

文章编号: 1000-5013(2009) 04 0389- 05

LD 抽运 Nd: YVO₄ 双波长激光器的输出特性

张峻诚, 王加贤, 苏培林, 熊刚强, 王娟娟

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 在满足双波长激光振荡阈值相等的条件下, 分析和数值计算抽运光、双波长(1. 34, 1. 06 μm) 振荡激光光束半径的相对大小, 以及其对两个子腔输出镜透过率关系的影响. 研究发现, 当抽运光、两种波长激光的光束半径之比达到一定值时, 两个子腔输出镜透过率之间的最佳关系不随腔内光束半径的变化而变化. 在考虑 Nd: YVO₄ 晶体的热透镜效应情况下, 可合理地选择 2 个子腔腔长来实现双波长(1. 34, 1. 06 μm) 激光相同的振荡阈值. 实验结果表明, 抽运功率较小(小于 11 W) 时, 输出的 1. 06 μm 激光功率大于 1. 34 μm 激光功率; 抽运功率较大时(大于 11 W) , 1. 34 μm 激光功率超过 1. 06 μm 激光功率; 当抽运功率等于 11 W 时, 1. 34 μm 和 1. 06 μm 激光功率均为 0. 675 W.

关键词: LD 抽运; Nd: YVO₄ 激光器; 复合腔; 双波长激光; 热透镜效应

中图分类号: TN 248. 1 文献标识码: A

双波长固体激光器可应用于激光医学、激光雷达、激光光谱学、非线性频率变换等领域, 引起国内外的研究兴趣^[1-6]. 1990 年, 沈鸿元等^[7]对 Nd³⁺ 为激活离子的各种晶体的多波长振荡条件进行了分析, 得出在连续灯泵条件下, 只能在 Nd: YAP 中实现双波长(1. 08, 1. 34 μm) 的输出. Nd: YVO₄ 主要有 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$, $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{11/2}$ 和 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 发射谱线, 对应的波长分别为 1. 34, 1. 06, 0. 91 μm. 其中, 1. 34 μm 和 1. 06 μm 谱线属于四能级结构, 是比较理想的双波长振荡激光晶体. 2000 年, Chen^[8] 首先报道了采用 LD 抽运 Nd: YVO₄ 获得 1. 34 μm 和 1. 06 μm 连续双波长激光输出, 并且对二镜腔和三镜腔结构进行了对比. 文[8] 的研究发现, 三镜腔更易获得双波长输出, 但并未考虑抽运光光束半径及晶体的热透镜效应对双波长输出的影响. 在此基础上, 本文分析和数值计算了三镜腔中抽运光、两种波长振荡激光光束半径的相对大小, 以及其对两个子腔输出镜透过率之间关系的影响.

1 实验装置

实验装置如图 1 所示. 采用中科院上海光机所生产的光纤耦合半导体激光器(LD) 作为抽运源, 其最大输出功率为 15 W, 输出耦合光纤的芯径为 600 μm, 数值孔径为 0. 22. 抽运激光经过准直和聚焦透镜后耦合效率约为 90%, 在 25 ℃ 时, LD 发射中心波长为(808 ± 3) nm 的激光. 用恒温冷却水循环装置进行温度控制, 可有效保证发射中心波长与 Nd: YVO₄ 的吸收峰匹配.

输入镜 M₁ 的曲率半径为 50 cm, 镀上 808 nm 的高透膜和 1. 06, 1. 34 μm 的高反膜. Nd: YVO₄ 晶体进行 a 轴切割, 尺寸为 4 mm × 4 mm × 8 mm. Nd 离子掺杂质量浓度为 0. 5%, 两通光面均镀上 808 nm, 1. 06 μm 和 1. 34 μm 高透膜. 晶体到腔镜 M₁ 的距离为 1 cm, Nd: YVO₄ 晶体用铝箔包紧并用微通道热沉通水冷却. 腔镜 M₂ 和 M₃ 均为平面镜, M₂ 镀 1. 06 μm 的高透膜, 对 1. 34 μm 的透过率(T₁) 为

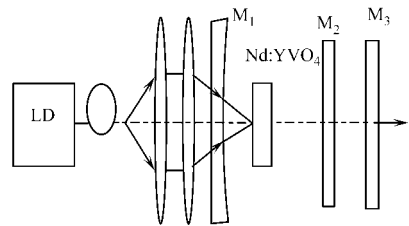


图 1 双波长输出的 Nd: YVO₄ 激光器

Fig. 1 Nd: YVO₄ dual wavelength laser

收稿日期: 2008-03-12

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); 国务院侨办科研基金资助项目(05QJR11)

8%; M_3 镀 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 高透膜, 对 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的透过率为 T_2 . M_1 到 M_2 的距离 l_1 固定为 4.5 cm , M_1 到 M_3 的距离 l_2 可以根据实验的需要调节.

2 理论分析

2.1 两个子腔透过率的关系

Nd: YVO_4 晶体的 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ 和 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ 跃迁发射截面之比约为 $2^{[9]}$, 低于文[7] Nd: YAG 的 5.1 和文[10] Nd: GdVO_4 的 4.2. 发射截面越接近越易于实现双波长同时振荡, 获得高效的双波长激光输出. 对于 LD 抽运激光器, $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 两条激光谱线的振荡阈值为^[8]

$$P_{th,i} = \frac{\ln(1/R_i) + L_i}{2l\eta_p} \cdot \frac{h\nu_p}{\alpha\tau_i} \cdot \int \iiint s_i(r,z)r_p(r,z)dV)^{-1}, \quad i = 1, 2. \tag{1}$$

两条激光谱线同时振荡的条件为 $P_{th1} = P_{th2}$, 由此条件可得^[8]

$$\ln(1/R_2) + L_2 = \beta[\ln(1/R_1) + L_1], \tag{2}$$

$$\beta = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \times \int_0^l e^{-\alpha z} \frac{1 - e^{-2q^2}}{\omega_p^2(z)} dz / \int_0^l e^{-\alpha z} \frac{1 - e^{-2q^2k^2}}{\omega_p^2(z)} dz, \tag{3}$$

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

上式中, 下标 1, 2 分别对应 $\lambda = 1.34\text{ }\mu\text{m}$ 和 $\lambda = 1.06\text{ }\mu\text{m}$ 的相应参量. R_i 为输出镜对该波长的反射率; L_i 为透射以外的其他所有损耗, 根据实际情况取 $L_1 = 0.005, L_2 = 0.009$; $s_i(r, z)$ 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; 工作物质的长度 $l = 8\text{ mm}$; α 为受激发射截面, $\alpha_1 = 60\text{ pm}^2, \alpha_2 = 120\text{ pm}^{2[9]}$; 增益介质对抽运光的吸收系数 $\alpha = 0.1\text{ m}^{-1}$; 抽运光与 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光在晶体中的光束半径之比 $q = \omega_p/\omega_2$; 两种波长激光在晶体中的光束半径之比 $k = \omega_2/\omega_1$; 抽运光在工作物质中的光束半径为 $\omega_p(z)$; 抽运光腰半径 $\omega_{p,0} = 0.038\text{ cm}$; 抽运光波长 $\lambda_p = 808\text{ nm}$; 抽运光质量因子 $M_p^2 = 310$; 抽运光焦平面与聚焦透镜之间的距离 $z_0 = 2.3\text{ cm}$.

由式(2)~(4)及上面的数据, 取 2 组参数: 参量 q 分别为 0.8, 1.1, k 分别为 0.8, 1.2, 双波长同时振荡时, M_2 镜的透过率 $T_1 (T_1 = 1 - R_1)$ 和 M_3 镜的透过率 $T_2 (T_2 = 1 - R_2)$ 的关系, 如图 2(a) 所示. 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; 如果 T_2 保持不变, k 增大, T_1 则要增大; 即透过率 T_1 和 T_2 的关系对于 q 和 k 的变化很敏感.

实验中, 总是先固定 T_1 的值, 再根据数值计算选择合适的透过率 T_2 . 但是, 如果 q 和 k 的值在激光器运转中变化, T_2 就达不到最佳化. 然而, 若能满足条件为

$$\int_0^l e^{-\alpha z} \frac{1 - e^{-2q^2}}{\omega_p^2(z)} dz / \int_0^l e^{-\alpha z} \frac{1 - e^{-2q^2k^2}}{\omega_p^2(z)} dz \approx 1, \quad \beta \approx \alpha_2/\alpha_1, \tag{5}$$

则 T_1 和 T_2 的关系将不随 q 和 k 的变化而变化.

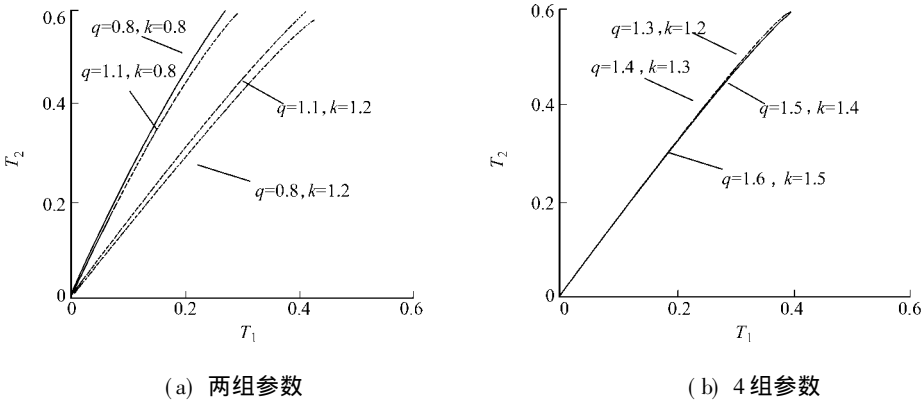


图 2 透过率 T_1 和 T_2 之间的关系

Fig. 2 Relationship between the transmittances T_1 and T_2

另取 4 组参数: 参量 q 分别为 1.3, 1.4, 1.5, 1.6; k 分别为 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 计算 T_1 与 T_2 的关

系, 如图 2(b) 所示. 从图 2(b) 可发现, 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_1 与 T_2 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, 选取 $T_1 = 8\%, T_2 = 24.6\%$.

2.2 谐振腔的设计

若要满足条件 $q \geq 1.3, k \geq 1.2$, 则需合理地设计谐振腔的参数. 考虑晶体的热透镜效应, 根据稳态热传导方程, 可得到热透镜焦距^[11] 为

$$f = \frac{\pi k_c \omega_{p,a}^2}{P_{p,h} (dn/dt)} \left(\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right), \tag{6}$$

$$\omega_{p,a} = \int \int_{z_0 - l/2}^{z_0 + l/2} e^{-\alpha z} \omega_p(z) dz / \int \int_{z_0 - l/2}^{z_0 + l/2} e^{-\alpha z} dz, \tag{7}$$

$$\omega_p^2(z) = \omega_{p,0}^2 \left\{ 1 + \left[\frac{\lambda_p M_p^2}{n \pi \omega_{p,0}^2} (z - z_0) \right]^2 \right\}. \tag{8}$$

上式中, $P_{p,h}$ 为吸收的抽运功率中转化为热量的部分, $P_{p,h} = (1 - \lambda_p/\lambda) P_{in}$; λ_p 为抽运光波长, λ 为激光波长, P_{in} 为抽运光功率, K_c 是热导率, $\omega_{p,a}$ 为晶体内平均抽运光束半径, $\omega_p(z)$ 为抽运光在晶体中的激光光束半径, $\omega_{p,0}$ 为抽运光腰斑半径, n 是工作物质的折射率, dn/dt 是折射率温度系数 α 轴切割, Nd 离子掺杂质量浓度为 0.5% 的 Nd: YVO₄ 的 $K_c = 5.1 \text{ (m} \cdot \text{K)}^{-1}$, $n = 2.165$, $dn/dt = 8.5 \text{ MK}^{-1}$ [12].

取 $l_2 = 12 \text{ cm}$, 计算出的晶体热透镜焦距与抽运功率及波长的关系, 如图 3 所示. 焦距随着抽运功率的增大而减小, 在小于 10 W 的抽运功率下, 热透镜焦距迅速减小. 热透镜焦距的减小, 将会影响到谐振腔的稳定性和激光光束半径的大小.

采用等效 G 参量法^[13] 可以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. 在小于 10 W 的抽运功率下, $q = \omega_p/\omega \geq 1.45$. 随着抽运功率的增加, $1.06 \text{ }\mu\text{m}$ 激光光束半径与 $1.34 \text{ }\mu\text{m}$ 激光光束半径的比值逐渐变大. 当 $2 \text{ W} \leq P_{in} \leq 10 \text{ W}$ 时, $1.2 \leq k = \omega_2/\omega_1 \leq 2$; 当抽运功率大于 10 W 时, $1.06 \text{ }\mu\text{m}$ 激光的谐振腔由稳定腔变为非稳腔, 而 $1.34 \text{ }\mu\text{m}$ 激光的光束半径在 10~20 W 范围内基本不变. 由此可见, 谐振腔的设计完全满足设计要求, 即 $q \geq 1.3, k \geq 1.2$.

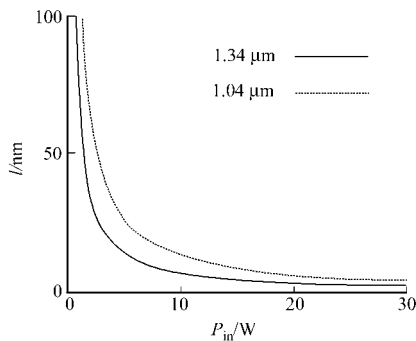


图 3 热透镜焦距与抽运功率的关系
Fig. 3 The thermal focal length as a function of the incident pump power

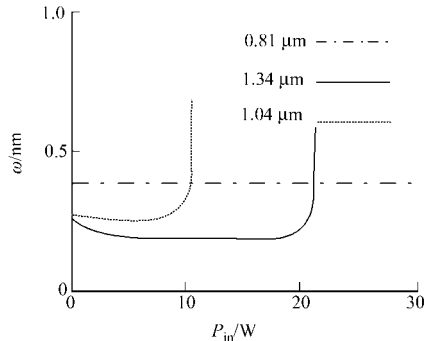


图 4 光束半径与抽运功率的关系
Fig. 4 The laser radius as a function of the incident pump power

3 实验结果与分析

用 WGD-300A 型多波段光栅单色仪测量输出波长, 入口正对激光器的输出端, 而在其出口处放置一功率计, 实验时转动光栅单色仪鼓轮. 激光器输出功率用功率计测量(精度为 1 mW), 当功率计(美国 Molelectron Detector 公司)检测到信号功率时, 通过所读出的鼓轮读数即可得出波长值, 由此得到激光器的输出波长为 1.06, 1.34 μm .

取 1.34 μm 激光振荡的子腔腔长 $l_1 = 4.5 \text{ cm}$, 1.06 μm 激光振荡的子腔腔长 $l_2 = 12 \text{ cm}$, 此时满足阈值相等条件, 阈值功率大约在 3.9 W. 此时, 输出功率与抽运功率的关系, 如图 5(a) 所示. 由图 5(a) 可知, 抽运功率小于 11 W 时, 由于 1.06 μm 激光的光束半径大于 1.34 μm 激光的光束半径, 而且均小于 808 nm 抽运光光束半径, 以及 1.06 μm 激光发射截面比 1.34 μm 激光发射截面大, 所以 1.06 μm 激光的功率大于 1.34 μm 激光的功率. 当抽运功率超过 11 W 时, 1.06 μm 激光的功率迅速下降, 1.34 μm

激光功率迅速增大. 这是由于随着抽运功率的增大, 晶体的热透镜焦距变小, $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光的谐振腔由稳定腔变为非稳腔, 其光束半径迅速增大, 远远大于抽运光的光束半径, 基模运转损耗增大; 而 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 激光的光束半径在抽运功率 $10\sim 20\text{ W}$ 范围内基本不变, 所以, 其输出功率随着抽运功率的增加而增加. 当抽运功率为 11 W 时, 总输出功率为 1.35 W , 此时两波长输出功率相等, 均为 0.675 W ; 继续增大抽运功率, $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光功率迅速下降到零, 只有 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 激光输出.

当 $l_2=9\text{ cm}$ 时, 双波长振荡输出功率与抽运功率的关系, 如图 5(b) 所示. 此时, 不满足两种波长激光振荡阈值相等的条件, 即 $P_{th,1}>P_{th,2}$. 从图 5(b) 可以看出, 当抽运功率为 10 W 时, 输出总功率为 1.7 W , $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光功率为 1.3 W ; 继续增大抽运功率, $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光输出功率近似线性增加. 对比图 5(a), 可以发现此情况下总功率和 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光功率均变大, 但 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 激光功率变小, 未能达到双波长同功率输出.

当 $l_2=14\text{ cm}$ 时, 双波长振荡输出功率与抽运功率的关系, 如图 5(c) 所示. 此时, $P_{th,1}<P_{th,2}$, $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 激光优先振荡. 当抽运功率增加到 10 W 时, $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光功率迅速下降到零, $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 激光功率上升到 1.1 W ; 当抽运功率为 9.2 W 时, 达到双波长同功率输出, 输出的双波长总功率为 0.7 W . 在 $l_2=14\text{ cm}$ 时虽能实现同功率双波长输出, 但 2 种波长激光的输出功率(0.35 W) 低于 $l_2=12\text{ cm}$ 时的输出功率(0.675 W). 由此可见, 当破坏双波长激光同时振荡条件时, 先达到振荡阈值的激光在反转粒子数增益竞争中占据优势. 这种情况下不容易达到同功率双波长输出, 即使达到同功率双波长输出, 输出功率也非常低.

当抽运功率为 11 W 时, 分别对 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 激光的稳定性进行测试, 每间隔 1 min 从功率计读出功率, 由此求出 10 min 内功率稳定度. 经计算, 输出的稳定度(均方根) 分别为 1.4% 和 1.5% , 由于双波长激光之间存在着增益竞争, 所以稳定度很难优于 1% .

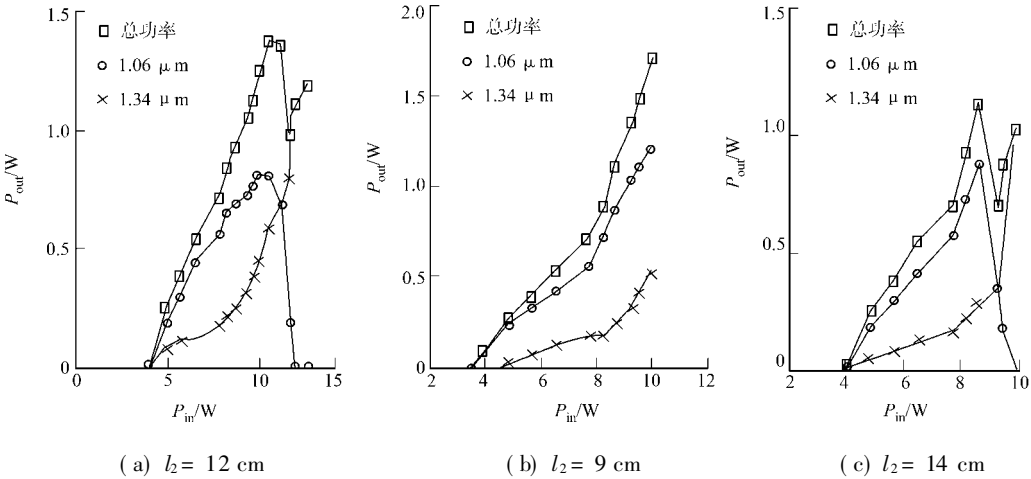


图 5 双波长振荡的输出功率与抽运功率的关系

Fig. 5 Output power vs pump power under dual wavelength oscillation

4 结 束 语

在 LD 端面抽运三镜复合腔 Nd:YVO₄ 激光器中, 当抽运光、 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 激光的光束半径之比达到一定值时, 可以合理地选择 2 个子腔的输出镜透过率, 使之满足双波长振荡阈值相等的条件. 在考虑 Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应情况下, 通过数值计算得到了 2 个子腔腔长和输出镜透过率的较佳参数. 采用这些参数, 当抽运光的功率为 11 W 时, 激光器输出的总功率为 1.35 W , 其中 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1.34\text{ }\mu\text{m}$ 激光功率均为 0.675 W , 达到双波长激光相同功率输出. 实验结果表明, 三镜复合腔结构是获得同功率双波长输出的有效方法, 特别适合于激光和频.

参 考 文 献:

[1] 王加贤, 吕凤萍, 苏娅菲. 双调 Q 复合腔 Nd:YAG:Cr³⁺:YAG 激光器的研究[J]. 中国激光, 2004, 31(4): 399.

402.

[2] 王加贤. 双波长输出的 Nd: YAG/ Cr⁴⁺ : YAG 激光器的腔设计与参数选择[J]. 激光杂志, 2002, 23(5): 14- 15.

[3] 卜轶坤, 郑 权, 薛庆华, 等. LD 泵浦 Nd: YAG 946 nm/1.06 μm 双波长运转及腔内和频[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(S1): 19- 22.

[4] 王加贤. 掺 Cr⁴⁺ 离子的激光材料与器件[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2004, 25(3): 225- 230.

[5] LIN Y Y, CHEN S Y, CHIANG A C, et al. Single longitudinal mode, tunable dual wavelength, CW Nd: YVO₄ laser[J]. Opt Express, 2006, 14(12): 5329- 5334.

[6] LU Yang, ZHANG Baigang, LI Erbang, 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]. Optics Communications, 2006, 262(2): 241- 245.

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

[8] CHEN Y F. CW dual wavelength operation of a diode end pumped Nd: YVO₄ laser[J]. Appl Phys (B), 2000, 70(4): 475- 478.

[9] TUCKER A W, BIRNBAUM M, FINCHER C L, et al. Stimulated emission cross section at 1.06 μm and 1.34 μm in Nd: YVO₄[J]. J Appl Phys, 1977, 48(12): 4907- 4911.

[10] JENSEN T, OSTROUMOV V G, MEYN J P, et al. Spectroscopic characterization and laser performance of diode laser pumped Nd: GdVO₄[J]. Appl Phys (B), 1994, 58(5): 373- 379.

[11] 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.

[12] BERMUDEZ G J C, PINTO-ROBLEDO V J, KIR'YANOV A V, et al. The thermal lensing effect in a grazing incidence, diode side pumped Nd: YVO₄ laser[J]. Optics Communications, 2002, 210(1/ 2): 75- 82.

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

Research on the Output Characteristics of LD Pumped Nd: YVO₄ Dual-Wavelength Laser

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

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

Abstract: Output characteristics of a diode end pumped three mirror compound cavity Nd: YVO₄ laser at the 1.34 μm and 1.06 μm was reported. According to the threshold condition of the dual wavelength laser simultaneous oscillation, influence of the relative size of pump beam radius and oscillation beams on the transmittances of output mirrors was studied. The result reveal that the optimum relationship between the transmittances of output mirrors of two cavities don't change with intracavity beam radius when the ratio of the pump beam radius and oscillation beams are optimal. The same threshold of dual wavelength oscillation can be achieved through change the length of two cavities when the thermal lens effect of Nd: YVO₄ crystal is considered. The experimental results has shown that output power of 1.06 μm laser is more than 1.34 μm laser when pump power below 11 W, output power of 1.34 μm laser is more than 1.06 μm laser when pump power beyond 11 W, and the output power of 1.06 μm and 1.34 μm laser are all 0.675 W when pump power is 11 W.

Keywords: LD pumped; Nd: YVO₄ laser; compound resonator; dual wavelength laser; thermal lens effect

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)