

激光二极管泵浦 Nd·YVO₄/LBO 腔内 倍频瓦级连续波绿光激光器*

何京良¹⁾ 王建明²⁾ 侯 玮¹⁾ 赵宗源²⁾ 许祖彦¹⁾ 吴 星²⁾ 杨国桢¹⁾

1), 中国科学院物理所光物理实验室, 北京 100080
2), 中国科学院物理所晶体生长实验室, 北京 100080

摘 要 报道一种激光二极管端面泵浦 Nd·YVO₄ 晶体、LBO 腔内倍频的全固态瓦级连续波 (CW) 绿光激光器。对 LBO 采用 I 类非临界相位匹配(NCPM)、温度调谐, 当泵光功率为 5.5 W 时, 获得了 1.2 W TEM₀₀模 532 nm 连续波绿光输出, 光-光转换效率达 22%, 电-光转换效率达 3%。

关键词 全固态绿光激光器, Nd·YVO₄, LBO 腔内倍频。

1 引 言

激光二极管泵浦的全固态连续波绿光激光器由于具有效率高、寿命长、使用方便、结构紧凑和性能稳定等优点, 近年来成为国际上竞相研究开发的热点。特别是大功率的全固态绿光激光器, 在军事、医疗、科研诸多领域有重要的用途。最近有文献报道^[1], 用 20 W 激光二极管泵浦 Nd·YAG、KTP 腔内倍频, 获得 6.3 W 连续波绿光输出, 可代替氩离子激光器泵浦钛宝石激光器。

本文报道一种采用激光二极管端面泵浦 Nd·YVO₄ 晶体、LBO 腔内倍频的高效率全固态连续波绿光激光器, 它的最大输出功率为 1.2 W (TEM₀₀模, 532 nm)。其光-光转换效率达 22%, 电-光转换效率为 3%, 比同量级功率输出的氩离子激光器高一个数量级以上。

2 Nd·YVO₄/LBO 绿光激光器结构

Nd·YVO₄/LBO 绿光激光器采用三镜折叠腔结构, 如图 1 所示。这种腔结构的优点是将倍频光与基频光分开, 从而避免了 Nd·YVO₄ 对绿光的吸收, 同时可产生两个束腰, 将激光晶体与倍频晶体分别放在两束腰处, 以求获得较大的泵光功率密度和较高的倍频转换效率。另外, 对端镜 M₃ 镀双色高反膜以实现腔内双通倍频、单向输出。

实验用的激光二极管(SDL-3450-P5), 在 25℃时中心波长是 805 nm, 最大输出是 10 W。

* 国家九五 863 重点资助项目。

收稿日期: 1997-03-22; 收到修改稿日期: 1997-07-23

通过对其工作环境温度的调节,使泵光中心波长落在 Nd:YVO₄ 晶体的吸收峰 808 nm 上,此时最大输出功率只有 8 W 左右。激光二极管的发射光通过光纤耦合输出,发散角较大(FWHM 值为 48°),光纤芯径为 400 μm,数值孔径为 0.42。选用 0.25 节距的自聚焦棒状透镜将光纤输出光束耦合到腔内,透镜通光口径为 φ2 mm,长 5.22 mm,NA = 0.46,尽管棒状透镜尺寸很小,但数值孔径大,工作距离短,较适合于光纤和腔之间的传输耦合。实验测得它的传输效率在 83% 以上。

Nd:YVO₄ 晶体具有较大的吸收系数、受激发射截面和大的吸收带宽,非常适合于激光二极管泵浦。实验中所用 Nd:YVO₄ 晶体是物理所自己生长的,尺寸为 3×3×5 mm³,Nd³⁺ 掺杂的原子质量分数为 0.8%。为减少腔内元件数量、降低损耗,将 Nd:YVO₄ 晶体的一个端面作为输入腔镜,镀 808 nm 增透和 1.064 μm 的高反膜,另一面镀 1.064 μm 的增透膜。输出镜 M₂ 镀 1.064 μm 的高反膜和 532 nm 的增透膜。端镜 M₃ 镀双色高反膜。布儒斯特片的插入是为了补偿由于折迭腔而产生的像散^[2]。腔长的设计和腔镜的选取按照泵光与腔 TEM₀₀ 模相匹配的原理,同时考虑到倍频晶体的最佳聚焦点和接收角的大小对倍频效率的影响及腔的稳定性等问题,选取腔镜 M₂ 和 M₃ 的曲率半径均为 80 mm,总腔长为 360 mm,LBO 倍频晶体中心落在距输出镜约为 42 mm 的束腰处。

LBO 晶体是一种优良的非线性倍频晶体。它的非线性系数虽然比 KTP 小一些,但光谱透明区和匹配范围更宽,且有高的破坏阈值和很小的离散角^[3]。在 1.06 μm 波段倍频,可实现 I 类非临界相位匹配、温度调谐以消除孔径效应。这意味着在大功率泵浦情况下,可使用较长的倍频晶体,以获得更高的转换效率。实验中用的 LBO 晶体是中科院福建物构所生长的,尺寸为 3×3×14 mm³,两端镀双色增透膜,放在温度均匀分布的炉子里。

3 实验结果及分析

LBO 是一种负双轴晶体,根据 I 类非临界相位匹配条件,可推出它的倍频效率与温度的关系。由 Kato 修改后的 Sellemier 方程^[4](λ 以 μm 为单位):

$$n_x(T) = n_x(T_0) + (-3.76\lambda + 2.30) \times 10^{-6} \times [\Delta T + 29.13 \times 10^{-3}(\Delta T)^2]$$

$$n_y(T) = n_y(T_0) + (6.01\lambda - 19.40) \times 10^{-6} \times [\Delta T - 32.89 \times 10^{-4}(\Delta T)^2]$$

$$n_z(T) = n_z(T_0) + (1.50\lambda - 9.70) \times 10^{-6} \times [\Delta T - 74.49 \times 10^{-4}(\Delta T)^2]$$

其中:

$$n_x^2(T_0) = 2.4542 + \frac{0.01125}{\lambda^2 - 0.01135} - 0.01388\lambda^2$$

$$n_y^2(T_0) = 2.5390 + \frac{0.01277}{\lambda^2 - 0.01189} - 0.01849\lambda^2 + 4.3025 \times 10^{-5}\lambda^4 - 2.9131 \times 10^{-5}\lambda^6$$

$$n_z^2(T_0) = 2.5865 + \frac{0.01310}{\lambda^2 - 0.01223} - 0.01862\lambda^2 - 4.5778 \times 10^{-5}\lambda^4 - 3.2526 \times 10^{-5}\lambda^6$$

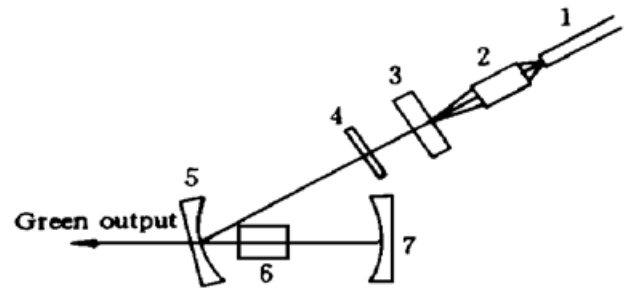


Fig. 1 Schematic of the all-solid-state green laser. 1: End of fiber, 2: selfoc. lens, 3: Nd:YVO₄(M₁), 4: Brewster plate, 5: end mirror M₂, 6: LBO crystal, 7: output couple mirror M₃

$$\Delta T = T - T_0 \quad (\text{取室温 } T_0 = 20^\circ\text{C})$$

在 I 类非临界相位匹配, $\theta = 90^\circ$ 、 $\varphi = 0^\circ$ 时, 可以得到:

$$n_1(\omega) = n_z(\omega, T)$$

$$n_2(2\omega) = n_y(2\omega, T)$$

式中 $n_1(\omega)$ 、 $n_2(2\omega)$ 分别为慢光和快光的折射率。而倍频效率

$$\eta \propto \sin^2 \left[\frac{\Delta k l}{2} \right]$$

其中 $\Delta k = \frac{4\pi}{\lambda} [n_2(2\omega) - n_1(\omega)]$ 为失谐量。根据以上公式, 通过计算得到倍频效率与温度关系的理论曲线(图 2 中实线所示) 与实验得到的温度调谐曲线(图 2 中的点线) 两者基本相符。绿光最大功率输出出现在 $T_{mp} = 153.3^\circ\text{C}$, 此值随泵光功率的变化略有改变。

图 3 为实验中测得的连续波绿光输出功率与泵光功率的关系曲线, 泵光阈值为 1.1 W。当泵光为 5.5W 时, 获得最大连续波绿光输出为 1.2 W, 模式为 TEM₀₀ 模, 光-光转换效率为 22%, 电-光转换效率为 3%。还对激光器绿光输出功率的稳定性进行了测试: 在半小时内测得连续波绿光输出功率抖动的相对平均值约为 3%。造成绿光输出功率不稳定的原因除了 LBO 的温度控制精度不够外, 另一主要原因是由于腔内各振荡纵模通过和频而产生的各纵模非线性耦合作用导致了光能在各个纵模间不断转换, 产生绿光输出功率的波动, 即所谓的“绿光问题”。

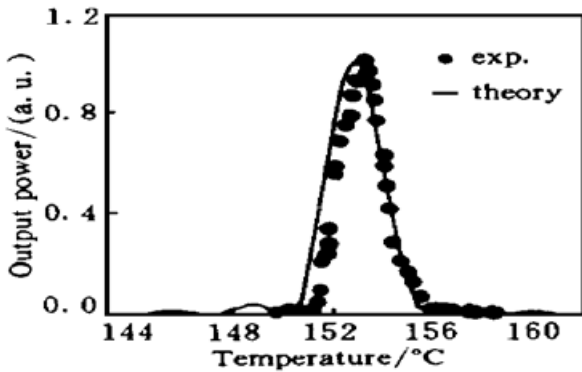


Fig. 2 LBO I-type NCPM SHG temperature-tuned curve

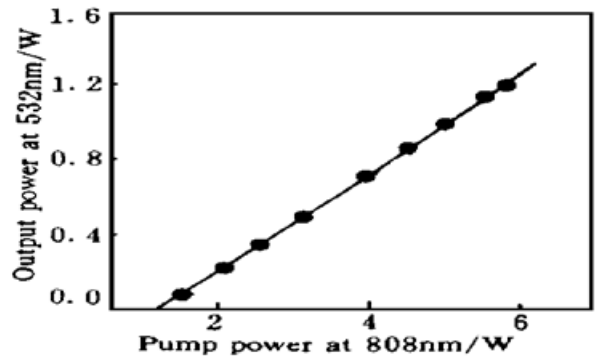


Fig. 3 Nd·YVO₄/LBO laser output power at 532 nm as a function of pump power

由于 Nd·YVO₄ 晶体的导热性较差, 当泵光功率超过某一值时, 在泵光焦点处, 由于功率密度过大, 出现热透镜效应, 使绿光输出功率下降, 模式改变。在此实验中, 当泵光功率为 5 W 时, 开始出现这一现象。经过调节光路参数, 可部分补偿热透镜效应, 此时, 绿光功率的输出仍可随泵光功率的增大而提高。当泵光功率超过 5.5 W 时, 绿光功率输出趋于饱和。这是因为此时激光晶体产生的热透镜效应已超出了所能调节的范围。因此, 要想获得更高的输出效率, 除了完善腔的结构以外, 如何最大限度地降低热效应将是今后必须解决的另一重要问题。

结 论 通过以上实验发现: 大功率激光二极管泵浦 Nd·YVO₄、LBO 腔内倍频的全固态激光器由于具有阈值低、转换效率高和输出功率大等特点, 在获得瓦级以上连续波绿光输出方面显示出一定的优势和潜力。

参 考 文 献

- [1] Masaki Tsunekane, Noboru Taguchi, High-power, low-noise, continuous-wave all-solid-state Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(23) : 1912~ 1914
- [2] H. Kogelnik, E. Ippen, A. Dienes *et al.*, Astigmatically compensated cavities for CW dye laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1972, **QE-8**(3) : 373~ 379
- [3] Changtian Chen, Yichang Wu, Aidong Jiang *et al.*, New nonlinear-optical crystal: LiB₃O₅, *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1989, **6**(4) : 616~ 621
- [4] K. Kato, Temperature-tuned 90° phase-matching properties of LiB₃O₅. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1994, **QE-30**(12) : 2950~ 2952

LD Pumped Nd: YVO₄/LBO Intracavity Frequency Doubling Over 1-W Green Output Laser

He Jingliang¹⁾ Wang Jianming²⁾ Hou Wei¹⁾ Zhao Zongyuan²⁾
 Xu Zuyan¹⁾ Wu Xing²⁾ Yang Guozhen¹⁾

- 1), *Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*
 2), *Laboratory of Crystal Growth, Institute of Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*

(Received 22 March 1997; revised 23 July 1997)

Abstract Over 1 W of CW TEM₀₀ green output from LD end-pumped Nd·YVO₄ with LBO intracavity-doubled all-solid-state laser was demonstrated. The maximum CW TEM₀₀ output of 1.2 W at 532 nm was obtained by using I-type non-critical phase-matched (NCPM) temperature tuning of LBO at the pumping power of 5.5 W. The optical-optical conversion efficiency of the all-solid-state laser is 22%, the electrical-optical conversion efficiency is 3%.

Key words all-solid-state green laser, Nd·YVO₄, LBO intracavity frequency doubling.