

文章编号: 0258-7025(2003)10-0873-04

# Nd:YAP/LBO 腔内倍频高功率红光激光器

陈振强<sup>1,2</sup>, 张 戈<sup>1</sup>, 沈鸿元<sup>1</sup>, 黄呈辉<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002; <sup>2</sup> 暨南大学理工学院, 广东 广州 510632)

**摘要** 报道了使用三镜折叠腔 Nd:YAlO<sub>3</sub>/LBO 腔内倍频获得 670.7 nm 激光的研究。通过计算分析光学谐振腔参数, 设计了较佳的谐振腔参数, 在平均抽运功率为 1783 W 时获得了 3.26 W 的 670.7 nm 激光输出。

**关键词** 激光技术; Nd:YAlO<sub>3</sub>; 670.7 nm 激光; 腔内倍频; 折叠腔

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## High Power Red Laser from Intracavity-doubled Nd:YAlO<sub>3</sub>/LBO Laser

CHEN Zhen-qiang<sup>1,2</sup>, ZHANG Ge<sup>1</sup>, SHEN Hong-yuan<sup>1</sup>, HUANG Cheng-hui<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, The Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China)  
(<sup>2</sup> College of Science & Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China)

**Abstract** High power red laser by intracavity-doubling of Nd:YAlO<sub>3</sub>/LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> 1.3414 μm laser was reported. The parameters of the folded laser resonator are calculated. Based on the theory analysis, the suitable cavity parameters are determined and the 670.7 nm laser of 3.26 W was got at the average electrical pumping power of 1783 W.

**Key words** laser technique; Nd:YAlO<sub>3</sub>; 670.7 nm laser; intracavity-doubled; folded laser resonator

## 1 引 言

高功率红色相干辐射在激光医疗、彩色显示和作为掺 Cr<sup>3+</sup> 离子激光晶体的抽运光源等方面具有巨大的应用前景。当前获得红光的方法主要是通过半导体激光器直接发射或通过掺 Nd<sup>3+</sup> 离子的激光晶体发射的 1.3 μm 波段激光经非线性光学晶体变频获得。比较两者, 红光 LD 相对于固体激光器来说光束质量差, 阵列 LD 价格昂贵, 但易于激光器的全固化和商品化; 后者由于光束质量好, 辐射功率高, 易于获得, 对于室内研究用光源和器件较为实用。随着近年来 LD 的迅猛发展, 适合 LD 抽运的掺钕激光晶体成为获得红光激光输出研究的热点。目前国际上常用的激光晶体主要有 Nd:YAlO<sub>3</sub>, Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub>, Nd:YLF, Nd:BEL 等几种。在这些掺钕激光晶体中, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体是最近几年重新受到重视的激光晶体, 尤其在获得红光发射研究方

面取得了较大的进展, 国外通过倍频 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的 1.3 μm 波段获得了最大 430 mW 的红光输出<sup>[1]</sup>。中国科学院物理所分别利用 I 类, II 类非临界相位匹配的 KTP 及 LBO 非线性光学晶体对 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 的 1.3 μm 波段激光进行腔内倍频的研究, 得到了从 273 mW 到 890 mW 的 671nm 稳定红光输出<sup>[2~4]</sup>。但由于该晶体的热导率较小等原因, 获得大功率的红光输出较为困难。Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体是研究较早的 1.3 μm 波段的优秀激光晶体, 因 Nd<sup>3+</sup> 离子的 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> - <sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> 的受激发射截面 σ 是 Nd:YAG, Nd:YLF, Nd:BEL 等晶体同一跃迁受激辐射截面的 2.4 倍以上<sup>[5]</sup>, 且 σ 和荧光寿命 τ 的乘积在这些晶体中最大而成为目前最适用于 1.3 μm 波段高功率运转的激光晶体, 加上 Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体接近于 Nd:YAG 晶体的良好光学机械性能系数和能够实现 1341.4 nm 线偏振激光(偏振方向平行结晶 c 轴)输出的特点<sup>[6]</sup>, 为实现腔内倍频获得较高功率的

收稿日期: 2002-06-10; 收到修改稿日期: 2002-10-21

基金项目: 国家自然科学基金(60278025)和福建省青年创新基金(2001J014)资助项目。

作者简介: 陈振强(1965—), 男, 河南柘城人, 中国科学院福建物质结构研究所博士后, 副研究员, 主要从事激光晶体生长、性能表征和激光器件研究。E-mail: czqiang@21cn.com

红光输出提供了一条行之有效的途径。

文献[7]报道了氦灯抽运 Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体通过 LBO 非线性晶体腔内倍频,在直腔结构中获得了 1.2 W 的稳定红光输出。本文报道的是在氦灯抽运下使用三镜折叠腔结构对 Nd:YAP 的 1.3414 μm 激光进行 LBO 腔内倍频,在抽运平均功率为 1783 W 的条件下获得了 3.26 W 的稳定 670.7 nm 红光输出的研究成果,激光稳定性在 20 min 内为 8.7% 左右。

## 2 实验装置与腔结构分析

实验采用如图 1 所示的三镜折叠腔结构。实验中采用准连续激光电源,氦灯作抽运灯。M<sub>1</sub> 为平面全反镜,表面镀 1341.4 nm 全反膜,反射率大于 98.2%。M<sub>2</sub> 和 M<sub>3</sub> 均为曲率半径为 31.5 cm 的凹面镜,M<sub>2</sub> 为对 1341.4 nm 全反和对 670.7 nm 增透双色镜,M<sub>3</sub> 为对 1341.4 nm 和 670.7 nm 均全反的双色镜。激光棒为直径 5 mm,长度 11 cm 的 b 轴 Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体,两端均镀有 1341.4 nm 波段的增透膜。倍频晶体为 LBO 晶体,长度为 10.3 mm,截面为 3 mm×3 mm,两端镀相应波长的增透膜。LBO 晶体对 1341.4 nm 的临界相位匹配方向为 φ = 0°,θ = 86.1°,接近非临界相位匹配条件。为了降低激光运转过程中 LBO 晶体的温升,LBO 晶体通水冷却。

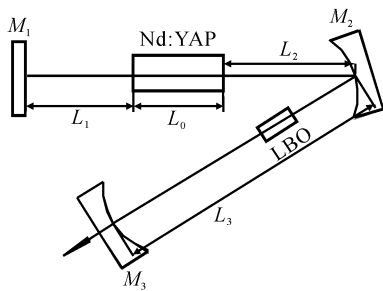


图1 670.7 nm 红光折叠腔激光器的实验装置  
Fig. 1 Schematic of the experimental configuration

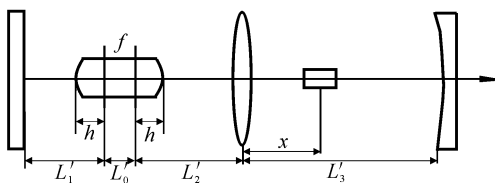


图2 图1的等效腔结构图  
Fig. 2 Equivalent resonator for figure 1

图 2 为图 1 所示的等价腔结构图,L<sub>1</sub> 为平面腔镜到激光棒左端面的距离,L<sub>2</sub> 为激光棒右端面到 M<sub>2</sub> 的距离,L<sub>3</sub> 为 M<sub>2</sub> 镜到 M<sub>3</sub> 镜的距离,为了研究腔结构参数,把 Nd:YAlO<sub>3</sub> 激光棒等效为一热的厚透镜,其中 L<sub>0</sub> 为激光棒的长度,h 为抽运过程中 Nd:YAlO<sub>3</sub> 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:YAlO<sub>3</sub> 晶体热效应的理论研究<sup>[8,9]</sup>,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 Nd:YAlO<sub>3</sub> 棒对 c 偏振光沿结晶 c 轴方向的热透镜的影响,对于 Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体,从文献[8]知道 h = L<sub>0</sub>/2n<sub>z</sub>,式中 n<sub>z</sub> 是偏振方向沿结晶 c 轴方向的波长为 1341.4 nm 的折射率。

在该结构中,考虑到激光棒的热透镜效应,等效腔的各部分腔长分别为

$$L_1' = L_1 + L_0/2n_z$$

$$L_2' = L_2 + L_0/2n_z$$

$$L_3' = L_3 + (n_0 - 1) \cdot L_z$$

式中的 n<sub>0</sub> 为 LBO 晶体的 1341.4 nm 沿 I 类相位匹配方向的慢光折射率,可根据色散方程计算出来,(n<sub>0</sub> - 1) · L<sub>z</sub> 表示由于 LBO 晶体造成的腔内光程的变化,L<sub>z</sub> 为 LBO 晶体沿 z 轴的通光长度。而 Nd:YAlO<sub>3</sub> 激光棒在准连续氦灯抽运条件下的热焦距已由文献[7]给出。利用高斯光束变换的 ABCD 定律和高斯光束在腔内的自再现条件,通过程序方便地计算出光学谐振腔的腔参数,如倍频晶体处的光腰和激光棒处的光斑半径等,从而最大程度地优化谐振腔参数。

表 1 给出了不同抽运功率下,Nd:YAlO<sub>3</sub> 晶体

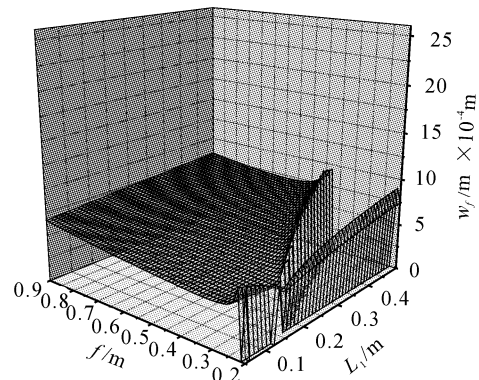


图3 激光棒左端面基波的光斑半径与激光棒的热焦距及 L<sub>1</sub> 的关系

Fig. 3 Mode radius ( $w_f$ ) of laser rod left end face versus hot focal length and  $L_1$

热焦距的数值。图 3 和图 4 分别表示在不同的腔长条件下,振荡光在倍频晶体 LBO 中的束腰和在激光晶体 Nd:YAlO<sub>3</sub> 激光棒左端面处的光斑半径变化情况,以  $x$  代表微小腔长改变量,图 3 中纵坐标  $w_f$  为

激光晶体处束腰,图 4 中纵坐标  $w_n$  为 LBO 晶体处束腰。从图中可以看出,在  $L_1$  分别在 17 cm 附近时,其光腰半径最小,约为 0.2 mm,激光棒左端面的光斑半径较大,约为 0.8 mm。

表 1 不同抽运功率下,Nd:YAlO<sub>3</sub> 激光棒的热焦距

Table 1 Pumping powers correspond to different thermal focal distances

Thermal lens $f_c(c)$ /cm	82	69	59	52	43.5	40	38	35	33	28	27	25	23
Average pumping power/W	746.2	864	970	1122	1236	1326	1442	1575	1664	1802	1908	2033	2140

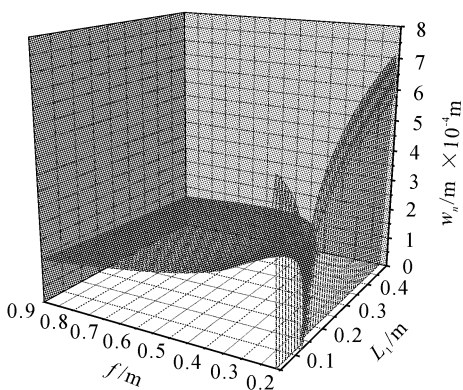


图 4 谐振腔中基波的光腰半径大小与激光棒的热焦距及  $L_1$  的关系

Fig. 4 Waist radius ( $w_n$ ) of 1.3414  $\mu\text{m}$  laser beam versus hot focal length and  $L_1$

### 3 实验结果与讨论

对于腔内倍频激光器而言,要求激光棒处有大的光斑半径,在倍频晶体处有小的光斑半径。根据上述腔结构分析,为了获得较大功率的红光输出,我们在  $L_2, L_3$  不变、逐步改变  $L_1$  的条件下分别测量了在不同抽运功率下 670.7 nm 激光的最大输出功率。图 5 为在不同的平均抽运功率和  $L_1$  腔长条件下的输出功率关系。在固定  $L_1, L_2, L_3$  的条件下,输出功率随抽运功率的增大而增大,到达最大值后则快速减少;在固定  $L_2, L_3$  而减小  $L_1$  时,输出功率要达到最大值所需的平均输入功率则增大。图 6 更清楚地表示了腔长和平均抽运功率及输出功率的空间变化关系。

根据上述特点,我们选择了  $L_1, L_2, L_3$  分别为 17 cm, 11 cm, 47 cm, 抽运平均电功率为 1783 W 的运转条件,实现了最大功率为 3.26 W 的 670.7 nm 激光输出,在 20 min 的观察时间内,激光的不稳定

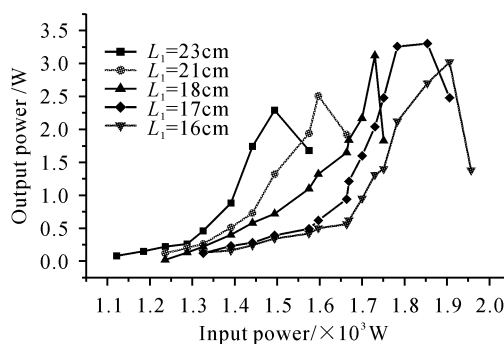


图 5 不同  $L_1$  条件下的最大输出功率  
Fig. 5 Maximal output power versus  $L_1$

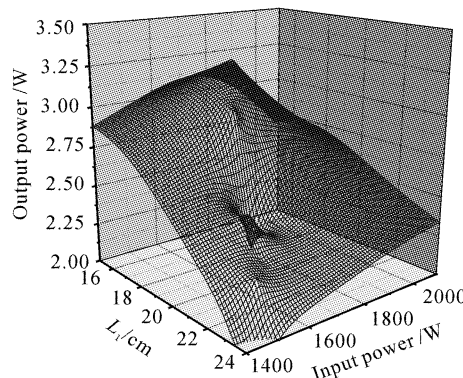


图 6 输出功率与输入功率及  $L_1$  的变化关系  
Fig. 6 Output power versus input power and  $L_1$

性在 8.7% 左右。

本次实验与早期工作相比,由于采用了折叠腔结构,倍频产生的红光能实现单向输出,所以获得的红光输出功率有较大提高,并且更易于操作。在抽运电功率达到一定的时候,输出功率达到稳定输出,一旦抽运功率继续增大,则输出功率会马上下降。这是由于激光晶体的热效应导致谐振腔超出其稳定区所致<sup>[7]</sup>。

## 4 结 论

本文在内含热透镜的三镜折叠腔的腔参数理论计算基础上,分析了不同腔长和不同抽运功率条件下,Nd:YAlO<sub>3</sub>/LBO腔内倍频激光输出的稳定区,确定了较佳的腔型结构,在平均电抽运功率为 1783 W 的条件下,得到了输出功率为 3.26 W 的 670.7 nm 激光输出,实验结果和前述的理论分析符合得较好。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Hengli, He Jingliang, Chen Yuchuan *et al.*. Diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser emitting at 1342 nm and 671 nm [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1998, **47** (9):1579~1584 (in Chinese)
- 2 Zhang Hengli, He Jingliang, Hou Wei *et al.*. LBO type-I noncritical phase-matched intracavity frequency-doubled 671 nm laser [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(10):1323~1326 (in Chinese)
- 3 Zhang Hengli, He Jingliang, Hou Wei *et al.*. Diode pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser emitting 671 nm through intracavity frequency doubling with LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 1998, **15**(11):807~809
- 4 Zhang Hengli, Zhu Naiyi, Yang Qiansuo *et al.*. LD pumped 1.34 μm Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP red light laser [J]. *Acta Phononica Sinica* (光子学报), 2000, **29**(5):470~473 (in Chinese)
- 5 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 <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> and <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>13/2</sub> [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(20):1937~1938
- 6 H. Y. Shen, Y. P. Zhou, R. R. Zeng *et al.*. Laser action of Nd:YAlO<sub>3</sub> at 1300 nm [J]. *J. Appl. Phys.*, 1991, **70**(6):3373~3375
- 7 G. Zhang, H. Y. Shen, R. R. Zeng *et al.*. The study of 1341.4 nm Nd:YAlO<sub>3</sub> laser intracavity frequency doubling by LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> [J]. *Opt. Comm.*, 2000, **183**:461~466
- 8 Shen Hongyuan. Thermal effects in orthorhombic YAP crystals [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1981, **30** (8):1085~1099 (in Chinese)
- 9 Shen Hongyuan, Zhou Yuping, Yu Guifang *et al.*. Influence of thermal effects on high power CW laser output of *b*-axis Nd:YAP [J]. *Acta Physica Sinica* (物理学报), 1982, **31**(9):1235~1242 (in Chinese)