

# 680 mW 小型薄片式 Yb:YAG/BIBO 515 nm 激光器

田玉冰<sup>1</sup> 檀慧明<sup>1</sup> 王 帆<sup>1</sup> 崔锦江<sup>1</sup> 董宁宁<sup>1</sup> 姚文明<sup>1,2</sup> 邱丰富<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163

<sup>2</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

<sup>3</sup>长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 报道了腔内倍频 Yb:YAG/BIBO 515 nm 薄片激光器, Yb:YAG 晶体掺杂浓度(原子数分数)为 10%, 几何尺寸为  $\phi 11 \text{ mm} \times 420 \mu\text{m}$ , 高反面经 Cr/Au 金属化处理, 采用钢焊工艺焊接到微通道水冷热沉上。理论上计算了抽运光吸收效率和注入光斑半径。耦合系统为四程抽运结构, 球面镜规格为直径  $\phi = 26 \text{ mm}$ , 曲率半径  $\rho = 50 \text{ mm}$ , 倍频晶体选用按 I 类临界相位匹配角度切割的 BIBO, 相位匹配角度  $(\theta, \Phi) = (166.7^\circ, 90^\circ)$ 。在 24.9 W 注入抽运功率下, 515 nm 激光最高输出功率可达 680 mW, 光-光转换效率为 2.73%。

**关键词** 激光器; 薄片激光器; Yb:YAG 晶体; 515 nm 绿激光

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201340.0602021

## A Compact Efficient Intra-Cavity Frequency Doubled Yb:YAG/BIBO 515 nm Thin Disc Laser

Tian Yubing<sup>1</sup> Tan Huiming<sup>1</sup> Wang Fan<sup>1</sup> Cui Jinjiang<sup>1</sup> Dong Ningning<sup>1</sup>

Yao Wenming<sup>1,2</sup> Wu Xingfu<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory for Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

<sup>3</sup>School of Science, Changchun University of Sciences and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

**Abstract** An intra-cavity frequency doubled Yb:YAG/BIBO 515 nm thin disc laser is demonstrated. The Yb:YAG crystal with 10% doped concentration is 420  $\mu\text{m}$  in thickness and 11 mm in diameter. It is mounted onto the micro-channel copper heat sink by Cr/Au/In. The pump light absorption and pump beam radius are calculated. A four-pass optical coupling system is well designed with two spherical imaging mirrors with diameter of 26 mm and curvature radius of 50 mm. A 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  2 mm BIBO crystal cutting at a type-I phase-matching direction of  $(\theta, \Phi) = (166.7^\circ, 90^\circ)$  is employed. With 24.9 W incident pumping power, the maximum output power of 680 mW at 515 nm is obtained. The optical-optical conversion efficiency is 2.73%.

**Key words** lasers; thin disc laser; Yb:YAG crystal; 515 nm green laser

**OCIS codes** 140.3320; 140.3480; 140.3410; 140.3515

## 1 引 言

515 nm 波长激光在牙齿美白、共聚焦显微镜、荧光探测等生物医学领域具有重要的应用。早期研究中该波段多采用氩离子激光器(514.5 nm)开

展<sup>[1]</sup>, 但氩离子耗水耗电, 体积庞大, 因此逐渐被市场所淘汰。相比之下, 激光二极管(LD)抽运的全固态激光器具有体积小、效率高和光束质量好等优势。近几年随着国外高功率薄片式 515 nm 激光器的发

收稿日期: 2013-01-30; 收到修改稿日期: 2013-03-05

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK2010235)、苏州市应用基础研究计划项目(SYG201127)和苏州医工所青年引导基金(Y052051205)资助课题。

作者简介: 田玉冰(1976-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事医用全固态激光器设计及非线性频率变换技术方面的研究。

E-mail: tianyb76@yahoo.com.cn

展,在金属加工、焊接等领域也开始有相关的实验报道<sup>[2,3]</sup>,因此开发 LD 抽运的 515nm 激光器具有重要的科研意义和工业应用价值。

515 nm 激光可通过对 Yb:YAG 的 1030 nm 谱线直接倍频获得,但其属于准三能级结构,不可避免地受到热透镜效应和应力双折射效应的影响。直到薄片式激光器思想的提出<sup>[4~8]</sup>,才使得高功率 1030 nm 激光输出成为可能。2003 年,德国 ELS 公司推出世界上第一款商用 1030 nm/515 nm 薄片激光器<sup>[9]</sup>,其结构采用环形腔,515 nm 激光的转换效率达 5%。由于非球面镜难于加工且该产品结构复杂,该公司只开发了输出功率大于 2.5 W 的 515 nm 激光器产品。目前该波段激光器的核心技术仍为德国所垄断。

国内相关研究工作起步较晚,2002 年,清华大学报道了薄片式 1030 nm Yb:YAG 激光器<sup>[10]</sup>。2004 年和 2006 年,清华大学和中国科学院物理研究所分别报道了 515 nm 激光器实验<sup>[11,12]</sup>,实验装置均采用 4 个球面镜耦合抽运光,通过 V 型腔压缩束腰来提高倍频效率。该结构虽能获得瓦级激光输出,但对产品开发来说存在着两个难于解决的问题:一是结构复杂,体积庞大:4 个球面镜的位置难以调整和固定,任一球面镜的微小抖动都会极大地影响抽运光的耦合效率,因而稳定性差;二是 V 型腔中倍频晶体对束腰位置非常敏感,调控困难。2010 年底,中国工程物理研究院在实验研究上取得突破,获得了平均功率为 10.2 W 的 515 nm 激光输出<sup>[13]</sup>。但其耦合结构仿照德国研究人员提出的非球面镜结构,谐振腔采用 Z 型腔,腔长达 1.89 m,小型 515 nm 激光器产品的开发仍是难点。

针对上述问题,设计了四程抽运的 515 nm Yb:YAG 薄片激光器,抽运光由两个球面镜进行耦合,谐振腔选用平凹腔,通过腔内倍频可获得 680 mW 的 515 nm 激光输出。该装置具有腔形简单、调节容易和稳定性高等特点。

## 2 理论分析与计算

薄片激光器主要通过减小晶体厚度来实现有效散热,同时能提高抽运程数以保证吸收效率。根据文献<sup>[14]</sup>可知,激光器的各项参数确定后,仅需优化热传输系数和晶体厚度就能达到有效散热的目的。热传输系数的优化可通过缓冲层的设计和焊料的选择来完成。实验时采用离子束溅射设备镀制不同厚度的 Cr 和 Au,对晶体实施金属化:一方面 Cr 具有

较高的导热系数<sup>[91.3 W/(m·K)]</sup>;另一方面 Cr 与基底结合比较牢固。焊料选用金属钢,由于钢属于低熔点(156 ℃)的软焊料,可降低镀膜的难度,同时能缓解晶体与热沉间的热应力。焊接时,将晶体放于真空回流炉充以弱酸,加热至 180 ℃进行焊接。

理论上,晶体厚度越小,散热效果越理想<sup>[15]</sup>。但厚度过小,吸收效率会降低,而厚度过大将加剧热透镜效应,因此晶体存在一个最佳厚度。这里推导了四程抽运结构的吸收效率,推导时先分别求出抽运光每次通过晶体时的吸收功率,然后相加化简可得

$$\eta_i = R_1 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-\alpha t}{\cos \theta}\right) \right] \left[ 1 + R_c \exp\left(\frac{-\alpha t}{\cos \theta}\right) \right] \times \left[ 1 + R_c R_2 \exp\left(\frac{-2\alpha t}{\cos \theta}\right) \right], \quad (1)$$

式中  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_c$  分别为两个耦合反射镜及晶体高反面对 940 nm 的反射率, $\theta$  为抽运光的入射角度,掺杂原子数分数为 10% 的 Yb:YAG 晶体对 940 nm 激光的吸收系数  $\alpha = 10 \text{ cm}^{-1}$ <sup>[16]</sup>, $t$  为晶体厚度。根据(1)式,计算了厚度分别为 340  $\mu\text{m}$  和 420  $\mu\text{m}$  的 Yb:YAG 晶体在入射角为  $11^\circ \sim 30^\circ$  ( $0.192 \sim 0.524 \text{ rad}$ ) 间的吸收曲线,如图 1 所示。由图可知,当入射角度  $\theta$  为  $20^\circ$  ( $0.349 \text{ rad}$ ) 时,两种规格的晶体对抽运光的吸收效率分别达到 75.9% 和 82.7%,考虑到未被吸收的抽运光沿原路返回会损伤抽运源<sup>[17]</sup>,因而实验选用吸收效率较高的 420  $\mu\text{m}$  厚的 Yb:YAG 晶体。

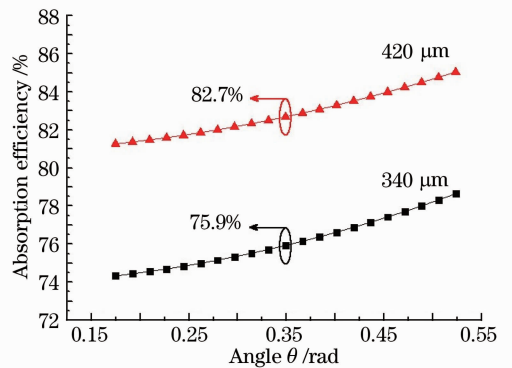


图 1 340  $\mu\text{m}$  和 420  $\mu\text{m}$  厚的 Yb:YAG 晶体吸收曲线图  
Fig. 1 Absorption curves for Yb:YAG crystals with thickness of 340  $\mu\text{m}$  and 420  $\mu\text{m}$

抽运光斑大小随球面反射镜轴向与光纤头轴向夹角  $\beta$  的变化而变化,因此利用 LightTool 软件计算了芯径为 200  $\mu\text{m}$  和 400  $\mu\text{m}$  的抽运光斑与  $\beta$  之间的关系曲线,如图 2 和图 3 所示。为了获得较高的功率密度,实验选用抽运光斑芯径为 200  $\mu\text{m}$  的半导体激光器,并将  $\beta$  调整到尽可能的小,以避免夹角过大而导致抽运光分布不均匀。

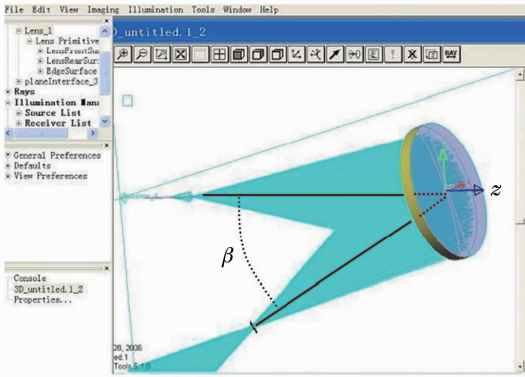


图 2 软件模拟截图

Fig. 2 Snapshot picture of simulation by software

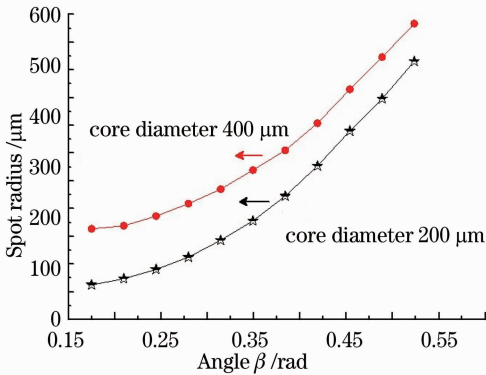


图 3 抽运光斑半径随  $\beta$  的变化曲线

Fig. 3 Pumping spot radius variation curves with  $\beta$

根据计算的抽运光斑,可依据模式匹配原则确定腔长和输出镜的曲率半径。平凹腔中基模光斑半径的表达式为<sup>[18]</sup>

$$\omega_0 = [(\lambda/\pi) \sqrt{L(\rho - L)}]^{1/2}, \quad (2)$$

式中  $L$  为腔长,  $\rho$  为曲率半径。经计算可知当选用这  $\rho=100$  mm 的输出镜,可使抽运光斑与基模光斑半径比符合模式匹配原则。

### 3 实验研究与结果

根据上面的计算结果搭建实验装置,如图 4 所

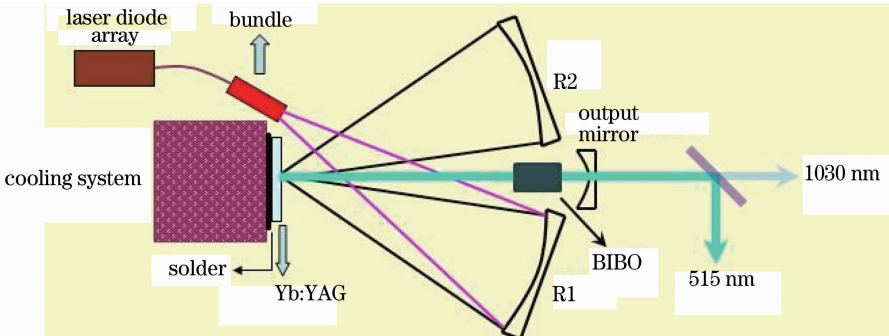


图 4 LDA 抽运 Yb:YAG/515nm 薄片激光器示意图

Fig. 4 Schematic of LDA-pumped thin disc Yb:YAG/515 nm laser

示。整个系统由激光二极管阵列(LDA)、水冷热沉、Yb:YAG 晶体、BIBO 倍频晶体、两个球面镜、输出耦合镜及滤光片组成。抽运源采用德国 DILAS 公司生产的 M1F2S22-940 型半导体激光器,数值孔径为 0.22,经光纤耦合后的出射光斑直径为  $200\mu\text{m}$ 。热沉选用经金属化处理的德国 Electrovacuramik 公司生产的微通道冷却器。薄片状 Yb:YAG 晶体尺寸为  $\phi 11\text{ mm} \times 0.42\text{ mm}$ ,掺杂原子数分数为 10%,左端面镀对 940 nm 和 1030 nm 波长的高反(HR)膜(对 1030 nm 激光的反射率  $R=99.92\%$ ;对 940 nm 激光的反射率  $R=99.93\%$ ),右端面镀对 940 nm 和 1030 nm 波长的增透(AR)膜(对 1030 nm 激光的透射率  $T=99.96\%$ ;对 940 nm 激光的透射率  $T=99.6\%$ )。左端面膜层先采用 Cr/Au 实施金属化,然后利用钢将其焊接到微通道水冷热沉上,这样可减小激光介质与冷却器之间的热阻,提高散热冷却效率<sup>[12]</sup>。水冷系统采用 LX-300 型水冷机。从光纤头出射的抽运光被球面镜 R1 反射至晶体,经两次吸收后,未被吸收的抽运光被球面镜 R2 反射并再次注入晶体。这样完成了四次抽运,大约 82.6%的抽运光被晶体吸收。两个耦合镜均为直径  $\phi=26\text{ mm}$ ,曲率半径  $\rho=50\text{ mm}$  的球面镜,凹面镀 940 nm 高反膜(对 940 nm 激光的反射率  $R>99.5\%$ )。实验时,将球面镜 1 和 2 的轴向与晶体法线间夹角调整到最小,控制在  $20^\circ$  左右。输出镜选用  $\rho=100\text{ mm}$  的平凹镜,与 Yb:YAG 晶体的左端面构成平凹谐振腔,腔长为 5.5 cm。平凹镜的凹面镀对 1030 nm 激光高反同时对 515 nm 激光增透的介质膜(对 1030 nm 激光的反射率  $R=99.92\%$ ;对 515 nm 激光的透射率  $T=93\%$ ),平面镀对 515 nm 激光增透的介质膜(对 515 nm 激光的透射率  $T=99.8\%$ )。

考虑到腔内倍频空间狭小,实验选用非线性系数较大、按 I 类临界相位匹配角度切割的 BIBO 晶

体,几何尺寸为  $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ ,相位匹配角度  $(\theta, \Phi) = (166.7^\circ, 90^\circ)$ 。BIBO 双面均镀对  $1030\text{ nm}$  和  $515\text{ nm}$  的增透膜 ( $T > 99\%$ )。实验中 BIBO 晶体用铝箔包裹后安装到导热性能优良的紫铜座上,采用半导体制冷器 (TEC) 单独制冷。在输出光路上,放置  $45^\circ$  反射式滤光片,前表面镀对  $515\text{ nm}$  高反同时对  $1030\text{ nm}$  增透的介质膜,以滤去  $1030\text{ nm}$  基频光。

图 5 为出水温度为  $15^\circ\text{C}$  时,用 OPHIR Laser Star 型功率计测量的  $515\text{ nm}$  激光输出功率曲线,其中各点数值为在相应抽运功率下所能调整的最大输出功率。图中插图为采用 Ocean Optics 公司生产的 MayaPro2000 型光纤光谱仪测量的光谱,输出光中心波长为  $515\text{ nm}$ 。由图 5 可以看出,注入抽运功率为  $24.9\text{ W}$  时,  $515\text{ nm}$  激光最大输出功率可达  $680\text{ mW}$ ,光-光转换效率为  $2.73\%$ 。但是随着抽运功率的进一步增加,输出功率反而下降。该现象主要是 BIBO 与热沉的接触面积较小,在高功率抽运

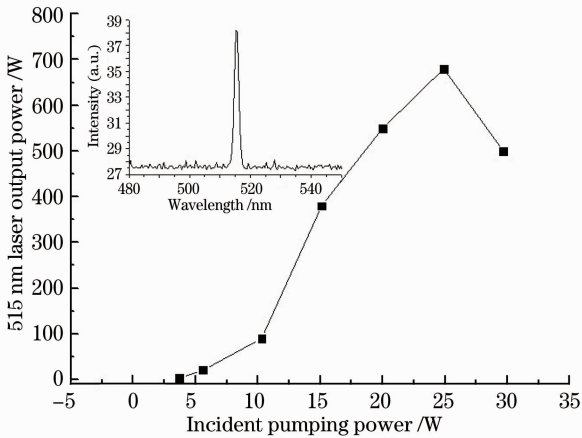


图 5  $515\text{ nm}$  激光输出功率随注入抽运光功率的变化

Fig. 5  $515\text{ nm}$  laser output power versus incident pumping power

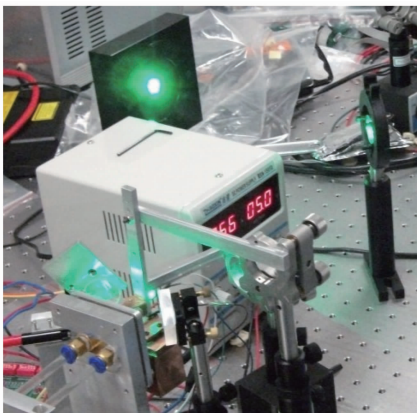


图 6  $515\text{ nm}$  激光实验装置

Fig. 6 Experimental arrangement of  $515\text{ nm}$  laser

情况下,散热不佳造成的,可通过进一步优化温控系统来解决。图 6 为实验装置图,由图 6 可以看出输出光光斑质量较好。

## 4 结 论

设计了四程抽运  $515\text{ nm}$  Yb:YAG 薄片激光器,在抽运功率为  $24.9\text{ W}$  时,通过腔内倍频获得了  $680\text{ mW}$  的  $515\text{ nm}$  激光输出。该方案结构紧凑、体积小,易于产品化。下一步将采用周期性极化晶体优化实验。由于准相位匹配方式能够充分利用非线性介质的最大非线性系数,因而可获得更高功率的输出。

## 参 考 文 献

- 1 Reinhard Anton Neumann, Robert Martin Knobler, Helmut Leonhartsberger *et al.*. Comparative histochemistry of port-wine stains after copper vapor laser ( $578\text{ nm}$ ) and argon laser treatment[J]. *J. Investigative Dermatology*, 1992, **99**(2): 160~167
- 2 Axel Hess, Rainer Schuster, Andreas Heider *et al.*. Continuous wave laser welding of copper with combined beams at wavelengths of  $1030\text{ nm}$  and of  $515\text{ nm}$  [J]. *Physics Procedia*, 2011, **12**(part A): 88~94
- 3 S. Döring, A. Ancona, S. Hädrich *et al.*. Microdrilling of metals using femtosecond laser pulses and high average powers at  $515\text{ nm}$  and  $1030\text{ nm}$ [J]. *Appl. Phys. A*, 2010, **100**(1): 53~56
- 4 A. Giesen, H. Hügel, A. Voss *et al.*. Scalable concept for diode-pumped high-power solid-state lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 1994, **58**(5): 365~372
- 5 Zhang Zhenhua, Cheng Xiaojin, Wang Jianlei *et al.*. Amplification characteristic of low temperature Yb:YAG crystal disc cooled by alcohol[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0702013
- 张振华,程小劲,王建磊等.基于无水乙醇冷却的Yb:YAG片状晶体激光放大特性研究[J].中国激光,2011,**38**(7):0702013
- 6 Zheng Jiangang, Yan Xiongwei, Jiang Xinying *et al.*. Numerical simulation of energy storage in  $\text{Cr}^{4+}$ , Yb:YAG crystal amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1006005
- 郑建刚,严雄伟,蒋新颖等.混合掺杂  $\text{Cr}^{4+}$ , Yb:YAG 晶体储能特性的数值模拟[J].中国激光,2011,**38**(10):1006005
- 7 Zhou Shouhuan, Feng Guoying. Mode distributions of large-aperture high-power thin disk laser and beam quality diagnosis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900110
- 周寿桓,冯国英.大口径薄片激光器中的谐振模式及光束质量诊断[J].光学学报,2011,**31**(9):0900110
- 8 Wu Xingsheng, Gao Jiancun, Tang Xinchun *et al.*. 20.6 W Nd:YVO<sub>4</sub> 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:YVO<sub>4</sub> 薄片激光器[J].中国激光,2012,**39**(12):1202001
- 9 Zhang Zhiwei. Thin disk Yb:YAG laser and its applications[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(s0): 11~14
- 张志伟.薄片式 Yb:YAG 激光器及其应用[J].强激光与粒子束,2005,**17**(s0):11~14
- 10 Li Chao, Xu zhen, Li Junlin *et al.*. Diode pumped Yb:YAG thin disk laser achieves 16 W CW output[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2002, **19**(2): 104~108
- 李超,徐震,李俊林等.二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激

- 光器获得16 W 连续激光输出[J]. 量子电子学报, 2002, **19**(2): 104~108
- 11 Shan Xinyan, Wei Xiaoyu, Wu Nianle *et al.*. Study on the beam quality of diode pumped Yb:YAG thin disc laser and the intracavity frequency doubling in V-type resonator[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2004, **21**(5): 587~591  
单欣岩, 魏晓羽, 吴念乐等. 二极管泵浦 Yb:YAG Thin Disk 激光器光束质量及 V 型腔腔内倍频的研究[J]. 量子电子学报, 2004, **21**(5): 587~591
- 12 Xinjun Guo, Wei Hou, Haibo Peng *et al.*. 4.44 W of CW 515 nm green light generated by intracavity frequency doubling Yb:YAG thin disc laser with LBO [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **267**(2): 451~454
- 13 Wang Chunhua, Wang Weimin, Ma Yi *et al.*. Thin-disk laser at 515 nm with good beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2795~2798  
王春华, 王卫民, 马毅等. 高光束质量 515 nm 薄片激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(11): 2795~2798
- 14 J. K. Alan, J. V. Gareth, D. Burns. Progress towards high-power, high-brightness neodymium-based thin-disk lasers [J]. *Progress in Quantum Electron.*, 2004, **28**(6): 305~344
- 15 Y. B. Tian, Z. H. Tian, H. M. Tan. Laser diode array pumped Yb:YAG/BIBO 515 nm thin disc laser with four-pass optical coupling system[J]. *Laser Physics*, 2010, **20**(4): 793~798
- 16 Y. Kalisky, C. Labbe, K. Waichman *et al.*. Passively Q-switched diode-pumped Yb:YAG laser using Cr<sup>4+</sup>-doped garnets [J]. *Opt. Mater.*, 2002, **19**(4): 403~413
- 17 Tian Yubing, Li Yantao, Lu Qipeng. 4.81 W of Yb:YAG/1030 nm thin disc laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, **22**(11): 2505~2509  
田玉冰, 李颜涛, 卢启鹏. 4.81 W Yb:YAG/1030 nm 薄片激光器优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2010, **22**(11): 2505~2509
- 18 W. Koehnnek. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 178~179  
克希耐尔 W. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 178~179

栏目编辑: 张 腾