

LBO Ⅱ类非临界相位匹配腔内 倍频 671 nm 激光器*

张恒利 何京良 侯 玮 房晓俊 李 健** 冯宝华 许祖彦
(中国科学院物理所光物理实验室, 北京 100080)

王建明 吴 星 赵宗源

吴柏昌 陈创天

中国科学院物理所晶体生长实验室,
北京 100080

中国科学院福建物质结构研究所,
福州 350002

摘 要 报道了利用 Ⅱ类非临界相位匹配的 LBO 晶体腔内倍频、激光二极管泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器, 在吸收泵浦功率 5.44 W 时, 获得 240 mW 的 671 nm 激光输出, 光-光转换效率约 4.4%。
关键词 LBO 晶体, Nd:YVO₄ 晶体, 激光二极管泵浦激光器, 非临界相位匹配。

近几年来, 全固态激光器由于其效率高、结构简单、稳定性好、寿命长等优点而成为激光领域研究的热点。利用腔内倍频而获得的 5 W、10 W 连续输出的全固态绿光激光器产品, 由于其在很大范围内可替代氩离子激光器而倍受关注。同样, 高功率输出的全固态红光激光器也必将在很大程度上替代价格昂贵、效率低、设备复杂的氩离子激光器。目前, 主要是通过腔内倍频 1.34 μm 得到红光激光输出。利用 LBO 晶体腔内倍频, 通过温度调谐, 可以在较宽波段范围内的倍频过程^[1]和参量过程^[2, 3]中实现非临界相位匹配。Kato^[4]利用近红外染料激光器和 KTP 参量激光器作泵浦源, 将 LBO 晶体从 20°C 到 320°C 温度范围内调节, 得到 475~ 875 nm 的 Ⅱ类 90°非临界相位匹配的二次谐波输出。Conroy 等^[5]在 LBO Ⅱ类非临界相位匹配微片 Nd:YVO₄ 激光器中得到 12 mW 稳定的 671 nm 激光输出。另外, Lincoln 等^[6]利用 Ⅱ类临界相位匹配 LBO 在激光二极管泵浦 Nd:YLF 激光器中获得 300 mW 的 659 nm 激光输出作为 Cr:LiSAF 自锁模飞秒激光器的泵浦源。利用 KTP 晶体腔内倍频, 王长青等^[7]用激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 激光器中, 在吸收泵浦功率 515 mW 时, 获得 3.5 mW 的 671 nm 的激光输出。霍玉晶等^[8]在激光二极管泵浦 Nd:YAP 激光器中, 获得 95 mW 红光输出, 然后去泵浦 Cr:LiSAF 晶体获得连续近红外输出。本文报道了在激光二极管泵浦 Nd:YVO₄ 晶体, 利用 LBO 晶体的 Ⅱ类非临界相位匹配进行腔内倍频, 获得 240 mW、671 nm 激光输出。

* 国家科委 863 重大项目资助。

** 山东师范大学物理系, 济南 250014。

收稿日期: 1998-05-04

1 温度调谐 LBO 非临界相位匹配计算

KTP 晶体在对波长为 1342 nm 的光进行倍频时, 走离角比较大, 约为 2.4° , 在光斑直径 100 μm 时, 有效作用长度仅为 1.19 mm。利用 LBO 晶体腔内倍频的最大优点在于利用温度调谐, 可以实现非临界相位匹配。当倍频过程满足非临界相位匹配时, 基频光和二次谐波间的走离角为 0, 有效作用长度理论上为无穷大。因此, 利用长的非临界相位匹配的 LBO 晶体进行腔内倍频, 必能大大提高 671 nm 的转换效率。室温下 (20°C), LBO 晶体的色散方程为^[4]:

$$\left. \begin{aligned} n_x^2 &= 2.4542 + \frac{0.01125}{\lambda^2 + 0.01135} - 0.01388\lambda^2 \\ n_y^2 &= 2.539 + \frac{0.01277}{\lambda^2 - 0.01189} - 0.01849\lambda^2 + 4.3025 \times 10^{-5}\lambda^4 - 2.9131 \times 10^{-5}\lambda^6 \\ n_z^2 &= 2.5865 + \frac{0.01310}{\lambda^2 - 0.01223} - 0.01862\lambda^2 + 4.5778 \times 10^{-5}\lambda^4 - 3.2526 \times 10^{-5}\lambda^6 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

晶体温度发生变化时, LBO 晶体的主轴折射率亦将随着温度变化而变化, 其变化关系为^[4]:

$$\left. \begin{aligned} \Delta n_x &= (-3.76\lambda + 2.30) \times 10^{-6} \times (\Delta T + 29.13 \times 10^{-3}\Delta T^2) \\ \Delta n_y &= (6.01\lambda - 19.40) \times 10^{-6} \times (\Delta T - 32.89 \times 10^{-4}\Delta T^2) \\ \Delta n_z &= (1.50\lambda - 9.70) \times 10^{-6} \times (\Delta T - 74.49 \times 10^{-4}\Delta T^2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$\Delta T = T - T_0$, $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $\Delta n = n(T) - n(T_0)$, $n(T)$ 和 $n(T_0)$ 是温度为 T 及室温下的各主轴折射率, (1) 式和 (2) 式中 λ 量纲为 μm 。当基频光波长 $\lambda(\omega) = 1342 \text{ nm}$ 、二次谐波波长 $\lambda(2\omega) = 671 \text{ nm}$, 由数值计算可得在温度约为 $T_{pm} = 14^\circ\text{C}$ 时, 沿 x 轴方向满足 $n_y(0.671) = n_z(1.342)$, 可以实现 $\bar{-}$ 类非临界相位匹配。

另外, 在平面波近似下, 二次谐波的输出功率满足^[9]:

$$P(2\omega) \propto [\sin^2(\Delta kl/2)] / (\Delta kl/2)^2 \quad (3)$$

式中 l 为晶体长度, Δk 为相位失配, 在温度调谐过程中, Δk 为温度 T 的函数:

$$\Delta k(T) = 4\pi[n_y(\lambda/2, T) - n_z(\lambda, T)]/\lambda \quad (4)$$

利用 (3)、(4) 式可数值计算出二次谐波转换效率与 LBO 晶体温度的关系, 温度半宽约 6°C 。

2 实验装置、结果及讨论

实验装置如图 1 所示, 为常用的三镜折迭腔。其中作为泵浦源的激光二极管型号

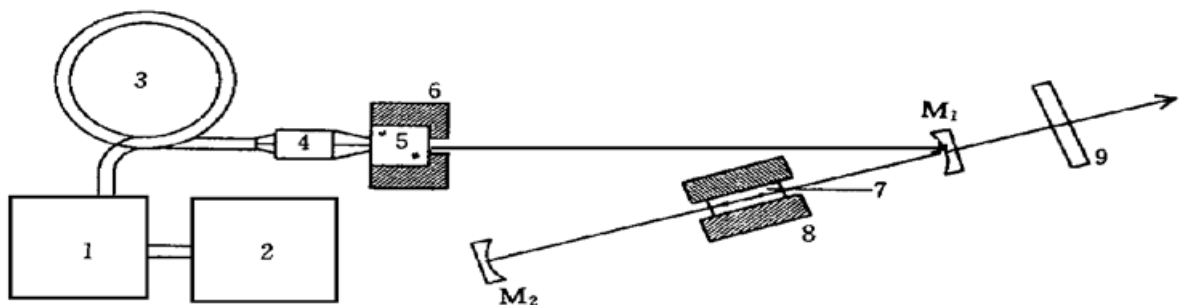


Fig. 1 Experiment setup of type- $\bar{-}$ noncritical phase-matched intracavity frequency-doubled LD pumped Nd:YVO₄ laser. 1: LD; 2: LD temperature controller; 3: fibre; 4: coupling system; 5: Nd:YVO₄ crystal; 6: copper heatsink; 7: LBO crystal; 8: LBO crystal temperature system; 9: filter

为SDL3450-P5, 室温下中心波长 805 nm, 数值孔径 0.42, 最大输出功率 10 W; 经过耦合系统后, 泵浦光斑直径约 0.6 mm, 耦合系统耦合效率约 80%。Nd:YVO₄ 晶体的钕离子掺杂的原子数分数约 1%, 一端镀对 1342 nm 高反和 808 nm 增透(透过率约 85%)的介质膜作为输入镜, 另一端镀 1342 nm 的增透膜。腔镜 M₁、M₂ 皆为平-凹镜, 其凹面曲率半径皆为 100 mm, M₁ 镀对 1342 nm 高反和 671 nm 增透双色介质膜, 作为 671 nm 激光的输出镜; M₂ 对 1342 nm 和 671 nm 双高反。LBO 晶体切割方向沿 *x* 轴, 尺寸 3 mm×3 mm×14 mm, 两端镀 1342 nm 和 671 nm 双色增透膜, 置于紫铜夹具内, 由半导体制冷器制冷。激光器工作时, LBO 晶体放于腔镜 M₁ 和 M₂ 之间的束腰处。折迭腔的两个臂长分别为 $L_1 \approx 200$ mm, $L_2 \approx 165$ mm。

在环境温度为 18℃ 时, 首先用 2.9 W 泵浦且不加 LBO 晶体时, 调节好谐振腔, 此时在倍频光的输出方向上得到 45 mW 的基频 1342 nm 激光输出; 加入 LBO 晶体后, 通过仔细调节, 可直接得到微弱的红光输出(约几毫瓦)。对 LBO 晶体进行制冷, 逐渐降低其温度, 在由室温降至 5.8℃ 的过程中, 可以看到红光输出在经过两次较小的波动后达到最大值。图 3 为在吸收泵浦功率 3 W 时, LBO 晶体紫铜夹具的温度与 671 nm 激光输出的变化关系, 图中实线为根据式(3)、(4)式得出的拟合曲线。从图中可以看出, 在 5.8℃ 时, 倍频光的输出达到最大值。进一步降低晶体温度, 倍频光的输出将迅速减小。与前面的理论计算比较, 可以看出存在两点大的差别: 一是实验测得非临界相位匹配温度为 5.8℃, 低于理论计算的 14℃; 二是实验测得温度半宽为 2.5℃, 是理论计算的温度半宽的二分之一。根据具体的实验条件, 我们认为造成这些差别的原因主要有以下两点: 1) 温度检控点为 LBO 晶体的紫铜夹具; 2) 我们所用紫铜夹具是自己简单加工的, 只能覆盖 LBO 晶体的一部分, 因而使得检测点温度与 LBO 晶体的温度有较大的差别, 而且它们的变化也不能精确同步, 也即紫铜夹具的温度变化速度大于 LBO 晶体的温度变化速度; 3) LBO 晶体本身温度不均匀。维持晶体夹具温度稳定在 5.8℃, 改变泵浦功率, 得到 671 nm 激光器的输入-输出关系, 如图 3 所示, 图中实线为二次拟合曲线, 方块为实验点。在吸收泵浦功率 5.44 W 时, 得到最大输出 240 mW, 光-光转换效率约 4.4%。另外, 在输出镜的另一方向上, 671 nm 的输出超过 20 mW, 计及此则红光输出超过 260 mW。输出激光光斑中心为一亮的圆斑, 四周有杂散光。激光器的阈值泵浦功率约为 1.45 W。由于 LBO 晶体潮解, 为避免低温下晶体表面结露, 没有对激光器的长期稳定性进行检测。3 分钟内, 在输出 150 mW 时, 671 nm 的输出不稳定性小于 ±2.7%。

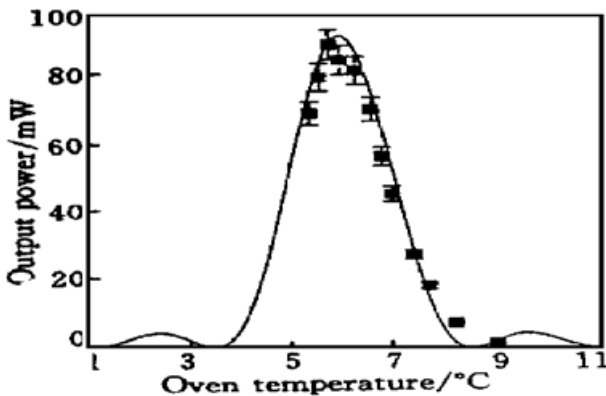


Fig. 2 671 nm laser output power versus temperature of the LBO oven

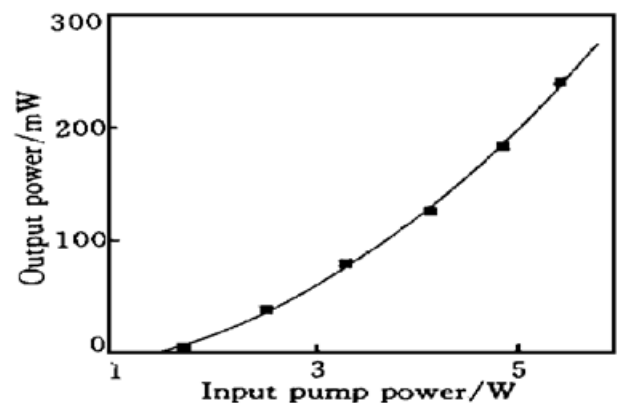


Fig. 3 671 nm laser output power as a function of pump power

结 论 利用温度控制 $\bar{\tau}$ 类非临界相位匹配的 LBO 晶体腔内倍频激光二极管泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器, 获得了 240 mW 的 671 nm 激光输出, 光-光转换效率 4.4%; 在激光器输出 150 mW 时, 激光输出短期的不稳定性小于 $\pm 2.7\%$ 。改进 LBO 晶体的温控装置, 提高低温下 LBO 晶体的温度均匀性, 将可进一步提高 671 nm 的激光输出。

感谢本研究组陈毓川博士、孔羽飞博士的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] Chen C, Wu Y, Jiang A *et al.*. New nonlinear-optical crystal: LiB₃O₅. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**(4) : 616~ 621
- [2] Lin S, Huang J Y, Ling J *et al.*. Optical parametric amplification in a lithium triborate crystal tunable from 0.65 to 2.65 μm . *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(22) : 2805~ 2807
- [3] Hanson F, Dick D. Blue parametric generation from temperature tuned LiB₃O₅. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(4) : 205~ 207
- [4] Kato K. Temperature-tuned 90° phase-matching properties of LiB₃O₅. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **30**(12) : 2950~ 2952
- [5] Lincoln J R, Ferguson A I. All-solid-state intracavity-doubled Nd:YLF laser producing 300 mW of 659 nm light. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(16) : 1213~ 1215
- [6] Conroy R S, Kemp A J, Friel G J *et al.*. Microchip Nd: vanadate lasers at 1342 and 671 nm. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(23) : 1781~ 1783
- [7] 王长青, 沈德元, 卢建仁等. 激光二极管泵浦的 1.34 μm 及其腔内倍频红光 Nd:YVO₄ 激光器. *中国激光*, 1997, **A24**(7) : 577~ 580
- [8] Huo Yujing, Shen Dezhong, Li Gansheng *et al.*. LD pumped red lasers and its application in Cr:LiSAF laser. *Proc. SPIE*, 1996, **2889** : 240~ 243
- [9] 沈元壤. 非线性光学. 北京: 科学出版社, 1987. 91

LBO Type- $\bar{\tau}$ Noncritical Phase-Matched Intracavity Frequency-Doubled 671 nm Laser

Zhang Hengli He Jingliang Hou Wei Fang Xiaojun

Li Jian Feng Baohua Xu Zuyan

(Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Wang Jianming Wu Xing Zhao Zongyuan

(Laboratory of Crystal Growth, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Wu Baichang Chen Chuangtian

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

(Received 4 May 1998)

Abstract With a type- $\bar{\tau}$ noncritical phase-matched LBO crystal as the intracavity frequency doubler in a LD pumped Nd:YVO₄ laser, 240 mW of 671 nm laser output was obtained with 5.44 W absorbed pump power, the optical-optical conversion efficiency is 4.4%.

Key words LBO crystal, Nd:YVO₄ crystal, LD pumped laser, noncritical phase-matched.