

波长锁定 878.6 nm 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 1064 nm 激光器

李 斌¹ 丁 欣¹ 张 巍¹ 盛 泉¹ 范 琛¹ 张海永¹ 姜鹏波¹
刘 简¹ 姚建铨¹ 孙 冰² 王 鹏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, 天津 300072)
² 天津梅曼激光技术有限公司, 天津 300111)

摘要 报道了一种由波长锁定 878.6 nm 半导体激光器抽运 Nd:YVO₄ 晶体的 1064 nm 激光器, 当晶体吸收 7.41 W 的抽运功率时获得了 5.75 W 的 1064 nm 激光输出, 相对于吸收功率的斜率效率为 80.2%, 光光转换率为 77.6%, 并且对波长锁定 878.6 nm, 非波长锁定的 808 nm, 878.6 nm 抽运的激光器的温度特性进行了研究, 结果表明利用波长锁定 878.6 nm 作为抽运源的激光器在 10 °C ~ 40 °C 的温度变化范围内具有很好的输出稳定性。

关键词 激光器; 波长锁定; 878.6 nm 抽运; Nd:YVO₄ 晶体; 1064 nm

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0502010

1064 nm Nd:YVO₄ Laser Pumped by Wave-Locked 878.6 nm Laser Diode

Li Bin^{1,2} Ding Xin¹ Zhang Wei¹ Sheng Quan¹ Fan Chen¹ Zhang Haiyong¹
Jiang Pengbo¹ Liu Jian¹ Yao Jianquan¹ Sun Bing² Wang Peng¹

(¹ Institute of Laser and Opto-Electronics, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Tianjin Maiman Laser Technology Co., Ltd, Tianjin 300111, China)

Abstract A Nd:YVO₄ laser at 1064 nm pumped by a wave-locked 878.6 nm laser diode is achieved. An output power of 5.75 W at 1064 nm for an absorbed pump power of 7.41 W, corresponding to an optical efficiency of 80.2%, optical to optical efficiency of 77.6%. The temperature characteristics of wave-locked 878.6 nm, wave-unlocked 808 nm and 878.6 nm pump laser are also researched. The result shows that wave-locked 878.6 nm pumped Nd:YVO₄ laser has excellent output stability when the temperature varies from 10 °C to 40 °C.

Key words lasers; wave-locked; 878.6 nm pump; Nd:YVO₄ crystal; 1064 nm

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3530; 140.3580

1 引 言

Nd:YVO₄ 晶体是一种优良的激光晶体, 广泛应用到各种固体激光器中^[1-3], 但由于激光器的热效应, 目前利用块状 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质的商用激光器仍被限制在几十瓦输出功率的水平

上^[4]。In-band 抽运技术是一种能从根本上解决激光器热效应的有效方法, 目前已有多篇文献对该技术进行报道^[5-7], 表明共振抽运技术在降低激光器热效应、提高光光转换率方面具有很好的效果。如 Lavi 等^[8]在 1999 年率先报道了利用 880 nm 钛宝

收稿日期: 2013-11-28; 收到修改稿日期: 2014-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(61178028)、新世纪人才计划(NCET-10-0610)

作者简介: 李 斌(1981—), 男, 博士, 主要从事激光及非线性频率变换技术等方面的研究。E-mail: bohrlee@163.com

导师简介: 丁 欣(1972—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光及非线性频率变换技术等方面的研究。

E-mail: dingxin@tju.edu.cn

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%。2003 年, Sato 等^[9] 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%。2006 年, McDonagh 等^[10] 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为 60 W, 斜率效率为 76%, 光光转换效率为 55%。2008 年, Zhu 等^[11] 利用 880 nm LD 抽运 Nd:YVO₄ 板条激光器, 1064 nm 激光输出功率为 165 W, 相对吸收抽运功率的转换效率为 60%。2009 年, Sangla 等^[12] 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, 斜率效率达 80.7%。2011 年 Ding 等^[13] 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%。2012 年, 清华大学巩马里等^[14] 报道了 888 nm LD 端泵的 Nd:YVO₄ 激光器, 抽运功率为 110 W 时, 1064 nm 激光连续波输出功率 60 W。同年清华大学吴兴盛等^[15] 报道了一种利用 880 nm 抽运的 Nd:YVO₄ 碟片激光器, 获得了 20.6 W 的 1064 nm 激光输出, 光光转换效率超过 50%, 但该技术迟迟没有得到广泛的应用, 分析原因主要有: 1) Nd:YVO₄ 晶体的共振抽运吸收带普遍比较窄(一般小于 3 nm), 这导致激光器具有非常高的温度敏感性, 限制了激光器的实际应用; 2) 共振抽运方式晶体对抽运光的吸收率较低, 如 1.5% 掺杂的 Nd:YVO₄ 对于 914 nm 的吸收率仅为 0.65 cm⁻¹, 如此小的吸收率不能满足实际应用。基于以上两点, 提出利用波长锁定 878.6 nm 半导体激光器抽运 Nd:YVO₄ 晶体能够克服以上缺点, 使共振抽运的激光器达到实用性。

2 实验分析及装置

如图 1 所示, Nd:YVO₄ 晶体具有四条主要的吸收谱线, 分别为 808、878.6、888.3、914 nm, 其中 808 nm 和 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}。对于 808 nm 抽运的情况, 原子在发射激光的过程要从 ⁴F_{5/2} 弛豫到 ⁴F_{3/2} 产生无辐热, 由于 878.6、888.3、914 nm 是直接原子抽运到 ⁴F_{3/2} 激光上能级, 去除了 ⁴F_{5/2} 弛豫到 ⁴F_{3/2}

产生无辐热, 但 888.3 nm 和 914 nm 是将基态较高斯塔克能级上的粒子直接抽运到激光上能级, 此种情况对温度的依赖性较高。当晶体的温度较高时, 激光下能级才有足够多的粒子数, 才能对抽运光进行有效的吸收, 因此称作热助推抽运。而 878.6 nm 是从基态斯塔克能级的 Z₁ 能级直接将原子抽运到 ⁴F_{3/2} 激光上能级, 此种情况对温度的依赖性不高, 并且消除了量子亏损产生的热量, 配合波长锁定半导体激光器的窄线宽、温度不敏感性, 可以使激光器达到很好的实用性及稳定性。

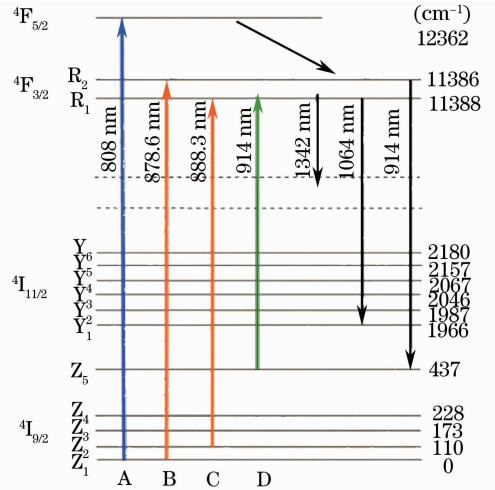


图 1 Nd:YVO₄ 的吸收及发射谱

Fig. 1 Absorption and emission spectra of Nd:YVO₄

实验装置如图 2 所示, LD 为 nlight 公司生产的单管半导体激光器, 其发射中心波长为 878.6 nm, 内部利用布拉格光栅对波长进行锁定, 线宽仅为 0.5 nm, 最高输出功率为 10 W。图 3 给出了 Nd:YVO₄ 在 880 nm 附近的吸收谱, 其吸收线宽为 3 nm, 利用 878.6 nm 波长锁定半导体激光器可以与 Nd:YVO₄ 的吸收谱具有很好的匹配。CO 为耦合系统, 将半导体激光器输出的光束聚焦到 Nd:YVO₄ 中, 聚焦光斑直径为 250 μm, Nd:YVO₄ 晶体规格为 3 mm×3 mm×10 mm, 掺杂浓度为 0.3% (质量分数), M1 为平凹镜, 曲率半径为 500 mm, 双面镀有 1064 nm 高反和 878.6 nm 增透膜系, M2 为平面镜, 有 1064 nm 透射率为 15% 的膜系。

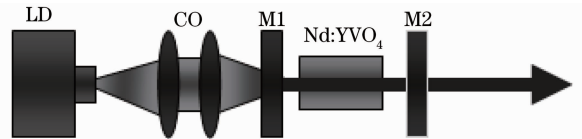


图 2 波长锁定 878.6 nm 抽运 Nd:YVO₄ 实验装置
Fig. 2 Schematic diagram of wave-locked 878.6 nm Nd:YVO₄ Laser

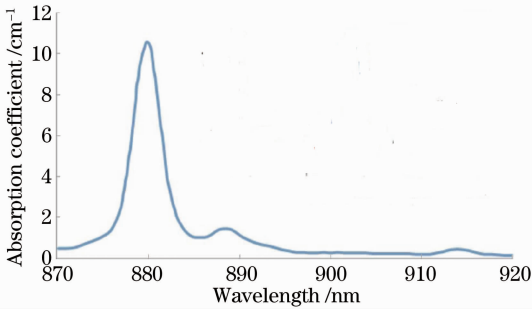


图 3 Nd:YVO₄ 880 nm 附近的吸收谱宽度

Fig. 3 Absorption spectrum bandwidth of Nd:YVO₄ at 880 nm

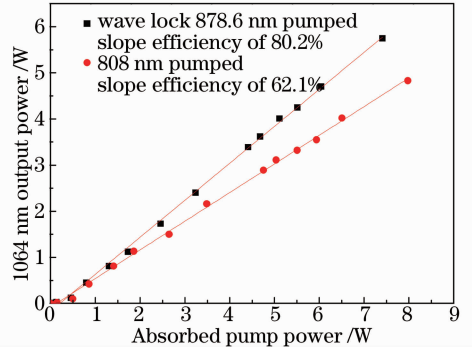


图 4 1064 nm 激光输出功率随晶体吸收功率的变化

Fig. 4 Output power of 1064 nm versus absorbed pump power of crystal

3 实验结果及分析

测量得 10 mm 长掺杂质量分数为 0.3% 的 Nd:YVO₄ 晶体对波长锁定 878.6 nm 的吸收率约为 91%，利用公式 $\eta_p = 1 - \exp(-\alpha l)$ ，得到吸收系数 $\alpha = 2.4 \text{ cm}^{-1}$ ，激光阈值约为 130 mW，较之 808 nm 的阈值 150 mW 略低。当使用波长锁定的 878.6 nm 抽运源时，抽运功率为 8.14 W 时，Nd:YVO₄ 晶体吸收了 7.41 W 的抽运光，最高获得了 5.75 W 的 1064 nm 激光输出，相对于抽运光的总体转换效率为 70.6%，斜率效率为 72.9%，相对于吸收抽运光的光光转换效率为 77.6%，斜率效率达 80.2%，非常接近 82.6% 的量子效率，这是目前利用 880 nm 波段作为抽运源的 Nd:YVO₄ 激光器获得的最高效率。而利用 808 nm 作为抽运源的情况，当抽运功率为 8.14 W 时，Nd:YVO₄ 晶体吸收了 7.98 W 的抽运光，得到了 4.83 W 的 1064 nm 激光输出，相对于吸收光的转换效率为 60.5%，斜率效率为 62.1%，相对于抽运光的总体转换效率为 59.3%，斜率效率为 60.8%。图 4 给出了 1064 nm 激光输出功率随晶体吸收功率的变化，图 5 给出了 1064 nm 激光输出功率随总抽运抽运功率的变化。实验结果表明相对于吸收抽运光功率波长锁定 878.6 nm 抽运情况比 808 nm 抽运情况的总体光光转换效率提高了 17.1%，斜率效率提高了 18.1%。这主要有 3 点原因：1) 878.6 nm 更接近于 1064 nm，具有更高的量子效率；2) 相比于 808 nm 抽运的情况，878.6 nm 抽运可以降低 27.8% 的热量，有利于转换效率的提高；3) 利用波长锁定 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，进一步提高了激光器的转换效率和稳定性。

众所周知，半导体激光器的发射波长会随着温

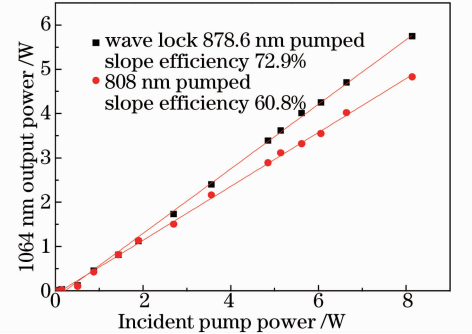


图 5 1064 nm 激光输出功率随总体抽运功率的变化

Fig. 5 Output power of 1064 nm versus pump power

度而发生漂移(约为 0.3 nm/°C)，最终会导致激光器输出功率随着温度的变化而变化，造成激光器输出功率的稳定性下降。图 6 给出了在相同抽运功率时，激光器的温度在 10 °C ~ 40 °C 变化的情况下，808 nm 和 878.6 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 6 所示。对于 808 nm 抽运的激光器，当激光器的温度从 10 °C 变化到 40 °C 时，其输出功率最高为 3.55 W，最低为 1.54 W，输出功率变化了 2.01 W。而对于非波长锁定 878.6 nm 抽运的激光器，当温度变化到 10 °C 时，其输出功率仅有 0.25 W，输出功

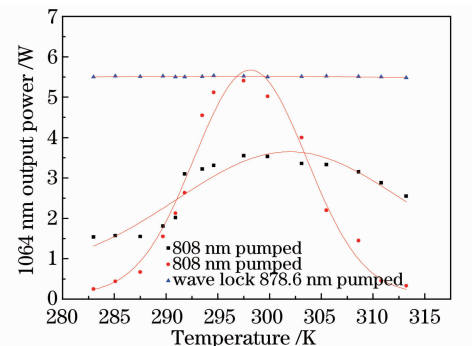


图 6 1064 nm 激光输出功率随温度的变化

Fig. 6 Output power of 1064 nm versus temperature

率随温度的漂移非常严重。而波长锁定 878.6 nm 抽运的激光器,当激光器的温度从 10 ℃ 变化到 40 ℃ 时,其输出功率基本保持不变,这是由于波长锁定 878.6 nm 的半导体激光器的输出波长已经由内部的光栅锁定,其输出波长不随温度的变化而漂移,始终在 Nd:YVO₄ 的吸收峰附近,因此对于激光器的输出功率影响不大。

Nd:YVO₄ 在 808 nm 处的吸收谱线较宽,约为 15 nm,相对 878.6 nm 的吸收峰宽得多,因此 808 nm 抽运情况下,激光器对温度的变化相对不很敏感。而对于 Nd:YVO₄ 在 878.6 nm 处的吸收谱线较窄(3 nm),因此在非波长锁定的 878.6 nm 抽运情况下,对温度的敏感度非常高,通过实验可见波长锁定 878.6 nm 抽运的激光器不仅具有效率高,而且对环境温度变化不敏感的特点。

对波长锁定 878.6 nm 抽运的激光器的光束质量因子 M^2 进行了测量,当抽运的总功率为 8.14 W 时,获得了 5.75 W 的 1064 nm 激光输出,水平方向和垂直方向的 M^2 分别为 1.2 和 1.3,为 TEM₀₀ 模输出,在相同抽运功率的情况下,对于 808 nm 抽运

的情况,获得了 4.83 W 的 1064 nm 激光输出,其水平方向和垂直方向的 M^2 分别为 1.5 和 1.7。图 7 给出了 808 nm 及 878.6 nm 的光强分布图,对比两图可以看出,对于 808 nm 抽运的情况,其光斑能量分布对称度不是很好,而 878.6 nm 抽运时,光斑能量分布具有很好的对称性,并且相比于 808 nm 抽运的情况,光束质量具有一定的改善。图 8 给出了晶体的热透镜焦距随抽运功率的变化情况,通过理论计算当抽运功率为 8 W 左右时,808 nm 抽运时晶体的热透镜焦距为 75 mm 和 878.6 nm 抽运时热透镜焦距为 130 mm,采用稳腔法测量了两种情况的热焦距分别约为 155 mm 和 71 mm,在该热焦距的情况下对谐振腔内的光斑直径进行了计算,如图 9 所示。相比于 808 nm 抽运,878.6 nm 抽运情况下腔内振荡激光具有更大的模体积,在光斑直径上与抽运光(为 250 μm)具有更好的模式匹配,因此较之 808 nm 抽运的情况,878.6 nm 抽运时输出激光的光束质量会更好一些。总而言之,由于利用 878.6 nm 作为抽运源从根本上降低了热效应,从而得到更好的光束质量输出。

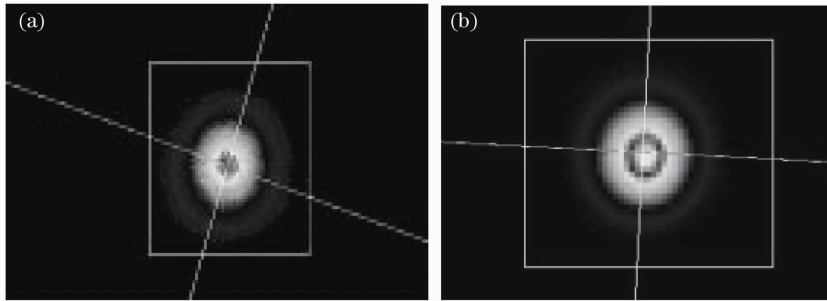


图 7 (a) 808 nm 与(b) 878.6 nm 抽运情况下 1064 nm 光强分布图

Fig. 7 1064 nm intensity distribution under (a) 808 nm and (b) 878.6 nm pump

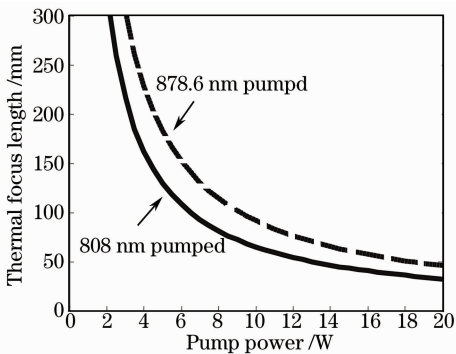


图 8 热透镜焦距随抽运功率的变化

Fig. 8 Thermal focus length versus pump power

实验表明利用波长锁定 878.6 nm 半导体激光器抽运 Nd:YVO₄ 激光器相比于 808 nm 抽运 Nd:YVO₄ 激光器不仅具有更高的效率、好的光束质量,

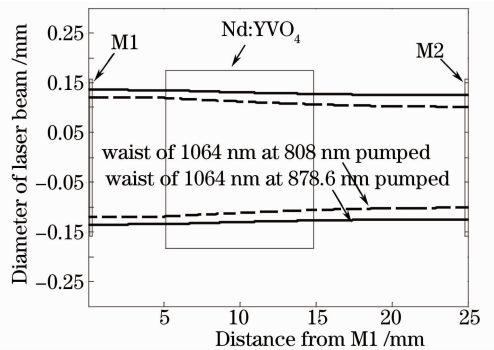


图 9 谐振腔内的激光光斑直径

Fig. 9 Laser spot diameter in cavity

并且对于温度变化具有很好的稳定性,该方式亦可利用到 914 nm 和 888.3 nm 抽运的 Nd:YVO₄ 激光器中,具有很好的实用价值,为热助推抽运的固体激

光器提供了一种比较实用的方式。

4 结 论

提出了利用波长锁定 878.6 nm 半导体激光器作为 Nd:YVO₄ 固体激光器的抽运源并对其进行了实验研究,实验测得的激光阈值约为 130 mW,较之 808 nm 抽运情况略低。对于波长锁定 878.6 nm,当抽运功率为 8.14 W 时,Nd:YVO₄ 晶体吸收了 7.41 W 的抽运光,最高获得了 5.75 W 的 1064 nm 激光输出,相对于抽运光的总体转换效率为 70.6%,斜率效率为 72.9%,相对于吸收抽运光的光光转换率 77.6%,斜率效率达 80.2%。对非波长锁定 808 nm 和 878.6 nm 及波长锁定 878.6 nm 抽运的 Nd:YVO₄ 固体激光的温度特性进行了研究,当激光器的温度从 10 ℃ 变化到 40 ℃ 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 878.6 nm 和 808 nm 抽运的激光器输出功率随温度变化有较大的波动,因此利用波长锁定 878.6 nm 作为抽运源为共振抽运方式提供了一种行之有效的办法。

参 考 文 献

- 1 Li Xiaoli, Shao Jie, Zang Huaguo, *et al.*. High repetition rate short pulse width Nd:YVO₄ slab laser[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 206–210.
李小莉,邵杰,臧华国,等.高重复率窄脉宽 Nd:YVO₄ 板条激光器[J].中国激光,2008,35(2):206–210.
- 2 Liu Huan, Gong Mali. Compact LD end-pumped Nd:YVO₄ intracavity frequency-tripled 355 nm laser[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(2): 1341–1346.
刘欢,巩马里.紧凑型激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 内腔三倍频 355 nm 紫外激光器[J].中国激光,2009,36(6):1341–1346.
- 3 Ding Xin, Shang Ce, Sheng Quan, *et al.*. Continuous-wave tunable intra-cavity single resonance optical parametric oscillator under 880 nm in-band pumping and the inverse conversion[J].

Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602008.

- 丁欣,尚策,盛泉,等.880 nm 共振抽运连续波内腔单谐振光学参量振荡器及其逆转换问题[J].中国激光,2013,40(6):0602008.
- 4 X Y Peng, L Xu, A Asundi. Power scaling of diode-pumped Nd:YVO₄ lasers[J]. IEEE J Quantum Electron, 2002, 38(9): 1291–1299.
- 5 Jianli Liu, Zhiyong Wang, Hong Li, *et al.*. Stable 12 W continuous-wave single-frequency Nd:YVO₄ green laser polarized and dual-end pumped at 880 nm[J]. Opt Express, 2011, 19(7): 6777–6782.
- 6 H Lin, F J Li, X Y Liang. 105 W, <10 ps, TEM₀₀ laser output based on an in-band pumped Nd:YVO₄ innoslab amplifier[J]. Opt Lett, 2012, 37(13): 2634–2636.
- 7 D len Xavier, Balembois Francois, Musset Olivier, *et al.*. Characteristics of laser operation at 1064 nm in Nd:YVO₄ under diode pumping at 808 and 914 nm[J]. J Opt Soc Am B, 2011, 28(1): 52–57.
- 8 Lavi Raphael, Jackel Steven. Thermally boosted pumping of neodymium lasers[J]. Appl Opt, 2000, 39(18): 3093–3098.
- 9 Y Sato, T Taira, N Pavel, *et al.*. Laser operation with near quantum-defect slope efficiency in Nd:YVO₄ under direct pumping into the emitting level[J]. Appl Phys Lett, 2003, 82(6): 844–846.
- 10 McDonagh Louis, Wallenstein Richard, Knappe Ralf. High-efficiency 60 W TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm[J]. Opt Lett, 2006, 31(22): 3297–3299.
- 11 Zhu Peng, Li Daijun, Hu Peixin, *et al.*. High efficiency 165 W near diffraction limited Nd:YVO₄ slab oscillator pumped at 880 nm[J]. Opt Lett, 2008, 33(17): 1930–1932.
- 12 Sangla Damien, Castaing Marc, Balembois François, *et al.*. Highly efficient Nd:YVO₄ laser by direct in-band diode pumping at 914 nm[J]. Opt Lett, 2009, 34(14): 2159–2161.
- 13 Ding Xin, Yin Sujia, Shi Chunpeng, *et al.*. High efficiency 1342 nm Nd:YVO₄ laser in-band pumped at 914 nm[J]. Opt Express, 2011, 19(15): 14315–14320.
- 14 Hong Hailong, Huang Lei, Liu Qiang, *et al.*. Compact high-power, TEM₀₀ acousto-optics Q-switched Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm[J]. Appl Opt, 2012, 51(3): 323–327.
- 15 Wu Xingsheng, Gao Jiancun, Tang Xinchun, *et al.*. 20.6 W Nd:YVO₄ thin disk laser with laser diode direct upper-state pumping[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1202001.
吴兴盛,高健存,唐新春,等.20.6 W 激光二极管直接上能级抽运 Nd:YVO₄ 薄片激光器[J].中国激光,2012,39(12):1202001.

栏目编辑:宋梅梅