

蓝光激光二极管抽运 $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ 红绿可见光激光器

王凤娟 刘哲 徐斌 曾承航 黄舜林 闫宇 罗塞雨 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(LD)(中心波长约为 444 nm)单端纵向抽运掺镨氟化钇锂($\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$)的红光(640 nm)和绿光(522 nm)激光器。用单个棱镜作为抽运光束整形器,实验中红光最高输出功率为 308.5 mW,其相应的抽运阈值功率为 46 mW,斜率效率为 47.5%;绿光这三个指标的值相应分别为 193.4 mW、162.3 mW 和 37.1%。结果表明抽运光的整形提升了红、绿光的输出特性。

关键词 激光器;可见光激光器;端面抽运;掺镨氟化钇锂晶体;蓝光激光二极管

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1202002

Blue Laser Diode Pumped $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ Visible Lasers

Wang Fengjuan Liu Zhe Xu Bin Zeng Chenghang Huang Shunlin Yan Yu

Luo Saiyu Cai Zhiping Xu Huiying

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

Abstract Red (640 nm) and green (522 nm) lasers with $\text{Pr}^{3+}:\text{YLF}$ pumped by a blue laser diode emitting at about 444 nm in the longitudinal direction are reported. On the basis of the beam reshaping of the pump spot by a prism, the maximum output power, absorbed threshold pump power and slope efficiency of the red laser are 308.5 mW, 46 mW and 47.5%, respectively. The three corresponding parameter values for green laser are 193.4 mW, 162.3 mW and 37.1%, respectively. The results show that the shaped pump beam is beneficial to improve the output characteristics of these two visible laser emissions.

Key words lasers; visible lasers; end-face pumping; Pr^{3+} -doped YLF; blue laser diode

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.7300

1 引言

可见光波段的光波由于在医学、生物学、测绘测量、光学存储以及显示技术等诸多领域内具有广泛用途,而成为研究的热点和前沿课题之一。当前,有效的获得可见光激光的方法和途径主要有:半导体激光器^[1]、光抽运半导体激光器(OPSL)^[2]、半导体激光器抽运的全固态激光器(DPSSL)腔内非线性频率转换^[3-4]和腔外倍频^[5]。但是这些技术手段都有其不足之处:半导体激光器通常具有相对较宽的波长宽度,在较高输出功率时,其输出激光的相干性不够理想,且发散角比较大,为多纵模多横模输出,这样的特性制约了半导体激光器在某些领域的应

用,另外,当前绿光半导体激光器性能不佳,输出功率小且效率低^[6];OPSL技术本身比较复杂,而且价格非常昂贵,不能很好地满足商业化的需求;DPSSL技术是当前获得高功率稳定的可见光光源的相对成熟和有效的技术,例如,腔内倍频就是最常见的获得可见光激光的手段,但是,由于需要采用非线性频率转换技术,而非线性晶体一般都需要有相应的温控装置,因此,增加了系统的复杂性,也难以具备紧凑性。

稀土元素中, Pr^{3+} 元素具有最丰富的可见光波段的辐射,因此最近几年,掺 Pr^{3+} 可见光固态激光器得到了前所未有的蓬勃发展^[7-18],这主要得益于

收稿日期: 2013-06-19; 收到修改稿日期: 2013-07-31

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

作者简介: 王凤娟(1988—),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: lanxiyixi@qq.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)

以 Nichia 公司为代表的蓝光(InGaN)半导体激光器产品的商业化。当前,InGaN 半导体激光器可提供在 440~450 nm 之间的瓦级输出,因此能够作为大多数掺 Pr³⁺ 激光晶体的抽运源。相比于氧化物激光材料,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较连续的激光输出,而且也大大地缓解了端面抽运激光器的热透镜效应。2004 年 Richter 等^[7]首次使用蓝光 InGaN 激光二极管作为抽运源。2011 年 Gün 等^[12]用两个发射波长均为 443.9 nm,输出功率为 1 W 的 InGaN 激光二极管作抽运源,采用双端抽运方式,获得了当前最高效率的基于 InGaN 抽运 Pr:YLF 可见光激光输出。Xu 等^[13-14]在 2011 年,采用 Nd:YAG/LBO 的波长为 469 nm 蓝光激光为抽运源,利用国外生长的 Pr:YLF、Pr:LLF、Pr:KY₃F₁₀ 和 Pr:KYF₄ 四种晶体为增益介质,获得了高效的多种可见光输出。近期,本课题组利用国

内生长的 Pr:YLF 晶体,成功地获得了绿光^[15]和深红光^[16]激光输出。实际上,当前国内关于 Pr:YLF 可见光激光器的研究还较少。本文以 InGaN 为抽运源,从国产 Pr:YLF 激光晶体中获得了高效的红光(640 nm)和绿光(522 nm)可见光输出。通过对抽运光进行整形优化,使红、绿光的最高输出功率进一步提升。实验中所用到的 Pr:YLF 激光晶体完全利用国内的技术和设备生长;端面镜的膜系从设计到制备也均由本研究所自行完成;相比较于当前的掺 Pr³⁺ 激光器抽运光斑整形装置而言,该激光器仅用一个棱镜来达到同样的效果,具有有效、紧凑和成本低的优点。

2 实验装置

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性腔结构,实验装置如图 1 所示。

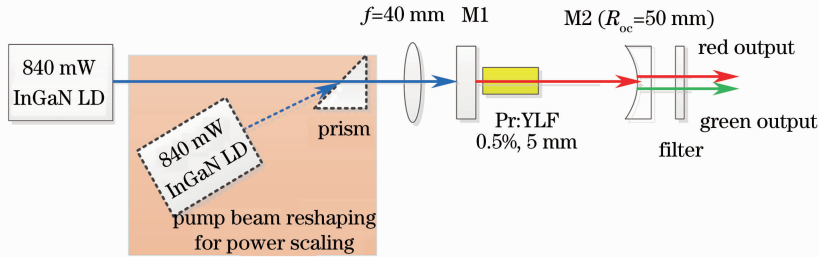


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic experiment of setup

根据对 Pr:YLF 晶体的吸收光谱研究,其在 444 nm 附近的最大吸收沿 π 偏振方向,因此为了最大限度吸收抽运光,实验中将抽运光的偏振调整到平行于 Pr:YLF 晶体 c 轴方向。实验中观测到该抽运光在 x 轴向分裂为三条条纹、在 y 轴向分裂为二条条纹的情形^[17],而且,光斑的 x 和 y 轴向尺寸不均匀(如图 2 所示)。因此为了更进一步提升抽运光的效率,用一个棱镜对抽运光进行整形操作,使得 x 和 y 轴向的光斑能在较大距离范围内保持圆对称性。

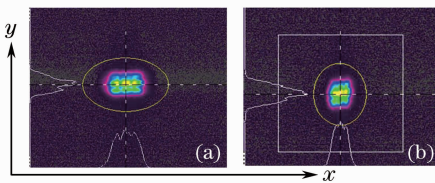


图 2 (a)棱镜整形前和(b)整形后同一位置处的抽运光斑图像

Fig. 2 Pump beam images at the same location (a) before and (b) after the beam reshaping

聚焦透镜为一个焦距为 40 mm 的球面透镜,且镀有对蓝光高透的增透膜。输入镜为平面镜,膜系设计为对抽运光高透,对受激辐射可见光高反。输出镜为一个曲率半径为 50 mm 的凹面镜,膜系设计为对激射的各可见光部分透射。实验中的端面镜膜系的设计和制备均为本研究所自己完成。激光晶体 Pr:YLF 原子数分数为 0.5%,长度为 5 mm,固定在铜质晶体架上,除此之外,没有采用其他制冷装置。

3 实验结果和分析

3.1 红光(640 nm)输出特性

抽运光斑整形前后红光激光的输出功率特性如图 3 所示。

红光相对应于³P₀ 上能级辐射跃迁到³F₂ 下能级,红光的输出峰值波长在 639.3 nm 处[如图 3(b)所示]。从图 3(a)可见,抽运整形前,红光最高输出功率 P_{max} 为 270.2 mW,该输出镜的透射率 T_{oc} 为 2.3%,相应的阈值和斜率效率 η_a 分别为 55 mW 和 43.9%;用

透射率为 3.1% 的输出镜,其最高输出功率略有降低,为 260.4 mW,相应阈值、斜率效率分别为 66 mW 和 44.2%;透射率为 5.6% 的输出镜相应的三个参数值分别为 244 mW、173 mW、48.3%。比较发现,当在相同的抽运水平和相近的耦合输出时,红光最高输出功率与文献[18]报道的实验结果相近。文献[18]中采用了两个圆柱透镜对抽运光进行优化整形,因此具有较小的抽运阈值(仅 30 mW),但本文的斜率效率最高达到 48.3%(输出镜透射率为 5.6%),高于文献中的 39%(输出镜透射率为 4%)。需要指出的是,双圆柱透镜整形无疑增加了激光系统的调节难度以及复杂

性。单个棱镜也可以实现在某个方向上对光束进行扩束或者压缩的效果,因此,考虑到系统的紧凑性以及成本,利用一个三角棱镜将 x 方向抽运光进行压缩,以期在激光晶体中获得较小的抽运光斑尺寸以及优化的圆对称性,从而最终进一步提高激光系统的输出特性。整形后的红光实验数据见图 3(b)所示。对于透射率为 2.3% 的输出镜,其最高输出功率提升到 308.5 mW,阈值降低到 46 mW,而斜率效率增加到 47.5%。用透射率为 3.1% 和 5.6% 的输出镜,其阈值分别减小到 65 mW 和 164 mW,而且其最高输出功率也都有所提高。

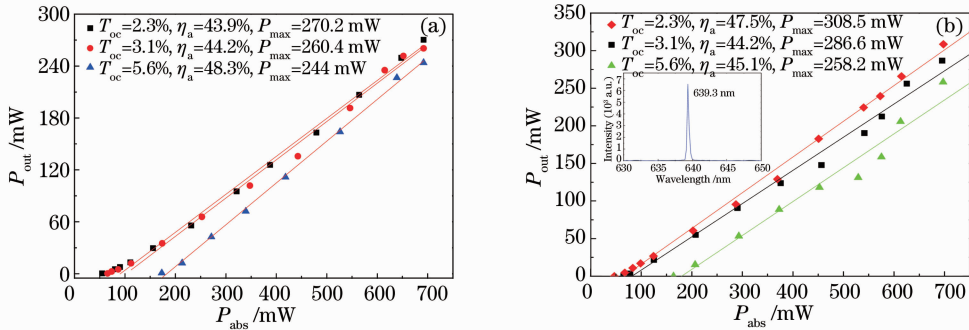


图 3 波长为 640 nm 的红光激光器输出功率特性。(a) 抽运光整形前;(b) 整形后(插图为红光激光光谱)

Fig. 3 Output characteristics of red laser at 640 nm. (a) Before and (b) after the pump beam reshaping (the inset is the red laser spectrum)

3.2 绿光(522 nm)输出特性

绿光输出特性如图 4 所示。绿光相对应于 3P_1 上能级辐射跃迁到 3H_5 下能级,绿光的输出峰值波长在 522.4 nm 处。实验中所用的 3 个输出镜透射率分别为 0.67%、1.9% 和 3.2%,以检验绿光激光在不同损耗条件下的输出特性。发现与红光激光相同的规律,即以棱镜整形后的抽运光来抽运激光晶体,相比较于未经整形的结果,最高输出功率得到一定的增加,而且抽运阈值在绿光时得到较大幅度的降低。透射率分别为 0.67%、1.9% 和 3.2% 三个输

出镜的阈值分别从 146 mW、253 mW 和 408 mW 降低到 98 mW、162.3 mW 和 248 mW。可见,对于较低增益的绿光来说,相较于红光,其阈值特性对抽运光斑质量更加敏感。由图 4(a)、(b)比较可见,经过抽运整形后,从这三个输出镜中耦合出射的绿光最高输出功率也均有所提高,例如,透射率为 1.9% 的输出镜中最高输出功率从 163.5 mW 提高到 193.4 mW。值得注意的是,当前的绿光实验结果,无论有没有经过抽运光整形,与早前的绿光实验数据[15]相比,在相同抽运水平时,最高输出功率均有

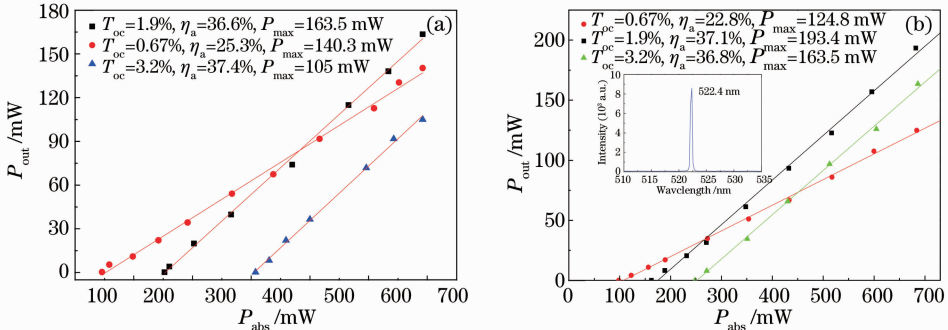


图 4 波长为 522 nm 的绿光激光器输出功率特性。(a) 抽运光整形前;(b) 整形后(插图为绿光激光光谱)

Fig. 4 Output characteristics of green laser at 522 nm. (a) Before and (b) after the pump beam reshaping (the inset is the green laser spectrum)

提高。分析认为,这主要是由于当前所用的抽运源比之前的抽运源在光斑质量(较之前的抽运源更接近方形)、峰值波长(为 443.8 nm,较之前的抽运源更接近实验所用的 Pr:YLF 晶体峰值吸收波长,即 443.98 nm)、波长宽度(比之前的抽运源约小 0.5 nm)等参数上更加优异。

低增益波段输出特性更能反映激光晶体的生长质量,因此,利用这三个输出镜的不同透射率与阈值功率的关系,用 Findlay-Clay 方法估算出绿光谱谐振腔的往返损耗值 $L=0.87\%$,如图 5 所示。文献[9]中报道的与 Pr:YLF 晶体极其相似的 Pr:LLF 晶体的 Findlay-Clay 损耗值为 1.3%,同时考虑到端面镜的衍射损耗、端面镜膜系的吸收损耗以及晶体的吸收和散射损耗等因素,认为对于 Pr:YLF 晶体来说,在绿光波段的该损耗值表明实验中谐振腔已经达到高度优化的状态。

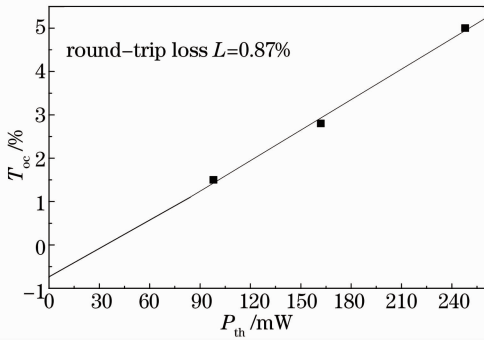


图 5 绿光谱谐振腔内往返损耗分析

Fig. 5 Analysis of intra-cavity round-trip loss of green laser

4 结 论

选用国产的 Pr:YLF 晶体作为激光增益介质,用 444 nm 蓝光 InGaN 二极管激光器为抽运源,并提出利用一个棱镜作为抽运光光斑整形器来提高抽运光的光斑质量,进而提高输出可见光的输出功率特性。用平-凹线性腔获得了红光(640 nm)和绿光(522 nm)两种可见光激光器,其最高输出功率分别为 308.5 mW 和 193.4 mW,相应地,相对于吸收抽运光的斜率效率分别为 47.5% 和 37.1%。利用 Findlay-Clay 方法对绿光可见光激光器的谐振腔往返损耗进行了估算,结果表明实验中所使用的国产 Pr:YLF 晶体具有很高的质量。对未经过抽运光整形时的红、绿光输出特性进行了研究,结果证明当前的单个棱镜作为光束整形器,具有比较明显的功率提升的作用。输出功率还可以通过进一步优化设计抽运光入射到该棱镜的角度来相应的改变 x 轴向

的抽运光宽度,从而调节 x 轴向抽运光在激光晶体中的尺寸来加以实现,也可以通过构造双端抽运谐振腔来实现,这将是下一阶段的研究计划。

参 考 文 献

- 1 The New Development of High-Power Green Laser Diodes [N/OL]. Official website of Nichia Corp, 2012. http://www.nichia.co.jp/en/about_nichia/2012/2012_112201.html.
- 2 V Ostroumov, W Seelert. 522/261 nm CW generation of Pr:YLF laser pumped by OPS laser [C]. SPIE, 2007, 6451: 645104.
- 3 Bin Xu, Patrice Camy, Jean-Louis Doualan, *et al.*. Frequency doubling and sum-frequency mixing operation at 469.2, 471, and 473 nm in Nd:YAG [J]. J Opt Soc Am B, 2012, 29(3): 346–350.
- 4 Yi Yao, Quan Zheng, Dapeng Qu, *et al.*. All-solid-state continuous-wave frequency-doubling Nd:YVO₄/LBO laser with 2.35 W output power at 543 nm [J]. Opt Lett, 2009, 34(23): 3758–3760.
- 5 Ole Bjarlin Jensen, Peter E Andersen, Bernd Sumpf, *et al.*. 1.5 W green light generation by single-pass second harmonic generation of a single-frequency tapered diode laser [J]. Opt Express, 2009, 17(8): 6532–6539.
- 6 Masahiro Adachi, Yusuke Yoshizumi, Yohei Enya, *et al.*. Low threshold current density InGaN based 520-530 nm green laser diodes on semi-polar {2021} free-standing GaN substrates [J]. Appl Phys Express, 2010, 3(12): 121001.
- 7 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.
- 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 Richter, E Heumann, *et al.*. Visible laser emission of solid state pumped LiLuF₄:Pr³⁺ [J]. Opt Express, 2007, 15(3): 992–1002.
- 10 F Cornacchia, A D 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.
- 11 P Camy, J L Doualan, R Moncorgé, *et al.*. Diode pumped Pr³⁺:KY₃F₁₀ red laser [J]. Opt Lett, 2007, 32(11): 1462–1464.
- 12 T Gün, P Metz, G Huber, *et al.*. Power scaling of laser diode pumped Pr³⁺:LiYF₄ 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.
- 13 Bin Xu, Patrice Camy, Jean-Louis Doualan, *et al.*. Visible laser operation of Pr³⁺-doped fluoride crystals pumped by a 469 nm blue laser [J]. Opt Express, 2011, 19(2): 1191–1197.
- 14 R Moncorgé, F Starecki, B Xu, *et al.*. Luminescence properties and red/orange laser operation of Pr:KYF₄ [C]. Advances in Optical Materials, 2012, IW5D.
- 15 Huang Shunlin, Liu Zhe, Zeng Chenghang, *et al.*. Blue laser diode pumped Pr:YLF green laser [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202005.
- 16 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.
- 17 Zhe Liu, Zhiping Cai, Shunlin Huang, *et al.*. Diode-pumped Pr³⁺:LiYF₄ continuous-wave deep red laser at 698 nm [J]. J Opt Soc Am B, 2013, 30(2): 302–305.
- 18 David Pabœuf, Oussama Mhibik, Fabien Bretenaker, *et al.*. Diode-pumped Pr:BaY₂F₈ continuous-wave orange laser [J]. Opt Lett, 2011, 36(2): 280–282.
- 19 Kohei Hashimoto, Fumihiko Kannari. High-power GaN diode-pumped continuous wave Pr³⁺-doped LiYF₄ laser [J]. Opt Lett, 2007, 32(17): 2493–2495.