

文章编号: 0258-7025(2001)02-0105-04

670 nm Nd:YAlO₃/LBO 腔内倍频激光器

张 戈 沈鸿元 曾瑞荣 黄呈辉 林文雄 黄见洪

(中国科学院福建物质结构研究所 福州 350002)

提要 报道了 670 nm Nd:YAlO₃/LBO 腔内倍频激光器。通过计算分析光学谐振腔参数,设计了较佳的谐振腔参数,在抽运平均功率为 1664 W 时获得了 1.2 W 的 670 nm 激光输出。

关键词 670 nm 激光, Nd:YAlO₃, LBO, 腔内倍频

中图分类号: TN248.1 文献标识码: A

670 nm Intracavity-doubled Nd:YAlO₃/LBO Laser

ZHANG Ge SHEN Hong-yuan ZENG Rui-rong

HUANG Cheng-hui LIN Wen-xiong HUANG Jian-hong

(Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Fuzhou 350002)

Abstract Intracavity-doubled 670 nm Nd:YAlO₃/LBO laser was reported. The parameters of the cavity are calculated. Based on the analysis, the suitable cavity parameters are determined and the 670 nm laser of 1.2 W is got under the pumping power of 1664 W, the transition efficiency of fundamental wave to harmonic wave is about 1.6%.

Key words 670 nm laser, Nd:YAlO₃, LBO, intracavity-doubled

1 引 言

内腔倍频是固体倍频激光器中常用的方法,由于腔内的基波光具有很高的功率密度,倍频晶体放置在腔内能够实现较高效率的谐波转换,尤其适合于连续运转的中、小型激光器的倍频过程。在众多的掺钕激光晶体中,Nd:YAlO₃晶体是目前已知最适用于 1300 nm 波段高功率运转的激光晶体,这是因为 Nd³⁺ 离子在 YAlO₃ 晶体中 ⁴F_{3/2}-⁴I_{13/2} 跃迁的受激发射截面 σ 是 Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:BEL 等晶体同一跃迁受激发射截面的 2.4 倍以上^[1],它与荧光寿命 τ 的乘积在这些晶体中也是最大的。由于 $\sigma\tau$ 与激光阈值成反比,而与输出激光成正比,所以 Nd:YAlO₃ 晶体能够实现低阈值、高效率的 1341.4 nm CW 激光运转。另一方面,这种晶体的光学机械性能系数接近于 Nd:YAG 晶体^[2],所以它与 Nd:YAG 晶体一样是获得高功率 CW 激光的优良晶体,已经获得 195 W 的 1341.4 nm CW 激光^[3]。而且,Nd:YAlO₃ 晶体激光器产生的 1341.4 nm 激光是偏振方向

平行于结晶 c 轴的线偏振光^[4],有利于腔内倍频。因此 1341.4 nm Nd:YAlO₃ 激光器腔内倍频是产生红色激光的一条可行途径。

本文测量了不同抽运功率下 Nd:YAlO₃ 晶体的热焦距,在此基础上计算了光学谐振腔的稳定区大小并与实验进行了比较。通过对光学谐振腔参数的计算,确定了较佳的光学谐振腔,得到了平均功率为 1.2 W 的 670 nm 激光输出。

2 光学谐振腔参数计算

考虑如图 1 的腔型结构,图中, L_1 为平面腔镜到激光棒左端面的距离, L_2 为激光棒右端面到聚焦透镜的距离, f_j 为聚焦透镜焦距, L_3 为聚焦透镜到凹面腔镜的距离, L_0 为激光棒长度, h 为抽运过程 Nd:YAlO₃ 晶体产生热透镜效应时晶体端面到热透镜主平面的距离,由正交晶系 Nd:YAlO₃ 晶体热效应的理论研究^[5]得到对偏振方向平行结晶 c 轴的 1341.4 nm 辐射在结晶 c 轴方向的热焦距最短,它对谐振腔的稳定性影响最大,所以谐振腔的设计应该考虑抽运过程中 Nd:YAlO₃ 棒对 c 偏振光沿结晶 c 轴方向的

热透镜效应的影响,对于 Nd:YAlO₃ 晶体,按文献 [5] $h = L_0/2n_z$, 式中 n_z 是偏振方向沿结晶 c 轴方向的折射率。

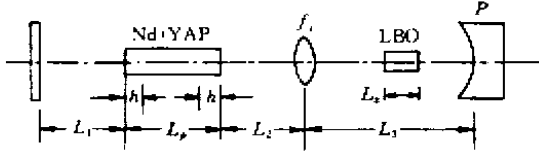


图 1 Nd:YAlO₃/LBO 腔内倍频激光器谐振腔结构图

Fig.1 Resonator structure of Nd:YAlO₃/LBO intracavity doubled laser

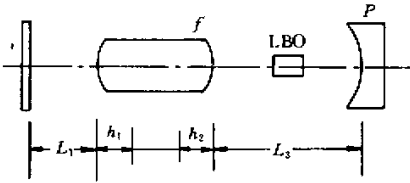


图 2 图 1 的等效谐振腔结构图

Fig.2 Equivalent resonator for Fig.1

为了计算光学谐振腔参数,首先将激光棒等效为一厚透镜,其主平面位置如图 1 所示,再将该等效透镜与聚焦透镜合并等效为一厚透镜,所得等效谐振腔如图 2 所示。图中,

$$f' = \frac{f_c(c) \cdot f_j}{f_c(c) + f_j - (L_2 + h)} \quad (1)$$

$$h_1 = h + \frac{(L_2 + h) \cdot f_c(c)}{f_c(c) + f_j - (L_2 + h)} \quad (2)$$

$$h_2 = \frac{(L_2 + h) \cdot f_j}{f_c(c) + f_j - (L_2 + h)} \quad (3)$$

式中 $f_c(c)$ 为 Nd:YAlO₃ 晶体对 c 偏振激光沿结晶 c 轴方向的热焦距, f' 为等效透镜焦距, h_1 为等效厚透镜 f' 的左侧主平面与激光棒左端面的距离, h_2 为等效厚透镜 f' 右侧主平面与聚焦透镜的距离。

设 $L_1' = L_1 + h_1$, $L_2' = L_3 + h_2 + (n_0 - 1) \cdot L_z$; 式中的 n_0 为 LBO 晶体的 1341.4 nm 沿 I 类相位匹配方向的慢光折射率, $(n_0 - 1) \cdot L_z$ 表示由于 LBO 晶体造成的腔内光程的变化。

该等效空腔的等价腔长和 g 因子为

$$L' = L_1' + L_2' - \frac{L_1' \cdot L_2'}{f} \quad (4)$$

$$g_1 = 1 - \frac{L_2'}{f} \quad (5)$$

$$g_2 = 1 - \frac{L_1'}{f} - \frac{L_1' + L_2' - L_1' \cdot L_2'/f}{R} \quad (6)$$

根据文献 [6] 激光在平面腔镜上的光斑半径 w_1 和凹面腔镜上的光斑半径 w_2 可由下式获得

$$w_1^2 = \frac{\lambda |L'|}{\pi} \left[\frac{g_2}{g_1 \cdot (1 - g_1 g_2)} \right]^{1/2} \quad (7)$$

$$w_2^2 = \frac{\lambda |L'|}{\pi} \left[\frac{g_1}{g_2 \cdot (1 - g_1 g_2)} \right]^{1/2} \quad (8)$$

式中 λ 为激光波长,根据高斯光束传输规律可获得靠近平面腔镜一侧的激光棒端面上的光斑半径 w_{01} 和腔内光腰位置 Z_n 及光腰半径 w_n , 其表达式如下

$$w_{01}^2 = w_1^2 \cdot \left[1 + \left(\frac{\lambda \cdot L_1'}{\pi w_1^2} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$Z_n = \frac{R}{1 + \frac{R^2 \lambda^2}{\pi^2 w_2^4}} \quad (10)$$

$$w_n^2 = w_2^2 \left[1 + \left(\frac{\pi w_2^2}{\lambda \cdot R} \right)^2 \right]^{-1} \quad (11)$$

w_{01} 对 $1/f_c(c)$ 的导数是判断谐振腔热稳定性的重要参数,将(9)式对 $1/f_c(c)$ 求导,通过复合函数求导原理可得 w_{01} 对 $1/f_c(c)$ 的导数

$$\frac{dw_{01}}{d \frac{1}{f_c(c)}} = \frac{\frac{\partial w_{01}^2}{\partial w_1^2} \cdot \frac{\partial w_1^2}{\partial \frac{1}{f_c(c)}}}{2w_{01}} = \frac{\partial w_{01}^2}{\partial w_1^2} \cdot \left[\frac{\partial w_1^2}{\partial g_1} \cdot \left(\frac{\partial g_1}{\partial L_2'} \cdot \frac{\partial L_2'}{\partial h_2} \cdot \frac{\partial h_2}{\partial \frac{1}{f_c(c)}} + \frac{\partial g_1}{\partial f'} \cdot \frac{\partial f'}{\partial \frac{1}{f_c(c)}} \right) + \frac{\partial w_1^2}{\partial g_2} \cdot \left(\frac{\partial g_2}{\partial L_1'} \cdot \frac{\partial L_1'}{\partial h_1} \cdot \frac{\partial h_1}{\partial \frac{1}{f_c(c)}} + \frac{\partial g_2}{\partial L_2'} \cdot \frac{\partial L_2'}{\partial h_2} \cdot \frac{\partial h_2}{\partial \frac{1}{f_c(c)}} + \frac{\partial g_2}{\partial f'} \cdot \frac{\partial f'}{\partial \frac{1}{f_c(c)}} \right) \right] \quad (12)$$

在准连续抽运条件下,准直的偏振方向沿 Nd:YAlO₃ 晶体 c 轴的 He-Ne 激光通过 Nd:YAlO₃ 晶体,其透射光束的椭圆光斑沿 c 轴方向的主轴达到最小的位置与 Nd:YAlO₃ 棒的主平面的距离即为 Nd:YAlO₃ 棒对 c 偏振光沿结晶 c 轴方向热焦距。不同的热焦距所对应的抽运平均功率如表 1 所示,根据这些数据及以上所述的公式可进行谐振腔参数设计。

首先设定凹面镜曲率半径为 7.9cm 及聚焦透镜焦距为 $f_j = 15$ cm,通过计算得到谐振腔的 g 因子,并结合谐振腔的稳定条件 $0 < g_1 g_2 < 1$ 可得到在 $L_1 = 0.5$ m, $L_2 = 0.15$ m 条件下谐振腔的 L_3 稳定区范围,结果示于图 3。

表 1 不同的热焦距对应的抽运功率

Table 1 Pumping powers corresponding to the different thermal focal lengths

$f_c(c)/\text{cm}$	82	69	59	52	43.5	40	38	35	33	28	27	25	23
Pump power/W	746.2	864	970	1122	1236	1326	1442	1575	1664	1802	1908	2033	2140

图 3 中, U_i 线表示各稳定区的上限, D_i 线表示各稳定区的下限(它们均为 $g_1 g_2$ 等于 0 或 1 的点)。由图 3 可以看到, 在一个抽运功率下存在两个稳定区域, 随着抽运功率的提高, 稳定区范围整体向下移动, 两个稳定区之间的间隙减小。对于某些特定参数的谐振腔 (L_3 介于 9 ~ 18 cm), 在低抽运功率和高抽运功率下均能实现激光运转, 而在两者之间的一段抽运功率范围内, 无法实现激光运转。因此, 对于热效应比较强的激光晶体, 应预先选择抽运功率, 再选取适合该抽运功率的光学谐振腔参数。

考虑平均抽运功率为 1664 W 的条件, 根据公式 (9)~(12) 可获得激光棒端面的光斑半径和光束腰半径随 L_3 变化的关系(结果如图 4 所示), 相应的光束腰位置(结果如图 5 所示)以及 w_{01} 对 $1/f_c(c)$

的导数(结果如图 6 所示)。对于腔内倍频激光器件, 激光棒处的光斑越大, 基波光功率就越强, 而光束腰半径越小, 基波光转换为倍频光的效率就越高, 因此, 腔内倍频激光器件要求在激光棒中的模体积大而光束腰小。从图 5 可知当 L_3 较大或较小时均符合以上条件, 但考虑到光束腰位置离凹面镜太近, 实验操作较为困难, 选择 L_3 较大的腔型较合适。同时, 为了得到较稳定的激光输出, 谐振腔应选择热稳定性较好的参数条件下。因此在选择谐振腔参数时应综合考虑各种因素, 选择适当的腔型以获得最佳的激光输出。

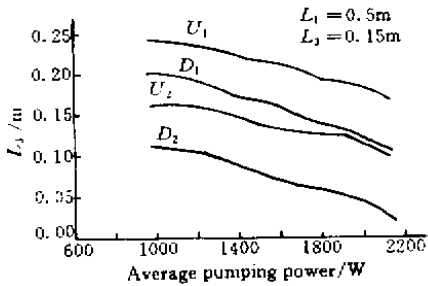


图 3 不同抽运功率下的 L_3 稳定区范围的计算结果

Fig.3 Calculation results of the stable area of L_3 under different pumping powers

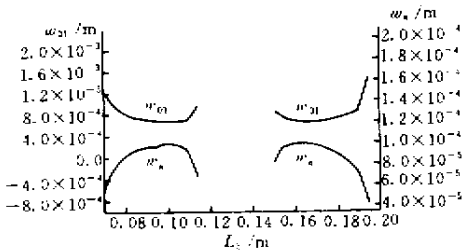


图 4 在 $L_1 = 0.5 \text{ m}$, $L_2 = 0.15 \text{ m}$ 条件下, 激光棒靠近平面镜的端面上的光斑半径 w_{01} 和谐振腔的光腰半径 w_n 随 L_3 的变化关系

Fig.4 Spot size w_{01} on the laser rod end towards the plane mirror and the spot size w_n on the beam waist under different L_3 ($L_1 = 0.5 \text{ m}$, $L_2 = 0.15 \text{ m}$)

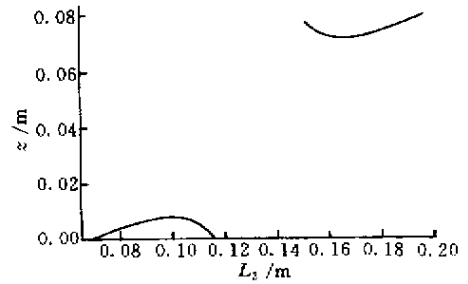


图 5 在 $L_1 = 0.5 \text{ m}$, $L_2 = 0.15 \text{ m}$ 条件下, 谐振腔光腰与凹面镜的距离随 L_3 的变化关系

Fig.5 Distance between the beam waist and the concave mirror under different L_3 ($L_1 = 0.5 \text{ m}$, $L_2 = 0.15 \text{ m}$)

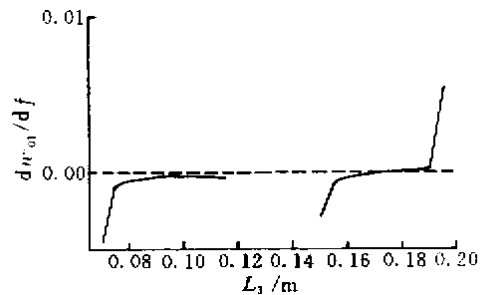


图 6 在 $L_1 = 0.5 \text{ m}$, $L_2 = 0.15 \text{ m}$ 条件下, w_{01} 对 $1/f_c(c)$ 的导数随 L_3 的变化关系

Fig.6 Derivative of w_{01} with respect to $1/f_c(c)$ under different L_3 ($L_1 = 0.5 \text{ m}$, $L_2 = 0.15 \text{ m}$)

3 实验及结果

实验中采用准连续激光电源, 氩灯作抽运灯, 激光棒为半径 2.5 mm 长, 10 cm 的 *b* 轴 Nd:YAlO₃ 晶

体,两端均镀对 1341.4 nm 和 670 nm 波段的增透膜。采用 I 类临界相位匹配 LBO 晶体,在腔内对 1341.4 nm 进行倍频,对 1341.4 nm LBO 晶体的临界相位匹配方向为 $\varphi = 0^\circ, \theta = 86.1^\circ$,已接近非临界相位匹配条件。计算得 $\varphi = 0^\circ, \theta = 86.1^\circ$ 时 670 nm 沿快光偏振方向的走离角约为 0.2° ,若 LBO 进光端面的光斑半径为 0.09mm,可计算得到孔径相干长度为 25.8 mm。实验中所用的 LBO 晶体长度为 13 mm,以减小走离效应对倍频效率的影响。LBO 晶体截面为 3 mm × 3 mm,两端镀相应波长的增透膜。为了减小运转过程中 LBO 晶体的温升,LBO 晶体通水冷却。平面腔镜对 1341.4 nm 全反,凹面镜 R 是曲率半径为 7.9cm 的双色镜,对 1341.4 nm 全反和对 670 nm 增透,聚焦透镜 f_j 焦距为 15 cm,镀对 1341.4 nm 和 670 nm 均增透的宽带增透膜。

实验测量了与图 3 相同的腔长条件下 L_3 的稳定区范围随不同抽运平均功率的变化,结果示于图 7,与图 3 比较,二者符合得较好。在一定的腔参数条件下 ($L_1 = 0.5\text{ m}, L_2 = 0.15\text{ m}, L_3 = 0.17\text{ m}$),实验中观察到随着抽运平均功率的提高,在较低抽运平均功率和较高抽运平均功率时均观察到红色激光,而在二者之间的一段抽运功率范围内未观察到红色激光,这与前述的理论分析一致。

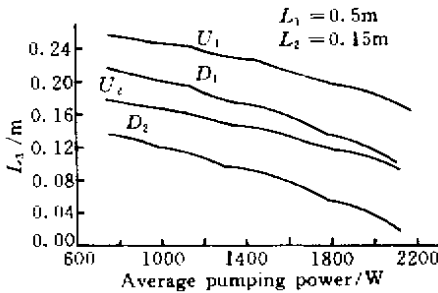


图 7 不同抽运功率下的 L_3 稳定区范围的实验结果
Fig.7 Measured results of the stable area of L_3 under different pumping powers

参考前述的谐振腔参数计算结果,在实验中,腔参数具体取值为: $L_1 = 0.5\text{ m}, L_2 = 0.15\text{ m}, L_3 = 0.18\text{ m}$ 。由公式(9)~(11)可分别得到谐振腔靠近平面腔镜一侧的激光棒端面上的光斑半径 w_{01} 为 0.8 mm,光腰半径 w_n 为 0.09 mm,光腰与凹面镜距离为 7.4 cm,由公式(12)可得 w_{01} 对 $1/f_j(c)$ 的导数约等于 0。将 LBO 晶体放置于离凹面镜约 7.5 cm 处,适当旋转 LBO 晶体,使基波光的偏振方向与倍频要求的偏振方向一致,即可获得 670 nm 红色激

光。在所述的腔参数条件下,670 nm 激光的输入-输出关系曲线如图 8 所示。由图 8 可见,在平均抽运功率为 1664 W 时,获得最大输出功率 1.2 W。由于实验中测量的是单方向传输的倍频激光,另一方向传输的倍频光未包含在内,因而,腔内实际产生的倍频光约为 2.4 W。

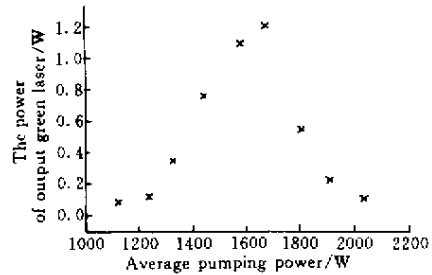


图 8 腔内倍频 670 nm 激光器的输入-输出曲线
Fig.8 Input-output curve of the 670 nm intracavity SHG laser ($L_1 = 0.5\text{ m}, L_2 = 0.15\text{ m}, L_3 = 0.17\text{ m}$)

本文分析了不同抽运功率条件下,Nd:YAlO₃/LBO 腔内倍频激光器光学谐振腔的稳定区大小,结果与实验符合较好。通过对抽运平均功率为 1664 W 的条件下腔参数的分析,确定了较佳的腔型结构,得到了单方向传输的平均功率为 1.2 W 的 670 nm 激光输出,考虑另一方向传输的 670 nm 激光,实际产生的 670 nm 激光约为 2.4 W。

致谢 实验中所用的 LBO 晶体由福建晶体技术开发公司提供,对该公司给予的支持表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 H. Y. Shen, R. R. Zeng, Y. P. Zhou et al.. Comparison of simultaneous multiple wavelength lasing in various neodymium host crystals at transitions from $^4F_{3/2} - ^4I_{11/2}$ and $^4F_{3/2} - ^4I_{13/2}$. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20):1937~1938
- 2 Y. P. Zhou, H. Y. Shen, R. R. Zeng et al.. A method for calculating optomechanical coefficient of laser materials. *Chinese J. Lasers, Special Issue on Laser Devices* (中国激光增刊,激光器件专集), 1990, **17**:138~140 (in Chinese)
- 3 H. Y. Shen, Y. P. Zhou, R. R. Zeng et al.. Laser action of Nd:YAlO₃ at 1300 nm. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(6):3373~3375
- 4 H. Y. Shen, Y. P. Zhou, R. R. Zeng et al.. High power 1.3414 μm Nd:YAP CW laser. *Scientia Sinica (Series A)* (中国科学 A 辑), 1986, (7):760~766
- 5 H. Y. Shen. Thermal effects in orthorhombic YAP crystals. *Acta Physical Sinica* (物理学报), 1981, **30**(8):1085~1099 (in Chinese)
- 6 V. Magni. Resonators for solid-state lasers with large-volume fundamental mode and high alignment stability. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(1):107~117