

连续输出 1.60 W/473 nm 直腔蓝光激光器

刘孙丽¹, 汪玉树¹, 蔡志平^{2*}, 黄剑平², 罗正钱¹

(1. 厦门大学物理学系, 2. 厦门大学电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 报道了 LD 端面泵浦 Nd:YAG 晶体, LBO 腔内倍频 473 nm 全固态直腔蓝光激光器. 根据谐振腔稳定性理论, 利用简单的平-平腔直接测得不同泵浦功率下的热焦距值. 通过数值计算分析了不同热焦距下, Nd:YAG 与 LBO 晶体中的腰斑半径以及 LBO 中光腰的位置, 并在准三能级系统模型和倍频理论的指导下优化激光腔体结构, 使激光器实现最佳的模式匹配和倍频效率, 得到高效的蓝光激光输出. 激光阈值为 1.92 W; 当泵浦激光功率为 20.58 W 时, 473 nm 蓝光的输出功率为 1.60 W, 光-光转化效率为 7.8%.

关键词: Nd:YAG; 热焦距; 倍频效率; LBO; 蓝光

中图分类号: TN 248.1

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2007)02-0179-04

LD 泵浦的全固体激光器具有结构紧凑、光-光转换效率高、稳定性好等优点, 在激光生物医学、激光彩色显示、激光高密度数据存储、激光光谱学、激光打印、激光水下成像与通信等领域具有重要应用. 通过倍频产生 532 nm 波长的全固体绿光激光器技术已发展成熟, 大、中、小型激光器已走向市场. 而 473 nm 波长的全固体蓝光激光器由于其基频光 946 nm 波长激光属于准三能级系统跃迁, 存在严重的再吸收损耗^[1-2]与谱线竞争. 因此, 在常温下要实现高效 946 nm 或其倍频光 473 nm 激光输出非常困难. 通常情况下多采用 V 型^[3-4]或 Z 型^[5-6]折叠腔, 在水冷系统的控制下^[6-9], 实现 473 nm 的激光输出, 但折叠腔结构复杂, 较难实现; 水冷系统体积庞大, 不利于小型化.

本文采用掺 Nd³⁺ 浓度为 1.1% (原子数) Nd:YAG 激光晶体, 利用半导体致冷片 (TEC) 与简洁的风冷系统控制温度, 采用最简单的平凹线性腔结构, LBO 腔内倍频, 实现泵浦激光功率为 20.58 W 时, 473 nm 激光输出功率为 1.60 W, 为目前线性腔实现的最高功率水平; 光-光转换效率达 7.8%, 实现了简单紧凑型蓝光激光器.

1 能级分析和倍频理论

Nd:YAG 存在 3 条荧光谱线, 分别是: 1 064、1 320、946 nm. 其中 1 064、1 320 nm 谱线均属于四能级结构, 很容易实现激光运转, 经过倍频便可获得 532

nm 绿光、660 nm 红光输出, 而 946 nm 谱线属于准三能级系统, 对应⁴F_{3/2} ~ ⁴I_{9/2} 之间的跃迁实现激光运转非常困难. 能级图^[10]如图 1 所示, 激光下能级是基态的一个斯塔克分裂能级, 分裂能级上的粒子数布居服从玻尔兹曼分布率, 激光下能级与基态能级的平衡粒子数由公式 $N_1/N_0 = \exp(-E/kT)$ 决定^[11], 其中, E 为两个能级间的能量差, T 为增益介质温度, k 为玻尔兹曼常数. 可见温度越高, 下能级热粒子数分布越多, 实现粒子数反转也就越困难. 显然, 要实现 946 nm 激光运转, 必须降低增益介质的温度.

另外根据非线性倍频理论^[12], 倍频产生二次谐波

的功率为:

$$P_2 = \frac{m c_0}{2} \int_0^L |E_{02}|^2 r dr = \frac{8^2 l^2 d_{eff}^2 P_1^2 \sin^2(kl/2)}{n_1^2 m^2 c_0^2 (kl/2)^2} \quad (1)$$

因此, 二次谐波效率 为:

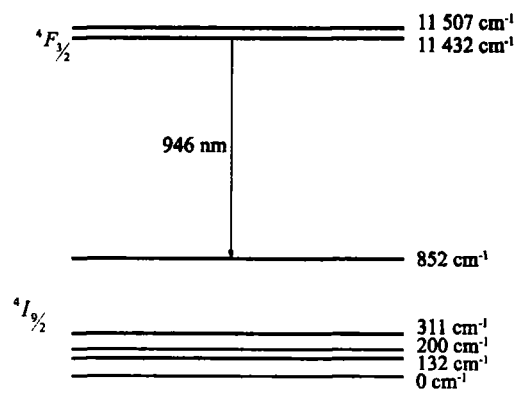


图 1 Nd:YAG 准三能级示意图
Fig. 1 Quasi-three-level diagram of Nd:YAG

收稿日期: 2006-07-11
基金项目: 福建省重大科技项目 (2002F011, 2004HZ01-1-3), 厦门大学 985 二期工程科技创新平台项目资助
* 通讯作者: zpcai@jingxian.xmu.edu.cn

$$= \frac{P_2}{P_1} = \frac{8^2 l^2 d_{eff}^2}{n_1^2 n_2^2 c^2} \frac{P_1 \sin^2(kl/2)}{(kl/2)^2} \quad (2)$$

其中 d_{eff} 为该晶体的有效非线性光学系数, l 是晶体的长度, k 为相位失配程度, n_1 、 n_2 分别为基波和二次谐波在晶体内的折射率, P_1 是基频光在晶体内的功率, c 是光速, h 普朗克常数, λ_1 为基波波长, r_0 为基波光束束腰半径. 由式(2) 可得, 要提高倍频效率必须提高倍频晶体基波的光功率密度, 同时, 尽量减小其相位失配程度. 对于 LBO 双轴晶体要实现相位匹配即 $k = 0$, 光传播的方向与晶体光轴的夹角 θ 和方位角 ϕ 必须满足方程:

$$\frac{\sin^2 \theta \cos^2 \phi}{n_x^2 - n_x^2} + \frac{\sin^2 \theta \sin^2 \phi}{n_y^2 - n_y^2} + \frac{\cos^2 \theta}{n_z^2 - n_z^2} = 0 \quad (3)$$

式中 n_x 、 n_y 、 n_z 是晶体的 3 个主折射率, 并规定 $n_x < n_y < n_z$. 对于 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 19.4^\circ$ 对腔体进行分析与设计, 使得 LBO 晶体内部的光功率密度获得最佳值, 并通过调节 LBO 晶体的位置, 使其达到最大的相位匹配.

2 热焦距的测量

热透镜效应影响着激光器几乎所有的主要方面, 如动态工作范围、模尺寸、效率以及输出光束质量等. 所以, 确定不同泵浦功率下的热焦距, 对于固体激光器的优化是极为重要的.

本文基于谐振腔稳定性理论^[13], 简单直接地测得不同泵浦功率下的热焦距值. 考虑一个内含激光介质的平行平面腔, 以 L_1 、 L_2 分别表示激光介质中心到两个腔镜的距离. 端面泵浦条件下, 激光晶体内部热聚焦作用在一级近似下可等效为一个焦距为 f_T 的理想薄透镜, 并位于激光晶体的中心. 这种处理方法对于大多数实际应用是足够精确的, 也是被广泛接受的一种方法.

根据 ABCD 传输矩阵, 可得上述谐振腔的稳定性条件为:

$$0 < \left(1 - \frac{L_1}{f_T} \right) \left(1 - \frac{L_2}{f_T} \right) < 1 \quad (4)$$

本文将激光晶体端面镀膜作为一平面腔镜, 因此 L_1 仅为 2 mm, 远小于热焦距 f_T , 所以条件式(4) 可简化为:

$$1 - \frac{L_2}{f_T} > 0 \quad (5)$$

从式(5) 可以得到如下结论: 1) 欲使上述谐振腔保持稳定, 必须满足条件 $L_2 < f_T$; 2) 当 $L_2 > f_T$ 时, 谐振腔将进入非稳区, 激光输出功率将迅速下降为零; 3) 存在一个由 $L_2 = f_T$ 所确定的临界点, 在该点上谐振腔由稳定腔变为非稳腔.

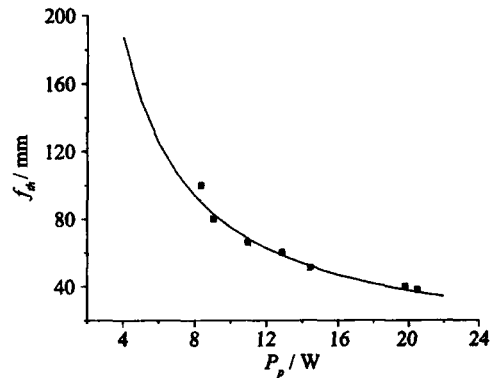


图 2 不同泵浦功率下的热焦距值

实验数据: - 理论拟合

Fig. 2 Focal length of thermal lens via different input pump power

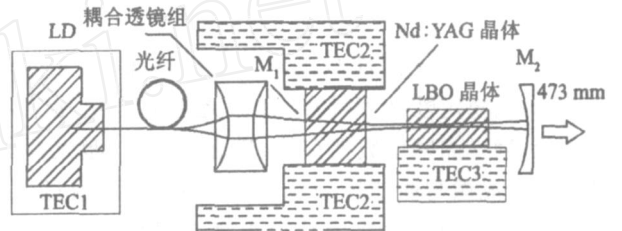


图 3 实验装置

Fig. 3 Experimental setup of 473 nm blue laser

据此可得出一种直接测量热透镜焦距的简单方法. 固定 L_2 在某一定值, 在一合适的泵浦功率下将激光器调整至最佳状态, 然后缓慢增大泵浦功率, 即增大热效应, 减小热焦距值, 达到某一泵浦功率时, 激光器将进入非稳区, 输出功率开始下降至零, 该泵浦功率下激光晶体的热焦距就等于此时的 L_2 值, 即 $f_T = L_2$.

根据此法测得温度为 5 时, 不同泵浦功率下的 Nd:YAG 的热焦距值, 如图 2 所示. 同时, 根据高斯光束端面泵浦激光晶体的热焦距公式^[11]:

$$f_{th} = \frac{K \rho^2}{P_p \left(\frac{dn}{dT} \right)} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \quad (6)$$

式中, K 为热导率, ρ 为泵浦光光腰大小, dn/dT 为折射率随温度的变化率, α 为泵浦光转化为热的效率, α 为泵浦光的吸收系数, l 为 Nd:YAG 晶体的长度. 取参量 $K = 0.13 \text{ W}/(\text{cm} \cdot \text{K})$, $\rho = 200 \mu\text{m}$, $dn/dT = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\alpha = 4.1 \text{ cm}^{-1}$, $l = 4.0 \text{ mm}$, $\eta = 0.37$. 由式(6) 可得到腔内热透镜焦距与泵浦功率的曲线, 如图 2 所示. 由图可知试验数据与理论值较为一致.

3 腔体设计及分析

实验装置如图 3 所示, 808 nm 光纤耦合激光二极管

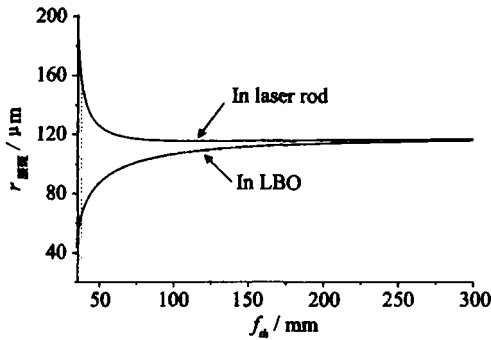


图 4 不同热焦距下 YAG 与 LBO 中的腰斑半径

Fig. 4 The laser mode and second beam waist via the focal length of thermal lens

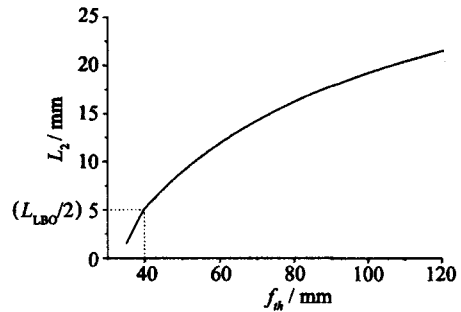


图 5 不同热焦距下光腰与输出镜的距离

Fig. 5 The distance of second beam waist and M_2 via the focal length of thermal lens

管(LD)作为泵浦源,经准直聚焦耦合系统注入 Nd YAG 激光晶体,其光斑半径为 200 μm . Nd YAG 激光晶体掺 Nd^{3+} 浓度为 1.1% (原子数),左端面晶体镀 946 和 473 nm 高反、1 342 和 1 064 和 808 nm 高透膜;另一端面镀膜为 946 和 473 nm 增透.用铝箔紧包安置在铜套中,并采用半导体致冷片(TEC)对铜套进行制冷控温.采用一类临界相位匹配的 LBO 晶体,其长度为 10 mm,两端面均镀膜为 946 和 473 nm 增透. M_2 透镜曲率半径为 100 mm,镀膜为 946 nm 高反、473 nm 增透.由图 3 可得光束传输矩阵为:

$$M = M_{\text{YAG}} \cdot M_{th} \cdot M_{\text{YAG}} \cdot M_{L_1} \cdot M_{\text{LBO}} \cdot M_{L_2} \cdot M_2 \cdot M_{L_2} \cdot M_{\text{LBO}} \cdot M_{L_1} \cdot M_{\text{YAG}} \cdot M_{th} \cdot M_{\text{YAG}} \cdot M_1,$$

其中

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, M_{\text{YAG}} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{L_{\text{YAG}}}{2 \cdot n_{\text{YAG}}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_{th} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ f_{th} & 1 \end{bmatrix}, M_{\text{LBO}} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{L_{\text{LBO}}}{n_{\text{LBO}}} \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -2 & 1 \\ R_2 & 1 \end{bmatrix}, M_{L_2} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_{L_1} = \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

腔内空气部分的总长度 $L_0 = L_1 + L_2$, L_1 是 YAG 晶体与 LBO 晶体间的距离, L_2 是 LBO 晶体到输出镜 M_2 的距离, $L_{\text{YAG}} = 4 \text{ mm}$; $n_{\text{YAG}} = 1.83$; $L_{\text{LBO}} = 10 \text{ mm}$; $n_{\text{LBO}} = 1.63$; $R_2 = 100 \text{ mm}$. 同时,由图 2 可得,当泵浦功率 $P_p = 20 \text{ W}$ 时,热焦距 $f_{th} = 37.5 \text{ mm}$,通过分析选取较佳腔长 40 mm. 通过数值计算,获得不同的热焦距下 Nd YAG 晶体与 LBO 晶体中的腰斑半径以及 LBO 中光腰距离输出镜的距离(使光腰尽量位于 LBO 中心点),如图 4,5 所示.

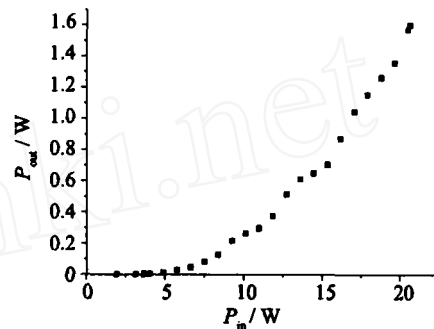


图 6 泵浦功率与 473 nm 激光输出功率图

Fig. 6 The output power of 473 nm laser via the incident pump power

由图可知随着热焦距的减小 LBO 晶体中的腰斑半径逐渐减小,即光功率密度不断增大,这有利于提高倍频效率,但同时,YAG 晶体中的腰斑半径也逐渐增大,这降低了基波的效率;并且由图 5 可知随着热焦距的减小,光腰与输出镜的距离也逐渐减小,当热焦距值小于 40 mm 时,光腰与输出镜的距离将小于 5 mm,即 LBO 晶体长度的一半,使得光腰位置偏离 LBO 晶体的中间点,这减小了 LBO 的有效长度,降低其倍频效率.

4 实验结果

根据以上的腔体分析,实验时选取腔长 40 mm, LBO 晶体紧靠输出镜,控制 Nd YAG 晶体的温度为 2.5,调节 LBO 晶体的位置与温度,使其达到最佳相位匹配,测得不同泵浦功率下 473 nm 蓝光的输出功率,如图 6 所示. 激光阈值为 1.92 W;当泵浦激光功率为 20.58 W 时,473 nm 蓝光的输出功率为 1.60 W,光-光转化效率为 7.8%,为目前线性腔实现的最高功率水平.

实验时,我们发现在高功率泵浦情况下,LBO 晶体离输出镜越近输出功率越大,这与图 5 相一致. 但实际操作时 LBO 晶体离输出镜总有一定的距离. 当

Nd YAG晶体的热焦距值逐渐减小,将使得光腰位置不在LBO晶体中心点,这样使得LBO晶体的倍频效率减小.如果有效的减小热透镜效应,将有望进一步提高输出功率.

参考文献:

- [1] Barnes N P, Brian M W, Hutcheson R L, et al. Pulsed $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$ operation of Nd lasers[J]. Opt Soc Am B, 1999, 16(12): 2169 - 2177.
- [2] Liu Weiren, Huo Yujing, He Shufang. Theory analysis for Nd³⁺ YAG quasi-three-level laser system[J]. Optical Technology, 2002, 28(4): 319 - 321.
- [3] 王军营, 邓权, 薛庆华, 等. 1.1 W 连续输出 473 nm 全固态蓝光激光器[J]. 中国激光, 2004, 31(5): 523 - 526.
- [4] 高兰兰, 檀慧明. 激光二极管阵列抽运 Nd YAG/LBO 大功率蓝光激光器[J]. 中国激光, 2004, 31(9): 1033 - 1035.
- [5] Czeranowsky C, Schmidt M, Heumann E, et al. Continuous wave diode pumped intracavity doubled Nd GdVO₄ laser with 840 mW output power at 456 nm[J]. Opt Commun, 2002, 205: 361 - 365.
- [6] Pierrou M, Laurell F. Generation of 740 mW of blue light by intracavity frequency doubling with a first-order quasi-phase-matched KTiOPO₄ crystal[J]. Opt Lett, 1999, 24(4): 205 - 207.
- [7] Zeller P, Peuser P. Efficient, multiwatt, continuous-wave laser operation on the $^4F_{3/2} - ^4I_{9/2}$ transitions of Nd YVO₄ and Nd YAG[J]. Opt Lett, 2000, 25(1): 34 - 36.
- [8] Du Geguo, Ruan Shuangchen, Zhu Qin, et al. LD-pumped Nd YAG laser at 946 nm and frequency doubling[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(11): 1392 - 1394.
- [9] Rui Zhou, zhiqiang Cai, Wuqi Wen, et al. High-power continuous-wave Nd YAG laser at 946 nm and intracavity frequency-doubling with a compact three-element cavity[J]. Optics communications, 2005, 255: 304 - 308.
- [10] Wang Chunwei, Weng Yilung, Huang Piling, et al. Passively Q-switched quasi-three-level laser and its intracavity frequency doubling[J]. Appl Opt, 2002, 41(6): 1075 - 1081.
- [11] W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙文, 译. 北京: 科学出版社, 2002.
- [12] 石顺祥, 陈国夫, 赵卫. 非线性光学[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [13] 刘均海. 高功率端面泵浦 Nd YVO₄, Nd GdVO₄ 激光器热效应及激光特性研究[D]. 济南: 山东大学, 1999.

1.60 W CW Output 473 nm Linear Cavity Blue Laser

LIU Sun-li¹, WANG Yu-shu¹, CAI Zhi-ping^{2*},
HUANG Jian-ping², LUO Zheng-qian¹

(1. Department of Physics, Xiamen University,

2. Department of Electronic Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In this paper, a LD-end-pumped Nd YAG all-solid blue laser (473 nm) is demonstrated using intracavity frequency doubling with a LBO crystal. Based on the theory of stable resonator, the focus lengths of thermal-lens are measured under the different pump powers in the simple plane-plane cavity. By the numerical simulations, the radius of beam waist in Nd YAG and LBO crystal and the position of beam waist are obtained under different focus lengths of thermal-lens. According to the quasi-three-level laser system and the theory of double-frequency, we realize the optimized mode-match and double-frequency efficiency and obtain the high output power at 473 nm. The pump threshold power is 1.92 W. When the pump power is 20.58 W, the output power is as high as 1.60 W at 473 nm. The optical-optical conversion efficiency is 7.8%.

Key words: Nd YAG; focus lengths of thermal-lens; double-frequency efficiency; LBO; blue laser