

28.2 W 波长锁定 878.6 nm 激光二极管共振抽运 双晶体 1064 nm 激光器*

李斌¹⁾ 丁欣^{1)†} 孙冰¹⁾²⁾ 盛泉¹⁾ 姜鹏波¹⁾ 张巍¹⁾ 刘简¹⁾ 范琛¹⁾
张海永¹⁾ 姚建铨¹⁾

1) (天津大学精密仪器与光电子工程学院, 激光与光电子研究所, “光电信息技术科学”教育部重点实验室, 天津 300072)

2) (天津梅曼激光技术有限公司, 天津 300111)

(2014年5月5日收到; 2014年5月28日收到修改稿)

报道了一种由波长锁定 878.6 nm 半导体激光器共振抽运两块不同掺杂浓度 Nd:YVO₄ 晶体串接的 1064 nm 激光器, 并与使用单块的低掺杂浓度晶体和高掺杂浓度晶体情况进行比较, 实验表明利用波长锁定 878.6 nm 半导体激光器共振抽运双晶体串接的方式, 有利于降低晶体的热效应, 提高光光转换效率. 当抽运功率为 40 W 时, 获得了 28.2 W 的 1064 nm 激光输出, 光光转换率为 70.5%, 斜率效率为 70.6%, 相对吸收光的光光转换率 76%, 斜率效率为 76.4%, 同时该激光器在 10 °C—40 °C 的温度变化范围内具有极好的温度稳定性.

关键词: 锁波长, 878.6 nm 抽运, Nd:YVO₄ 晶体, 1064 nm

PACS: 42.55.Xi, 42.60.Lh, 42.60.Pk

DOI: 10.7498/aps.63.214206

1 引言

激光器中的热效应一直是激光技术领域有待解决的难题, 这种热效应严重影响了全固态激光器的性能, 如何有效的减少抽运过程和激光发射过程中激光介质内产生的热量, 是全固态高功率激光研究过程中所面临的主要难题之一^[1,2], 为了从根本上解决激光器的热效应问题, 近年来提出了一种共振抽运技术, 采用共振抽运技术在降低激光器热效应方面具有很好的效果^[3-5]. Nd:YVO₄ 晶体是一种优良的激光晶体, 广泛用于各种激光器中^[6,7], 近年来针对 Nd:YVO₄ 的共振抽运技术的研究也有较多的报道, 如 Lavi 等在 1999 年率先报道了利用 880 nm 钛宝石激光器共振抽运的 Nd:YVO₄ 激光器, 1064 nm 激光的斜率效率相对 808 nm 抽运方式下提高到 106%, 同时其阈值也降至 88%^[8]. 2003 年, Sato 等分别利用 880 nm 的 LD 和钛宝石激光

器抽运 Nd:YVO₄ 激光器, 1064 nm 激光输出相对吸收抽运功率的斜率效率分别达到 75% 和 80%^[9], 2006 年, McDonagh 等还报道了利用 888 nm LD 端泵的 Nd:YVO₄ 激光器, 连续波基模输出功率 60 W, 斜率效率为 76%, 光光转换效率为 55%^[10], 2008 年, Zhu 等利用 880 nm LD 抽运 Nd:YVO₄ 板条激光器, 1064 nm 激光输出功率 165W, 相对吸收抽运功率的转换效率为 60%^[11], 2009 年 Sangla 等报道了利用 914 nm 抽运 Nd:YVO₄ 晶体激光器, 当吸收 14.8 W 的抽运光功率, 获得了 11.5 W 的 1064 nm 激光输出, 光光转换率达到 78.7%, 斜率效率达 80.7%^[12], 2011 年 Xin 等利用全固态激光器输出的 914 nm 抽运 Nd:YVO₄ 晶体在吸收了 1.86 W 的抽运光功率后, 获得了 0.86 W 的 1342 nm 激光输出, 斜率效率达到 65.4%^[13], 2012 年, 清华大学报道了 888 nm LD 端泵的 Nd:YVO₄ 激光器, 抽运功率 110 W 时, 1064 nm 激光连续波输出功率 60 W 的连续输出功率, 光光转换率为 54.5%^[14]. 以上研究结果

* 国家自然科学基金 (批准号: 61178028) 和新世纪人才计划 (批准号: NCET-10-0610) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: dingxin@tju.edu.cn

表明, 与传统的抽运方式相比, 共振抽运技术的确可以大大降低激光产生过程中放出的热量, 是一种从根本上解决全固态激光器热效应的有效方案, 但该技术存在抽运吸收带宽窄、吸收率低等问题, 导致激光器总体效率低、输出稳定性差、温度敏感性高, 阻碍了该技术的实际应用. 基于以上分析, 我们提出了波长锁定共振抽运多晶体技术可以很好的克服共振抽运存在的问题, 利用该技术我们获得了高效率、高功率、高稳定性的激光输出, 为共振抽运的实用化提供了一种行之有效的方式.

2 实验分析及装置

众所周知, Nd:YVO₄ 晶体具有四条主要的吸收谱线分别为 808 nm, 878.6 nm, 888.3 nm 和 914 nm, 其中 808 nm, 878.6 nm, 是由 ⁴I_{9/2} 的 Z₁ 基态抽运到 ⁴F_{5/2} 和 ⁴F_{3/2} 能级, 888.3 nm 和 914 nm 是由 ⁴I_{9/2} 劈裂的 Z₂ 和 Z₆ 能级抽运到 ⁴F_{3/2}, 相比于 808 nm 利用 878.6 nm 具有更小的量子亏损热, 提高激光器的效率降低了热, 相比高斯塔克能级的 888.3 nm 和 914 nm 抽运吸收峰, 878.6 nm 具有更好的吸收率, 更小的温度依赖性, 因此我们采用 878.6 nm 半导体激光器作为抽运源更具优势.

实验装置如图 1 所示抽运源为 878.6 nm 波长锁定光纤耦合输出半导体激光器, 其最大输出功率 40 W, 线宽 0.3 nm, 是普通半导体激光器线宽的 5%, 如此窄的线宽可以很好的与晶体的吸收峰相匹配, 弥补了共振抽运吸收带宽窄的缺点, 并且该抽运源具有很好的温度稳定性, 当热沉温度由 10 °C—40 °C 发生变换时, 其发射的中心波长仅移动 0.5 nm, 线宽基本保持不变, 这使得利用该半导体激光器作为抽运源具有极高的温度稳定性. 传输光纤直径为 400 μm, 数值孔径为 0.22, CO 为光学耦合系统, 其成像比为 1:1.25, M₁ 镀有 878.6 nm 增透和 1064 nm 高反膜, 激光晶体由两块不同浓度的 Nd:YVO₄ 组成, 靠近抽运源一端的规格为 3 mm × 3 mm × 6 mm, 0.15% 掺杂, 另一块为 3 mm × 3 mm × 4 mm, 0.5% 掺杂, 两块晶体用铝箔包裹放在紫铜热沉中. 实验证明低掺杂浓度的晶体能够承受更高的抽运功率, 对于 3 mm × 3 mm × 6 mm, 0.15% 的低掺杂晶体, 利用 878.6 nm 作为抽运源, 抽运光斑直径为 500 μm 时, 该晶体至少可承受 50W 以上的抽运功率而不至于使晶体发生热破裂, 由于受抽运源输出功率限

制我们没有继续增加抽运功率, 但该晶体其对抽运光的吸收率仅为 61%, 说明低掺杂浓度的晶体能够承受更高的抽运功率, 但对抽运光的吸收率较低, 为了克服这个缺点, 我们没有采用单纯增加晶体长度的方式, 而是在低掺杂晶体的后面串接了 0.5% 的高掺杂晶体, 由于 0.5% 的高掺杂晶体吸收的是抽运光通过 0.15% 晶体后的剩余抽运光, 因此降低了该晶体的热负荷, 同时提高了对抽运光的总体吸收率, 采用这种设计方式最终对抽运光的吸收率达到了 92.7%, 并且使激光晶体不至于太长, 从而提高了激光器的总体光光转换率和输出激光的光束质量. M₂ 为激光输出镜, 对 1064 nm 的透过率为 15%, 整体谐振腔长度为 ~80 mm.

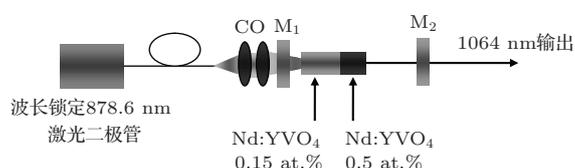


图 1 波长锁定 878.6 nm 激光二极管共振抽运双晶体 1064 nm 激光器实验装置

3 实验结果及分析

实验测得的结果如图 2 和图 3 所示, 图 2 给出了 1064 nm 输出功率随总的输入抽运功率的关系, 图 3 给出了 1064 nm 输出功率与吸收的抽运光功率的关系, 当波长锁定 878.6 nm 抽运功率为 40 W 时, 两块串接的 Nd:YVO₄ 晶体共吸收了 37.1 W 的抽运光, 最高获得了 28.2 W 的 1064 nm 激光输出, 相对于抽运光的总体转换率为 70.5%, 斜率效率 70.6%, 相对于吸收抽运光的光光转换率 76%, 斜率效率达 76.4%, 非常接近 82.6% 的量子效率. 据我们所知, 这是目前利用 880 nm 波段作为抽运源在 25 W 以上输出功率水平 Nd:YVO₄ 激光器获得的最高效率, 在其他条件不变的情况下分别将晶体换为单块的 3 mm × 3 mm × 10 mm, 0.15% 掺杂和 3 mm × 3 mm × 10 mm, 0.5% 掺杂的晶体, 对于 3 mm × 3 mm × 10 mm, 0.15% 掺杂对抽运光的吸收率为 79%, 当抽运功率为 40 W 时, 得到了 24.1 W 的 1064 nm 激光输出, 虽然相对于吸收光的光光转换效率高达 76.3%, 斜率效率高达 76.8%, 但总体的光光转换率仅为 60.2%, 斜率效率为 60.4%, 在总体的光光转换效率方面与传统的 808 nm 抽运的激光器具有相当的水平, 并没有使共振抽运技术的优势

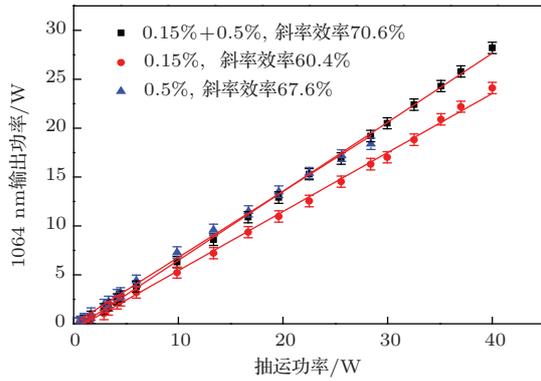


图2 (网刊彩色) 1064 nm 输出功率与总抽运功率的关系

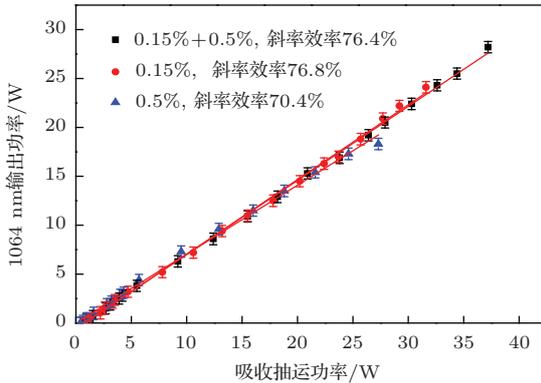


图3 (网刊彩色) 1064 nm 输出功率与吸收抽运功率的关系

得到体现. 对于 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, 0.5% 掺杂的晶体对抽运光的吸收率为 96.2%, 当抽运光为 28.4 W 时最高输出 18.3 W 的 1064 nm 激光, 总体光光转换效率为 64.4%, 斜率效率为 67.6%, 对于总体光光转换效率比 0.15% 掺杂晶体的情况略高, 相对吸收光的转换效率为 67%, 斜率效率 70.4%, 继续增大抽运功率则输出功率出现饱和, 同时输出的光束质量开始恶化. 实验中对以上三种激光器在最大输出功率时的光束质量因子进行测量 (90/10 刀口法), 测量结果如图 4 所示, 对于 0.15% 低掺杂的晶体、双晶体串接以及高掺杂的 0.5% 的晶体, 其输出激光的光束质量因子 M^2 分别为 1.52, 1.65 和 2.62, 相比较而言, 双晶体串接激光器的输出光束质量与 0.15% 低掺杂激光器的输出光束质量相当, 由于双晶体串接的方式可以将抽运光的能量分散于两块晶体上, 使每块晶体产生的热量较为平均, 而不至于使激光晶体内部产生很大的温度梯度, 因此既可以保证很高的光光转换效率又可以保证较好的光束质量. 对于 0.5% 的高掺杂晶体, 其输出激光的光束质量因子明显增加, 这是由于高掺杂晶体

虽然对抽运光的吸收效率高, 但单位体积内产生的热量较大, 内部有较大的温度梯度, 对输出的激光光束质量产生了比较大的影响. 根据以上实验结果我们可以看出使用单块的晶体要么是低掺杂的晶体吸收率不高, 导致整体的光光转换率较低, 要么是高掺杂晶体, 虽然对抽运光有很高的吸收率, 但输出激光的光束质量不好, 易出现热饱和, 不能实现高功率的激光输出. 因此利用两块晶体串接配合波长锁定共振抽运技术不仅可以获得更高的输出功率、较好的光束质量, 而且可以得到很高的光光转换效率, 这主要是因为 1) 878.6 nm 更接近于 1064 nm, 具有更高的量子效率, 更低的热效应, 有利于转换率的提高; 2) 利用锁波长 878.6 nm 作为抽运源, 其线宽窄, 稳定性好, 严格与 Nd:YVO₄ 在 880 nm 处的吸收峰相重合, 克服了共振抽运吸收带宽较窄的缺点, 提高了激光器的转换效率; 3) 利用双晶体串接技术, 不仅降低了晶体的热效应, 而且提高了晶体对抽运光的吸收, 克服了共振抽运技术吸收率低的缺点, 进一步提高了整体的光光转换效率.

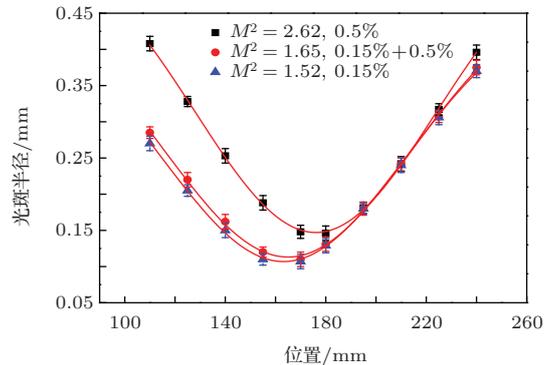


图4 (网刊彩色) 光束质量因子测量结果

众所周知, 半导体激光器的发射波长会随着温度的变化而发生漂移 ($\sim 0.3\text{ nm}/^\circ\text{C}$), 这最终会导致激光器的输出功率随着温度的变化而变化, 造成激光器的输出功率的稳定性下降. 我们给出了在相同抽运功率下时, 激光器的温度从 10—40 °C 的变化情况下, 非波长锁定 880 nm 及波长锁定 878.6 nm 抽运情况下激光器输出功率随温度的变化情况, 如图 5 所示, 对于 880 nm 抽运的激光器, 抽运功率为 40 W 时, 当激光器的温度从 10 °C 变化到 40 °C 时, 其输出功率最高为 25.7 W, 最低仅为 1.89 W, 输出功率随温度的变化而急剧的漂移, 而对于波长锁定 878.6 nm 抽运的激光器当温度从 10 °C—40

°C变化时,其输出功率仅有0.25 W的波动,输出功率随温度的漂移很小,因此利用波长锁定共振抽运技术对激光器的温度控制并不是要求很高,在 25 ± 5 °C的温度范围内,激光器的输出功率不会出现明显的变化,但对于非波长锁定的880 nm情况即使有 ± 1 °C的温度变化都会对输出功率有着巨大的影响.

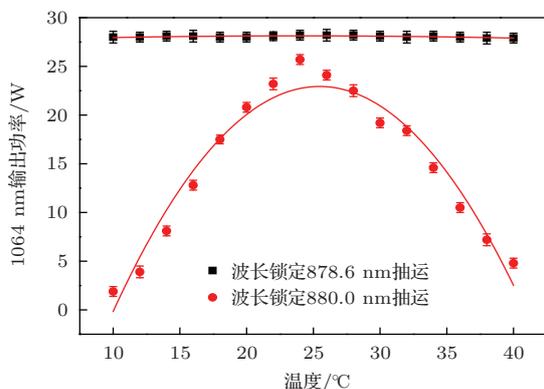


图5 (网刊彩色) 1064 nm 激光输出功率随温度的变化

4 结 论

提出了一种波长锁定的共振抽运多晶体串接技术,可以很好的克服共振抽运技术吸收带宽窄、吸收率低的缺点,获得了高功率、高效、高稳定度的激光输出.当波长锁定878.6 nm抽运功率为40 W时,最高获得了28.2 W的1064 nm激光输出,相对于抽运光的总体转换率为70.5%,斜率效率70.6%,相对于吸收抽运光的光光转换率76%,斜率效率达76.4%.对非波长锁定的880 nm以及波长锁定的878.6 nm的共振抽运激光器的温度特性进行了研究,当激光器的温度从10 °C变化到40 °C时,波长

锁定878.6 nm抽运的激光器其输出功率基本保持不变,而非波长锁定的880 nm抽运激光器其输出功率随温度变化输出功率有较大的波动,因此利用波长锁定共振抽运多晶体串接技术可以克服共振抽运的一系列缺点,获得高功率、高效率、高稳定性的激光输出,为共振抽运的实际应用提供了一种行之有效的方式.

参考文献

- [1] Zhao J T, Feng G Y, Yang H M, Tang C, Chen N J, Zhou S H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 084208 (in Chinese) [赵建涛, 冯国英, 杨火木, 唐淳, 陈念江, 周寿桓 2012 物理学报 **61** 084208]
- [2] Liu Q X, Zhong M 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8535 (in Chinese) [刘全喜, 钟鸣 2010 物理学报 **59** 8535]
- [3] Liu J, Wang Z Y, Li H, Liu Q, Zhang K S 2011 *Opt. Express* **19** 6777
- [4] Lin H, Li F J, Liang X Y 2012 *Opt. Lett.* **37** 2634
- [5] Délen X, Balembois F, Musset O, Georges P 2011 *J. Opt. Soc. Am. B* **28** 52
- [6] Li B, Ding X, Sheng Q, Yin S J, Shi C P, Li X, Yu X Y, Wen W Q, Yao J Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 014207
- [7] Ji F, Yao J Q, Zhang B G, Zhang T L, Xue D G, Wang P 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1286
- [8] Lavi R, Jackel S 2000 *Appl. Opt.* **39** 3093
- [9] Sato Y, Taira T, Pavel N, Lupei V 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 844
- [10] McDonagh L, Wallenstein R, Knappe R 2006 *Opt. Lett.* **31** 3297
- [11] Zhu P, Li D J, Hu P, Schell A, Shi P, Haas C, Wu N, Du K M 2008 *Opt. Lett.* **33** 1930
- [12] Sangla D, Castaing M, Balembois F, Georges P 2009 *Opt. Lett.* **34** 2159
- [13] Xin D, Su J Y, Chun P S, Xue L, Bin L, Quan S, Yu X Y, Wen W Q, Yao J Q 2011 *Opt. Express* **19** 14315
- [14] Hong H, Huang L, Liu Q, Yan P, Gong M L 2012 *Appl. Opt.* **51** 323

A 28.2 W wave-locked 878.6 nm diode-laser-pumped multi-segmented Nd:YVO₄ laser operating at 1064 nm*

Li Bin¹⁾ Ding Xin^{1)†} Sun Bing¹⁾²⁾ Sheng Quan¹⁾ Jiang Peng-Bo¹⁾ Zhang Wei¹⁾
Liu Jian¹⁾ Fan Chen¹⁾ Zhang Hai-Yong¹⁾ Yao Jian-Quan¹⁾

1) (*Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of Laser and Opto-Electronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

2) (*Tianjin Maiman Laser Technology Co.,Ltd, Tianjin 300111, China*)

(Received 5 May 2014; revised manuscript received 28 May 2014)

Abstract

We report a wave-locked 878.6 nm diode-laser-pumped multi-segmented Nd:YVO₄ laser operating at 1064 nm, which is compared with the high doping concentration and the low doping concentration monolithic Nd:YVO₄ lasers. Experimental results show that the configuration of the wave-locked 878.6 nm diode-laser-pumped multi-segmented crystals not only can reduce thermal effects of the laser but also can improve the optical-to-optical conversion efficiency. We have achieved an output power of 28.2 W at 1064 nm with an incidence pump power of 40 W, corresponding to the optical-to-optical efficiency of 70.5%, slope efficiency of 70.6%. For absorbed pump power, the optical-to-optical efficiency is 76% and the slope efficiency is 76.4%. The laser also has an excellent output stability while the temperature is varied from 10 °C to 40 °C.

Keywords: wave-locked, 878.6 nm, Nd:YVO₄, 1064 nm

PACS: 42.55.Xi, 42.60.Lh, 42.60.Pk

DOI: [10.7498/aps.63.214206](https://doi.org/10.7498/aps.63.214206)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61178028), and the Program for New Century Excellent Talents at Universities of China (Grant No. NCET-10-0610).

† Corresponding author. E-mail: dingxin@tju.edu.cn