

文章编号: 1000-5013( 2009)05 0513-04

# LD 抽运 Nd: YVO<sub>4</sub> 三镜腔激光器腔内和频技术

熊刚强, 王加贤, 张峻诚, 苏培林

( 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021 )

摘要: 针对激光二极管端面抽运的三镜复合腔 Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP 腔内和频激光器, 在分别满足 1 064, 1 342 nm 双波长激光振荡阈值相等和光子数密度相等条件下, 数值计算两个支腔腔长、两个支腔反射镜透过率之间的关系. 根据理论计算得到的参数, 在双波长光子数密度相等和双波长振荡阈值相等两种情况下, 对比其和频输出的黄光功率. 当抽运功率均为 12 W 时, 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%. 利用双波长光子数密度相等条件, 可以得到更高转换效率的和频黄光.

关键词: 激光二极管; 抽运; Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器; 三镜复合腔; 腔内和频

中图分类号: TN 248. 1

文献标识码: A

掺钕钒酸钇 (Nd: YVO<sub>4</sub>) 晶体具有破坏阈值高、热畸变小和受激发射截面大等优点, 主要有 3 条谱线, 分别是 1 342, 1 064, 914 nm. 采用激光二极管 (LD) 抽运 Nd: YVO<sub>4</sub>, 实现 1 064, 1 342 nm 双波长激光振荡并进行腔内和频输出, 是获得 593 nm 黄色激光的有效手段之一. 这类激光器具有体积小、重量轻、寿命长、效率高等优点, 在医疗和军事方面有着特殊的用途. 近年来, 有不少对此方面的研究工作报道<sup>[1-7]</sup>. 本文分别在满足两条激光谱线振荡阈值相等条件和光子数密度相等条件下, 设计谐振腔参数, 获得 593 nm 黄色激光输出.

## 1 实验装置

图 1 为实验装置. 采用光纤耦合半导体激光器作为抽运源, 最大输出功率 15 W, 输出耦合光纤芯径为 600 μm, 数值孔径 (NA) 为 0. 22. LD 在 25 ℃ 时的发射中心波长为 (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 808 nm 激光经耦合透镜组, 聚焦在 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体中心附近.

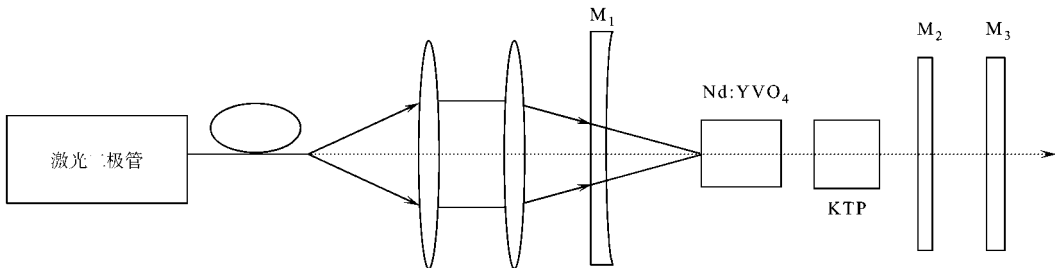


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

腔镜 M<sub>1</sub> 的曲率半径为 50 cm, 镀 808 nm 高透膜, 以及 1 064, 1 342 nm 高反膜; Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体为 a 轴切割, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 8 mm, Nd<sup>3+</sup> 离子掺杂质量分数为 0. 5%; KTP 晶体尺寸为 4 mm × 4 mm × 5 mm. 采用 II 类临界相位匹配, 匹配角度 θ = 78°, φ = 0°, 两个通光端面镀有 1 342, 1 064, 593 nm 增透膜. 将 KTP 晶体用铝箔包裹置于紫铜块中, 采用恒温冷却水循环装置进行冷却. 腔镜 M<sub>2</sub> 为平面

收稿日期: 2008-05-23

通信作者: 王加贤 (1955-), 男, 教授, 主要从事固体激光技术与器件的研究. E-mail: wangjx@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (A0610023)

镜, 镀 1 342 nm 高反膜, 以及 1 064, 593 nm 高透膜; 腔镜  $M_3$  为平面镜, 镀 593 nm 高透膜. 为了适当抑制 1 064 nm 激光振荡,  $M_3$  镜对 1 064 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.

2 理论分析

2.1 双波长振荡阈值相等条件

对于 LD 抽运激光器, 1 064, 1 342 nm 两条激光谱线的振荡阈值<sup>[1]</sup>为

$$P_{th,i} = \frac{\ln(1/(1 - T_i)) + \delta}{2l\eta_p} \times \frac{h\nu_p}{\sigma_i \tau_i} \frac{1}{\iiint_V (r, z) r_p(r, z) dV}, \quad i = 1, 2. \tag{1}$$

根据两条激光谱线振荡阈值相等条件  $P_{th,1} = P_{th,2}$ , 可得<sup>[1]</sup>

$$\ln\left(\frac{1}{1 - T_2}\right) + \delta = \beta \times \left[\ln\left(\frac{1}{1 - T_1}\right) + \delta\right], \tag{2}$$

$$\beta = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \times \left[ \frac{\int_0^a e^{-\alpha} [1 - \exp(-2(\omega_p^2/\omega_2^2))] / \omega_p^2(z) dz}{\int_0^a e^{-\alpha} [1 - \exp(-2(\omega_p^2/\omega_1^2))] / \omega_p^2(z) dz} \right], \tag{3}$$

$$\omega_p^2(Z) = \omega_{p,0}^2 \left\{ 1 + \left[ \frac{\lambda M_p^2}{n\pi\omega_{p,0}^2} (z - z_0) \right]^2 \right\}. \tag{4}$$

上式中,  $\omega_1, \omega_2$  分别为 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体内 1 342, 1 064 nm 激光光束半径. 它们和腔长  $l_i$ 、输入镜曲率半径  $R$ 、晶体与平面镜之间距离  $d_0$  的关系为

$$\omega_i = \left[ \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{l_i(R - l_i) + (l_i - d_0)^2}{4l_i(R - l_i)} \right]^{1/2}, \quad i = 1, 2. \tag{5}$$

上式中,  $i = 1, 2$  分别对应  $\lambda = 1\,342\text{ nm}$  和  $\lambda = 1\,064\text{ nm}$  的相应参量.  $T_i$  为输出镜对该波长的透过率;  $\delta$  为透射以外的其他所有损耗, 根据实际情况取  $\delta = 0.005, \delta_2 = 0.009$ ;  $w(r, z)$  为归一化光子数分布函数,  $r_p(r, z)$  为归一化抽运速率空间分布函数,  $h\nu_p$  为泵浦光子能量,  $\eta_p$  为量子效率,  $\tau_i$  为相应谱线的荧光寿命,  $l = 8\text{ mm}$  为工作物质的长度,  $\sigma_i$  为受激发射截面,  $\sigma_1 = 60\text{ pm}^2, \sigma_2 = 120\text{ pm}^2$ <sup>[8]</sup>,  $\alpha = 10\text{ cm}^{-1}$  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,  $\omega_{p,0} = 0.038\text{ cm}$  为抽运光腰半径,  $\lambda = 808\text{ nm}$  为抽运光波长,  $M_p^2 = 310$  为抽运光质量因子,  $z_0 = 2.3\text{ cm}$  为抽运光焦平面与聚焦透镜之间的距离.

根据两基频光在 KTP 晶体处的光束半径相等条件  $\omega_2 = \omega_1$ , 当  $l_1 = 6\text{ cm}$  时, 计算得出  $l_2 = 10\text{ cm}$ . 根据上述参数, 由式(5)可求得 Nd: YVO<sub>4</sub> 晶体处  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的值. 由式(2)计算出  $M_3$  镜对 1 064 nm 激光的透过率  $T_2$ , 以及  $M_2$  镜对 1 342 nm 激光透过率  $T_1$  的关系, 如图 2 所示. 由图 2 可知, 当  $T_1 = 0$  时,  $T_2 = 2.7\%$ .

2.2 双波长光子数密度相等条件

Henderson 建立了 Y 型腔 Nd: YAG 双波长 Q 调制激光器的速率方程组, 得到双波长光子数密度相等条件  $l_1/l_2 = \sigma_1/\sigma_2$ <sup>[8]</sup>, 但他没有考虑增益介质内双波长激光束半径不同. 考虑增益介质内 1 342 nm 光束半径  $\omega_1$  不同于 1 064 nm 光束半径  $\omega_2$ , 并设抽运光的平均光束半径与 1 342 nm 光束半径接近, 双波长光子数密度相等条件应修改为

$$\frac{l_1}{l_2} = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2}, \tag{6}$$

$$\tau_{c,1} = \tau_{c,2}, \tag{7}$$

式(6), (7)中,  $\tau_{c,1}, l_1, \tau_{c,2}, l_2$  分别为 1 342 nm 和 1 064 nm 的光子寿命和腔长. 把增益介质中心处的激光光束半径式(5)代入式(6), 可得到

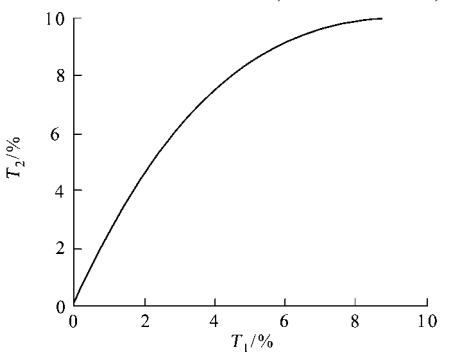


图 2 两个腔镜透过率之间的关系  
Fig. 2 The relationship of two mirrors transmittances

$$l_1 \cdot \frac{l_1(R-l_1)+(l_1-d_0)^2}{\sqrt{l_1(R-l_1)}} = l_2 \frac{\alpha_1 \lambda}{\alpha_2 \lambda} \cdot \frac{l_2(R-l_2)+(l_2-d_0)^2}{\sqrt{l_2(R-l_2)}}. \tag{8}$$

对式(8)进行数值计算,得到满足双波长光子数密度相等条件时  $l_2$  与  $l_1$  的关系,如图 3(a)所示. 它们的关系基本是线性的,其比值约为 2.5.

为了使腔内 1 342 nm 和 1 064 nm 光子寿命相等,即  $\tau_{c,1} = \tau_{c,2}$ ,在腔长确定的情况下,必须选择合适的  $T_1$  和  $T_2$ . 腔内光子寿命为

$$\tau_{c,i} = \frac{l_i}{v} \cdot \left[ -\frac{1}{2} \ln(1-T_i) + \delta \right]^{-1}, \quad i = 1, 2. \tag{9}$$

式(9)中,  $v$  为增益介质中光速. 由式(6),(8),可得到  $T_2$  和  $T_1$  的关系为

$$T_2 = 1 - \exp \left[ \frac{l_1}{l_2} (\ln(1-T_i) - 2\delta) + 2\delta \right]. \tag{10}$$

把  $l_1, l_2, \delta_1, \delta_2$  值代入式(10),数值求解结果如图 3(b)所示. 当  $T_1 = 0$  时,可得到  $T_2 = 4.5\%$ .

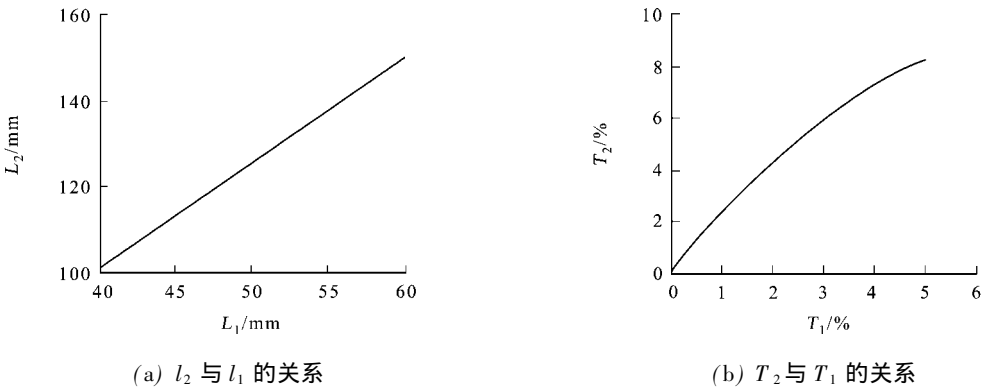


图 3 满足双波长光子数密度相等时

Fig. 3 Under condition of equal dual wavelength photon densities

3 结果与分析

实验中采用  $T_1 = 0, T_2 = 4.5\%, l_1 = 6 \text{ cm}, l_2 = 10 \text{ cm}$ ,以满足 KTP 晶体处双波长光束半径和双波长光子数密度相等条件,即  $\varphi_1 = \varphi_2$ ;采用  $T_1 = 0, T_2 = 2.5\%, l_1 = 4 \text{ cm}, l_2 = 10 \text{ cm}$ ,以近似满足双波长振荡阈值相等条件,即  $P_{th,1} = P_{th,2}$ . 用美国 Moletron Detector 公司的功率计,分别测量双波长振荡阈值相等和双波长光子数密度相等两种情况下的输出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, 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,双波长光子数密度相等条件下输出的黄光功率要高于双波长振荡阈值相等条件下输出的黄光功率. 图 5 是用美国 Ocean Optics 公司的光纤光谱仪测得的输出黄光的光谱图. 从图 5 可以看出,黄光的中心波长约为 593 nm,谱宽约为 2 nm.

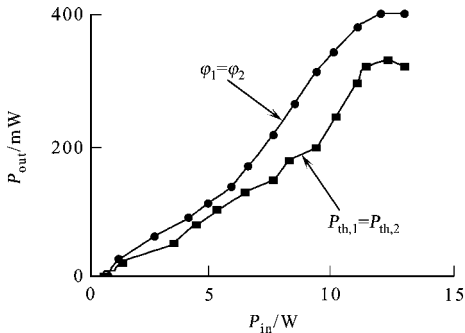


图 4 输出功率与抽运功率的关系

Fig. 4 Output power vs pumped power

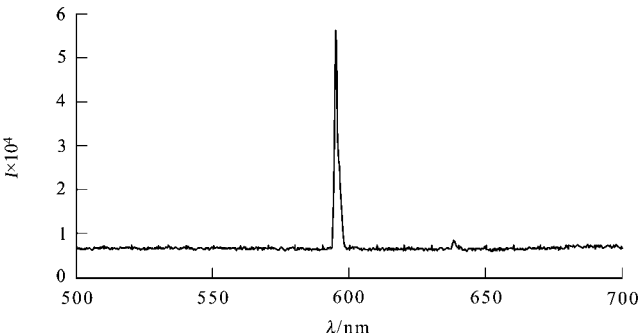


图 5 593 nm 黄光光谱图

Fig. 5 Spectrum of 593 nm yellow laser

## 4 结束语

在分别满足 1 064, 1 342 nm 双波长激光振荡阈值相等和光子数密度相等条件下, 设计了 LD 端面抽运三镜复合腔 Nd: YVO<sub>4</sub> 激光器谐振腔的相关参数. 在双波长光子数密度相等和双波长振荡阈值相等两种情况下, 对比激光器输出的黄光功率. 当抽运功率均为 12 W 时, 分别得到了 410, 340 mW 的黄光输出, 其光光转换效率分别为 3. 4% 和 2. 8%. 由此可见, 利用双波长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] CHEN Y F. CW dual wavelength operation of a diode end pumped Nd: YVO<sub>4</sub> laser[J]. Appl Phys ( B ), 2000, 70(4): 475-478.
- [2] 王加贤, 吕凤萍, 苏娅菲. 双调 Q 复合腔 Nd: YAG/Cr<sup>4+</sup>: YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 399-402.
- [3] 王加贤. 双波长输出的 Nd: YAG/Cr<sup>4+</sup>: YAG 激光器的腔设计与参数选择[J]. 激光杂志, 2002, 23(5): 14-15.
- [4] CHEN Y F, TSAI S W, WANG S C, et al. Efficient generation of continuous wave yellow light by single pass sum frequency mixing of a diode pumped Nd: YVO<sub>4</sub> dual wavelength laser with periodically poled lithium niobate[J]. Optics Letters, 2002, 27(20): 1809-1811.
- [5] CHEN Y F, TSAI S W. Diode pumped Q switched Nd: YVO<sub>4</sub> yellow laser with intracavity sum frequency mixing [J]. Optics Letters, 2002, 27(6): 397-399.
- [6] 卜轶坤, 郑 权, 薛庆华, 等. LD 泵浦 Nd: YVO<sub>4</sub>/LBO 腔内和频连续黄光激光器[J]. 光子学报, 2005, 34(6): 801-804.
- [7] LU Yan-fei, ZHANG Xi-he, YAO Zhi-hai, et al. 1.1 W continuous wave orange yellow light Nd: YVO<sub>4</sub> laser with intracavity sum frequency generation[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(5): 736-739.
- [8] TUCKER A W, BIRNBAUM M, FINCHER C L, et al. Stimulated emission cross section at 1 064 and 1 342 nm in Nd: YVO<sub>4</sub>[J]. J Appl Phys, 1977, 48(12): 4907-4911.

## Intracavity Sum-Frequency Mixing of LD End Pumped Nd: YVO<sub>4</sub> Laser with Three Mirrors Cavity Technology

XIONG Gang-qiang, WANG Jia-xian,  
ZHANG Jun-cheng, SU Pei-lin

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

**Abstract:** The intracavity sum frequency mixing of a laser diode (LD) end pumped Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP laser with three mirrors compound cavity was researched. The relationships of the cavity lengths and transmissivities of two cavity branches was numerically calculated under the conditions that 1 064 nm and 1 342 nm lasers emission respectively possessed the same oscillation threshold and the equal dual wavelength photon densities. According to the theoretical calculations the power output of the yellow laser was experimentally compared in the two circumstances. When the pump power was 12 W, 410 mW and 340 mW power of the yellow laser was obtained and the conversion efficiency for light to light were 3. 4% and 2. 8% respectively. The results showed that the use of the equal dual wavelength photon densities was more effective.

**Keywords:** laser diode; pump; Nd: YVO<sub>4</sub> laser; three mirror cavity; intracavity sum frequency mixing

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 吴逢铁)