

可调谐全固态 Nd:YVO₄/LBO 倍频 连续 671 nm 环形激光器

孙桂侠 刘涛* 钱金宁 苏新军 张晓卫 张志忠

(核工业理化工程研究院激光技术研究所, 天津 300180)

摘要 描述了一种可调谐全固态 Nd:YVO₄/LBO 倍频连续 671 nm 环形激光器的结构参数和相关实验研究。激光器采用四镜环形腔结构,利用 880 nm 激光二极管(LD)端面抽运 YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体和 I 类相位匹配的 LBO 倍频方式,加入 TGG 旋光器和 $\lambda/2$ 波片组成的光学单向器实现单向运转,通过对法布里-珀罗(F-P)标准具角度和腔镜压电晶体电压的调节实现了激光输出波长 671 nm 附近的调频。在抽运功率为 23 W,吸收抽运功率为 14.5 W 时,输出单频 671 nm 连续红光最高功率为 1.08 W,光-光转换效率为 7.4%;加标准具调谐时,获得了最高功率为 738 mW 的可调谐红光输出。

关键词 激光器; 固态环形激光器; 880 nm 激光二极管抽运; YVO₄-Nd:YVO₄; LBO 倍频; 频率调谐

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602011

Tunable All-Solid-State Continuous Wave Intra-Cavity Frequency-Doubled Nd:YVO₄/LBO 671 nm Ring Laser

Sun Guixia Liu Tao Qian Jinning Su Xinjun Zhang Xiaowei Zhang Zhizhong

(Research Institute of Laser Technology, Research Institute of Physical and Chemical Engineering
of Nuclear Industry, Tianjin 300180, China)

Abstract A tunable all-solid-state Nd:YVO₄ ring laser, intra-cavity frequency doubled by a type-I matched LBO crystal with 671 nm laser output, is demonstrated in this paper. The laser resonator is designed with a four-mirror ring configuration. The YVO₄-Nd:YVO₄ composite crystal is end-pumped by a 880 nm laser diode (LD). A Faraday optical diode consisted with TGG rotator and half-wave plate is placed inside the resonator for forcing the laser to operate unidirectionally. A solid Fabry-Perot etalon and a piezoelectric-ceramic are inserted into the cavity for tuning the wavelength. The single-frequency output power of 1.08 W at 671 nm is obtained under the pumping power of 23 W (the absorbed pumping power of 14.5 W), the optical-optical conversion efficiency is about 7.4%. With the etalon tuning, a maximal output power of 738 mW is obtained.

Key words lasers; solid-state ring laser; 880 nm laser diode pump; YVO₄-Nd:YVO₄; LBO frequency-doubled; frequency tuning

OCIS codes 140.3480; 140.3515; 140.3540; 140.3580

1 引 言

激光二极管(LD)端面抽运固体激光器近年来受到广泛关注,它具有效率高、结构紧凑、性能稳定、寿命长和全固化等优点,广泛应用于激光雷达、光谱分析、引力波探测、相干通信和量子光学等领域^[1~7]。激光器采用端面抽运的方式有利于实现激光基模输出,而实现激光器单纵模输出的方法有很

多,如光学参量的差频过程、扭转腔模、短腔谐振、利用标准具、布氏片选模等^[8~12]。对于环形谐振腔在其中插入单向器,可使激光器单向运转,消除空间烧孔效应,使单个纵模充分利用了空间增益,从而获得高效的单频激光输出^[13,14]。

文献^[1,3,5,15]报道的 671 nm 环形固体激光器获得了单频激光输出。常冬霞等^[5]采用环形腔

收稿日期: 2013-02-24; 收到修改稿日期: 2013-04-19

基金项目: 核工业集团总公司青年创新团队基金资助课题。

作者简介: 孙桂侠(1979-),女,硕士,副研究员,主要从事激光技术与应用方面的研究。E-mail: suntyg@163.com

* 通信联系人。E-mail: dpssl@sina.com

Nd:YVO₄/LBO 倍频获得 610 mW 的单频 671 nm 连续红光,但没有实现频率调谐。文献[15]报道了采用Nd:YVO₄/BiB₃O₆ 倍频的四镜环形腔获得了 1.55 W 的 1342 nm 红外连续光和 680 mW 的 671 nm 连续红光,并加入标准具实现了频率调谐,最大功率为 380 mW。本文介绍的 880 nm LD 端面抽运 YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体的环形激光器,在 23 W 的抽运功率(吸收抽运功率为 14.5 W)下获得了 1.08 W 的单频 671 nm 红光。加入法布里-珀罗(F-P)标准具与压电陶瓷实现了频率调谐功能,获得了最大功率为 738 mW 的可调谐 671 nm 红光输出。

2 激光器结构

图 1 为 LD 端面抽运 Nd:YVO₄/LBO 倍频连

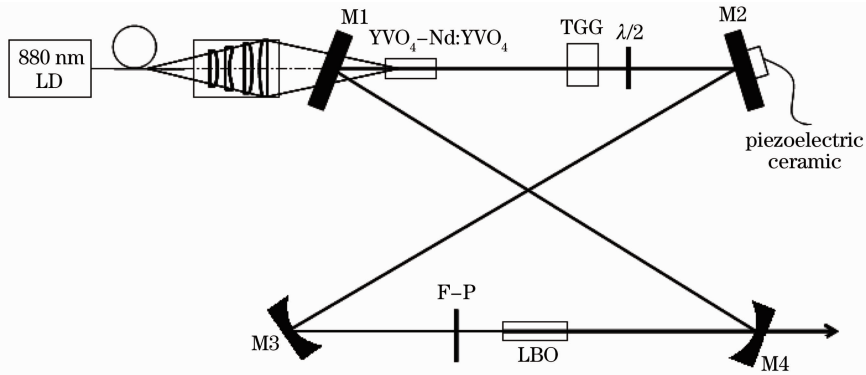


图 1 连续波 671 nm 环形激光器的实验装置图

Fig.1 Experimental setup of ring laser at CW 671 nm

抽运源采用德国 DILAS 公司生产的高功率光纤耦合输出的 LD,中心波长为 880 nm,光纤端面半径为 200 μm,数值孔径为 0.22,最高输出功率 50 W。光纤输出的抽运光经耦合系统注入到复合晶体工作物质中,聚焦光斑半径约为 300 μm,而晶体中心处形成的基模光斑半径约为 248 μm,基本满足在高功率情况下基模与抽运光的模式匹配为 0.8~1.0^[16]的要求。

在一般的应用中,LD 端面抽运中最为常见的是采用 808 nm 光抽运,而近年来有很多文献报道了采用 880 nm LD 抽运的实验^[4,5]。采用 880 nm 激光作为抽运光把粒子直接抽运到激光上能级的方式减少了无辐射跃迁的粒子数,降低量子缺陷带来的能量损耗,从而有效地减少了激光介质的热负荷。分别测量了采用 880 nm LD 与 808 nm LD 抽运 YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体时的热焦距,实验结果如图 2 所示。从图 2 可以明显地看出在相同抽运功率

续波(CW)671 nm 红光激光器的实验装置图,激光器采用“8”字四镜环形谐振腔结构。谐振腔总长度 $L_{cav}=538$ mm(相应纵模间隔为 558 MHz),M3 和 M4 之间距离为 120 mm,激光晶体离 M1 位置较近,谐振腔内在激光晶体和倍频晶体处形成两个束腰,束腰半径分别为 248 μm 和 60 μm。平面镜 M1 为输入耦合镜,靠近抽运光的一端镀 880 nm 减反膜($T>95\%$),另一端镀 1342 nm 高反膜($R>99.8\%$)和 880 nm 增透膜($T>95\%$);腔镜 M2 为平面镜,镀 1342 nm 高反膜($R>99.8\%$);M3 和 M4 为凹面镜,曲率半径为 100 mm,其中 M3 凹面镀 1342 nm 高反膜($R>99.8\%$),M4 为输出耦合镜,凹面镀 1342 nm 高反膜($R>99.8\%$)和 671 nm 增透膜($T>95\%$),平面镀 671 nm 减反膜。为了抑制 1064 nm 激光起振,激光器 4 个腔镜均镀 1064 nm 增透膜。

水平下,激光晶体在采用 880 nm LD 抽运时比 808 nm LD 抽运时具有更低的热负荷,从而有效地减小了晶体的热透镜效应。

实验中激光增益介质采用了 YVO₄-Nd:YVO₄

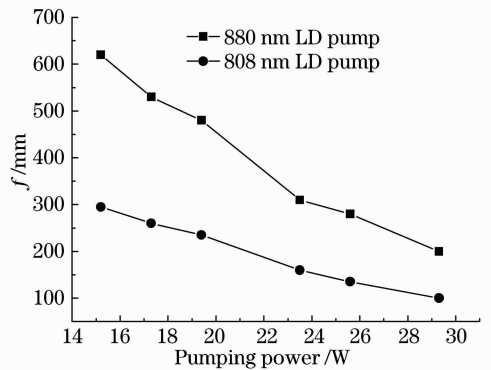


图 2 880 nm 和 808 nm LD 抽运时热焦距随抽运功率的变化关系

Fig.2 Thermal focal length versus pumping power for LD pumping at 880 nm and 808 nm

复合晶体,晶体的两端面除了镀 880、1342 nm 减反膜外,还镀有 1064 nm 减反膜以防止 1064 nm 光在激光晶体内起振。考虑到激光晶体掺杂浓度对激光器运行特性的影响,在激光器中采用了不同掺杂浓度的晶体进行了实验测试。如图 3 所示,图中给出了在不同腔型参数下采用不同掺杂浓度激光晶体时 671 nm 激光输出功率与抽运功率的变化关系。在实际装置中选用了掺杂浓度为 0.5% (原子数分数) 的 YVO₄-Nd:YVO₄ 键合晶体作为增益介质,尺寸为 3 mm×3 mm×(3+10) mm (3 mm 为 YVO₄ 基质,10 mm 为 Nd:YVO₄ 晶体)。事实上采用较高掺杂浓度的晶体可降低激光阈值,更容易实现激光输出,较适用于低功率抽运水平的激光应用;采用掺杂浓度低的晶体,可以适当地降低晶体的热负荷,实现更高功率的激光输出,较适合高功率抽运的激光应用。

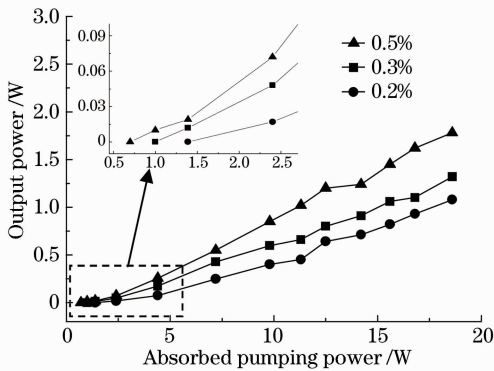


图 3 不同掺杂浓度时 671 nm 输出功率随吸收抽运功率的变化关系

Fig. 3 Absorbed pumping power versus 671 nm output power for different doping concentrations

研究本激光器的目的是为了获得适合光谱实验的激光光源,因此需要对 Nd:YVO₄ 基频 1342 nm 的红外激光进行倍频。选定了 LBO 为倍频晶体,以 I 类匹配方式切割 ($\theta = 86.1^\circ$, $\phi = 0^\circ$),两端镀 1342 nm 和 671 nm 双色增透膜,置于腔镜 M3 和 M4 之间的束腰处。同时理论计算由走离效应决定的倍频晶体最大作用长度约为 20 mm,因此选择使用尺寸大小为 5 mm×5 mm×20 mm 的 LBO 晶体。YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体和 LBO 晶体均用铝箔包裹以达到与金属座之间紧密接触的目的,并使之置于一个紫铜热沉上,用冷却的循环水对晶体进行控温。

光学单向器由 $\lambda/2$ 波片和放在磁场中的 TGG 晶体组成,由于 TGG 晶体对于 1342 nm 光的磁光系数较低,为实现有效的磁光旋转效果,需要提供较

强的中心磁场。为此,自行设计加工了组合磁体,轴向中心磁场强度达到 1.5 T,旋光器对 1342 nm 基频光的旋光角度不小于 15° ,与半波片相结合,能够有效维持单向运转。

为实现激光器频率简单可靠的调谐,在腔内插入一个固态法布里-珀罗标准具,厚度为 0.3 mm,自由光谱区范围约为 333 GHz,大于 Nd:YVO₄ 在 1342 nm 波段荧光带宽(约为 200 GHz)。通过旋转标准具的倾斜角来粗调激光器的输出频率,同时改变谐振腔腔镜上的压电陶瓷的电压来进行微调,以达到精确调节波长的目的。

3 实验结果与分析

实验中,首先对基频 1342 nm 红外光的输出特性进行了研究。把 M2 换成对 1341.4 nm 激光透射率分别为 $T=2\%$ 、 4% 、 10% 的输出耦合镜片,测量了激光输出功率,结果如图 4 所示。图中可以看出,当透射率过大时将引起腔内损耗过大,导致阈值较高,输出功率偏低;当透射率过小时,阈值降低,但随着抽运光功率的增加,腔内存在着较大的增益而无法有效输出。比较三种不同透射率时的功率,4% 透射率时得到较高的功率,在抽运功率为 29 W,吸收抽运功率为 18.6 W 时,得到不加标准具时最高 2.62 W 的单频 1342 nm 红外输出光,光-光转换效率为 9%,测量工具为 GENTEC 公司生产的型号为 PC-Solo2 功率计。

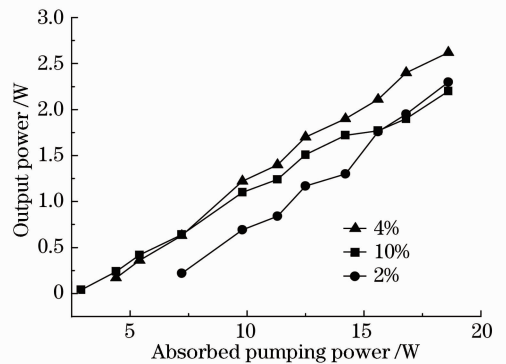


图 4 不同透射率输出耦合镜时的 1342 nm 输出光功率与吸收抽运功率的关系

Fig. 4 1342 nm output power versus absorbed pumping power for output couplers with different transmittances

把 M2 换回 1342 nm 全反镜,在腔内加入 LBO 倍频晶体,获得了到 671 nm 红光输出。调整半导体激光器的抽运电流,采用光功率计测得不同抽运功率注入下的 671 nm 红光输出功率,结果如图 5 所示。图中方点线为未加标准具激光单向运转时 671 nm 红

光随抽运光的变化曲线,功率随抽运功率的增大而增大,在抽运光抽运功率约为 23 W,其吸收功率约为 14.5 W 时,单向输出红光为 1.08 W,光-光转换效率为 7.4%;加标准具频率可调谐时,最大功率为 738 mW。

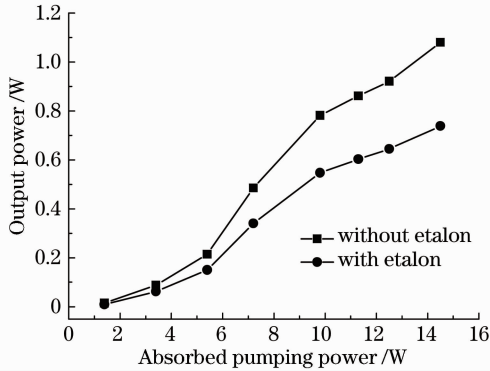


图 5 671 nm 波长输出功率随吸收抽运功率的变化关系
Fig. 5 671 nm output power versus absorbed pumping power

加入标准具对红光进行调谐时,调谐曲线如图 6 所示,波长调谐范围为 670.70~671.56 nm,最大功率为 738 mW。配合腔镜 M2 上的压电陶瓷来微调激光波长,可精确连续调节波长。

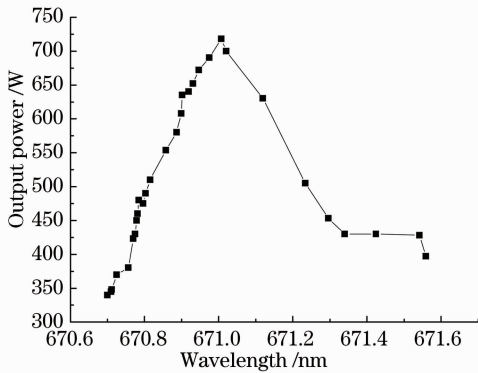


图 6 红光激光的调谐曲线
Fig. 6 Tuning curve of red laser

通过扫描干涉仪和 TOPTICA 生产的 WS-7 型波长计对 671 nm 输出红光进行了频率特性和稳定性的测量,结果如图 7 所示。图 7(a)为用扫描干涉仪观察激光器的频率特性,可以看出激光器处于单频运转。图 7(b)为用波长计监测激光器频率稳定性图,激光器在自由运转时大于 1 h 保持较好的稳定性。用美国 Photon 公司生产的型号为 BeamPro2320 仪器测量了输出激光的光束质量,结果为 $M_x^2 = 1.13$, $M_y^2 = 1.15$,图 8 给出了光斑和能量分布采集图。

图 9 为激光器自由运转输出功率在 658 mW 时测得的功率稳定性曲线,1 h 内功率波动小于 1%。

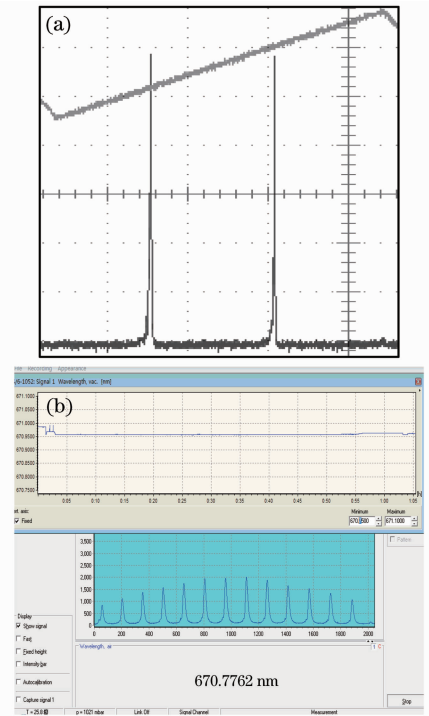


图 7 671 nm 激光频率特性与稳定性图
Fig. 7 Frequency property and stability of 671 nm laser

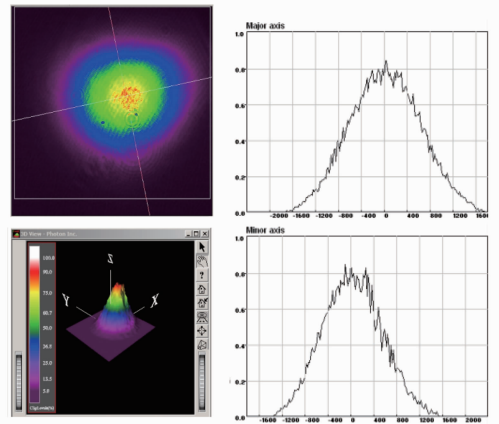


图 8 光斑和能量分布图
Fig. 8 Spot and energy distribution

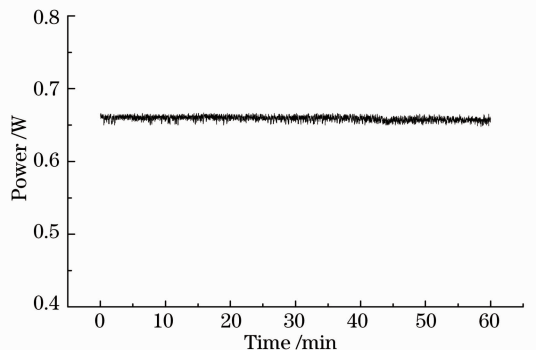


图 9 671 nm 红光激光器的功率稳定性
Fig. 9 Power stability of the 671 nm red laser

4 结 论

报道了“8”字四镜环形谐振腔结构的激光器实验研究。880 nm 的 LD 端面抽运复合晶体 YVO₄-Nd:YVO₄ 获得了 671 nm 单频红光输出。在吸收抽运功率为 14.5 W 时,单频 671 nm 红光最大功率为 1.08 W。加入厚度为 0.3 mm 标准具和压电陶瓷对激光进行调频,波长调谐范围为 670.70~671.56 nm,峰值最大功率为 738 mW。激光器的各项输出指标均能满足相关光谱实验的要求,并在有关实验中得到了有效的应用。

参 考 文 献

- Zhang Jing, Zhang Kuanshou, Wang Runlin *et al.*. All-solid-state Nd:YVO₄ ring laser of single-frequency operation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **27**(8): 694~696
张靖,张宽收,王润林等. 全固化单频 Nd:YVO₄ 环形激光器[J]. *中国激光*, 2000, **27**(8): 694~696
- Zhang Tieli, Yao Jianquan, Wang Peng *et al.*. Laser diode end-pumped high power continuous wave single frequency Nd:YVO₄ ring laser at 1064 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(9): 1194~1197
张铁犁,姚建铨,王鹏等. 端面抽运高功率连续单频 1064 nm Nd:YVO₄ 环形激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(9): 1194~1197
- Y. F. Chen. Efficient 1521 nm Nd:GdVO₄ Raman lasers[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(22): 2632~2634
- Yanfei Lv, Xihe Zhang, Jing Xiu *et al.*. High-efficiency direct-pumped Nd:YVO₄-LBO laser operating at 671 nm[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2010, **42**(3): 522~525
- Chang Dongxia, Liu Xia, Wang Yu *et al.*. All-solid-state CW intracavity frequency-doubled and frequency-stabilized Nd:YVO₄/LBO red laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 323~326
常冬霞,刘侠,王宇等. 连续波 Nd:YVO₄/LBO 稳频倍频红光全固态激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(3): 323~326
- Zhao Zhigang, Dong Yantao, Pan Sunqiang *et al.*. 50 W class double-end-pumped Nd:YVO₄ TEM₀₀ mode solid state laser oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0902001
赵智刚,董延涛,潘孙强等. 50 W 量级双端抽运 Nd:YVO₄ 基模固体激光振荡器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0902001
- 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. 20.6 W 激光二极管直接上能级抽运 Nd:YVO₄ 薄片激光器王坤[J]. *中国激光*, 2012, **39**(12): 1202001
- K. Wallmeroth, P. Peuser. High power CW single-frequency TEM₀₀ diode-laser-pumped Nd:YAG laser[J]. *Electron. Lett.*, 1988, **24**(17): 1086~1088
- J. J. Zayhowski, A. Mooradian. Frequency-modulated Nd:YAG microchip lasers[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**(12): 618~620
- P. Nachman, J. Munch, R. Yee. Diode-pumped frequency-stable tunable continuous-wave Nd:glass laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(2): 317~322
- G. J. Kintz, T. Baer. Single-frequency operation in solid-state laser materials with short absorption depths[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1990, **26**(9): 1457~1459
- Yang Fei, Chen Dijun, Pan Zhengqing *et al.*. Short linear cavity single-frequency fiber laser with active frequency stabilization by fiber Bragg grating[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(9): 0902005
杨飞,陈迪俊,潘政清等. 光纤光栅主动稳频的短直线腔单频光纤激光器[J]. *中国激光*, 2012, **39**(9): 0902005
- Zhao Weifang, Hou Wei, Guo Lin *et al.*. 7.5 W Nd:GdVO₄ single-frequency ring laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0514003
赵伟芳,侯玮,郭林等. 7.5 W Nd:GdVO₄ 环形腔单频激光器[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0514003
- Zhu Ren, Zhou Jun, Liu Jiqiao *et al.*. Solid state tunable single-frequency laser based on non-planar ring oscillator[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(11): 1102011
朱韧,周军,刘继桥等. 可调谐单频非平面环形腔固体激光器[J]. *中国激光*, 2011, **38**(11): 1102011
- Fabiola Almeida Camargo, Thomas Zanon-Willetee, Thomas Badr *et al.*. Tunable single-frequency Nd:YVO₄/BiB₃O₆ ring laser at 671 nm[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2010, **46**(5): 804~809
- Y. F. Chen, T. M. Huang, C. F. Kao *et al.*. Optimization in scaling fiber-coupled laser-diode end-pumped lasers to higher power: influence of thermal effect[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8): 1424~1429

栏目编辑: 张腾