

LD 抽运直腔式 457 nm 蓝光激光器的实验研究

尹浩^{1,2} 朱思祁^{1,2} 阳其国^{1,2} 陈振强^{1,2} 何青^{1,3} 李安明^{1,2} 李真^{1,2}

¹暨南大学光电信息与传感技术广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510632
²暨南大学理工学院光电工程系, 广东 广州 510632
³广东医学院, 广东 东莞 524023

摘要 充分利用全固态激光器结构紧凑的优点,设计了一套紧凑型直腔式 457 nm 蓝光激光器系统。在设计过程中,针对 Nd:YVO₄ 激光晶体的自身性质及其产生 914 nm 激光的相关光学特性,着重对该激光系统的激光阈值进行分析,对温控系统及谐振腔参数进行优化。最终实现了 Nd:YVO₄ 激光晶体 914 nm 波长激光运转,并在此基础上利用 BIBO 晶体进行腔内倍频获得 457 nm 激光输出。入射抽运光功率为 24.2 W 时,最高输出功率为 1.56 W,光-光转换效率为 6.45%,功率稳定度低于 2.98%, M^2 因子为 1.3。

关键词 激光器;Nd:YVO₄ 晶体;谐振腔设计;457 nm;蓝光激光器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0202003

Research on LD-End-Pumped 457 nm Laser with Straight Type Cavity

Yin Hao^{1,2} Zhu Siqi^{1,2} Yang Qiguo^{1,2} Chen Zhenqiang^{1,2}
He Qing^{1,3} Li Anming^{1,2} Li Zhen^{1,2}

¹Key Laboratory of Optoelectronic Information and Sensing Technologies of Guangdong Higher Education Institutes, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

²Institutes of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

³Guangdong Medical Colleges, Dongguan, Guangdong 524023, China

Abstract In order to give full play to the advantages of compact all-solid-state lasers, a compact straight cavity 457 nm blue laser system is designed. Based on the nature of the Nd:YVO₄, the analysis of laser threshold of quasi-three-level laser system and the parameters optimization of resonator cavity are obtained. The laser of Nd:YVO₄ operation at 914 nm and its 457 nm second harmonic is realized by intracavity frequency doubling with BIBO nonlinear crystal. The highest output power at 457 nm reaches 1.56 W with an incident pump power of 24.2 W, and the optical-to-optical conversion efficiency is higher than 6.45%, also the fluctuation of the blue output power is less than 2.98% and M^2 factor is 1.3.

Key words lasers; Nd:YVO₄ crystal; design of resonator; 457 nm; blue-ray laser

OCIS codes 140.2020; 140.3410; 140.3480

1 引言

长期以来,全固态蓝色激光一直是可见波长激光研究的重点。在蓝光波段,473 nm 波长的全固态蓝光激光器已较为成熟^[1~3],而 440、447、457、456 nm 等蓝光波段激光研究相对较弱^[4~11]。457 nm 蓝色激光同 473 nm 蓝色激光相比具有颜色更饱满、波长更

短、光子能量大等优点,使其在高密度数据存储、激光彩色显示等方面有着更广阔的应用前景。

全固态蓝色激光主要是通过倍频或者三倍频技术实现的,但整体效率偏低^[1~6]。究其原因:一是在倍频蓝光系统中,基频光运转是通过 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 等晶体的准三能级 $^4F_{3/2}^- \rightarrow ^4I_{9/2}$ 跃迁弱发

收稿日期: 2012-08-27; 收到修改稿日期: 2012-10-15

基金项目: 广东省省部产学研项目(2009B091300072, 2010B090500022, 2009B090600040)和中央高校基本科研业务费专项(21611515)资助课题。

作者简介: 尹浩(1973—),男,博士,讲师,主要从事激光和检测技术等方面的研究。E-mail: yinhaoemail@jnu.edu.cn

射谱线来实现的,与 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 、 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 等波段存在着激烈的谱线竞争,导致其激光运转困难,振荡阈值高,效率偏低^[7,8];二是在三倍频蓝光系统中,产生 440、446、447 nm 等波段蓝色激光是分别通过 Nd:YAG、Nd:YAP 的 1.319、1.338、1.3414 μm 的基频光经过倍频后再和频获得的^[9~17],所以难以实现高效输出。最近 Zheng 等^[4]报道了由 Nd:YVO₄/LBO 构成 V 型腔结构实现了 13.2 W 高功率 457 nm 蓝光输出,但该系统调整难度大,结构较为复杂,且光束质量不高。目前能实现高功率、高光束质量 457 nm 激光输出的仍属少数,尤其是结构简单的直腔式系统。因此,设计一种高效率且结构紧凑的高光束质量 457 nm 蓝光激光器有重要的科研和应用意义。

本文在重点分析 457 nm 激光系统的激光阈值基础上,通过对温控系统和谐振腔参数进行优化设计,搭建了一套直腔式 457 nm 高效率蓝光激光系统,实现了连续输出功率为 1.56 W、功率稳定度为 2.98%、光-光转换效率为 6.45%、 M^2 因子为 1.3 的 457 nm 蓝光输出。

2 理论分析和系统设计

2.1 激光阈值分析

457 nm 蓝光激光系统属于准三能级系统,其激光下能级存在较多的粒子数,导致激光系统起振难度大,激光阈值高,因此需要通过优化系统参数来降低激光阈值。准三能级系统的阈值公式为^[4]

$$p_{\text{th}} = \frac{\pi h\nu_p (\omega_L^2 + \omega_p^2) (\delta + 2N_1^0 \sigma_3 l)}{4\sigma_3 \tau \eta \eta_a (f_1 + f_2)}, \quad (1)$$

式中 $h\nu_p$ 为抽运光的光子能量, ω_L 和 ω_p 分别为介质内振荡光的束腰半径和抽运光的光斑半径, δ 为激光谐振腔损耗, f_1 和 f_2 分别为激光上能级和下能级占总粒子数的比例, N_1^0 为自由掺杂浓度决定的总粒子数密度, σ_3 为激光发射截面, τ 为上能级寿命, $\eta = 1 - \exp(-\alpha l)$, η_a 为量子效率, l 为激光晶体长度,由(1)式可知:

1) 激光阈值与抽运光斑的半径成正比,抽运光斑越小,激光阈值越低。因此抽运源采用了纤芯半径为 200 μm 的光纤耦合输出,并通过 1:1 的光学成像系统聚焦到激光晶体的中心,有效降低了激光系统的阈值。

2) 激光阈值与激光下能级占总粒子数的比例 f_2 成反比,而激光下能级的粒子数分布遵从玻尔兹曼分布,所以要降低激光下能级的粒子数,需要将激

光晶体控制在一个较低的温度,从而降低激光系统起振的阈值。因此对激光温控系统进行了优化设计。

2.2 温控系统优化设计

Nd:YVO₄ 晶体具有发射截面大、吸收谱宽、偏振输出(能避免在倍频转换时产生双折射干扰)等优点,但其明显缺点是热导率小。为了降低激光系统的阈值和晶体热效应对激光输出功率和稳定性的影响,对温控系统进行了优化设计。

实验温控装置主要由水冷模块和温控系统两大部分组成。水冷模块采用紫铜制作而成。晶体采用厚度为 0.05 mm 的铝箔包裹后置于上面紫铜块中,有利于晶体与紫铜块接触更加紧密,有效控制温度并使散热均匀。紫铜块侧面的小孔用于将热敏电阻导入其中,使热敏电阻更接近晶体,从而提高所测量温度的准确性。半导体制冷器(TEC)置于下面的紫铜块之上,对上面的紫铜块制冷并将热量传导至下面的紫铜块,通过循环水冷将热量带走。温控系统包括温控电源、热敏电阻和 TEC 制冷片 3 个部分。该温控系统能很好地保证晶体的温度稳定性。

2.3 谐振腔设计

为了提高激光系统的紧凑性和操作调节的简便性,采用直腔式结构,同时为了使谐振腔结构更加紧凑,在 Nd:YVO₄ 晶体前端面镀 914 nm 及 457 nm 高反双色膜作为腔镜,即可以认为该激光谐振腔的输入端腔镜为平面镜。

采用谐振腔稳定性法对实验所用的 Nd:YVO₄ 晶体热透镜焦距进行测量,实验表明当抽运光功率大于 21.5 W 时,其热焦距小于 90 mm,而且随着抽运功率的增加,热焦距会进一步缩短。

常见直腔式谐振腔结构如图 1 所示, M_1 和 M_2 为前、后腔镜, f 表示激光晶体所形成的热透镜的焦距。当热透镜效应存在时,等效于在两腔镜之间插入了一凸透镜,焦距为 f 。 L_1 , L_2 分别为前、后两腔镜到晶体中心的距离。

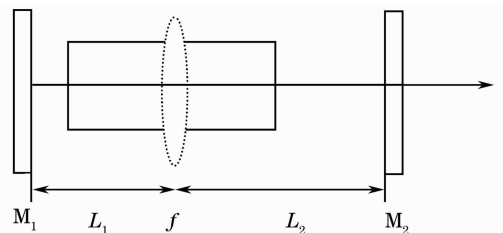


图 1 直腔式谐振腔结构图

Fig. 1 Structure of straight cavity

确定 M_1 为平面镜,且 M_1 紧贴晶体, L_1 非常小,因此 M_1 可以等效为一个曲率半径 $R=f$ 的凹面镜,如图 2 所示。此时 L_2 为总腔长,根据 ABCD 矩阵的相关原理,谐振腔需符合其稳定性条件 $\left| \frac{1}{2}(A+D) \right| < 1$ 。假设 f 一定(设为 90 mm),对比 M_2 镜采用平面镜和凹面镜(设 $R=100$ mm)的稳定性条件随 L_2 (总腔长)的变化情况,结果如图 3(a)所示;再假定 L_2 一定(设为 90 mm,采用紧凑的腔结构),对比 M_2 镜采用平面镜和凹面镜(设 $R=$

100 mm)的稳定性条件随 f (即 M_1 的曲率半径)变化的情况,结果如图 3(b)所示。

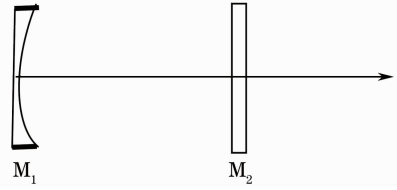


图 2 直腔式谐振腔等效结构图

Fig. 2 Equivalent structure of straight cavity

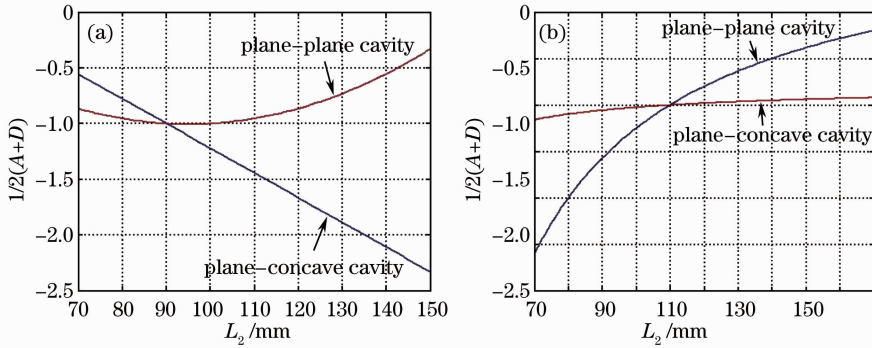


图 3 平-平腔与平-凹腔的谐振腔稳定性比较。(a) f 定值;(b) L_2 定值

Fig. 3 Comparison of stability of plane-plane cavity and plane-concave cavity. (a) f fixed value; (b) L_2 fixed value

从图 3 分析可知,平-凹腔结构比平-平腔结构的稳定区域大得多,也就是说当 f 或者 L_2 在一定范围内变化时平-平腔比平-凹腔更容易失稳。此外,由于平-凹腔的机械不对准容限的灵敏度远小于平-平腔,而产生热透镜后等效的双曲面镜腔又比平-凹腔的灵敏度更小,因此选择凹面镜作为耦合输出镜 M_2 更为适合^[18]。

3 实验装置

激光二极管(LD)端面抽运直腔式 457 nm 蓝光激光系统如图 4 所示,抽运源采用最高输出功率为 32 W 的 808 nm 光纤耦合半导体激光器。光纤芯径定制为 200 μm ,一方面为了降低激光系统的阈值,另一方面为了提高基频光的功率密度和倍频效率。调节

半导体激光器的工作温度,使其工作波长为 808.7 nm,与 Nd:YVO₄ 晶体的吸收峰相匹配,抽运光通过 1:1 的光学成像系统聚焦到激光晶体中心,系统的传输透射率为 92%,焦距为 30 mm,整个谐振腔腔长设定为 90 mm。为了避免产生过大的热透镜效应,在保证晶体有足够吸收系数的前提下,本实验采用掺杂浓度较低(Nd³⁺ 掺杂离子数分数为 0.1%)的 Nd:YVO₄ 晶体作为激光晶体,并用 0.05 mm 的铝箔包裹置于紫铜块中,将其温度控制在 10 $^{\circ}\text{C}$,同时采用 I 类相位匹配($\theta=159.7^{\circ}$, $\varphi=90^{\circ}$)的 BIBO 晶体作为倍频晶体,将其温度控制在 25 $^{\circ}\text{C}$ 。因为激光晶体的 914 nm 波段相对于 1064 nm 和 1341 nm 两个波段的发射截面小很多,所以存在着激烈的谱线竞争,为了实现 914 nm 波段的激光振荡,必须通过激光谐振腔镜片和晶体端

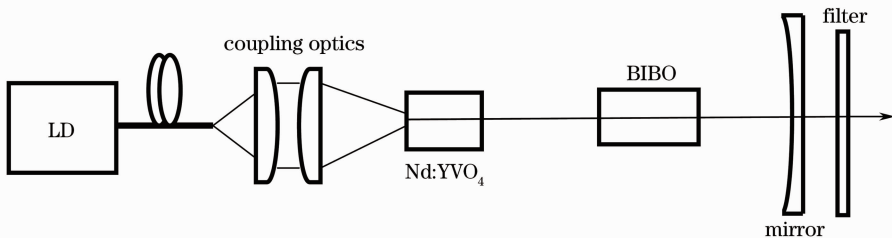


图 4 直腔式 457 nm 蓝光激光系统结构

Fig. 4 Structure of 457 nm blue laser with straight cavity

面的膜系设计来充分加强1064 nm和1341 nm两个波段的振荡,实验中所采用的晶体及镜片的膜系设计参数如表1所示,其中S1,S2分别表示晶体和镜

片的前表面和后表面,HT、HR和AR分别代表高透、高反和减反, ϕ 代表镜片直径。

表1 晶体及镜片参数表
Table 1 Parameters of the crystal and mirror

Crystal	Size	Coating film
Nd:YVO ₄	3 mm×3 mm×	S1: HT-808 nm>95% HR-914 nm>99.5% HT-1064 nm>90%
	5 mm	S2: HT-914 nm>99.5%;HR-1064 nm>95%;HR-1341 nm>90%;HR-457 nm>99.5%
BIBO	3×3×5 mm ³	S1:AR-914 nm>99.5%
		S2:AR-457 nm>99.5%
Mirror	$\Phi=20$ mm, R=100 mm	S1: HT-1064 nm>85%;HT-1341 nm>90%;HR-914 nm>99.5%;HT-457nm>90%
		S2: AR-457/1064/1341 nm

4 实验结果与分析

实验获得了457 nm激光输出,并对输出激光相关参数进行了测量。功率的测量使用以色列Ophir公司生产的NOVA II型激光功率能量计,其测量范围为0.2~150 W,光电探头上升时间远小于200 ps,响应度为0.4 mA/W;光束质量的测量采用以色列Ophir公司生产的带高分辨率高灵敏度相机(型号:GRAS 20,灵敏度:0.4 nW/cm²),以及高质量软件、衰减系统和自动测试M²系统(型号:M²-200S-FW-A)的光束质量综合分析仪;光谱测量使用北京卓立汉光公司生产的SBP300型三光栅光谱仪,精度为0.1 nm。实验结果分析如下:

1) 当Nd:YVO₄晶体温度控制在10℃和BIBO晶体温度控制在25℃时,输出功率随抽运功率变化曲线如图5所示。从图中可以看出,随着抽运功率的增大,输出功率也不断增加。激光的阈值为3.9 W。在抽运功率为24.2 W时,457 nm蓝光的输出功率为1.56 W,光-光转换效率为6.45%。之后再增加抽运功率,激光输出功率开始下降,系统由于热效应而不稳定。

2) 对输出激光的稳定性进行了测量,如图6所示。考虑到高的抽运功率可能会损坏激光晶体,因此选择在抽运功率为20 W、蓝光输出功率为0.98 W时对激光输出稳定性进行测量,功率稳定度优于2.98%。

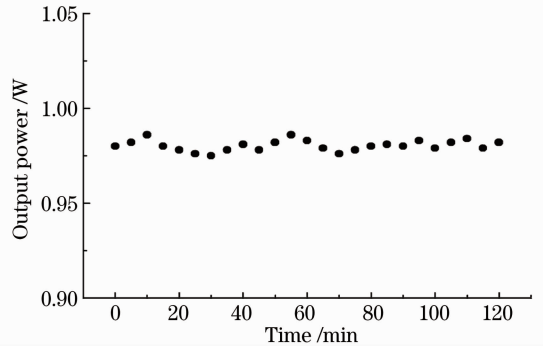


图6 功率稳定度

Fig. 6 Power stability

3) 利用光栅光谱仪对输出激光光谱进行测量,如图7所示。谱线宽度大约为2.8 nm,具有良好的单色性。同时,远场光斑质量良好。

4) 使用高灵敏度的CCD相机对光斑进行了二维(2D)和三维(3D)成像,如图8所示。可以看出蓝光具有良好的光束质量,经测定,M²因子为1.3,说明BIBO腔内倍频基本实现了蓝光的TEM₀₀模运转。

5 结 论

通过理论分析,设计了一款结构紧凑的直腔式457 nm连续蓝光激光器。该激光器在抽运功率为24.2 W时获得了1.56 W的457 nm蓝光输出,光-光转换效率达到6.45%。在输出功率为0.98 W时,功率稳定度优于2.98%。457 nm光束质量较好,M²因子为1.3。实验证明,采用适当的谐振腔

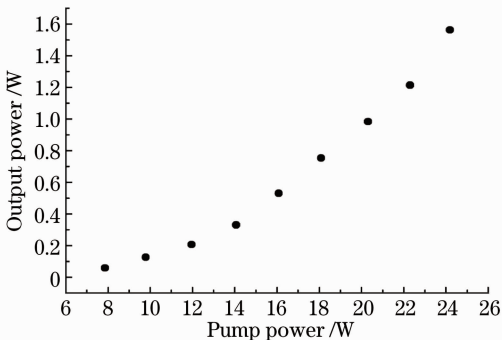


图5 输入功率与输出功率关系图

Fig. 5 Input power versus output power

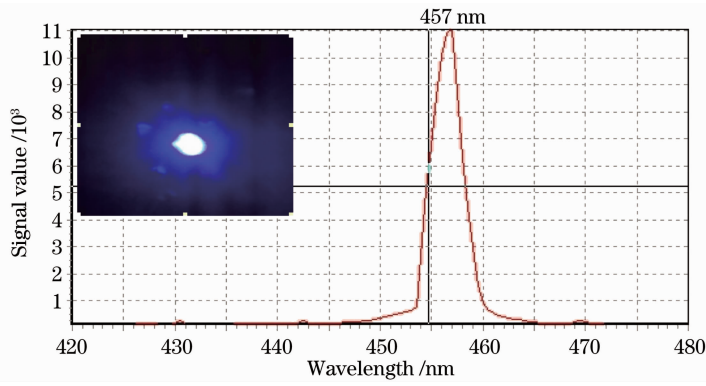


图7 输出激光光谱图及远场光斑

Fig. 7 Spectrum diagram of output laser and far-field spot

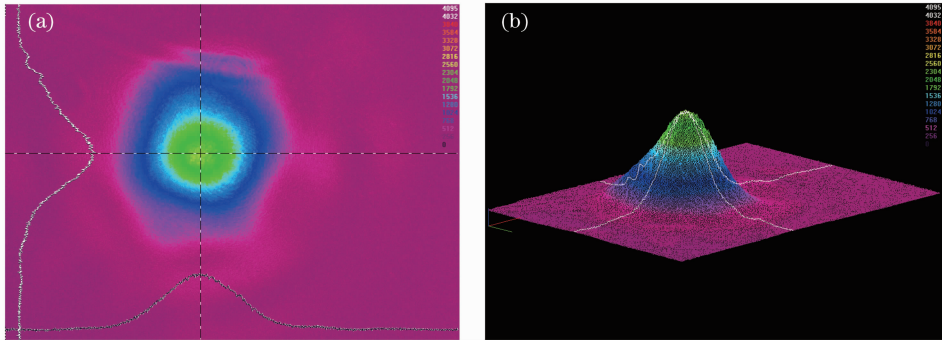


图8 (a) BIBO腔内倍频蓝光光斑2D图像;(b) BIBO腔内倍频蓝光光斑3D图像

Fig. 8 (a) 2D image of the blue light spot by BIBO intracavity frequency doubling; (b) 3D image of the blue light spot by BIBO intracavity frequency doubling

参数及良好的温控系统,即使是采用简单的直腔式结构的谐振腔,也能获得较高功率、较好光束质量的457 nm 蓝光输出。

致谢 感谢中国科学院福建物质结构研究所张戈教授课题组在晶体加工方面的支持。

参 考 文 献

- 1 Y. Chen, H. Peng, W. Hou *et al.*. 3.8 W of CW blue light generated by intracavity frequency doubling of a 946-nm Nd:YAG laser with LBO[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(2): 241~243
- 2 C. Czeranowsky, E. Heumann, G. Huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG-BIBO laser with 2.8-W output power at 473 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 432~434
- 3 Gao Jing, Yu Xin, Zhang Wenping *et al.*. Research progress in LD pumped all-solid-state blue lasers[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(3): 430~434
高静,于欣,张文平等. LD抽运全固态蓝光激光器的研究进展[J]. *光学技术*, 2007, **33**(3): 430~434
- 4 Quan Zheng, Yi Yao, Bin Li *et al.*. 13.2 W laser-diode-pumped Nd:YVO₄/LBO blue laser at 457 nm[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(6): 1238~1242
- 5 Lü Baida. *Laser Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 356~361
吕百达. *激光光学* [M]. 北京: 科学出版社, 2003. 356~361

- 6 Qinghua Xue, Yikun Bu, Fuqiang Jia *et al.*. Compact efficient 1.5 W continuous wave Nd:YVO₄/LBO blue laser at 457nm[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **258**(1): 67~71
- 7 Liu Rui, Yu Yongji, Chen Xinyu *et al.*. 150 kHz Q-switched adhesive-free bond composite Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602001
刘瑞,于永吉,陈薪羽等. 150 kHz 生长型复合 Nd:YVO₄/Nd:GdVO₄ 电光调 Q 激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602001
- 8 Zheng Yaohui, Wang Yajun, Peng Kunchi. Single-end pumping, single-frequency Nd:YVO₄/LBO laser with output power of 21.5 W[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(6): 0602011
郑耀辉,王雅君,彭堃堃. 输出功率为 21.5 W 的单端抽运 Nd:YVO₄/LBO 单频激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(6): 0602011
- 9 Y. F. Chen, Y. S. Chen, T. H. Ou *et al.*. Compact efficient diode-pumped Nd:YVO₄ Q-switched blue laser with intracavity frequency tripling[J]. *Appl. Phys. B: Lasers Opt.*, 2005, **81**(4): 517~520
- 10 Yanfei Lü, Xihe Zhang, Zhihai Yao *et al.*. 6.2-W deep blue light generation by intracavity frequency-doubled Nd:GdVO₄ using BIBO[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 407~408
- 11 Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu *et al.*. High-power efficient diode-pumped Nd:YVO₄/LiB₃O₅ 457 nm blue laser with 4.6 W of output power[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(8): 1070~1072
- 12 F. Jia, Q. Xue, Q. Zheng *et al.*. 5.3 W deep-blue light generation by intra-cavity frequency doubling of Nd:GdVO₄[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(2): 245~247
- 13 Haiyong Zhu, Ge Zhang, Chenghui Huang *et al.*. Multi-watt power blue light generation by intracavity sum-frequency-mixing

- in KTiOPO_4 crystal [J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(5): 2989~2994
- 14 Li Jingzhao. The Reearch of All-Soild-State 447nm CW Laser [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009
李景照. 全固态 447 nm 连续激光器的研究[D]. 广州: 暨南大学, 2009
- 15 Ji Jianghua, Qi Yunfeng, Zhu Xiaolei *et al.*. High-power quasi-continuous-wave Nd:YAG ceramic laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3): 415~418
纪江华, 漆云凤, 朱小磊 等. 大功率准连续 Nd:YAG 陶瓷激光器研究[J]. 光学学报, 2006, **26**(3): 415~418
- 16 Xiao Chongli, Wan Chunming, Ling Ming. Side-pumped Nd:YAG pulsed laser with conduction cooling [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0414001
肖崇深, 万春明, 凌 铭. 传导冷却侧面抽运 Nd:YAG 脉冲激光器[J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0414001
- 17 Benxue Jiang, Tongde Huang, Yusong Wu *et al.*. Synthesis and microstructure analysis of composite Nd:YAG/YAG transparent ceramics[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **17**(6): 505~507
- 18 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. Sun Wen *et al.*. Transl. Beijing: Science Press, 2002. 187~188
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文 等 译. 北京: 科学出版社, 2002. 187~188

栏目编辑: 宋梅梅