

# LD 端面抽运 Nd:YLF/Nd:YAG 多波长脉冲激光器

陆婷婷 王君涛 黄敏捷 刘 丹 朱小磊\*

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室, 上海 201800)

**摘要** 报道了一台激光二极管(LD)双端面抽运 Nd:YLF 和 Nd:YAG 双晶体串接多波长输出脉冲激光器。在抽运能量 40.5 mJ, 电光调 Q 重复频率 500 Hz 的工作条件下, 获得单脉冲能量约为 6 mJ 的 1064 nm/1053 nm 双波长激光脉冲输出, 光-光转换效率约为 14.8%。相同抽运条件下在腔内插入 I 类相位匹配 LBO 晶体作为非线性频率转换器, 获得了脉冲总能量为 3.6 mJ 的 526.5、529.0、532.0 nm 三波长同时输出, 由抽运光到输出绿光脉冲的转换效率约为 8.9%, 测得光束质量因子分别为  $M_x^2=1.61$ ,  $M_y^2=1.25$ 。

**关键词** 激光器; 多波长激光; 电光调 Q; Nd:YLF; Nd:YAG; LBO

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0902002

## Simultaneous Multi-Wavelength Pulsed Laser in Diode-End-Pumped Nd:YLF/Nd:YAG

Lu Tingting Wang Juntao Huang Minjie Liu Dan Zhu Xiaolei

(Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Simultaneous multi-wavelength pulsed laser is achieved in dual-end-pumped composite laser slab composed of Nd:YLF and Nd:YAG crystals. As much as 6 mJ of laser output at 1064 nm and 1053 nm wavelengths is obtained with an incident pump pulse energy of 40.5 mJ at 500 Hz repetition rate, corresponding to an optical-optical conversion efficiency of 14.8%. By inserting a LBO crystal in the cavity, three green wavelengths of 526.5, 529.0 and 532.0 nm lasing is detected simultaneously. The total pulse energy is about 3.6 mJ under 40.5 mJ of incident pump pulse energy at 500 Hz repetition rate. The optical-optical conversion efficiency is 8.9%. The beam quality factors are  $M_x^2=1.61$ ,  $M_y^2=1.25$ .

**Key words** lasers; multi-wavelength laser; electro-optic Q-switch; Nd:YLF; Nd:YAG; LBO

**OCIS codes** 140.3460; 140.3480; 140.3538; 140.3540

## 1 引 言

多波长输出激光器广泛应用于激光雷达、激光医学、激光光谱以及非线性频率转换等领域, 是国际上一个较为热门的研究内容<sup>[1~9]</sup>。在众多双波长输出激光器中, 激光中心频率频差在太赫兹 (THz) 量级的双波长高峰值功率激光器, 又因其可以利用非线性差频技术简单且无阈值地获得太赫兹波输出而备受关注<sup>[4~6]</sup>。目前, 获得多波长激光输出主要有

三种典型方法: 一是利用某些增益介质的多条跃迁谱线, 进行合理的谐振腔设计, 在同一个激光谐振腔内同时产生两个甚至两个以上的波长振荡<sup>[1~6]</sup>。典型的工作有郑芳华等<sup>[6]</sup>于 2008 年报道的激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YAG 1319 nm/1338 nm 双波长连续线偏振运转激光器, 在重复频率 50 kHz 时, 双波长激光平均输出功率达到 2.22 W, 斜率效率 12.72%, 线偏振度 0.983, 脉冲宽度 71.91 ns, 光

收稿日期: 2012-03-23; 收到修改稿日期: 2012-05-11

基金项目: 国家 863 计划(1105181B00)资助课题。

作者简介: 陆婷婷(1986—), 女, 博士研究生, 主要从事全固态激光器技术等方面的研究。

E-mail: tingting\_lu@siom.ac.cn

导师简介: 朱小磊(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事全固态激光器技术及激光应用系统等方面的研究。

E-mail: xlzhu@siom.ac.cn(通信联系人)

束质量因子  $M^2$  仅为 1.165, 不稳定性小于 0.487。二是通过在一种基质中同时掺杂两种激活离子获得多波长激光输出, 如以  $\text{Er}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  同时为激活离子的 YAG 激光器, 和以  $\text{Ho}^{3+}$ ,  $\text{Nd}^{3+}$  同时为激活离子的 YAG 激光器<sup>[7-8]</sup>。代表性的工作有 J. Machan 等<sup>[8]</sup>于 1987 年报道的用一个共掺原子数分数分别为 10%  $\text{Ho}^{3+}$  离子和 1%  $\text{Nd}^{3+}$  离子的 YAG 基质晶体作为激光增益介质, 采用氙灯抽运, 在同一谐振腔内实现 2.940, 3.011, 1.064  $\mu\text{m}$  三波长同时输出。三是将具有相近吸收谱线的激光晶体串接, 通过选择合理的抽运光源及优化谐振腔设计, 来获得多波长激光输出。这方面的工作主要有 Jie Song 等<sup>[9]</sup>于 1999 年报道的, 采用 LD 侧面抽运, 用光学胶胶合的 Nd:YLF 复合 Nd:YAG 晶体棒作为增益介质, 在被其称为虚拟点源谐振腔结构中, 在连续输出工作模式下, 成功获得平均功率 30 W 的 1064 nm/1047 nm 双波长激光输出, 激光器光-光转换效率达到 20%。同前两种方法相比, 这种晶体串接方法可以通过选用不同的增益介质, 以及相对应的抽运源, 实现更灵活的波长组合输出。

本文在特殊设计的双端面抽运 U 形激光谐振腔内, 采用串接的两块 Nd:YLF 和 Nd:YAG 晶体板条作为产生双波长输出的激光增益介质, 共用一个电光调 Q 开关, 选用尾纤输出的波长为 806 nm 的 LD 模块对两块晶体分别进行端面抽运。当总抽运能量为

40.5 mJ, 重复频率为 500 Hz 时, 获得调 Q 单脉冲能量约为 6 mJ, 脉宽小于等于 21 ns 的 1064 nm/1053 nm 双波长激光输出, 光-光转换效率约为 14.8%, 斜率效率约为 19.2%。在相同的抽运条件下, 在腔内插入一个 I 类相位匹配切割的 LBO 倍频晶体, 成功观测到 1053 nm 的倍频光 (526.5 nm), 1064 nm 的倍频光 (532 nm) 及 1053 nm 和 1064 nm 的和频光 (529 nm) 三波长同时运转, 输出脉冲总能量为 3.6 mJ, 光-光转换效率约为 8.9%, 相应的斜率效率为 10.2%, 脉宽小于等于 18 ns, 测得光束质量因子分别为  $M_x^2 = 1.61$  和  $M_y^2 = 1.25$ 。

## 2 实验装置及原理分析

实验原理光路如图 1 所示。由凹面镜 M4 和平面镜 M1, M2, M3 构成 U 型折叠腔, 几何腔长约 430 nm。凹面镜 M4 曲率半径为 1.1 m, 对 1053 nm/1064 nm 双波长全反。平面镜 M2 和 M3 为 45° 双色镜, 对 806 nm 波长增透, 对 1053 nm/1064 nm 双波长全反。平面镜 M1 对 1053, 1064, 526.5, 532 nm 波长全反。平面镜 M5 为输出耦合镜, 对 1053 nm/1064 nm 双波长增透, 对 532 nm 和 526.5 nm 波长全反。谐振腔内一臂插入 KD\*P 泡克耳斯盒, 与偏振片、 $\lambda/4$  波片构成电光 Q 开关, 另一臂插入 LBO 晶体作为非线性频率转换晶体。

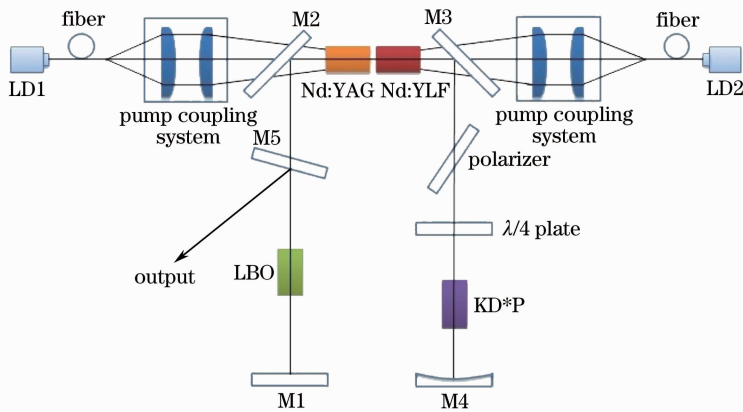


图 1 多波长脉冲激光器腔型结构图

Fig. 1 Schematic diagram of simultaneous multi-wavelength Q-switched laser resonator

激光增益介质为 Nd:YLF 晶体和 Nd:YAG 晶体串接。Nd:YLF 晶体掺杂原子数分数为 1%, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 12 mm, 沿 a 轴切割, 通光方向长度为 12 mm, 晶体的两个通光面分别镀 1053 nm 和 806 nm 增透膜。Nd:YAG 晶体掺杂原子数分数也为 1%, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 12 mm, 晶体的两个

通光面分别镀 1064 nm 和 806 nm 增透膜。将两块晶体板条置于同一个紫铜热沉上, 两者之间的距离小于 1 mm, 实验中采用传导冷却方式将激光晶体温度控制在  $(18 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。

由于 Nd:YLF 晶体有 792, 797, 806 nm 三个吸收峰, 而 Nd:YAG 晶体的主吸收峰在 808 nm 处, 因

此实验中采用尾纤输出的中心波长为 806 nm 的 LD 模块为抽运源,纤芯直径为 600  $\mu\text{m}$ ,数值孔径 (NA)为 0.22。实验采用双端面抽运方式,LD 发出的抽运光经过光学耦合系统后分别聚焦进相邻的晶体,焦点位置在略超过晶体中心处,实测焦点处光斑直径约为 1.5 mm。由于 Nd:YLF 晶体的应力断裂阈值较低,抽运 LD 以脉冲方式工作,重复频率 500 Hz,抽运脉冲宽度选择 480  $\mu\text{s}$ ,与 Nd:YLF 晶体弛豫时间相同,相应的占空比约为 25%,实验证明这种抽运方式可以有效避免由于热应力导致的 Nd:YLF 晶体断裂。

### 3 实验结果

用对 1064 nm 透射率为 48% 的输出耦合镜代替平面镜 M1,腔内不插入 LBO 倍频晶体,获得 1053 nm/1064 nm 双波长激光输出。该激光器在自由运转和调 Q 状态下输出脉冲能量随输入抽运能量的变化规律如图 2 所示。在电光调 Q 重复频率为 500 Hz 的工作条件下,当抽运能量达到 40.5 mJ 时获得脉冲能量为 6 mJ,脉冲宽度小于等于 21 ns 的双波长调 Q 激光脉冲输出,峰值功率约为 0.286 MW,光-光转换效率约为 14.8%,斜率效率约为 19.2%。实验中用高速 PIN 管探测到的激光脉冲波形如图 3 所示。

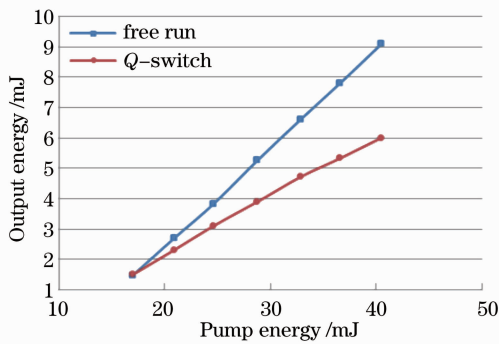


图 2 自由运转及调 Q 状态下 1053 nm/1064 nm 双波长激光输出能量和抽运能量的关系

Fig. 2 Output energy of 1053 nm/1064 nm laser as a function of pump energy in free-run mode and Q-switched mode

用 YOKOGAMA AQ6370B 光纤光谱仪(波长响应范围 600~1700 nm)监测抽运能量为 40.5 mJ 时调 Q 状态下输出激光脉冲的光谱组成,结果如图 4 所示。从图 4 的光谱曲线可以看出,输出激光脉冲包含 1064 nm 和 1053 nm 两个波长成分。理论上,a 切 Nd:YLF 晶体可以同时产生 1053 nm( $\sigma$  偏

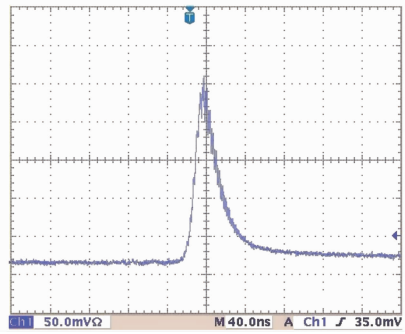


图 3 调 Q 激光脉冲时间波形示波图

Fig. 3 Pulse waveform of Q-switched laser pulse

振)和 1047 nm( $\pi$  偏振)两种波长的激光辐射,但是由于腔内插入布儒斯特偏振片限制了  $\pi$  偏振态的 1047 nm 波长振荡,因此只观察到  $\sigma$  偏振态的 1053 nm 激光输出。由图 4 还可以看出,1053 nm 波长脉冲幅度与 1064 nm 波长脉冲幅度基本相等。实验中,通过控制两个抽运模块的输出能量差异,平衡 Nd:YAG 晶体和 Nd:YLF 晶体的增益,从而获得脉冲能量基本相等的双波长输出。

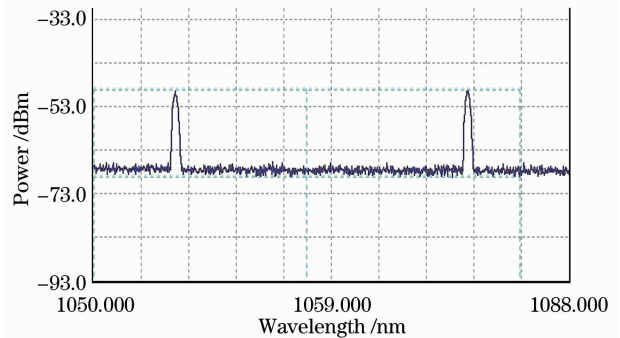


图 4 抽运能量最高时调 Q 输出激光的光谱

Fig. 4 Spectra of the Q-switched output laser with the maximum pump energy

当激光器转入腔内倍频模式运行时,需用镀有 1053,1064,532,526.5 nm 高反膜的平面镜 M1 替换透射率为 48% 的输出耦合镜,并且在腔内插入 I 类相位匹配切割的 LBO 晶体作为谐波转换器。LBO 晶体尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 12 mm,晶体两通光端面镀有对 1053 nm/526.5 nm 增透双色膜。

同样地,在激光器工作重复频率为 500 Hz 的条件下,当抽运能量增大到 40.5 mJ 时,实验得到最大的谐波绿光脉冲输出,单脉冲总能量为 3.6 mJ,光-光转换效率为 8.9%,相应的斜率效率约为 10.2%,参见图 5 的输出脉冲能量变化曲线。图 6 为实验中用高速 PIN 管探测到的激光脉冲波形,脉冲宽度小于等于 18 ns。

实验中,用 Spiricon M<sup>2</sup>-200 光束质量分析仪测

量最大谐波激光输出下的激光光束质量,测得光束质量因子分别为 $M_x^2=1.61$ 和 $M_y^2=1.25$ ,测量结果

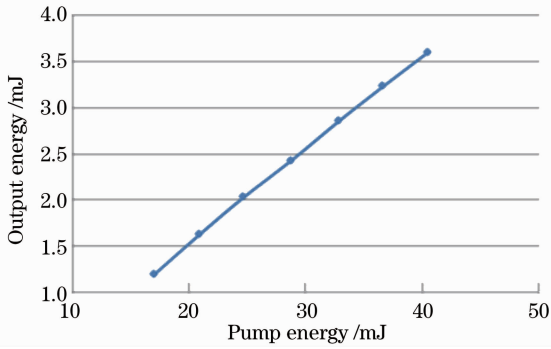


图 5 谐波激光脉冲输出能量随抽运能量变化关系  
Fig. 5 Output energy of harmonic laser pulse as a function of pump energy

如图 7(a)所示。图 7(b)为激光能量远场空间分布情况,呈现出良好的准高斯形空间分布。

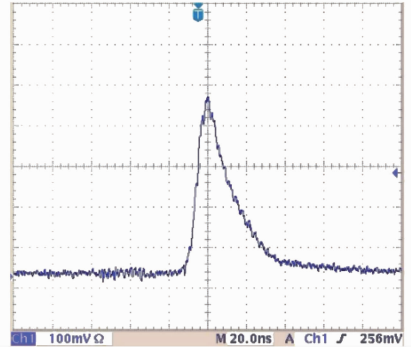


图 6 谐波激光脉冲波形图

Fig. 6 Pulse waveform of harmonic laser pulse

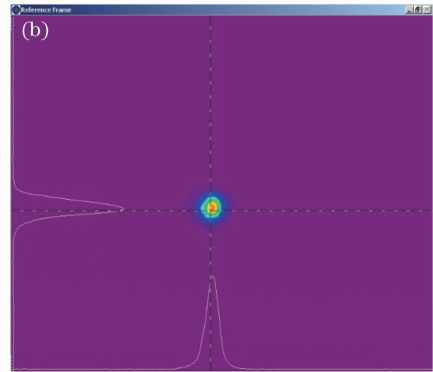
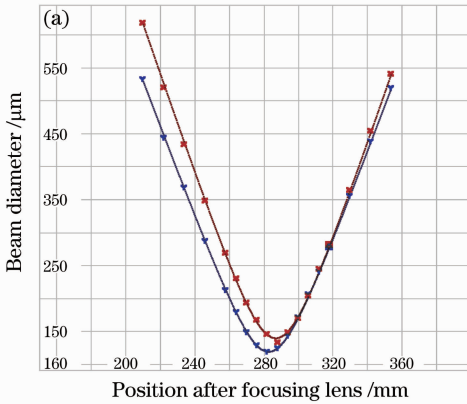


图 7 Spiricon M<sup>2</sup>-200 光束质量分析仪的测量结果。(a) M<sup>2</sup> 测量结果;(b)远场光强分布  
Fig. 7 Measurement of the Spiricon M<sup>2</sup>-200 beam propagation analyzer. (a) M<sup>2</sup> measurement; (b) spatial distribution in far-field

最后,用 Ocean Optics HR4000 光纤光谱仪对谐波激光输出的光谱成分进行观测,获得如图 8 所示谐波脉冲三波长光谱分布结果,受测量用光谱仪分辨率的限制,每个谐波激光脉冲的线宽被严重展宽。分析图 8 光谱曲线,发现除了获得了常规的 Nd:YLF 晶体 1053 nm 波长的倍频光 526.5 nm,以及 Nd:YAG 晶体 1064 nm 波长的倍频光 532 nm 外,还观测到 529 nm 波长的绿光脉冲输出。很显然,529 nm 波长是 1053 nm 波长和 1064 nm 波长的和频结果,也就是说,双波长调 Q 激光器在实现腔内双波长各自独立倍频输出的同时,实现了腔内和频振荡输出。这是由于 1064 nm 和 1053 nm 波长相距较近,对于负双轴晶体 LBO,1064 nm 的倍频,1053 nm 的倍频以及 1064 nm 和 1053 nm 和频的匹配角  $\theta$  及方位角  $\varphi$  较为接近,因此在实验中通过调整 LBO 晶体至合适的角度,实现了 1064 nm 的倍

频,1053 nm 的倍频以及 1064 nm 和 1053 nm 的和频同时输出。和频过程是频率为  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的两个光子同时湮没,产生频率为  $\omega_2$  的一个光子。腔内和频激光脉冲的产生,表明激光器谐振腔内 1064 nm 调 Q 激光脉冲和 1053 nm 调 Q 激光脉冲同步。

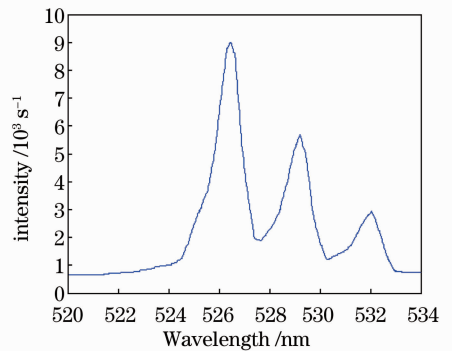


图 8 输出绿光的光谱

Fig. 8 Spectra of the green laser output

## 4 结 论

利用 Nd:YLF/Nd:YAG 双晶体串接,在双端面抽运电光调 Q 激光器中,成功地获得了双波长激光脉冲输出。在 500 Hz 的重复频率条件下,当抽运能量提升到 40.5 mJ 时,获得单脉冲能量约为 6 mJ,脉冲宽度小于等于 21 ns 的 1064 nm/1053 nm 双波长调 Q 激光输出,峰值功率约为 0.286 MW。该激光器作为产生太赫兹输出的高功率脉冲抽运源,将会有很大的应用潜力。

当在谐振腔内插入 I 类相位匹配的 LBO 倍频晶体时,成功获得了单脉冲能量最大为 3.6 mJ 的 526.5 nm/529.0 nm/532.0 nm 三波长激光脉冲输出,绿光脉冲光束质量因子为  $M_x^2 = 1.61$  和  $M_y^2 = 1.25$ 。腔内和频激光脉冲的产生,表明了激光器谐振腔内 1064 nm 波长调 Q 激光脉冲和 1053 nm 波长调 Q 激光脉冲同步。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Jiaxian, Wang Yanfei. Semiconductor film passively Q-switching for dual-wavelength laser at 1064 nm and 1342 nm in Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0202008  
王加贤,王燕飞. 半导体薄膜实现 Nd:YVO<sub>4</sub> 1064 nm 和 1342 nm 双波长激光被动调 Q [J]. *中国激光*, 2012, **39**(2): 0202008
- 2 Shen Hongyuan. Dual wavelength crystal lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 1994, **A21**(5): 334~340
- 3 Zhang Qiang, Yao Jianquan, Wen Wulin *et al.*. High power laser diode pumped Nd:YAG continuous wave dual-wavelength laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5): 577~581  
张强,姚建铨,温伍麟等. 高功率激光二极管抽运 Nd:YAG 连续双波长激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 577~581
- 4 Ardendu Sahaa, Aniruddha Ray, Sourabh Mukhopadhyay *et al.*. Simultaneous multi-wavelength oscillation of Nd laser around 1.3  $\mu\text{m}$ ; A potential source for coherent terahertz generation[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(11): 4721~4726
- 5 Liu Huan, Yao Jianquan, Zheng Fanghua *et al.*. A dual-wavelength diode-end-pumped Nd:YAG laser operating simultaneously at 1319 nm and 1338 nm [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(1): 230~237  
刘欢,姚建铨,郑芳华等. LD 端面抽运 Nd:YAG 1319 nm/1338 nm 双波长激光器研究 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(1): 230~237
- 6 Zheng Fanghua, Liu Huan, Li Xifu *et al.*. Simultaneous dual-wavelength quasi-continuous-wave laser-diode-end-pumped Nd:YAG laser for terahertz wave source [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 200~205  
郑芳华,刘欢,李喜福等. 产生太赫兹辐射源的 Nd:YAG 双波长准连续激光器 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 200~205
- 7 W. Q. Shi, R. Kurtz, J. Machan *et al.*. Simultaneous, multiple wavelength lasing of (Er, Nd):Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**: 1218~1220
- 8 J. Machan, R. Kurtz, M. Bass *et al.*. Simultaneous, multiple wavelength lasing of (Ho, Nd):Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1987, **51**(17): 1313~1315
- 9 Jie Song, Deyuan Shen, Anping Liu *et al.*. Simultaneous multiple-wavelength cw lasing in laser-diode-pumped composite rods of Nd:YAG and Nd:YLF [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(24): 5158~5161
- 沈鸿元. 双波长晶体激光器 [J]. *中国激光*, 1994, **A21**(5): 334~340

栏目编辑:宋梅梅