

文章编号: 1000-5013(2010)02-0153-04

# LD 抽运 Nd: YAG 复合腔双波长激光器

韩磊, 王加贤, 张峻诚, 熊刚强

( 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021 )

摘要: 研究激光二极管(LD)端面抽运的 Nd: YAG 三镜复合腔激光器的 1 064, 946 nm 双波长激光连续运转. 在满足双波长激光振荡阈值相等的条件下, 考虑 Nd: YAG 晶体的热透镜效应, 数值计算 1 064, 946 nm 两个子腔的腔长、输出镜透过率之间的关系. 结果表明, 当 Nd: YAG 晶体中抽运光, 1 064, 946 nm 激光的光束半径达到合理匹配时, 两个子腔的输出镜透过率之间有确定的关系. 选取合适的复合腔结构参数, 当抽运功率为 9 W 时, 可同时获得 1.1 W 的 1 064 nm 激光, 以及 500 mW 的 946 nm 激光输出.

关键词: 双波长激光; Nd: YAG 激光器; 复合腔结构; 热透镜效应

中图分类号: TN 248.1+3

文献标识码: A

双波长激光在激光遥感遥测、激光雷达、光谱分析、光电对抗, 以及非线性光学频率变换等领域都有重要的应用<sup>[1-2]</sup>. Bethea<sup>[3]</sup> 使用闪光灯抽运 Nd: YAG 晶体, 首次观察到 1 060, 1 318 nm 的双波长激光同时振荡. Farley 等<sup>[4]</sup> 实现 Nd: YAG 激光器在 1 060, 1 320 nm 的双波长同时运转, 并通过腔内和频获得 589 nm 的黄光输出. 上述双波长激光器都是通过灯抽运来实现, 体积大、效率低. 近年来, 激光二极管(LD)抽运的全固体激光器因其结构紧凑、整体效率高、寿命长等特点获得广泛应用. 固体激光材料 Nd: YAG 的 3 条发射谱线中, 946 nm 谱线属于准三能级结构, 增益较低, 阈值较高, 不易获得激光输出; 而 1 064, 1 319 nm 同属于四能级结构, 较易获得激光输出<sup>[5-6]</sup>. 本文采用 LD 端面抽运 Nd: YAG, 合理地选择了谐振腔有关参数, 实现了 1 064, 946 nm 双波长激光输出.

## 1 实验装置

双波长 Nd: YAG 激光器实验装置, 如图 1 所示. 采用光纤耦合半导体激光器作为抽运源, 最大输出功率 12 W, 输出耦合光纤的芯径 600  $\mu\text{m}$ , 数值孔径  $N_A = 0.22$ , 抽运光经过准直和聚焦透镜后耦合效率约为 90%. LD 在 25  $^{\circ}\text{C}$  时发射中心波长(808 $\pm$ 3) nm 激光, 用恒温冷却水循环装置进行温度控制, 以保证 LD 发射中心波长与 Nd: YAG 的吸收峰匹配.

Nd: YAG 晶体尺寸为 4 mm $\times$ 4 mm $\times$ 3 mm, 通光长度为 3 mm, Nd<sup>3+</sup> 质量分数为 1.0%, 两通光面均匀镀上 808, 1 064, 946 nm 增透膜, 晶体用钼箔包紧并用微通道热沉通水冷却. 输入凹面镜  $M_1$  的曲率半径 100 cm, 镀 808 nm 增透膜和 1 064, 946 nm 高反膜, 晶体端面到腔镜  $M_1$  的距离为 1 cm; 腔镜  $M_2$  和  $M_3$  均为平面镜,  $M_1$  与  $M_2$  构成 946 nm 子腔,  $M_1$  与  $M_3$  构成 1 064 nm 子腔; 而  $M_2$  镀上 1 064 nm 增透膜, 对 946 nm 的透过率( $T_1$ )为 5%;  $M_3$  镀 946 nm 增透膜, 对 1 064 nm 的透过率  $T_2$  根据计算结果选取.  $M_1$  到  $M_2$  的距离  $l_1$  固定为 3.5 cm, 而  $M_1$  到  $M_3$  的距离  $l_2$  可以根据实验的具体需要进行调节.

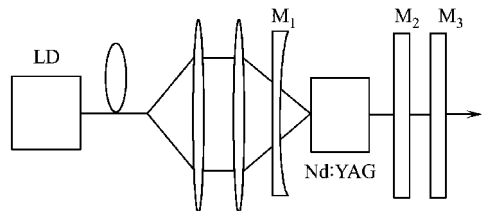


图 1 双波长输出的 Nd: YAG 激光器

Fig. 1 Nd: YAG laser of dual-wavelength output

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(2009J01291)

2 理论分析

2.1 两个子腔透过率的关系

Nd: YAG 晶体中  $\text{Nd}^{3+} \text{ } ^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  跃迁发射 1 064 nm 谱线,  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$  跃迁发射 946 nm 谱线, 受激发射截面之比约为 6.5<sup>[7]</sup>, 高于  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$  (1 064 nm) 和  $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$  (1 319 nm) 受激发射截面之比的 5.1<sup>[8]</sup>. 受激发射截面之比愈高, 愈难实现双波长振荡, 所以, 1 064, 946 nm 双波长振荡的实验条件要比 1 064, 1 342 nm 双波长振荡困难.

对于 LD 抽运 Nd: YAG 激光器, 946 nm 激光的振荡阈值<sup>[9]</sup> 为

$$P_{th,1} = \frac{\pi h \nu_p}{4 \alpha_1 \eta_p (f_a + f_c) \tau} \times \frac{2 \omega_p^2}{1 - \exp(-2 \omega_p^2 / \omega_1^2)} \times (-\ln R_1 + \delta + \delta_{0,1}). \tag{1}$$

它对应  $\lambda = 946 \text{ nm}$  的相应参量.  $h \nu_p$  为抽运光子能量, 受激发射截面  $\sigma_1 = 4.0 \text{ pm}^2$ ;  $\eta_p$  为抽运量子效率;  $f_a, f_c$  分别为 946 nm 激光上、下能级粒子数占总粒子数的比例;  $\tau$  为激光上能级寿命;  $\omega_p(z)$  为晶体中的抽运光光束半径;  $\omega_1$  为 946 nm 激光在晶体中间的光束半径;  $R_1$  为  $M_1$  镜对  $\lambda$  波长激光的反射率;  $\delta$  为透射以外的其他所有损耗;  $\delta_{0,1} = 2 f_1 \alpha_1 N_0 l$ , 其中  $f_1$  为 946 nm 激光下能级粒子数占总粒子数的比例,  $N_0$  为晶体的掺杂浓度,  $l$  为晶体长度.

1 064 nm 激光的振荡阈值为<sup>[9]</sup>

$$P_{th,2} = \frac{\pi h \nu_p}{4 \alpha_2 \eta_p f_b \tau} \times \frac{2 \omega_p^2}{1 - \exp(-2 \omega_p^2 / \omega_2^2)} \times (-\ln R_2 + \delta_2). \tag{2}$$

它对应  $\lambda_2 = 1\,064 \text{ nm}$  的相应参量.  $\sigma_2$  为受激发射截面;  $\sigma_1 = 1.2 \text{ pm}^2$ ;  $f_b$  为 1 064 nm 激光上能级粒子数占总粒子数的比例;  $\omega_2$  为 1 064 nm 激光在晶体中间的光束半径;  $R_2$  为  $M_3$  镜对  $\lambda$  波长激光的反射率;  $\delta$  为透射以外的其它所有损耗, 其它符号的意义与式(1)相同.

由两条激光谱线振荡阈值相等条件  $P_{th,1} = P_{th,2}$ , 可以得到

$$-\ln R_2 + \delta_2 = \beta \times (-\ln R_1 + \delta + \delta_{0,1}). \tag{3}$$

式(3)中:  $\beta = \frac{\sigma_2 f_b}{\alpha_1 (f_a + f_c)} \times \frac{1 - \exp(-2 q^2)}{1 - \exp(-2 q^2 k^2)}$ ,  $\omega_p^2(z) = \omega_{p,0}^2 \left\{ 1 + \left[ \frac{\lambda_p M_p^2}{n \pi \omega_{p,0}} (z - z_0) \right]^2 \right\}$ . 其中:  $q = \omega_p / \omega_2$  为抽运光与 1 064 nm 激光在晶体中间的光束半径之比,  $k = \omega_2 / \omega_1$  为 1 064 nm 与 946 nm 激光在晶体中间的光束半径之比,  $\omega_{p,0} = 0.038 \text{ cm}$  为抽运光腰半径,  $\lambda_p = 808 \text{ nm}$  为抽运光波长,  $M_p^2 = 310$  为抽运光质量因子,  $z_0 = 23 \text{ mm}$  为抽运光焦平面与聚焦透镜之间的距离.

取上述有关参数, 并将  $f_a = 0.5, f_b = 0.5, f_c = 0.055, \delta_{0,1} = 0.014, \delta = 1\%, \delta_2 = 5\%$  代入式(3), 可计算 2 组和 4 组不同  $q, k$  的参数值, 并且在满足双波长振荡阈值相等条件时,  $M_3$  对 1 064 nm 的透过率  $T_2 = 1 - R_2$  和  $M_2$  对 946 nm 透过率  $T_1 = 1 - R_1$  之间的关系. 透过率  $T_2$  与  $T_1$  的关系, 如图 2 所示.

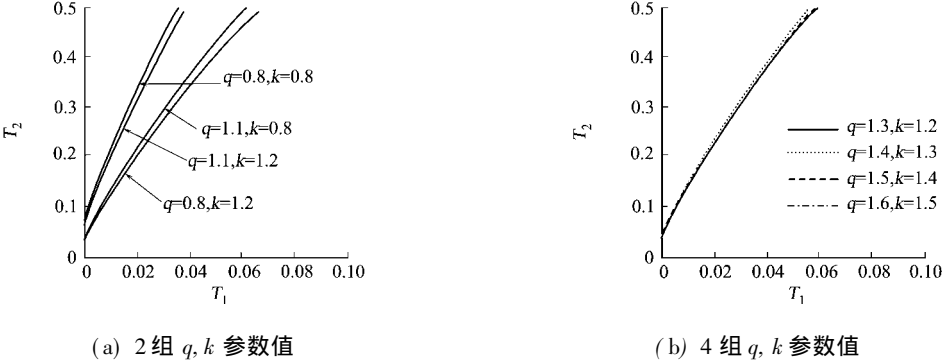


图 2 透过率  $T_2$  和  $T_1$  之间的关系

Fig. 2 Relationship between transmissivity  $T_2$  and  $T_1$

从图 2(a) 可以看出, 如果  $T_1$  保持不变,  $k$  减小,  $T_2$  则要增大,  $q$  的变化也会影响  $T_2$  的变化. 即透过率  $T_2$  和  $T_1$  的关系对于  $q$  和  $k$  的变化很敏感. 实验中, 先固定  $T_1$  的值, 再根据数值计算选择合适的

$T_2$ . 但是如果  $q$  和  $k$  的值变化,  $T_2$  就达不到最佳化. 然而, 若能满足  $\frac{1 - \exp(-2 q^2)}{1 - \exp(-2 q^2 k^2)} \approx 1$ ,  $\beta = \frac{\sigma_2 f_b}{\alpha_1 (f_a + f_c)}$

的条件,  $T_2$  和  $T_1$  的关系将不随  $q$  和  $k$  的变化而变化, 而满足该条件, 就必须选取合适的  $q$  和  $k$  的值.

由图 2(b) 可见, 3 条曲线几乎完全重合. 这表明, 只要使  $q \geq 1.3, k \geq 1.2$ , 透过率  $T_2$  与  $T_1$  的关系几乎不受  $q$  和  $k$  变化的影响. 在满足此条件的情况下, 当选取  $T_1 = 5\%$  时,  $T_2 = 40\%$ .

### 2.2 两个子腔腔长的关系

要满足  $q \geq 1.3, k \geq 1.2$ , 则对晶体中心间处的激光光束半径  $\omega_1, \omega_2$  就得有一定要求. 激光光束半径  $\omega_1, \omega_2$  与腔长  $l_1, l_2$ , 输入镜曲率半径  $r$  的关系为

$$\omega_i = \left[ \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{l_i(r - l_i) + (l_i - d_0)^2}{\sqrt{l_i(r - l_i)}} \right]^{1/2}. \quad (4)$$

把 946 nm 子腔腔长  $l_1 = 3.5$  cm 代入式 (4), 可得  $\omega_1 = 338.5 \mu\text{m}$ . 1 064 nm 光束半径  $\omega_2$  与其子腔腔长  $l_2$  的关系, 如图 3 所示. 从图 3 可以看出, 选取适当的 1 064 nm 子腔腔长  $l_2$ , 能够满足条件  $q \geq 1.3, k \geq 1.2$ . 通过计算可知, 同时满足  $q \geq 1.3, k \geq 1.2$ , 则  $286.2 \mu\text{m} \leq \omega_2 \leq 293.2 \mu\text{m}, 5.6 \text{ cm} \leq l_2 \leq 6.1 \text{ cm}$ .

### 2.3 热透镜效应的影响

根据分析, 选取复合腔两个子腔合适的腔长和透过率, 可以达到双波长振荡阈值相等条件. 在 LD 纵向抽运激光器中, 必须考虑晶体的热透镜效应. 根据稳态热传导方程<sup>[10]</sup>, 可得到 Nd: YAG 晶体的热透镜焦距为

$$f = \frac{\pi k_c \omega_{\text{ba}}^2}{P_{\text{ph}} (dn/dt)} \left[ \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right], \quad (5)$$

$$\omega_{\text{ba}} = \left[ \int_{z_0 - l/2}^{z_0 + l/2} \exp(-\alpha z) \omega_{\text{p}}(z) dz \right] / \left[ \int_{z_0 - l/2}^{z_0 + l/2} \exp(-\alpha z) dz \right]. \quad (6)$$

其中:  $\omega_{\text{p}}(z)$  由式 (3) 给出;  $P_{\text{ph}} = (1 - \lambda_p/\lambda) P_{\text{in}}$  为吸收的抽运功率中转化为热量的部分;  $P_{\text{in}}$  为抽运光功率; 热导率  $k_c$  为  $5.1 \text{ W} \cdot (\text{K} \cdot \text{m})^{-1}$ ; 折射率温度系数  $dn/dt$  为  $8.5 \mu\text{K}^{-1}$ ;  $\omega_{\text{ba}}$  为晶体内平均抽运光束半径; 晶体的折射率  $n$  为 2.165; 晶体的长度  $l$  为 3 mm; 晶体对抽运光的吸收系数  $\alpha$  为  $10 \text{ cm}^{-1}$ , 其他参量不变.

取  $l_1 = 3.5 \text{ cm}, l_2 = 6 \text{ cm}$ , 考虑晶体热透镜焦距, 采用等效  $G$  参量法<sup>[11]</sup>, 求出晶体中心的激光光束半径与抽运功率的关系, 如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 随着抽运功率的增加, 1 064, 946 nm 激光的光束半径均有所变化. 当  $2 \text{ W} \leq P_{\text{in}} \leq 10 \text{ W}$  时,  $q \geq 1.3, k = \omega_2/\omega_1 \geq 1.2$  的条件仍得到满足; 但是当抽运功率大于 10 W 时, 1 064 nm 激光的谐振腔由稳定腔变为非稳腔, 而 946 nm 子腔在抽运功率小于 20 W 时仍能保持为稳定腔. 由此可见, 考虑晶体的热透镜效应, 只要抽运功率不超过 10 W, 此谐振腔的设计可以满足此前的要求, 即  $q \geq 1.3, k \geq 1.2$ .

## 3 实验结果

输出总功率和 1 064, 946 nm 激光功率与抽运功率的关系, 如图 5 所示. 图 5 参数:  $T_1 = 5\%, T_2 = 40\%, l_1 = 3.5 \text{ cm}, l_2 = 6 \text{ cm}$ , 激光器输出功率用 Molelectron Detector 公司的功率计测量 (精度为 1 mW). 测量总功率时用滤光片滤去 808 nm 抽运光; 测量 946 nm 激光功率时, 再用滤光片滤去 1 064 nm 激光. 当抽运功率为 9 W 时, 同时获得最大的 1.1 W 的 1 064 nm 和 500 mW 的 946 nm 双波长激光输出.

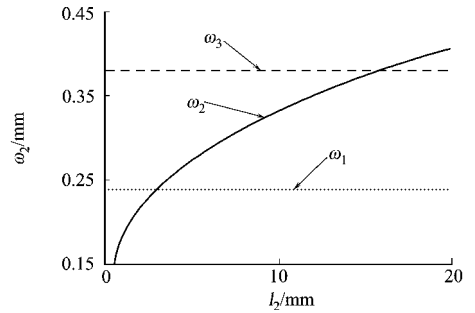


图 3 1 064 nm 光束半径与腔长的关系  
Fig. 3 Relationship between the beam radius in 1.064 nm and cavity length

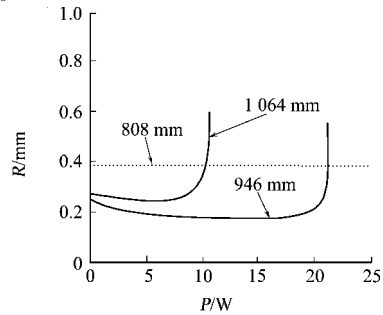


图 4 光束半径与抽运功率的关系  
Fig. 4 Relationship between the beam radius and pump power

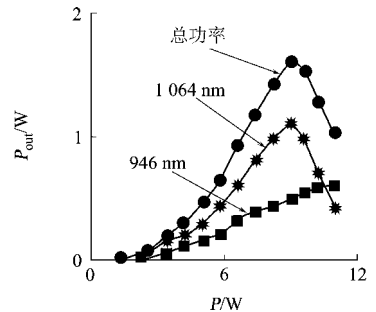


图 5 输出功率与抽运功率的关系  
Fig. 5 Relationship between the output and input power

从图 5 可以看出,当抽运功率超过 10 W 时,由于热透镜效应的影响,输出功率迅速下降.

4 结 束 语

采用双波长运转振荡阈值相等条件,对 LD 抽运的复合腔 Nd: YAG 激光器的腔结构和参数进行数值计算和理论分析,合理配置了两个支腔腔长和耦合输出镜的透过率.三镜复合腔结构是获得同功率双波长输出的有效方法,适合于激光和频.可应用于激光加工、激光演示和激光医疗等领域.

参考文献:

[ 1 ] 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.

[ 2 ] MORGAN R A,HOPF F A,PEYGHAMBARIAN N. Dual-frequency Nd: YAG laser for the study and application of nonlinear optical crystals[ J ]. Opt Eng,1987,26(12):1240-1244.

[ 3 ] BETHEA C G. Megawatt power at 1.318 μm in Nd: YAG and simultaneous oscillation at both 1.06 μm and 1.318 μm[ J ]. IEEE J Quantum Electronics,1973,9(2):254-258.

[ 4 ] FARLEY R W,DAO P D. Development of an intracavity-summed multiple-wavelength Nd: YAG laser for a rugged, solid-state sodium lidar system[ J ]. Appl Opt,1995,34(21):4269-4273.

[ 5 ] 张强,姚建铨,温伍麒,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.

[ 6 ] 周成,叶子青,郑权,等.半导体泵浦全固体蓝光激光器的研究进展[ J ].光学精密工程,2002,10(3):295-299.

[ 7 ] 吕百达.固体激光器件[ M ].北京:北京邮电大学出版社,2001.45.

[ 8 ] SHEN H Y,ZENG R R,ZHOU Y P, et al. Comparison of simultaneous multiple wavelength laseing in various neodymium host crystals at transitions from and [ J ]. Appl Phys Lett,1990,56(20):1937-1938.

[ 9 ] 元岩,卜轶坤,郑权,等.LD 泵浦腔内和频连续 500.8 nm Nd: YAG/LBO 激光器[ J ].激光与红外,2004,36(6):436-438.

[ 10 ] INNOCENZI M E,YURA H T,FINCHER C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers[ J ]. Appl Phys Lett,1990,56(19):1831-1833.

[ 11 ] 吕百达.激光光学[ M ].3 版,北京:高等教育出版社,2002:268-271.

Research on the LD Pumping Nd: YAG Laser with  
Compound Cavity and Dual-Wavelength Output

HAN Lei, WANG Jia-xian,  
ZHANG Jun-cheng, XIONG Gang-qiang

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

**Abstract:** The CW operation of a LD end-pumping Nd: YAG laser with three-mirror compound-cavity and 1 064 nm and 946 nm dual-wavelength laser output was investigated. Taking into account the thermal-lens effect of Nd: YAG crystal, the relations of cavity length and output coupler transmissivity of 1 064 nm cavity branch and that of 946 nm cavity branch was numerically calculated under the condition that the dual-wavelength laser oscillation threshold is equal. It is found that the output mirror transmissivity of the two cavities keep a certain relation when the beam radii of pump laser, 1 064 nm laser and 946 nm laser in the Nd: YAG crystal are well matched. By selecting certain structure parameters of the compound resonator, the output power of 1.1 W at 1 064 nm laser and 500 mW at 946 nm laser was obtained respectively when the pump power is 9 W.

**Keywords:** dual-wavelength laser; Nd: YAG laser; compound resonator structure; thermal-lens effect

( 责任编辑: 鲁斌 英文审校: 吴逢铁)