

文章编号: 0258-7025(2005)01-0009-04

# LBO 倍频 1.8 W 连续 671 nm 红光激光器

郑 权, 王军营, 薛庆华

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022)

**摘要** Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中掺杂的 Nd<sup>3+</sup> 除了 1.064 μm 的受激辐射跃迁外, 还可产生 1.342 μm 波段的弱辐射, 经腔内倍频, 最终可输出 671 nm 的红色激光。报道了一种光纤耦合半导体激光二极管(LD)阵列端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, 腔内采用 I 类临界相位匹配 LBO(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) 晶体倍频, 实现波长为 671 nm 的全固态红光激光器瓦级输出的理论分析和实验结果。采用短三镜折叠腔结构, 通过对激光晶体热透镜焦距的估算, 用计算机优化设计选取了合适的谐振腔参数, 在芯径为 400 μm 的光纤耦合 808 nm 半导体激光二极管阵列抽运下, 当注入功率为 8 W 时, 获得了波长为 671 nm 的红色基模稳定输出, 最高输出功率达 1.8 W, 光-光转换效率达 22.5%。

**关键词** 激光技术; 红光激光器; 激光二极管抽运; LBO 晶体

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A

## LBO Frequency Doubled CW Red Laser at 671 nm up to 1.8 W

ZHENG Quan, WANG Jun-ying, XUE Qing-hua

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** The Nd<sup>3+</sup> ion doped in Nd:YVO<sub>4</sub> crystal has a weak laser transition at 1.342 μm in addition to 1.064 μm stimulated transition. The laser at 1.342 μm can be frequency-doubled to obtain red light at 671 nm. In this paper, the analysis and the experiment of a Nd:YVO<sub>4</sub> crystal pumped by 400-μm fiber-coupled diode array, type-I critical phase matching and intra-cavity frequency-doubled LBO (LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) crystal, and red laser at output wavelength of 671 nm were performed. By using a short folded-cavity resonator, the thermal focal length of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal was calculated, and the parameters of laser cavity were selected by computer optimum design. At last, with incident pump power of 8 W, TEM<sub>00</sub> mode (transverse electromagnetic mode) red laser at 671 nm of 1.8W was obtained, with the optical conversion efficiency up to 22.5%.

**Key words** laser technique; red laser; laser diode-pumped; LBO crystal

## 1 引 言

尽管近年来红光半导体激光器(LD)已经商品化, 但因其存在发散角大、光束质量差、线宽宽、输出波长及功率随温度漂移等缺点, 仍然难以在彩色显示、单纵模运转、超短脉冲输出等有特殊要求的领域取代固体红光激光器。半导体激光器抽运的全固态红光激光器因其输出功率高、光束质量好、使用寿命长等优点, 逐步引起人们的重视。

众所周知, Nd:YVO<sub>4</sub> 中掺杂的 Nd<sup>3+</sup> 除了 1.064 μm 的受激辐射跃迁外, 还可产生 1.342 μm 波段的弱辐射<sup>[1]</sup>。Nd<sup>3+</sup> 在 YVO<sub>4</sub> 中的掺杂浓度高, 在 1.342 μm 处的发射截面较大(约为 6 × 10<sup>-19</sup> cm<sup>2</sup>), 并且偏振发射, 很适合用 LD 抽运, 经腔内倍频, 最终输出 671 nm 的红激光。

对于 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体、腔内倍频的红光激光器, 国内外已经有一些文献报道, 其中, 中国科学院物理研究所用 10 W 的 LD 抽运, 采用了 II 类临

收稿日期: 2003-06-23; 收到修改稿日期: 2003-12-23

基金项目: 国家 863 计划(No. 2002AA311140)资助项目。

作者简介: 郑 权(1973—), 男, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所理学博士, 主要研究方向为高性能及大功率固体激光器。E-mail: zhengquanok@163.com

界相位匹配 KTP 倍频,实现了 70 mW 的 671 nm 输出<sup>[2]</sup>;该所用 10 W 的 LD 抽运三镜折叠腔结构,采用了 I 类温度匹配 LBO(LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>)进行腔内倍频,实现了 502 mW 的 671 nm 输出,光-光转换效率超过 8.3%<sup>[3]</sup>;意大利研究人员用 10 W 的 LD 抽运三镜折叠腔结构,采用了 II 类温度匹配 LBO 进行腔内倍频,实现了 430 mW 的 671 nm 输出<sup>[4]</sup>。

分析上述各种方式,用 KTP 倍频时晶体不需要进行精确的温度控制,但因走离角大,导致晶体有效工作区短,倍频效率低,并且光斑质量差;而使用温度匹配 LBO 倍频虽然效率高,但对温控要求十分严格,难以产业化。特别是 I 类温度匹配 LBO 倍频效率虽然最高,但其匹配温度低[非临界相位匹配(NCPM)温度约 5℃],室温下要求环境干燥,否则晶体表面易结雾,影响器件正常工作。因此有必要寻找新的倍频晶体或倍频方式来获得高的倍频效率和良好的光束质量的红光输出。

作者曾报道了将临界位相匹配 LBO 晶体用于 1.342 μm 腔内倍频的研究成果<sup>[5]</sup>。本文则采用大功率的光纤耦合 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体, I 类临界相位匹配 LBO 腔内倍频,采用短三镜折叠腔结构,在 8 W 抽运功率下,获得了高达 1.8 W 的连续 671 nm 红光基模输出,光-光转换效率高达 22.5%。

## 2 理论分析

### 2.1 临界相位匹配 LBO 倍频

选择倍频晶体时,晶体的匹配类型、匹配角度、有效非线性系数、走离角、接收角等参数都是要考虑的。它们一方面决定着对倍频晶体的切割角度和长度的选取,另一方面也作用于激光谐振腔的设计。使用 SNLO 软件对 KTP 和 LBO 对 1342 nm→671 nm 的角度匹配倍频参数进行了计算。表 1 列出了典型的倍频参数值。

表 1 倍频晶体的典型参数(T=300 K)

Table 1 Main parameters of frequency-doubled crystals

(T=300 K)

Crystal	KTP	LBO	LBO
Critical phase matching	Type-II	Type-I	Type-II
CPM angle ( $\theta, \varphi$ )	59.9, 0	86.1, 0	3.6, 0
$d_{\text{eff}} / (\text{pm}/\text{V})$	2.84	0.817	0.645
Walk-off angle / mrad	44.3	3.45	3.25
Accept angle / mrad · cm	1.69	24.29	26.07

由表 1 可以看出,对 1342 nm 倍频时,LBO 有

效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  明显小于 KTP,但却具有走离角小、允许角大、相互作用长度长的优点。根据由走离效应决定的倍频晶体最大作用长度 ( $L_{\text{max}}$ ) 公式<sup>[6]</sup>

$$L_{\text{max}} = 1.16w/\rho, \quad (1)$$

其中  $w$  为基频激光束半径,  $\rho$  为走离角。(1) 式表明,在走离角  $\rho$  很小的情况下,适当减小  $w$  仍有较大的  $L_{\text{max}}$  值。而减小  $w$ , 会增加腔内经过 LBO 的基频光功率密度,从而提高倍频效率。若设  $w = 100 \mu\text{m}$ , 则可计算出对应的基频光波在各晶体中的相互作用最大长度值。考虑到腔内倍频时倍频光输出功率与有效非线性系数  $d_{\text{eff}}$  和晶体作用长度  $L_{\text{max}}$  的乘积平方成正比,将  $d_{\text{eff}}$  与  $L_{\text{max}}$  相乘,可知 I 类临界匹配 LBO 对应的值最大,为 27.86 ( $d_{\text{eff}} = 0.817 \text{ pm}/\text{V}$ ,  $L_{\text{max}} = 34.1 \text{ mm}$ ); II 类 LBO 其次,为 23.16 ( $d_{\text{eff}} = 0.645 \text{ pm}/\text{V}$ ,  $L_{\text{max}} = 35.9 \text{ mm}$ ); 而 II 类 KTP 最小,仅为 7.38 ( $d_{\text{eff}} = 2.84 \text{ pm}/\text{V}$ ,  $L_{\text{max}} = 2.6 \text{ mm}$ )。即使我们将 LBO (I 类) 晶体长度取为  $L = 10 \text{ mm}$ , 此时的倍频效率也将高于 KTP。因此,选用较长的 I 类 LBO, 优化设计出相对小的光腰尺寸来获得较高的倍频转换效率。

### 2.2 谐振腔设计

即使在中功率抽运条件下,激光晶体的热透镜效应仍很明显,因此,在设计腔型前,对 Nd:YAG 晶体的热透镜焦距进行估算是必要的。在此,将受热的激光晶体等效为一个薄透镜,下式为端面抽运情况下,热透镜焦距公式<sup>[7]</sup>

$$\frac{1}{f_{\text{th}}} = \frac{\xi P_{\text{abs}}}{4\pi K_c w_p^2} [dn_0/dT + (n_0 - 1)\alpha_T], \quad (2)$$

其中  $\xi$  为热负荷比,  $P_{\text{abs}}$  为吸收的抽运功率,  $K_c$  为热导率,  $w_p$  为平均抽运光斑半径,  $n_0$  为环境温度下的折射率,  $dn_0/dT$  为折射率温度系数,  $\alpha_T$  为热膨胀系数。实验中所用 Nd:YVO<sub>4</sub> 的有关参数为:  $\xi = 0.4$ ,  $K_c = 0.0523 \text{ W}/(\text{K} \cdot \text{cm})$ ,  $w_p = 200 \mu\text{m}$ ,  $n_0 = 2.165$ ,  $\alpha_T = 4.43 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。计算可得,在 8 W 抽运功率下,热焦距  $f_{\text{th}}$  约为 150 mm。

为了充分利用抽运能量和提高 LBO 的倍频效

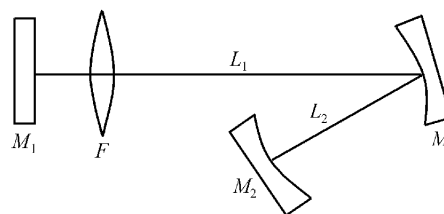


图 1 折叠腔示意图

Fig. 1 The schematic of folded cavity

率,采用了图 1 所示的折叠谐振腔结构<sup>[6]</sup>。其中,  $M_1, M_2$  分别为分臂 1, 分臂 2 的端镜, 曲率半径分别为  $R_1, R_2$ , 折叠输出镜  $M$  的曲率半径为  $R$ ,  $F$  为激光晶体的等效热透镜, 假设热透镜中心在激光晶体的中心,  $M$  与  $M_1, M_2$  之间的距离为  $L_1, L_2$ 。

在设计激光谐振腔时, 首先考虑到伴随热透镜所产生的高阶球差引起的附加衍射损耗, 第 1 分臂的基频光腰应略小于抽运光聚焦光斑, 这样有利于获得 TEM<sub>00</sub> 模输出<sup>[9]</sup>; 其次, 由倍频效率公式  $\eta = kI_{\omega}$  ( $k$  与非线性晶体有关的转换因子) 可知, 倍频效率与基频光强成正比, 为了提高转换效率, 第 2 分臂的光腰尺寸要小。以此两点为前提, 通过计算机优化设计, 便可选取合适的腔型参数。

考虑到热透镜效应的补偿, 抽运能量的充分利用, 以及 LBO 倍频效率的提高, 采用 G 参数等价腔分析法, 通过计算机辅助优化设计, 选取第 1 分臂长为 63 mm, 第 2 分臂长为 29 mm (此时  $w_{01}$  约为 145  $\mu\text{m}$ , 位于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内;  $w_{02}$  约为 55  $\mu\text{m}$ , 放置 LBO)。该腔型为良好的热稳定腔, 即当改变抽运功率使激光晶体的热焦距发生变化时, 谐振腔仍然是稳定腔。

### 3 实验结果

实验装置如图 2 所示。抽运源为最大输出功率 10 W 的光纤耦合输出半导体阵列激光器(耦合光纤直径为 400  $\mu\text{m}$ , 数值孔径为 0.22), 25 $^{\circ}\text{C}$  下输出中心波长为 806.6 nm; 经准直聚焦系统(传输耦合效率约为 80%)会聚成直径 400  $\mu\text{m}$  的抽运光斑, 注入到 Nd:YVO<sub>4</sub> 工作物质中, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体采用  $a$  轴切割, 掺杂浓度(原子数分数)为 0.5%, 尺寸为 3 mm $\times$ 3 mm $\times$ 5 mm, 其左端镀 808 nm 增透, 1342 nm 高反双色膜作为一个腔镜, 右端对 1342 nm 增透; 将其安装在金属座上。由于晶体与金属座之间存在热阻, 需在两者之间裹上一层铝箔, 以达到紧密接触的目的。增益介质中的热量传给晶体座, 再通

过半导体致冷器导出至散热片, 最后通过涡流风扇被空气吹走。

曲率半径 50 mm 的平凹镜作为折叠输出镜, 凹面镀 1342 nm 高反膜, 1064 nm 和 671 nm 增透膜, 平面对 671 nm 增透; 第 2 分臂的端镜为曲率半径为 200 mm 平凹镜, 凹面镀 1342/671 nm 高反双色膜。倍频晶体采用 I 类临界相位匹配 LBO, 尺寸为 2 mm $\times$ 2 mm $\times$ 12 mm, 两端面镀 1342/671 nm 增透双色膜。Nd:YVO<sub>4</sub> 与 LBO 分别用致冷器温控, 实验中所用致冷器的控温范围为 -20 $^{\circ}\text{C}$  ~ +50 $^{\circ}\text{C}$ , 控温精度为 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

通过温度调节, 使抽运光中心波长与 Nd:YVO<sub>4</sub> 的中心吸收波长 808.9 nm 重合, 在抽运光功率为 8 W 时, 获得了 1.8 W 的红光连续输出, 光-光转换效率为 22.5%。图 3 描述了红光输出功率随

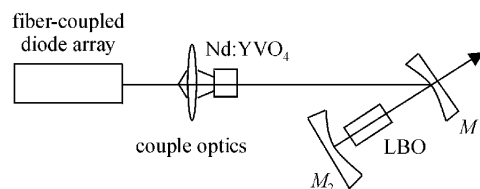


图 2 光纤耦合 LD 抽运 Nd:YAG/LBO 红光激光器示意图  
Fig. 2 Setup of LD-pumped Nd:YAG/LBO red laser

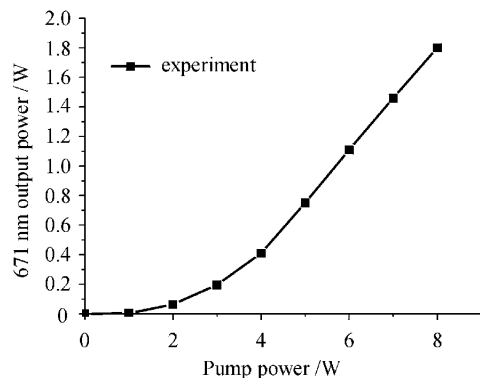


图 3 671 nm 红光输出功率随抽运功率的变化  
Fig. 3 671 nm output as a function of 808 nm pump power

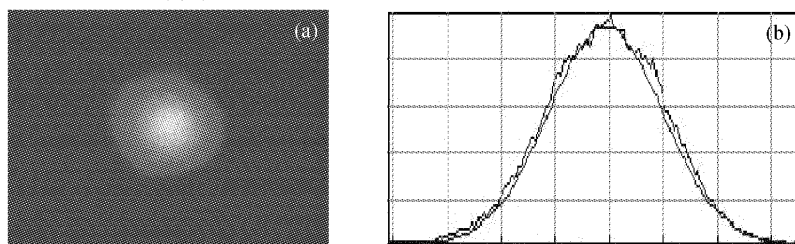


图 4 远场光斑照片(a)和能量近高斯函数分布曲线(b)

Fig. 4 Spot photo (a) and spatial energy distribution (b) for the 671 nm laser

抽运功率的关系曲线。用光束轮廓分析仪测量表明是良好的 TEM<sub>00</sub> 模,其  $M^2$  因子小于 1.3。图 4 给出了远场光斑照片和能量近高斯函数分布曲线。

## 4 结 论

报道了一种光纤耦合 LD 抽运全固态瓦级 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 折叠腔红光激光器,采用 I 类临界相位匹配 LBO 作为倍频晶体,在 8 W 抽运功率下,利用优化设计的短三镜折叠腔结构,获得了 1.8 W 的红光连续 TEM<sub>00</sub> 模输出,光-光转换效率达到 22.5%,达到了全固态大功率红光激光器实用化和产业化的要求。

## 参 考 文 献

- 1 A. W. Tucker, M. Birnbaum, C. L. Fincher *et al.*. Stimulated-emission cross section at 1074 and 1342 nm in Nd:YVO<sub>4</sub>[J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(12):4907~4911
- 2 Wang Changqing, Shen Deyuan, Lu Jianren *et al.*. 1.34  $\mu\text{m}$  intracavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub> laser pumped by a laser diode [J]. *Chinese J. Lasers*, 1997, **A24**(7):577~580  
王长青,沈德元,卢建仁等. 激光二极管泵浦的 1.34  $\mu\text{m}$  及其腔内倍频红光 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. 中国激光, 1997, **A24**(7):577~580
- 3 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*, 1998, **47**(9):1579~1584  
张恒利,何京良,陈毓川等. 激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 1342 nm 和 671 nm 激光器研究[J]. 物理学报, 1998, **47**(9):1579~1584
- 4 A. Agnesi, G. C. Reali, P. G. Gobbi. 430-mW single-transverse-mode diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 671 nm [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1998, **34**(7):1297~1300
- 5 Zheng Quan, Tan Huiming, Zhao Ling *et al.*. LD-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> frequency-doubled by CPM LBO laser at 671 nm [J]. *High Technology Letters*, 2001, **11**(11):48~51  
郑权,檀慧明,赵岭等. LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体 LBO 临界相位匹配 671 nm 激光器[J]. 高技术通讯, 2001, **11**(11):48~51
- 6 J. J. Zondy, M. Abed, S. Khodja. Twin-crystal walk-off-compensated type-II second-harmonic generation: single-pass and cavity-enhanced experiments in KTiOPO<sub>4</sub>[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1994, **11**(12):2368~2370
- 7 Yung-Fu Chen, S. W. Tsai. Diode-pumped Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> yellow laser with intracavity sum-frequency mixing [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(6):397~399
- 8 Zheng Quan, Zhao Ling, Tan Huiming *et al.*. LD-pumped high efficient folded-cavity YAG/LBO blue laser [J]. *Laser & Infrared*, 2001, **31**(3):144~146  
郑权,赵岭,檀慧明等. LD 泵浦的高效率折叠腔 YAG/LBO 蓝光激光器[J]. 激光与红外, 2001, **31**(3):144~146
- 9 Liu Junhai, Lü Junhua, Lu Jianren *et al.*. Mode matching in high-power laser-diode-array end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> solid-state lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2):186~189  
刘均海,吕军华,卢建仁等. 高功率端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 固体激光器模式匹配的研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(2):186~189