

文章编号: 0253-2239(2008)12-2365-05

激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 和频黄光激光器的理论及实验研究

张峻诚 王加贤 苏培林 韩磊 熊刚强

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 为了达到最佳和频 593 nm 黄色激光输出, 采用激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体, 根据四能级系统的速率方程理论, 建立了空间相关的两波长激光运转速率方程模型, 由此导出两波光子数表达式。对 LD 端面抽运 Nd:YVO₄/KTP 三镜复合腔结构的腔内和频黄光激光器, 在满足参与和频的两基频光子数密度相等的条件下, 理论上得到了谐振腔的各个参数。实验比较了在满足两波光子数密度相等和两波振荡阈值相等两种情况下激光器输出的 593 nm 黄色激光功率。在抽运功率为 12 W 时, 二种情况下分别得到了 410 mW 和 340 mW 的黄光输出, 光-光转换效率分别为 3.4% 和 2.8%。由此可见, 在满足两波光子数密度相等的条件下可以得到更高转换效率的和频黄光输出。

关键词 激光技术; 腔内和频激光器; 三镜复合腔; 速率方程; 两波光子数密度

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20082812.2365

Theoretical and Experimental Study of LD Pumped Nd:YVO₄ Yellow Laser with Sum-Frequency Generation

Zhang Juncheng Wang Jiexian Su Peilin Han Lei Xiong Gangqiang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China)

Abstract In order to attain optimal sum-frequency 593 nm yellow laser, using LD end-pumped Nd:YVO₄, starting from the four-level system rate equations, a theoretical model of the spatial related dual-wavelength rate-equation was established and dual-wavelength photon number expression was conducted. The parameters of the three-mirror compound resonator were theoretically obtained for the LD end-pumped Nd:YVO₄/KTP yellow laser with sum-frequency in the case of equal dual-wavelength photon number density. The output power of 593 nm yellow laser was experimentally compared under the conditions that dual-wavelength laser photon number density was equal and the dual-wavelength laser oscillation threshold was equal. Output power of 593 nm yellow laser was respectively 410 mW and 340 mW, and the conversion efficiency was 3.4% and 2.8% in the two cases with 12 W pump power. The experimental results show that more efficiency yellow laser can be obtained in the case of equal dual-wavelength photon number density.

Key words laser technique; intracavity sum-frequency laser; three-mirror compound resonator; rate equation; dual-wavelength photon number density

1 引 言

掺钕钒酸钇 (Nd:YVO₄) 晶体是目前应用最为广泛的激光晶体之一, 具有破坏阈值高、热畸变小和受激发射截面大等优点, 主要有 1342 nm、1064 nm

和 914 nm 三条谱线, 对于激光二极管(LD)抽运 Nd:YVO₄ 晶体的研究工作也主要集中于这三条谱线, 通过倍频可以分别得到红、绿、蓝三色激光^[1-3]。由于黄色激光在显示、医疗和军事等方面有着特殊

收稿日期: 2008-03-31; 收到修改稿日期: 2008-05-06

基金项目: 福建省自然科学基金(A0610023)资助课题。

作者简介: 张峻诚(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事固体激光技术与器件等方面的研究。

E-mail: zjcheng1983@yahoo.com.cn

导师简介: 王加贤(1955-), 男, 博士, 教授, 主要从事固体激光技术与器件等方面的研究。E-mail: wangjx@hqu.edu.cn

的用途,所以国内外近年来又开展对 1342 nm 和 1064 nm 这两条谱线腔内和频输出黄色激光的研究工作^[4~10]。2000 年 Y. F. Chen^[4,5]报道了采用 LD 抽运 Nd:YVO₄ 获得连续两波长激光输出,并通过腔外和频得到 593 nm 的黄光。随后各研究小组对此方面的实验研究工作也多有报道,但理论研究工作的报道并不多见,而且普遍采用两条激光谱线振荡阈值相等的条件设计谐振腔和选择参数。为了达到最佳的和频输出,不仅要求两基频光同时运转,两基频光的功率密度要高,而且和频晶体处参与腔内和频作用的两基频光光束半径和光子数密度还要相等,而仅仅满足阈值振荡相等条件是不够充分的。

采用 LD 端面抽运方式,要考虑增益介质内抽运光束与激光光束的空间交叠问题。本文以空间相关的四能级系统的速率方程理论为基础,推导出激光器在两波长运转时的速率方程,在近阈值条件下得到了两基频光光子数密度的表达式,在满足和频晶体两波长光子数密度相等的条件下,理论上得到优化设计方案,实验上也验证了在满足两波长光子数密度相等的条件下可以得到更高转换效率的和频黄光输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。采用光纤耦合半导体激

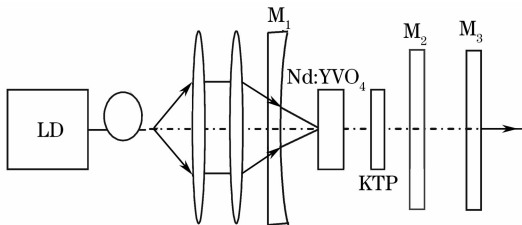


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

光器作为抽运源,最大输出功率 15 W,输出耦合光纤芯径为 600 μm ,数值孔径 $\text{NA}=0.22$ 。LD 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 时发射中心波长为 (808 ± 3) nm 激光,用恒温冷却水循环装置进行温度控制。LD 输出的激光经耦合透镜组聚焦在 Nd:YVO₄ 晶体中心附近。

腔镜 M_1 的曲率半径为 50 cm,镀 808 nm 高透膜,1064 nm、1342 nm 高反膜;Nd:YVO₄ 晶体为 a 轴切割,尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 8 mm,Nd 离子掺杂原子数分数为 0.5%;KTP 晶体尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 5 mm,采用 II 类临界相位匹配,匹配角度为 $\theta=78^{\circ},\phi=0^{\circ}$,两个通光端面镀有 1342 nm、1064 nm、593 nm 增透膜。将 Nd:YVO₄ 和 KTP 晶体用铝箔包裹紧置于紫铜块中,均采用恒温冷却水循环装置进行冷却。腔镜 M_2 为平面镜,镀 1342 nm 高反膜,1064 nm 和 593 nm 高透膜;腔镜 M_3 为平面镜,镀 593 nm 高透膜,1064 nm 反射膜。为了适当抑制 1064 nm 激光振荡,达到和 1342 nm 激光近似相等的振荡阈值, M_3 镜对 1064 nm 应有一定的透射损耗,其透过率及 M_1 到 M_2 、 M_1 到 M_3 的距离可通过理论计算得出,并在实验中加以调整。

3 两波长激光运转时速率方程的建立

LD 端面抽运的固体激光器,增益介质内抽运光和振荡光强度在纵向和径向均有变化,所以必须考虑抽运速率与振荡光光子数密度的纵向和径向分布。Nd:YVO₄ 四能级系统在两波长激光运转时,1342 nm 和 1064 nm 激光具有共同上能级,受激辐射共同消耗上能级粒子数,并跃迁到不同下能级,在实现两波长运转时必然会出现竞争。忽略激光下能级粒子数,即反转粒子数密度 $\Delta N(x,y,z,t) \approx N_2(x,y,z,t)$;只考虑基模运转状态,则两波长激光器空间速率方程可以写为

$$\frac{\partial \Delta N(x,y,z,t)}{\partial t} = Rr_p(x,y,z) - v\Delta N(x,y,z,t)[\sigma_1 S_1(t)u_1(x,y,z) + \sigma_2 S_2(t)u_2(x,y,z)] - \frac{\Delta N(x,y,z,t)}{\tau_f}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial S_1(t)}{\partial t} = \sigma_1 v \iiint_{\text{crystal}} \Delta N(x,y,z,t) S_1(t) u_1(x,y,z) dV_1 - \frac{S_1(t)}{\tau_{c1}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial S_2(t)}{\partial t} = \sigma_2 v \iiint_{\text{crystal}} \Delta N(x,y,z,t) S_2(t) u_2(x,y,z) dV_1 - \frac{S_2(t)}{\tau_{c2}}, \quad (3)$$

式中积分在增益介质范围内,下标 1 和 2 分别对应 $\lambda_1=1342$ nm 和 $\lambda_2=1064$ nm 相应参量。 R 为抽运速率, $r_p(x,y,z)$ 为归一化的抽运速率分布函数; v 为工作物质中的光速; σ_i 为受激发射截面; S_i 为腔内激光光子数, $u_i(x,y,z)$ 为归一化的腔内光子数密度分布函数; τ_f 为 Nd:YVO₄ 荧光寿命; $\tau_{ci}=l_i/c\delta_{oi}$ 为振荡激光光子寿命,其中 l_i 为谐振腔长度, δ_{oi} 为腔内单程损耗。 $r_p(x,y,z)$ 和 $u_i(x,y,z)$ 归一化条件为

$$\iiint r_p(x, y, z) dV_1 = 1, \quad \iiint u_i(x, y, z) dV_2 = 1,$$

式中 V_1 为增益介质体积, V_2 为谐振腔模体积。 $r_p(x, y, z) = \frac{2\alpha \cdot \exp(-\alpha z)}{\pi\omega_p^2(z)[1 - \exp(-\alpha l_{cr})]} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2(z)}\right]$,

$u_i(x, y, z) = \frac{2}{\pi l_i \omega_{0i}^2} \exp\left[-\frac{2(x^2 + y^2)}{\omega_i^2(z)}\right]$, 其中 α 为增益介质对抽运光的吸收系数, $\omega_p(z)$ 为抽运光在工作物质中的光束半径, l_{cr} 为增益介质长度, ω_{0i} 为振荡激光束腰半径, $\omega_i(z)$ 为振荡激光光束半径。

当连续运转的 Nd:YVO₄ 激光器达到稳态时, 反转粒子数密度和腔内光子数与时间无关, 令

$$\frac{\partial \Delta N(x, y, z)}{\partial t} = 0, \text{ 得到}$$

$$\Delta N(x, y, z) = \frac{\tau_f R r_p(x, y, z)}{1 + \tau_f v \sigma_1 S_1 u_1(x, y, z) + \tau_f v \sigma_2 S_2 u_2(x, y, z)}, \quad (4)$$

将(4)式代入(2)式、(3)式, 在近阈值条件下, $\tau_f v \sigma_1 S_1 u_1(x, y, z) + \tau_f v \sigma_2 S_2 u_2(x, y, z) \ll 1$, 把(2)式、(3)式中右边第一项被积函数按泰勒级数展开并取一级近似, 在稳态时得到

$$\sigma_1 v \tau_f R \iiint_{\text{crystal}} [1 - \tau_f v \sigma_1 S_1 u_1(x, y, z) - \tau_f v \sigma_2 S_2 u_2(x, y, z)] r_p(x, y, z) u_1(x, y, z) dV_1 - \frac{1}{\tau_{c1}} = 0, \quad (5)$$

$$\sigma_2 v \tau_f R \iiint_{\text{crystal}} [1 - \tau_f v \sigma_1 S_1 u_1(x, y, z) - \tau_f v \sigma_2 S_2 u_2(x, y, z)] r_p(x, y, z) u_2(x, y, z) dV_1 - \frac{1}{\tau_{c2}} = 0, \quad (6)$$

(5)式、(6)式经整理后可得

$$\tau_f v \sigma_1 J_3 S_1 + \tau_f v \sigma_2 J_5 S_2 = J_1 - \delta_{01} / (l_1 \tau_f \sigma_1 R), \quad (7)$$

$$\tau_f v \sigma_1 J_5 S_1 + \tau_f v \sigma_2 J_4 S_2 = J_2 - \delta_{02} / (l_2 \tau_f \sigma_2 R), \quad (8)$$

式中交叠积分 $J_1 \sim J_5$ 分别为

$$J_1 = \iiint_{\text{crystal}} r_p(x, y, z) u_1(x, y, z) dV_1 = \frac{2}{\pi l_1} \cdot \frac{1}{\omega_{pa}^2 + \omega_{01}^2},$$

$$J_2 = \iiint_{\text{crystal}} r_p(x, y, z) u_2(x, y, z) dV_1 = \frac{2}{\pi l_2} \cdot \frac{1}{\omega_{pa}^2 + \omega_{02}^2},$$

$$J_3 = \iiint_{\text{crystal}} r_p(x, y, z) u_1^2(x, y, z) dV_1 = \frac{4}{\pi^2 l_1^2 \omega_{01}^2 (\omega_{01}^2 + 2\omega_{02}^2)},$$

$$J_4 = \iiint_{\text{crystal}} r_p(x, y, z) u_2^2(x, y, z) dV_1 = \frac{4}{\pi^2 l_2^2 \omega_{02}^2 (\omega_{02}^2 + 2\omega_{pa}^2)},$$

$$J_5 = \iiint_{\text{crystal}} r_p(x, y, z) u_1(x, y, z) u_2(x, y, z) dV_1 = \frac{4}{\pi^2 l_1 l_2 \omega_{01} \omega_{02} \omega_{pa}^4 (1/\omega_{pa}^4 + 1/\omega_{01}^4 + 1/\omega_{02}^4)}.$$

式中 $\omega_{pa} = \left[\frac{1}{l} \int_0^l \omega_p^2(z) dz \right]^{1/2}$ 为抽运光在增益介质中的平均光束半径, 其中

$$\omega_p^2(z) = \omega_{p0}^2 \left\{ 1 + \left[\frac{\lambda_p M_p^2}{n \pi \omega_{p0}^2} (z - z_0) \right]^2 \right\},$$

ω_{p0} 、 ω_{01} 和 ω_{02} 分别为抽运光、1342 nm 和 1064 nm 激光束腰半径, M_p^2 为抽运光质量因子, z_0 为抽运光束光腰位置。

4 速率方程的数值求解及结果分析

4.1 计算参数的选取

Nd:YVO₄ 的相关参数为: 受激发射截面 $\sigma_1 = 7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, $\sigma_2 = 25 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$ ^[11]; 增益介质中的光速 $v = 1.38 \times 10^8 \text{ m/s}$; 荧光寿命 $\tau_f = 100 \mu\text{s}$ ^[12]; 增益介质长度 $l_{cr} = 8 \text{ mm}$; 抽运速率 $R = \eta_p P_{\text{abs}} / h\nu_p$, 其中量子效率 $\eta_p = 0.8$, 增益介质吸收的抽运光功率 $P_{\text{abs}} = P_p [1 - \exp(-\alpha l_{cr})]$, P_p 为入射到增益介质端面的抽运功率, $\alpha = 30 \text{ cm}^{-1}$ ^[12]。腔内单程损耗 $\delta_{0i} = \alpha_i - 0.5 \ln(1 - T_i)$, $\alpha_1 = 0.005$, $\alpha_2 = 0.007$ 为两个子腔除透射外的其他损耗(根据 Findlay-Clay 原理求取), T_1 、 T_2 分别为 M_2 、 M_3 镜透过率。选择 1342 nm 子腔腔长 $l_1 = 6 \text{ cm}$, 由于 1064 nm 激光增益大于 1342 nm 激光增益, 所以选取 1064 nm 子腔长度 $l_2 > l_1$, 1342 nm 子腔参数确定后, $\omega_1(z)$ 也就确定。当 1064 nm 子腔腔长 $l_2 = 10 \text{ cm}$ 时, 在和频

晶体 KTP 处, $\omega_2/\omega_1=1$, 此时两束基频光的空间重叠性最好, 有利于提高和频效率。如果采用二镜腔即两波的谐振腔长度相等, $\omega_2(z)/\omega_1(z)=\sqrt{\lambda_2/\lambda_1}=0.89$, 由于 1342 nm 激光光束半径较大但增益较小, 此时参与和频的两基频光光子数相差较大, 不利于和频输出。

4.2 两波光子数密度相等时的子腔参数

在腔内某一体积元内, 两波光子数密度分别为

$$\begin{aligned} \phi_1(x, y, z) &= S_1 \cdot u_1(x, y, z), \\ \phi_2(x, y, z) &= S_2 \cdot u_2(x, y, z). \end{aligned} \tag{9}$$

将(9)式整理后代入(7)式和(8)式可得

$$\phi_2(x, y, z) = K_1 \cdot \phi_1(x, y, z) + C_1, \tag{10}$$

$$\phi_2(x, y, z) = K_2 \cdot \phi_1(x, y, z) + C_2, \tag{11}$$

式中

$$K_1 = -\frac{\sigma_1 l_2 \omega_{02}^2 J_3}{\sigma_2 l_1 \omega_{01}^2 J_5},$$

$$K_2 = -\frac{\sigma_1 l_2 \omega_{02}^2 J_5}{\sigma_2 l_1 \omega_{01}^2 J_4},$$

$$C_1 = 2 \frac{J_1 - \delta_{01}/(l_1 \tau_f \sigma_1 R)}{\pi l_2 \tau_f \nu \sigma_2 J_5 \omega_{02}^2},$$

$$C_2 = 2 \frac{J_2 - \delta_{02}/(l_2 \tau_f \sigma_2 R)}{\pi l_2 \tau_f \nu \sigma_2 J_4 \omega_2^2}.$$

将 $J_1 \sim J_5$ 和 4.1 节选取的参数代入(10)式和(11)式, 得到 KTP 晶体前表面中心处光子数密度的数值计算结果, 如图 2 中实线和虚线所示。由于 K_1 和 K_2 已经确定, 即两条直线的斜率确定, C_1, C_2 只与激光损耗 δ_{01}, δ_{02} 有关。选取 1342 nm 子腔输出镜 M_2 对 1342 nm 激光全反, $T_1=0, \delta_{01}=0.005$, 由于 K_1 和 C_1 值确定, 所以实线位置固定。当改变 1064 nm 激光损耗 δ_{02} 即 C_2 值, 则可改变虚线与实线交点位置。当 $\delta_{02}=0.024$ (对 1064 nm 激光透过率 $T_2=3.3\%$) 时, $\phi_1 < \phi_2$; 当 $\delta_{02}=0.034$ (对 1064 nm 激光透过率 $T_2=5.3\%$) 时, $\phi_1 > \phi_2$; 当 $\delta_{02}=0.03$ (对 1064 nm 激光透过率 $T_2=4.5\%$) 时, $\phi_1 = \phi_2$, 即

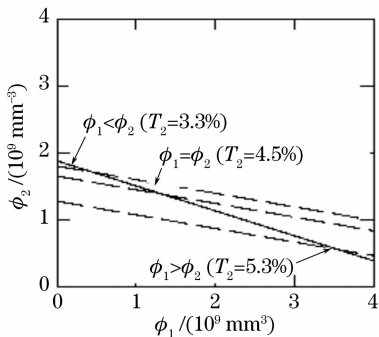


图 2 腔损耗不同时对两波光子数密度的影响

Fig. 2 ϕ_2 versus ϕ_1 under the different cavity losses

KTP 晶体表面中心处参与和频作用的两基频光光子数密度相等, 此时和频效率最高。

5 实验结果

实验上采用 $T_2=4.5\%, l_2=10$ cm, 以满足 KTP 晶体处两波光束半径和两波光子数密度相等的条件。图 3 是用 Ocean Optics 公司的光纤光谱仪测得的输出黄光的光谱图, 可以看出黄光的中心波长约为 593 nm, 谱宽约为 2 nm。用 Molelectron Detector 公司的功率计分别测量了两波光子数密度相等和两波振荡阈值相等两种情况下的输出黄光功率。两波振荡阈值相等情况下取两镜腔结构, 腔长为 10 cm。由四能级的阈值公式可以得到^[13], 当 $P_{th1}=P_{th2}$ 时, 取 $T_1=0.1\%$, 则 $T_2=2.7\%$ 。两种情况下黄光功率与抽运光功率的关系如图 4 所示。在抽运功率为 12 W 时, 两种情况下分别得到了 410 mW 和 340 mW 的黄光输出; 光-光转换效率 (黄光功率与抽运光功率之比) 分别为 3.4% 和 2.8%; 继续增大抽运功率, 两种情况下均出现了不同程度的热透镜效应。实验结果表明, 两波光子数密度相等条件下输出的黄光功率要高于两波振荡阈值相等条件下输出的黄光功率。

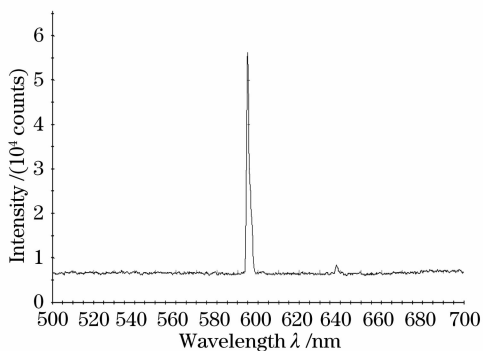


图 3 593 nm 黄光光谱图

Fig. 3 Spectrum of 593 nm yellow laser

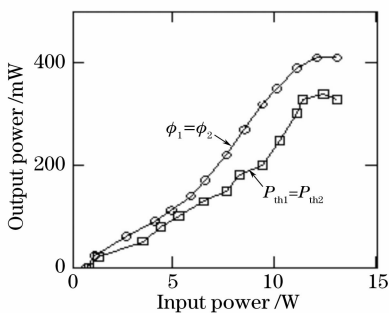


图 4 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power versus pump power

6 结 论

由两波长激光运转的速率方程得到两波光子数表达式,分析抽运光和激光光束半径的空间分布对和频的影响。为了得到最佳和频输出,在和频晶体处两波光子数密度相等时合理地选取了各子腔参数。利用理论分析得到的参数,实验上对比了两波光子数密度相等和两波振荡阈值相等两种情况下的输出黄光功率。在抽运功率为 12 W 时,两种情况下分别得到了 410 mW 和 340 mW 的黄光输出,光-光转换效率分别为 3.4% 和 2.8%。由此可见,利用两波光子数密度相等条件可以得到更高效率的和频黄光输出。

参 考 文 献

- 1 Ai-Yun Yao, Wei Hou, Xue-Chun Lin *et al.*. High power red laser at 671 nm by intracavity-doubled Nd:YVO₄ laser using LiB₃O₅[J]. *Opt. Commun.*, 2004, **231**(4~6): 413~416
- 2 Fu Weijia, Yu Jian, Kang Yuzhuo *et al.*. 13 mW-continuous-wave green light output by quasi-phase-matched frequency doubling in periodically poled KTP[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1063~1066
付伟佳,于建,康玉琢等. 准相位匹配 PPKTP 晶体连续倍频 13 mW 绿光输出[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1063~1066
- 3 Qinghua Xue, Yikun Bu, Fuqiang Jia *et al.*. Compact efficient 1.5 W continuous wave Nd:YVO₄/LBO blue laser at 457 nm[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **258**(1~3): 67~71
- 4 Y. F. Chen. CW dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Appl. Phys. B*, 2000, **70**: 475~478
- 5 Y. F. Chen, S. W. Tsai, S. C. Wang *et al.*. Efficient generation of continuous-wave yellow light by single-pass sum-frequency mixing of a diode-pumped Nd:YVO₄ dual-wavelength laser with periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(20): 1809~1811
- 6 Bu Yikun, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. Diode-pumped Nd:YVO₄ CW 593.5 nm yellow laser with LBO intracavity sum-frequency mixing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(6): 801~804
卜轶坤,郑权,薛庆华等. LD 泵浦 Nd:YVO₄/LBO 腔内和频连续黄光激光器[J]. *光子学报*, 2005, **34**(6): 801~804
- 7 Y. F. Chen, Y. S. Chen, S. W. Tsai. Diode-pumped Q-switched laser with intracavity sum frequency mixing in periodically poled KTP[J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**: 207~210
- 8 Lü Yanfei, Zhang Xihe, Yao Zhihai *et al.*. 1.1 W continuous-wave orange-yellow light Nd:YVO₄ laser with intracavity sum-frequency generation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(5): 736~739
吕彦飞,张喜和,姚治海等. 1.1 W 内腔和频连续波橙黄光 Nd:YVO₄ 激光器[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5): 736~739
- 9 Fu Xihong, Tan Huiming, Li Yimin *et al.*. Laser diode-pumped continuous-wave 589 nm laser with doubly resonant intracavity sum frequency mixing[J]. *Chin. J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1043~1047
付喜宏,檀慧明,李义民等. 激光二极管抽运复合腔和频连续波 589 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1043~1047
- 10 Yanfei Lü, Xihe Zhang, Zhihai Yao. All-solid-state sum-frequency generation of 1.12 W continuous-wave laser at 588 nm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 353~354
- 11 A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher *et al.*. Stimulated-emission cross section at 1064 and 1342 nm in Nd:YVO₄[J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(12): 4907~4911
- 12 J. C. Bermudez, G. V. J. Pinto-Robledo, A. V. Kir'yanov *et al.*. The thermo-lensing effect in a grazing incidence diode-side-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **210**(1~3): 75~82
- 13 Yang Lu, Baigang Zhang, Enbang Li *et al.*. High-power simultaneous dual-wavelength emission of an end-pumped Nd:YAG laser using the quasi-three-level and the four-level transition[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **262**(1~3): 241~245