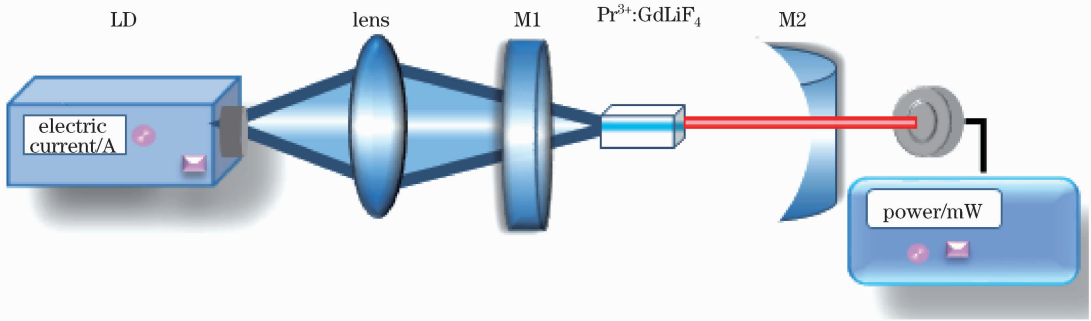


图 1 激光二极管抽运  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  激光器实验装置示意图

Fig. 1 Experiment setup of laser diode pumped  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  laser

图 1 中所示抽运源为蓝光激光二极管抽运源,其中心波长约为 444 nm,抽运源的最大输出功率为 3 W。激光二极管产生的蓝光通过焦距为 75 mm 的透镜进行聚焦使焦点正好聚到晶体上。实验所用激光晶体材料是采用提拉法生长的、*a*-切 2.7 mm×2 mm×4 mm (*a*×*c*×*a*)  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  晶体,晶体端面抛光但没有做任何涂层。实验中为加快在高抽运功率下所产生的热量的散发晶体用铝箔包裹后固定在铜块上,铜块连接水冷系统给晶体制冷,水冷系统温度设置为 10  $^{\circ}\text{C}$ 。输入镜 M1 为平面镜,朝向腔外面镀有对抽运光抗反射的介质膜,朝向腔内面镀有对生成激光高反射、对抽运光高透过的介质膜;输出耦合镜 M2 为平凹镜,曲率半径  $R_{oc}$  为 30 mm,其凹面镀有对生成激光部分透过、对抽运光高透过的介质膜,而其平面镀有对抽运光抗反射的介质膜,其透射率  $T=3\%$ 。整个平凹腔长度优化到 30 mm。实验所得激光输出功率通过功率计 (EPM2000, Molectron) 测得,激光光谱通过光谱分析仪 (HR4000CG-UV-NIR, Ocean Optics Inc) 记录。

## 3 实验结果与分析

激光二极管抽运  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  红光激光器输出特性曲线如图 2 所示,其中横坐标对应抽运光功率,纵坐标对应红光激光器的连续红光输出功率。图 2 中直线是根据实验数据拟合出的结果。图 2 内部插图为通过光谱仪测得的红光光谱谱线图,插图同时计算了光谱的半峰全宽 (FWHM)。

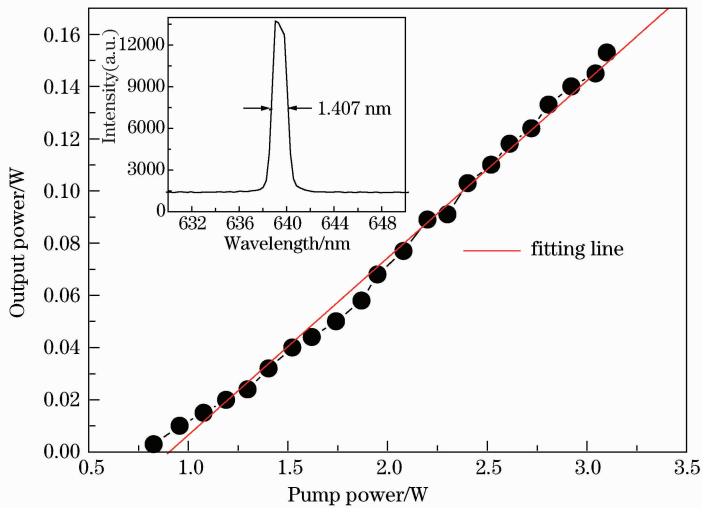


图 2  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  红光激光器输出特性曲线(插图为红光光谱谱线)

Fig. 2 Output characteristic curves of  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  red laser (inset is spectrum of red laser)

当输出镜透射率  $T_{OC} = 3\%$  时,最大输出功率为  $P_{out} = 153 \text{ mW}$ ,此时抽运光功率的阈值  $P_{thr} = 750 \text{ mW}$ ,拟合的斜率效率为  $\eta = 6.78\%$ 。通过电荷耦合器件(CCD)(CMOS-1201, Cin Cam)测量记录后计算出激光光束质量因子  $M^2$  为 1.15。从图中可以看出,输出功率和抽运光功率为线性增加,如果继续提高抽运源的输出功率,有望得到更高的连续红光输出。然而,现有的蓝光激光二极管抽运源输出功率较低,同时输出波长随着输出功率的增加向长波长漂移的问题一直存在,成为制约其发展的重要问题。用蓝光激光二极管抽运  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  晶体获得了  $153 \text{ mW}$  红光输出,如果在晶体表面适当的镀膜以及进一步优化实验条件可能会使得激光性能大幅度提高,下一步可以从提高蓝光激光二极管抽运源稳定性能、优化透镜焦距、改变输出镜的透射率、对  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  晶体合适的镀膜等方面进一步优化实验。

红光激光谱线如图 2 插图所示,实验所得谱线的中心波长为  $639.3 \text{ nm}$ 。半峰全宽约为  $1.407 \text{ nm}$ 。

## 4 结 论

实验研究了一种蓝光激光二极管抽运  $\text{Pr}^{3+}:\text{GdLiF}_4$  晶体连续红光激光器。获得了波长  $639.3 \text{ nm}$ 、最大输出功率  $153 \text{ mW}$  的红光激光输出,其相斜率效率为  $6.78\%$ 。后续实验可以通过优化抽运源的输出功率、输出耦合镜透射率及实验腔的长度等得到更大功率的激光输出。

## 参 考 文 献

- 1 G Huber, C Kränkel, K Petermann. Solid-state lasers; status and future [J]. Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics, 2010, 27(11): B93-B105.
  - 2 T Gün, P Metz, G Huber. Efficient continuous wave deep ultraviolet  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  laser at  $261.3 \text{ nm}$  [J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(18):181103.
  - 3 S C Buchter, H P Jenssen. All solid state red, green, and blue  $\text{Pr}:\text{YLF}$  laser [J]. Adv Soli Stat Las, 1998, 19: 34-35.
  - 4 L D Merkle, B Zandi, R Moncorgé, et al.. Spectroscopy and laser operation of  $\text{Pr, Mg}:\text{SrAl}_{12}\text{O}_{19}$  [J]. Journal of Applied Physics, 1996, 79(4): 1849-1856.
  - 5 T Sandrock, T Danger, E Heumann, et al.. Efficient continuous wave-laser emission of  $\text{Pr}^{3+}$ -doped fluorides at room temperature [J]. Applied Physics B, 1994, 58(2): 149-151.
  - 6 A A Kaminskii, A I lyashenko, N P Isaev, et al.. Quasi-cw  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  laser with  $\lambda = 0.6395 \mu\text{m}$  and an average output power of  $2.3 \text{ W}$  [J]. Quantum Electronics, 1998, 28(3): 187-188.
  - 7 T Gün, P Metz, G Huber. Power scaling of laser diode pumped  $\text{Pr}^{3+}:\text{LiYF}_4$  cw lasers; efficient laser operation at  $522.6 \text{ nm}$ ,  $545.9 \text{ nm}$ ,  $607.2 \text{ nm}$ , and  $639.5 \text{ nm}$  [J]. Opt Lett, 2011, 36(6): 1002-1004.
  - 8 Yu Xiaobo, Zhao Xin, Li Changmin, et al.. Infrared spectrum estimation for maximum phonon energy in optical glasses [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2008, 27(2): 155-157.
- 于晓波,赵 昕,李长敏,等. 光学玻璃最大声子能量的红外光谱估算[J]. 大连工业大学学报, 2008, 27(2): 155-157.

- 9 T Danger, T Sandrock, E Heumann, *et al.*. Pulsed laser action of Pr: GdLiF<sub>4</sub> at room temperature [J]. Applied Physics B, 1993, 57(3): 239–241.
- 10 F Reichert, F Moglia, D T Marzahl, *et al.*. Diode pumped laser operation and spectroscopy of Pr<sup>3+</sup>:LaF<sub>3</sub>[J]. Opt Express, 2012, 20(18): 20387–20395.
- 11 Huang Shunlin, Liu Zhe, Zeng Chenghang, *et al.*. Blue laser diode pumped Pr: YLF green laser [J]. Chinese J Laser, 2012, 39(12): 1202005.  
黄舜林,刘 哲,曾承航,等. 蓝光激光二极管抽运 Pr:YLF 绿光激光器[J]. 中国激光,2012, 39(12): 1202005.
- 12 A Richter, E Heumann, E Osiac, *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.
- 13 F Cornacchia, A Richter, E Heumann, *et al.*. Visible laser emission of solid state pumped LiLuF<sub>4</sub>:Pr<sup>3+</sup>[J]. Opt Express, 2007, 15(3): 992–1002.
- 14 F Cornacchia, A Di 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.

栏目编辑: 韩 峰