

激光二极管抽运 Nd:YAG/Nd:YVO₄ 共轴双晶体 Cr:YAG 被动调 Q 激光器

李 斌¹ 丁 欣¹ 孙 冰^{1,2} 盛 泉¹ 姜鹏波¹ 张 巍¹ 刘 简¹ 范 琛¹ 张海永¹ 姚建铨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 报道了一种由激光二极管抽运的 Nd:YAG/Nd:YVO₄ 共轴双晶体的 Cr:YAG 被动调 Q 激光器, 利用这种方式相比于传统的 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器提高了输出激光的偏振比, 在非线性频率变换过程中得到了更高的转换效率, 当抽运功率为 10 W 时获得了 2.8 W 的被动调 Q 1064 nm 激光输出, 偏振比大于 80:1, 激光重复频率为 15 kHz, 脉冲宽度为 7 ns, 采用 LBO 作为非线性频率变换晶体, 最终获得了 223 mW 的 355 nm 紫外激光输出。

关键词 激光器; Nd:YAG/Nd:YVO₄; 偏振比; Cr:YAG; 355 nm

中图分类号 TN248 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0402003

Laser-Diode-Pumped Coaxial Double Crystals Nd:YAG/Nd:YVO₄ Cr:YAG Passively Q-Switched Laser

Li Bin¹ Ding Xin¹ Sun Bing^{1,2} Sheng Quan¹ Jiang Pengbo¹ Zhang Wei¹ Liu Jian¹
Fan Chen¹ Zhang Haiyong¹ Yao Jianquan¹

¹Institute of Laser and Opto-Electronics, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

²Tianjin Maiman Laser Technology Co., Ltd, Tianjin 300111, China

Abstract A laser diode pumped Nd:YAG/Nd:YVO₄/Cr:YAG passively Q-switched laser is reported. Compared with Nd:YAG/Cr:YAG laser, the polarization ratio is improved in this configuration, the higher conversion efficiency is achieved in optics nonlinear frequency conversion, an output power of 2.8 W at 1064 nm with repetition rate of 15 kHz and pulse width of 7 ns is achieved and the polarization ratio of the laser is more than 80:1. 223 mW output power at 355 nm is obtained using two LBO crystals as optics nonlinear frequency conversion crystal.

Key words lasers; Nd:YAG/Nd:YVO₄; polarization ratio; Cr:YAG; 355 nm

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3540; 140.3580

1 引 言

被动调 Q 激光器具有结构紧凑、稳定性好的优点, 并且被动调 Q 开关不需要高压、快速电光驱动器或者射频调制器, 相比主动调 Q 固体激光器具有体积小、结构简单、成本低等优点, 广泛应用于工业加工、信息存储、遥感探测、激光通讯、医疗卫生等领域^[1-5]。Cr:YAG 被认为是目前非常有前途的被动调 Q 晶体之一, 由于该晶体具有较大的吸收截面, 较短的弛豫时间和较小的剩余吸收截面, 掺杂浓度高, 饱和光强小, 同时还具有稳定的物化性能、良好的导热性以及抗损伤、防潮等特性, 作为被动调 Q 晶体广泛应用于 0.9~1.2 μm 波段的激光器中。掺 Nd³⁺ 激活介质的 0.9 μm 以及 1.06 μm 的发射谱线刚好在此范围内, 因此掺 Nd³⁺ 激活介质可以与 Cr:YAG 结合起来, 研制出结构紧凑、性能稳定的被动调 Q 激光器。基于以上优点, Cr:YAG 被动调 Q 技术

收稿日期: 2014-09-17; 收到修改稿日期: 2014-12-10

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

被广泛的用于各种激光中,尤其在窄脉宽、高重复频率、高峰值功率以及光学非线性频率变换等方面都有很大的进展^[6-11]。

本文利用激光二极管抽运 Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体,利用 Cr:YAG 作为被动调 Q 开关晶体,当抽运功率为 10 W 时获得了 2.8 W 的 1064 nm 激光输出,偏振比大于 80:1,激光重复频率为 15 kHz,脉冲宽度为 7 ns。采用临界 I 类相位匹配的 LBO 作为倍频晶体,最终获得了 223 mW 的 355 nm 紫外激光输出,并与 Nd:YAG/Cr:YAG 被动调 Q 激光器进行了对比。实验表明 Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶被动调 Q 结构相比于 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器提高了输出激光的偏振比和偏振稳定性,该激光器结构简单、紧凑,具有很好的实用价值。

2 实验分析及装置

Nd:YAG/Cr:YAG 激光器具有峰值功率高、脉冲宽度窄的特点,这两点优势非常适合作为非线性频率变换的基频光,但由于 Nd:YAG 属于各向同性晶体,输出激光不具有偏振性,又限制了其在以上领域的应用。但有相关文献对于 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器输出激光具有一定的偏振性有过报道,本课题组也从实验上对 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器的偏振性进行了研究。实验结果表明这种激光器在特定的条件下确实存在一定的偏振性,尤其在抽运功率不高的情况下,其偏振特性比较明显;但在高功率抽运的情况下,激光输出的偏振性具有明显的不确定性,其偏振比与抽运功率的大小、谐振腔调整情况密切相关,并且偏振比往往不高,这种随机性很难把握。目前情况下要使 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器输出具有确定的偏振行为,往往需要在谐振腔内插入起偏元件(如布儒斯特片),但这种情况会给激光器带来额外的损耗,从而使激光器的光光转换效率降低。而对于 Nd:YVO₄/Cr:YAG 激光器,由于 Nd:YVO₄ 晶体本身具有双折射特性,因此该激光器输出的激光具有很好的偏振性。但 Nd:YVO₄ 晶体具有较大的受激截面、较短的上能级寿命,从而使 Nd:YVO₄/Cr:YAG 被动调 Q 激光器输出的重复频率非常高,即使特殊设计在高功率输出情况下其重复频率也要大于 50 kHz 甚至 100 kHz 以上^[12],这种高重复频率必然导致峰值功率的下降,也限制了在非线性频率变换方面的应用。为了克服以上缺点,将以上两种激光器的优点相结合,采用激光二极管抽运 Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体 Cr:YAG 被动调 Q 结构,在一定程度下既保证了高峰值功率,同时也保证了输出激光的高偏振比。实验装置如图 1 所示,抽运源为 806.8 nm 半导体激光器,其最大输出功率 10 W,线宽为 3 nm,传输光纤直径为 400 μm,数值孔径为 0.22,CO 为光学耦合系统,其成像比为 1:1。M1 镀有对 808 nm 增透和 1064 nm 高反的膜,Nd:YAG 与 Nd:YVO₄晶体共轴紧贴放置,晶体的各个面都镀有对 808 nm 和 1064 nm 的增透膜;Cr:YAG 规格为 φ4×3 mm,初始透射率为 75%,双面镀有对 1064 nm 的增透膜,M2 为激光输出镜,镀有对 1064 nm 透射率为 30%的膜系。以两块晶体的阈值相等为条件,使 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄发射的激光同时起振,来确定两块晶体的长度。由于 Nd:YVO₄具有偏振发射特性,所以整体的发射激光在 Nd:YVO₄的偏振方向上具有一定的偏振优势,使该偏振模式在模式竞争中占优,而其他偏振态的模式将被竞争掉,从而使激光输出具有很好的偏振特性。设 Nd:YAG 的阈值为 P_{th1} ,Nd:YVO₄的阈值为 P_{th2} ,由阈值条件有^[13-14]:

$$P_{th1} = P_{th2}, \quad (1)$$

$$P_{th1} = \frac{\pi h\nu(\omega_L^2 + \omega_p^2)L_1}{4\sigma_{Nd:YAG}\tau_1\eta_p\eta_1}, \quad (2)$$

$$P_{th2} = \frac{\pi h\nu(\omega_L^2 + \omega_p^2)L_2}{4\sigma_{Nd:YVO_4}\tau_2\eta_{p1}\eta_2}, \quad (3)$$

式中 $\sigma_{Nd:YAG}$ 为 Nd:YAG 的受激截面, $\sigma_{Nd:YVO_4}$ 为 Nd:YVO₄ 的受激截面, η_p 为 1064 nm 的量子效率, η_1 和 η_2 分别为 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄的吸收率。 τ_1 和 τ_2 为 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄的激光上能级寿命。 L_1 和 L_2 分别为 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄的腔损耗, ω_L 和 ω_p 分别为晶体上的激光光斑和抽运光斑半径。以上参数分别取 $\sigma_{Nd:YAG} = 2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\sigma_{Nd:YVO_4} = 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\eta_1 = 1 - \exp(-\alpha_{Nd:YAG} \times l_{Nd:YAG})$, $\eta_2 = \exp(-\alpha_{Nd:YAG} \times l_{Nd:YAG}) - \exp(-\alpha_{Nd:YAG} \times l_{Nd:YAG} - \alpha_{Nd:YVO_4} \times l_{Nd:YVO_4})$, 其中 $\alpha_{Nd:YAG}$ 为 Nd:YAG 的吸收系数, $\alpha_{Nd:YVO_4}$ 为 Nd:YVO₄的吸收系数, $l_{Nd:YAG}$ 和 $l_{Nd:YVO_4}$ 分别为 Nd:YAG 及 Nd:YVO₄晶体的长度,取 $\alpha_{Nd:YAG} = 3 \text{ cm}^{-1}$,当 $P_{th1} = P_{th2}$ 时,当 $\alpha_{Nd:YVO_4}$ 取值分别为 3,

5, 8, 10, 15 cm⁻¹, $l_{\text{Nd:YAG}}$ 和 $l_{\text{Nd:YVO}_4}$ 的关系如下图 2 所示。分别采用掺杂粒子数分数为 0.6% 的 Nd:YAG 及 0.2% 的 Nd:YVO₄ 作为增益介质, 由于 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 在 808 nm 处的吸收峰略有差别, 因此增益介质对抽运光的吸收率可以通过调节抽运源的温度来实现, 选择抽运源的温度为 29 °C, 此时 Nd:YAG 对抽运光的吸收达到最大, 测得 Nd:YAG 的吸收系数约为 3 cm⁻¹, Nd:YVO₄ 的吸收系数约为 5 cm⁻¹。取 Nd:YAG 的长度为 4 mm, 根据图 2 的计算结果, 如果要达到 $P_{\text{th1}} = P_{\text{th2}}$, 则 Nd:YVO₄ 的长度为 2.18 mm。根据以上分析, 并结合实际情况, 采用的 Nd:YAG 掺杂粒子数分数为 0.6%, 尺寸为 3 mm×3 mm×4 mm, Nd:YVO₄ 晶体规格为掺杂粒子数分数 0.2%, 尺寸 3 mm×3 mm×3 mm, 根据计算结果, 因为 Nd:YVO₄ 起振的阈值略低于 Nd:YAG, 因此在抽运功率较低的情况下, Nd:YVO₄ 优先起振, 可作为种子光, 由于 Nd:YVO₄ 具有很好的偏振发射的特性, 从而在增加抽运功率, 两晶体发射的激光都起振后, 输出的激光仍具有很好的偏振特性。

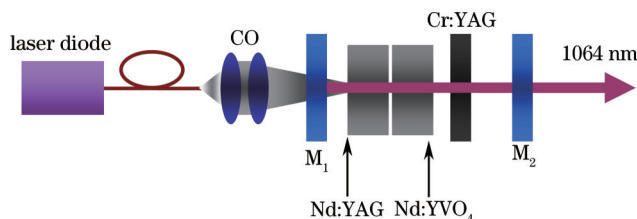


图 1 Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体 Cr:YAG 被动调 Q 实验装置
Fig.1 Setup of coaxial double crystals Nd:YAG/Nd:YVO₄/Cr:YAG Q-switched laser

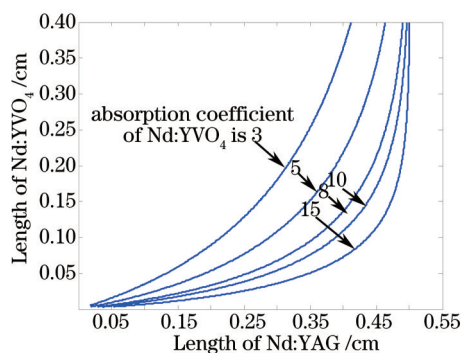


图 2 阈值相等条件下 Nd:YAG 与 Nd:YVO₄ 的长度关系
Fig.2 Length of Nd:YAG and Nd:YVO₄ at the condition of $P_{\text{th1}} = P_{\text{th2}}$

3 实验结果分析

在相同的条件下, 首先对传统的 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器进行了实验研究, 当抽运功率为 10 W 时, 最高获得了 3.1 W 的 1064 nm 激光输出, 脉冲重复频率为 13 kHz, 脉冲宽度为 8 ns, 光光转换效率为 31%; 同时对 Nd:YAG/Cr:YAG 的偏振特性进行了研究, 实验结果如图 3 所示。实验表明, Nd:YAG/Cr:YAG 在低抽运功率时, 输出的激光具有较高的偏振比, 约为 85:1, 随着抽运功率的增加输出激光的偏振比逐渐下降。但在某一功率值, 其偏振性会有所增加, 但并未如文献[15-16]中所报道的 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器输出激光具有很明显的偏振性。实验中也发现, Nd:YAG/Cr:YAG 激光器输出的偏振特性与谐振腔的调试相关, 亦可以在较高功率抽运情况下, 通过对谐振腔的调试来得到高的偏振比, 只不过此时的输出功率会有所下降。实验结果表明 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器输出的偏振特性具有一定的随机性, 不是很好控制, 对于以上现象认为是热致双折射作用的结果。当抽运功率增加, Nd:YAG 晶体会出现热致双折射效应, 使其由原来的各向同性晶体变为各向异性晶体, 相当于在腔内插入了双折射晶体, 导致输出激光具有一定的偏振性。而这种双折射效应又是随抽运功率的变化而变化, 因此输出激光的偏振特性也会随着抽运功率而变化。由于不同偏振的光通过 Nd:YAG 后会产生双折射造成空间上的分离, 因此通过调节谐振腔镜可以使某一偏振态的激光损耗最小, 使其在模式竞争中占有优势, 此时输出激光具有明显的偏振性。但这种方式不好控制, 每当增加或减小抽运功率后都需要调整谐振腔, 不具有实用性。

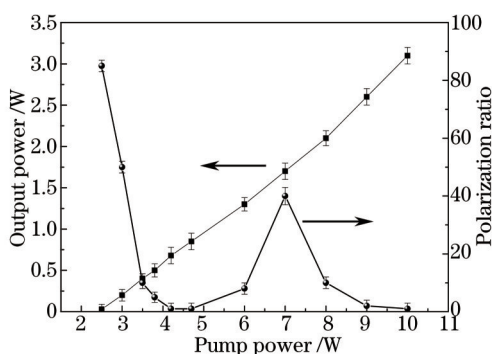


图3 Nd:YAG/Cr:YAG激光器的输出特性及偏振特性与抽运功率的关系

Fig.3 Output power and polarization ratio of 1064 nm versus pump power of Nd:YAG/Cr:YAG laser

对Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体Cr:YAG被动调Q结构的输出特性进行了实验研究,当抽运功率为10 W时,最高获得了2.8 W的1064 nm激光输出,脉冲重复频率为15 kHz,脉冲宽度为7 ns,光光转换效率为28%。对比发现,其输出功率略低于Nd:YAG/Cr:YAG激光器,这是由于使用两块晶体造成谐振腔内的损耗过大,从而使输出功率降低。相比于Nd:YAG/Cr:YAG激光器其重复频率有所增加,这是由于Nd:YVO₄的受激截面较大,上能级寿命较短的原因。该激光器的脉冲宽度略窄于Nd:YAG/Cr:YAG激光器。该激光器的偏振特性实验测量结果如图4所示,其偏振比最高为90:1,随着抽运功率的增加,偏振比略有降低,最低为83:1,明显优于Nd:YAG/Cr:YAG激光器。当抽运功率为10 W时,测量了Nd:YAG/Cr:YAG和Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体Cr:YAG被动调Q结构输出激光的光束质量因子,分别为1.56和1.63,二者输出激光的光束质量基本相同。在以上实验的基础上,进行了三倍频实验,实验装置如图5所示,LBO为倍频晶体,采用I类临界相位匹配方式;LBO为三倍频晶体,采用II类临界相位匹配方式;R为滤波片,镀有对1064 nm和532 nm高反膜,对355 nm高透膜系。采用Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体Cr:YAG被动调Q激光器作为基频光,最高获得了223 mW的355 nm紫外(UV)激光输出,而采用Nd:YAG/Cr:YAG激光器作为基频光,仅获得117 mW的355 nm激光输出。这主要是因为Nd:YAG/Cr:YAG激光器输出的1064 nm激光不具有很好的偏振性,因此在后续的非线性频率变换中不能得到较高的转换效率。

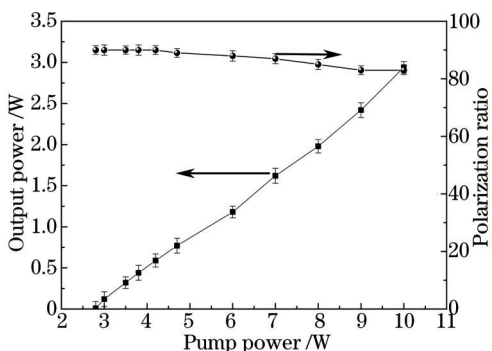


图4 Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体Cr:YAG被动调Q激光器的输出特性及偏振特性与抽运功率的关系

Fig.4 Output power and polarization ratio of 1064 nm versus pump power of Nd:YAG/Nd:YVO₄/Cr:YAG laser

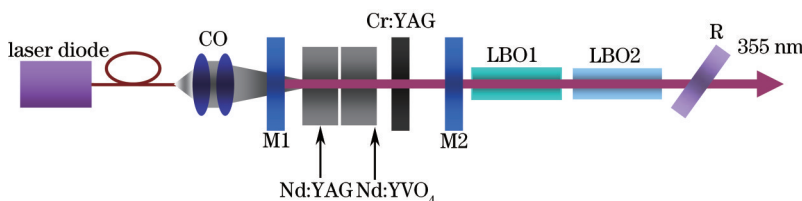


图5 Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体Cr:YAG被动调Q紫外激光器

Fig.5 Setup of Nd:YAG/Nd:YVO₄/Cr:YAG passively Q-switched UV laser

4 结 论

实现了一种由激光二极管抽运的 Nd:YAG/Nd:YVO₄共轴双晶体的 Cr:YAG 被动调 Q 激光器,当抽运功率为 10 W 时,最高获得了 2.8 W 的 1064 nm 激光输出,脉冲重复频率为 15 kHz,脉冲宽度为 7 ns,光光转换效率为 28%。实验表明,该激光器输出激光的偏振比大于 80:1,相比于 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器,具有很好的偏振特性。在此基础上利用 LBO 晶体作为非线性频率变换晶体,最终获得了 223 mW 的 355 nm 紫外激光输出。该形式灵活多样,可以广泛用于其他激光器中,具有很好的实用价值。

参 考 文 献

- 1 Sakai H, Kan H, Taira T. >1 MW peak power single-mode high-brightness passively Q-switched Nd³⁺:YAG microchip laser[J]. Opt Express, 2008, 16(24): 19891-19899.
- 2 Hayashi S, Shibuya T, Sakai H, *et al.*. Tunability enhancement of a terahertz-wave parametric generator pumped by a microchip Nd:YAG laser[J]. Appl Opt, 2009, 48(15): 2899-2902.
- 3 Tsunekane M, Inohara T, Ando A, *et al.*. High peak power, passively Q-switched micro laser for ignition of engines[J]. IEEE J Quantum Electron, 2010, 46(2): 277-284.
- 4 Pavel N, Tsunekane M, Taira T, *et al.*. Composite, all-ceramics, high-peak power Nd:YAG/Cr:YAG monolithic micro-laser with multiple-beam output for engine ignition[J]. Opt Express, 2011, 19(10): 9378-9384.
- 5 Dong Jun, Wang Guangyu, Ren Yingying. Advances in passively Q-switched solid-state lasers based on composite materials[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0601003.
董 俊,王光宇,任滢滢.基于复合材料的被动调 Q 固体激光器的研究进展[J].中国激光,2013,40(6):0601003.
- 6 Bhandari R, Taira T. >6 MW peak power at 532nm from passively Q-switched Nd:YAG/Cr⁴⁺:YAG microchip laser[J]. Opt Express, 2011, 19(20): 19135-19141.
- 7 Cheng Li, Jie Song, Deyuan Shen, *et al.*. Diode-pumped CW and passively Q-switched solid-state lasers with an ultra-thin Nd:YVO₄ crystal as the gain medium[J]. Opt Commun, 2000, 186(4): 245-250.
- 8 Thomas G M, Damzen M J. Passively Q-switched Nd:YVO₄ laser with greater than 11 W average power[J]. Opt Express, 2011, 19(5): 4577-4582.
- 9 Zhou Cheng, Ye Ziqing, Zheng Quan, *et al.*. Investigation for passively Q-switched Cr⁴⁺:YAG all-solid-state ultraviolet laser of fourth-harmonic generation[J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 339-341.
周 城,叶子青,郑 权,等. Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 4 倍频全固态紫外激光器的研究[J].激光技术,2003,27(4):339-341.
- 10 Zheng Quan, Zhao Ling, Jiang Yaoliang, *et al.*. 2002 LD pumped passively Q-switched Nd:YAG/LBO green laser[J]. Chinese J Lasers, 2002, 29(6): 492-494.
郑 权,赵 岭,姜耀亮,等. LD 抽运被动调 Q Nd:YAG/LBO 绿光激光器[J].中国激光,2002,29(6):492-494.
- 11 Jia Haixu, Ding Shuanghong, Liu Jiajia, *et al.*. Laser-diode-pumped Cr:YAG passively Q-switched intracavity PbWO₄ mode-locked Raman laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1002007.
贾海旭,丁双红,刘佳佳,等. LD 抽运 Cr⁴⁺:YAG 被动调 Q 内腔式 PbWO₄ 锁模拉曼激光器实验研究[J].中国激光,2014,41(10):1002007.
- 12 Zhang Qiulin, Su Hongxin, Sun Jiang, *et al.*. Stability of LD pumped passively Q-switched solid-state lasers[J]. Acta Phys Sin, 2007, 56(10): 5818-5820.
张秋琳,苏红新,孙 江,等. LD 抽运被动调 Q 固体激光器的脉冲稳定性[J].物理学报,2007,56(10):5818-5820.
- 13 W P Risk. Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses[J]. J Opt Soc Am B, 1988, 5(7): 1412-1423.
- 14 Fan T Y, Byer R L. Model and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser[J]. IEEE Journal of Quantum Electron, 1987, 23(5): 605-612.
- 15 Zheng Quan, Jiang Yaoliang, Qian Longsheng. Research on polarization of a LD-pumped Nd:YAG/Cr:YAG laser[J]. Laser & Infrared, 2002, 32(4): 248-249.
郑 权,姜耀亮,钱龙生. LD 泵浦 Nd:YAG/Cr:YAG 激光器偏振特性的研究[J].激光与红外,2002,32(4):248-249.
- 16 Shen Gao, Tan Huiming, Fu Xihong, *et al.*. 355 nm Laser based on a Nd:YAG/Cr:YAG composite crystal[J]. Chinese J Laser, 2008, 35(2): 191-194.
申 高,檀慧明,付喜宏,等. Nd:YAG/Cr:YAG 键合晶体的 355 nm 激光器[J].中国激光,2008,35(2):191-194.

栏目编辑:宋梅梅