

LD 端泵 Nd: GdVO₄/KTP 腔内倍频 绿光激光器的研究

林 浪¹, 陈振强^{1,2}, 王如刚¹, 张 戈³, 李 真¹, 陈义红⁴

(暨南大学光 1. 电工程系; 2. 光电工程研究所, 广东 广州 510632;

3. 中科院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002; 4. 广州安特激光技术有限公司, 广东 广州 510730)

[摘 要] 报道了半导体激光二极管(LD)端面泵浦 Nd: GdVO₄ 晶体, KTP 晶体腔内倍频实现了 531.7 nm 连续波绿色激光器. 采用简单、紧凑的平凹直腔结构, 当注入泵浦的功率为 12W 时, 得到了 372 mW 的稳定绿光输出, 光-光转换效率为 3.1%. 功率稳定性半小时内优于 $\pm 1.2\%$.

[关键词] 半导体激光二极管; Nd: GdVO₄; 腔内倍频; 相位匹配角

[中图分类号] TN248.1 [文献标识码] A [文章编号] 1000-9965(2007)01-0070-04

Studies on LD end-pumped Nd: GdVO₄/KTP Intra-cavity-frequency-doubling Green Laser

LIN Lang¹, CHEN Zhen-qiang^{1,2}, WANG Ru-gang¹, ZHANG Ge³,
LI Zhen¹, CHEN Yi-hong⁴

(1. Department of Optoelectronic Engineering;

2. Institute of Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

3. Fujian Institute of Research on Structure of Matter, The Chinese Academy of Science, Fuzhou
350002, China; 4. Ante Laser (Guangzhou) Co Ltd, Guangzhou 510730, China)

[Abstract] An LD end-pumped Nd: GdVO₄, KTP Intra-cavity frequency doubling Green Laser at 531.7 nm is reported. Using simple compact flat-concave cavity, 531.7 nm continuous green laser is obtained by 1 063.4 nm Intra-cavity frequency doubling with KTP crystal. When the incident pump power is about 12 W, the stable output power of 372 mW was achieved at 531.7 nm. The optical-to-optical conversion efficiency is up to 3.1% and the power fluctuation is less than $\pm 1.2\%$ for 0.5 h.

[Key words] Diode Laser; Nd: GdVO₄; Intra-cavity-frequency-doubling; phase-matching angle

1 引言

近年来, 随着国内半导体激光技术的进步和国

外半导体激光器价格的降低, LD 端泵的全固态连续绿光激光器的研究取得了快速的进展. 全固态连续绿光激光器具有光束质量好、发散角小、亮度高、

高稳定性、结构紧凑等一系列优点,在高密度光学数据存储、生物医学诊断、相干光通信、海洋探测、光学测量和传感、大屏幕彩色显示等领域有着广泛的应用^[1]. Nd: GdVO₄ 作为激光工作物质因其有一系列优良的光学特性,掺杂 Nd³⁺ 离子从能级⁴F_{3/2}到⁴I_{11/2}受激跃迁产生 1 060 nm 波段的激光辐射,是 LD 泵浦全固态中小功率绿光激光器的理想材料;同 Nd: YVO₄相比, Nd: GdVO₄ 具有完全类似的激光性能. 因为 GdVO₄ 是一种与 YVO₄ 同晶型的 Nd³⁺ 基质晶体,但 Nd: GdVO₄ 在 808 nm 附近处有较高的吸收系数,在 1 064 nm 处有较大的受激发射截面^[2],沿 <110> 方向的热导率是 Nd: YVO₄ 的 2.1 倍^[3]. 因此, Nd: GdVO₄ 是更适于发展中小型 LD 泵浦全固态激光器的激光工作物质之一.

本文利用 Nd: GdVO₄ 代替常用的 Nd: YVO₄ 作为激光工作物质,通过 KTP 腔内倍频来实现全固态绿光输出;使用结构紧凑的平凹直腔并适当利用激光晶体的热透镜效应来设计倍频晶体在腔内的最佳位置,实现了稳定连续的绿光输出.

2 理论分析

腔内倍频是固态倍频激光器中常用的方法,由于腔内的基频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的倍频转换效率,尤其是以直腔倍频 CW 中小型激光器的倍频过程. 设计合理的腔型结构和倍频晶体的位置,是提高倍频效率的关键技术. 基频光的光功率密度的强弱对倍频晶体的转换效率有很大的影响,当基频光不太强时,倍频光转换效率低,可由倍频表达公式^[4]表示

$$\eta_{\text{linle}} = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = l^2 K \frac{P_{\omega} \sin^2(\Delta k l / 2)}{A(\Delta k l / 2)} \quad (1)$$

其中对于给定波长和非线性晶体, K 为常量, l 为非线性晶体的长度, A 为基频光的光斑面积, $P_{2\omega}$ 为倍频光的光功率, P_{ω} 为基频光的光功率. 由公式(1)可知,倍频光的转换效率主要是由光功率密度 P_{ω}/A 、晶体长度 l 和相位失配 Δk 决定;当 l 给定, $\Delta k \neq 0$ 时,存在一个最佳的基频光强,使得转换效率达到最大值,所以增大光功率密度可以提高倍频光的转换效率. 提高基频光功率密度通常可以利用透镜对基频光聚焦,但在实验中我们并不利用一个短焦距的透镜对基频光聚焦,因为考虑到倍频晶体的破坏阈值比较低,对基频光聚焦可能破坏晶体,而

且如果聚焦的腰斑控制不好,会使其发散角变大,超出相位匹配角允许范围,转换效率反而会下降;激光晶体在泵浦光作用下,当泵浦功率及热载荷达到一定程度时呈现热透镜效应^[5];尽管我们使用制冷设备对激光晶体热效应引起的变形有很大的缓解作用,但是在连续泵浦作用下它的热透镜效应来不及消除,仍然存在一定的形变. 所以我们利用晶体这种热效应等效以一个透镜来处理,它对基频光有聚焦作用,并把谐振腔分为两个子腔,从而会在两个子腔中出现两个基频腰束,通过 ABCD 定律可以优化谐振腔,保证倍频晶体处于基频光的高功率密度的腰束处,实现较高的转换效率. 同时通过调节激光晶体的位置使泵浦光和基频光达到最优化的模式匹配. 腔内的高斯光束分布如图 2 所示,把激光晶体等效一个透镜,其热焦距计算公式^[3,6]为:

$$f_r = \frac{\pi k_c \omega_p^2}{p_{ph} (dn/dt)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \\ = \frac{\pi k_c \omega_p^2}{\xi p_p (dn/dt)} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (2)$$

其中 k_c 为热传导系数, ω_p 为泵浦光入射到工作物质的光束半径, P_p 为泵浦光在晶体端面的功率, ξ 为泵浦光转化热量的效率, dn/dt 为激光晶体折射率随温度的变化率, α 为晶体吸收系数, l 为晶体的长度. 我们实验中所用的激光晶体 Nd: GdVO₄, $k_c = 11.7 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$, $dn/dt = 4.7 \times 10^{-6}/\text{k}$, $\alpha = 7.4/\text{mm}$, $\xi = 0.24$, $l = 6 \text{ mm}$, $\omega_p \approx 250 \text{ } \mu\text{m}$. 经过 MATLAB 程序数值计算,可得到泵浦功率与热透镜关系如图 1 所示. 从图 1 可以看出,热焦距随泵浦功率增大而减小,当泵浦功率大于 10 W 的时候,热透镜效应对基频光有明显的影响. 当确定某个泵浦功率后,就可以确定热焦距,根据 ABCD 定律和

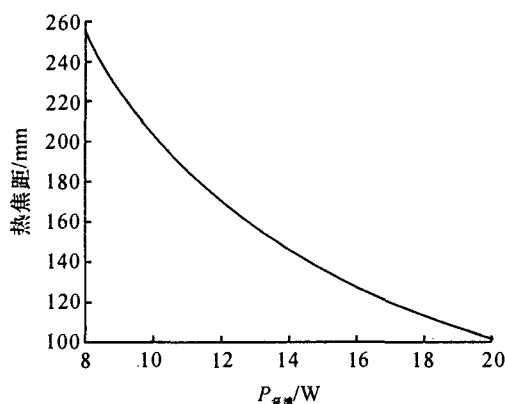


图 1 热透镜焦距与泵浦功率的关系

稳定条件,可以确定倍频晶体的最佳位置和晶体中的束腰大小,这样可以保证在此泵浦功率泵浦下,倍频光转换效率最高.当施加的泵浦功率为 12 W 时,对应的热透镜焦距约为 170 mm,根据文献[7]的测量方法测量,这个值基本与测量值吻合.

KTP 的倍频效率与温度有很大关系^[8],根据 II 类相位匹配条件和 Sellemier 色散方程^[9]可以推导出其倍频效率和温度之间的关系,当倍频晶体的温度在 23 ~ 31 °C 时^[10],KTP 的倍频效率较大,又由于采用的是角度匹配,所以晶体使用循环水制冷方式,室温控制在 25 °C,可以满足要求.在实验中,由于条件限制,没有很好地控制晶体温度均匀分布;倍频晶体的温度会随着入射的基频光发生非均匀变化,晶体中心的温度远高于其边缘的温度,这是由于基频光的能量集中在晶体的中心.晶体的温度变化会引起晶体的折射率的变化^[11],折射率变化又会引起相位失配量 Δk 增大,从而使晶体的倍频的转换效率增加就变得缓慢.当泵浦功率增大到一定的程度时,晶体的倍频转换效率也会明显的下降.

3 实验装置及实验结果

实验装置如图 2 所示,该实验装置包括光学耦合系统、谐振系统和控温系统.泵浦源采用武汉凌云光电公司生产的 LD,其最大输出功率为 30 W,光纤芯径为 400 μm .数值孔径为 0.22,28 °C 时发射的中心波长为 808.7 nm,光纤输出的激光经过光学耦合系统后,在 Nd:GdVO₄ 内形成半径约 250 μm 的光斑;使用平凹直腔作为谐振腔,激光晶体 Nd:GdVO₄ 和倍频晶体 KTP 由福建物质结构研究所提供,Nd:GdVO₄ 晶体的 Nd³⁺ 掺杂的原子质量数为 1%,尺寸为 4 mm × 4 mm × 6 mm,KTP 尺寸为 5 mm × 5 mm × 8 mm.采用 II 类非临界相位匹配.利用控温设备控制 Nd:GdVO₄ 晶体和倍频晶体 KTP 的温度,把 Nd:GdVO₄ 用铂金纸紧裹放置于精心设计的四周通有冷却水的紫铜夹块中,此紫铜夹块放置在制冷器 TEC 上,通过 TEC 使其温度处于 16 °C.KTP 置于紫铜夹块中,使用循环水制冷.为了为实现基频光 1 064 nm 的高效振荡,必须合理分配谐振腔内各元件对 808、1 064 nm 以及倍频后产生的 532 nm 的透射和反射特性.两边均镀膜兼作输入镜的 M₁ 对 808 nm 高透,对 1 064 nm 和 532 nm 全反,输出镜 M₂ 的曲率半径为 200 mm,表面镀有

1 064 nm 全反、532 nm 高透介质膜.在实验中,考虑到光学元件的放置和调节,选谐振腔的腔长为 115 mm,激光晶体与输入镜距离为 1.5 cm.根据前面分析及 ABCD 定律和高斯光束输出规律,通过计算机数值计算,可以确定泵浦功率为 12 W 时,谐振腔的参数为:激光晶体中心的基频光的半径约为 193.7 μm ,束腰半径约为 191 μm ,在等效透镜与凹镜组成的子腔中,束腰半径为 173.6 μm ,离 M₂ 距离约 5.4 cm.可见,把激光晶体等效为一个透镜对基频光有会聚作用,功率密度变大,在忽略倍频晶体的热透镜作用下,把倍频晶体置于离 M₂ 约 5.4 cm 处,对倍频效率有明显的提高.

并且由激光晶体中心的基频光的光斑半径约为 193 μm 与泵浦半径约 250 μm 可以看出,基频光与泵浦光基本满足最优先模式匹配条件(即 $\omega_0 \approx 0.8\omega_p$)^[12];这样,很有利于泵浦光利用效率的提高.

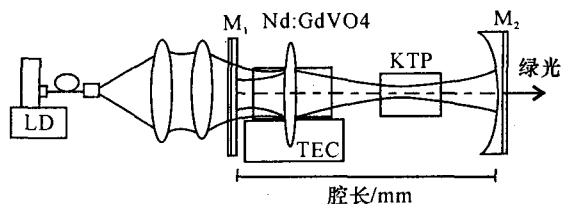


图 2 绿光激光器装置

调整半导体激光器泵浦功率,采用光功率计测得绿光输出功率如图 3 所示.当注入功率为 12 W 是,得到 372 mW 的稳定单模 531.7 nm 绿光输出,光-光转换效率为 3.1%.功率稳定性半小时内优于 $\pm 1.2\%$.其光谱图如图 4 所示,远场光斑如图 5 所示;当泵浦功率逐渐靠近 12 W 时,光-光转换效率明显逐渐增大,当泵浦功率达到 12 W 时,激光晶体的热透镜效应焦距达到设计值,谐振腔处于最佳工作状态,此时,得到较大的转换效率.继续增大泵浦功率时,从图中可以看出,输出的绿光增加变得缓慢;这是由于泵浦光增大,热透镜半径逐渐变小,谐振腔逐渐移向工作的非稳定区,由公式(1)可知,输出绿光的倍频转换效率降低;同时,KTP 中心温度发生梯度变化更加明显,使得相位失配量逐渐增大,导致转换效率增加变得缓慢.实验结果同文献[13]报道的结果相比,低转换效率的原因可能有如下几个方面:首先,KTP 和 Nd:GdVO₄ 晶体没有镀增透膜;其次,腔过长和泵浦光斑过大.晶体的光学均匀性也是影响实验结果的原因之一.

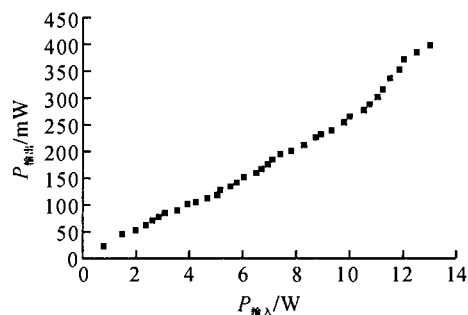


图3 绿光的输出功率随注入泵浦功率的变化

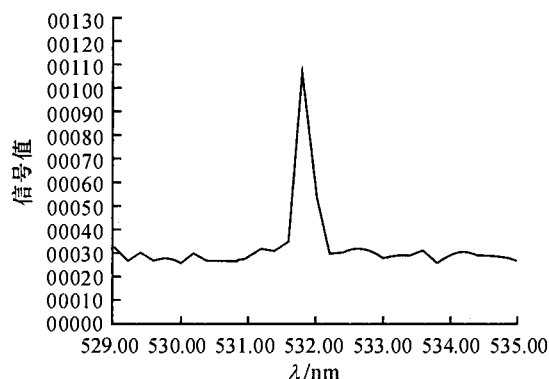


图4 KTP 倍频的绿光光谱

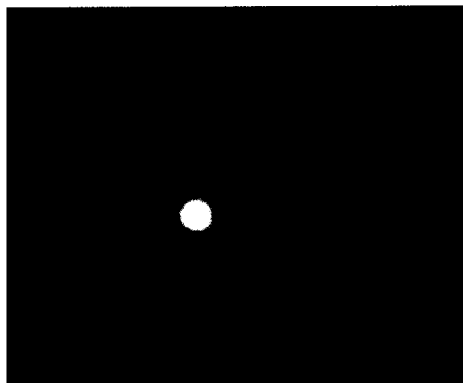


图5 KTP 倍频的绿光远场光斑

4 结论

采用 Nd: GdVO₄ 代替常用的 Nd: YVO₄ 激光工作物质,并合理的应用激光晶体的热透镜效应,采用简单的平凹直腔,在激光工作稳定情况下,倍频晶体 KTP 处于腔内最佳位置处,保证了倍频效率转换达到最高.当输入泵浦的功率为 12 W 时,得到了 372 mW 稳定的 531.7 nm 绿光输出,光-光转换效率为 3.1%.

致谢:衷心地感谢中国科学院福建物构所提供材料和帮助.

[参考文献]

- [1] HOU Xue-yuan, LI Yu-fei, SUN Yu-ming, et al. LD pumped Nd: GdVO₄/KTP intracavity frequency doubling laser[J]. Acta Photomica Sinica, 2004, 33(1): 11 - 14.
- [2] JENSEN T, OSTROUMOV V G, MEJIN J P. Spectroscopic characterization and laser performance of Diode-Laser-pumped Nd: GdVO₄ [J]. Appl Phys B, 1994, 58 (5): 373 - 379.
- [3] STUENIKIN P A, ZAGUMENNYI A I, ZAVARTSEV Y D, et al. Nd: GdVO₄ as a new medium for Solid-Laser: some optical and thermal properties laser; some optical and thermal properties of crystals Doped with Cd³⁺, Tm³⁺, and Er³⁺ ions[J]. Quantum Electronics, 1995, 25(12): 1162 - 1165.
- [4] W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京: 科学出版社: 2002: 510.
- [5] 关 俊, 李金萍, 程光华, 等. 端面泵浦固体激光器热透镜的实验研究[J]. 物理学报, 2004, 53(6): 1804 - 1809.
- [6] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER C L, et al. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state Lasers[J]. Appl Phys Lett, 1990, 56(19): 1831 - 1833.
- [7] 杨永明, 文建国, 王石语, 等. LD 端面泵浦 Nd: YAG 激光器中的热透镜焦距[J]. 光子学报, 2005, 34 (12): 1769 - 1772.
- [8] PAN Qing, ZHANG Jun, ZHANG Tian-cai, et al. Frequency-stabilized and frequency-doubled ring Nd: YAP laser[J]. Chinese Lasers, 1996, A23(1): 6 - 10 (In Chinese).
- [9] WU Bai-chang, XIE Fa-li, CHEN Chuang-tian, et al. Generation of tunable coherent vacuum radiation in LiB₃O₅ crystal[J]. Opt Commun, 1992, 88(4 - 6): 451 - 454.
- [10] 郝二娟, 檀慧明, 付喜宏, 等. LD 泵浦的全固态高转化率高偏振度绿光激光器[J]. 光电子·激光. 2006, 17(2): 127 - 130.
- [11] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调协技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 58 - 63.
- [12] 武自录, 王贤华, 陈国夫, 等. 双端泵浦固体激光器模式匹配问题的实验研究[J]. 光子学报, 2002, 31(2): 223 - 225.
- [13] 尹 钊, 沈德元, 植田宪一. 激光二极管抽运的 Nd: GdVO₄ 激光器[J]. 光学学报, 2000, 20(10): 1374 - 1377.

[责任编辑: 王景周]