

文章编号:1001-5078(2007)02-0117-03

LD 端面泵浦 Yb:YAG/LBO 525nm 绿光激光器

曹洪忠^{1,2}, 檀慧明¹, 王保山^{1,2}, 田玉冰^{1,2}, 张哲^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:报道了一种激光二极管(LD)端面泵浦 10at% 掺杂 Yb:YAG 薄片激光晶体(ϕ 4mm $\times$ 1mm)、I 类临界相位匹配 LBO、腔内倍频 525nm 全固态绿光激光器。采用平凹腔结构, 在 LD 泵浦功率为 1.43W 时, 获得了最高功率为 22.3mW 的 525nm 的基模连续激光输出, 光-光转换效率为 1.5%, 光斑椭圆度为 0.99。腔内倍频激光器的倍频光输出功率受腔内基频光子数密度等的影响, 最后也对此作了讨论。

关键词:LD 端面泵浦; Yb:YAG 晶体; 525nm 绿光激光器; 腔内倍频

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A

Laser Diode End-pumped Yb:YAG/LBO 525nm Green Laser

CAO Hong-zhong^{1,2}, TAN Hui-ming¹, WANG Bao-shan^{1,2}, TIAN Yu-bing^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Graduate School of The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A laser diode end-pumped 10at% doped Yb:YAG microchip crystal, type-I critical phase-matched LBO crystal, intracavity frequency doubled 525nm solid-stated green laser is reported in the paper. Using one plano-concave resonator, with the pump power of 1.43W, 22.3mW TEM₀₀ continuous wave laser at 525nm is obtained. The optical conversion efficiency is 1.5%, and the ellipticity of the output beam is 0.99. The output power of intracavity frequency doubled laser is influenced by intracavity photons density of fundamental wave and some other physics quantity, and it also is discussed at last.

Key words: LD end-pumped; Yb:YAG crystal; 525nm green laser; intracavity frequency doubled

1 引言

Yb:YAG 晶体面世已有几十年之久, 但只有在 20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 泵浦波长在 940nm 左右的 InGaAs 激光二极管(LD)出现以后, 研究人员才注意到 Yb:YAG 的巨大潜力。Yb:YAG 晶体具有吸收带宽宽、上能级寿命长(1.3ms)、量子效率高(91.4%)、热负荷小、不存在激发态吸收和上转换、高的掺杂浓度而不会出现浓度淬灭(可以实现完全掺杂)等的优点。

Yb:YAG 的发射峰主要有两个, 一个位于 1030nm 处, 另一个位于 1050nm 处。目前, Yb:YAG 1030nm 的激光器已经获得高功率的激光输出^[1]、连续可调谐输出^[2]等。清华大学也报道了 1049nm 的 Yb:YAG 连续^[3]和调 Q^[4]激光器, 而对于其倍频光 525nm 左右的激光却未见过报道。由于 525nm 激光在激光显示等方面具有优势, 我们对此开展了研究。在 LD 输入电流为 1.8A 时, 我们采用 Spectra-

Physics 生产的 2.1W 的 LD 泵浦国产 Yb:YAG 晶体, 通过 LBO 腔内倍频获得了 22.3mW 525nm 激光输出。

2 Yb:YAG 激光性能分析

Yb:YAG 晶体为准三能级结构的激光晶体, Yb³⁺ 仅有一个基态²F_{7/2} 和一个激发态²F_{5/2}, 能级结构如图 1 所示^[5]: 在晶场作用下, 能级产生 Stark 分裂, 形成准三能级激光运行机制。1030nm 的激光下能级的 Boltzmann 因数为 0.046, 由于有较多的粒子数分布, 使得 1030nm 处存在着严重的自吸收效应, 而且难于实现粒子数反转, 尤其在泵浦功率较低时, 较难获得激光输出; 而 1048nm 处 Boltzmann 因数仅为 0.02, 所以自吸收较 1030nm 要弱, 也较易实

作者简介: 曹洪忠(1981-), 男, 中科院长春光学精密机械与物理研究所在读硕士, 主要从事全固体激光器及其频率变换方面的研究。E-mail: chz81829@eyou.com

收稿日期: 2006-07-04

现粒子数反转。因此,目前开展 LD 泵浦 1030nm 激光器的研究主要集中于瓦级以上的较大功率的激光器,而对于低功率 LD 泵浦 Yb:YAG 激光器的研究主要限于 1050nm 波长。

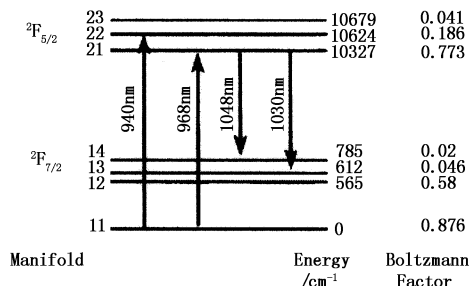


图1 Yb:YAG的 Stark 能级结构

Fig.1 the stark energy level of Yb:YAG

图2为Yb:YAG晶体的吸收光谱和发射光谱^[5]:由图可以看出Yb:YAG晶体有两个吸收带,分别位于940nm和968nm处,而且位于940nm的吸收带较宽(约18nm),这样LD就不需要像泵浦掺Nd³⁺激光器的808nm LD那样采取严格的温度控制,使其更适于LD泵浦。Yb:YAG晶体的发射峰也有两个,一个较大的位于1030nm处,另一个位于1050nm处,而且在1030nm处也存在一个明显的吸收峰,因此1050nm的激光在小功率密度泵浦的情况下较1030nm更易获得激光输出。

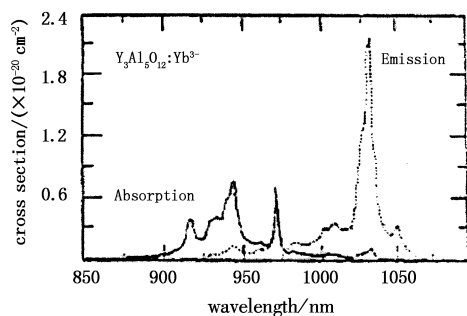


图2 Yb:YAG的吸收和发射光谱特性

Fig.2 the absorption and emission spectral properties of Yb:YAG

3 实验设置

实验装置如图3所示。实验中采用的泵浦源为Spectra-Physics公司生产的2.1W的940nm的InGaAs LD,LD的最大工作电流为1.8A,最大输出功率为1.43W,经耦合系统传输到晶体的最大泵浦功率为1.37W。Yb:YAG晶体掺杂浓度为10at%,尺寸为 $\phi 4\text{mm} \times 1\text{mm}$,晶体前表面镀1050nm和525nm的高反膜(HR1050 > 99.94% & HR525 > 99.2%)以及940nm的增透膜(HT > 88.89%),晶体后表面镀对1050nm和525nm增透膜(HT1050 > 99.7% & HT525 > 99.8%),晶体前表面和输出镜形成平凹腔结构,腔长为19.1mm;倍频晶体为2mm × 2mm × 10mm的525nm的LBO,LBO双面都镀有对

1050nm和525nm的增透膜;输出镜凹面曲率半径为100mm并且镀有1030nm高反和515nm高透的介质膜,而且对1050nm的反射率和1030nm相差不大,大于99.7%,525nm的透过率大于95%。Yb:YAG晶体用铝座紧密装夹,LBO固定于铜座上,并且都采用TEC进行严格的温度控制。

我们也采用Coherent公司生产的功率计、中科院长春光机所研制的MFS-01光纤光谱仪和美国Photon公司生产的光束轮廓仪对激光输出功率、激光波长和远场光斑等进行测量。

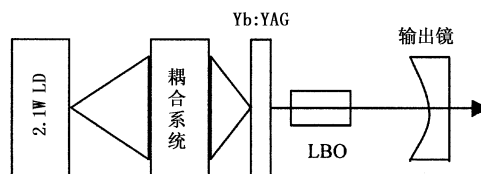


图3 LD泵浦Yb:YAG/LBO激光器实验装置图

Fig.3 experimental setup of diode-pumped Yb:YAG/LBO laser

4 实验结果与讨论

对于准三能级结构的Yb:YAG晶体而言,加大制冷可有效地减少下能级的粒子数密度,降低阈值,提高激光输出功率。实验中我们对于Yb:YAG晶体和LBO都采用了TEC制冷。在LD工作电流为1.8A时得到了22.3mW的525nm的绿光输出,光-光转换效率为1.5%,实验中测量了不同泵浦功率下的525nm激光的输出功率,如图4所示,激光阈值为417mW,由图可以看出LD输入电流为1.8A时,倍频光输出功率未有饱和现象发生。图5为525nm激光的光谱图,激光输出的中心波长在525.3nm,而且谱线宽度较窄。图6是用Photon公司的轮廓仪记录的远场光斑的平面和三维立体图,绿光激光输出为基模TEM₀₀,光斑的椭圆度为0.99,光斑质量很高。

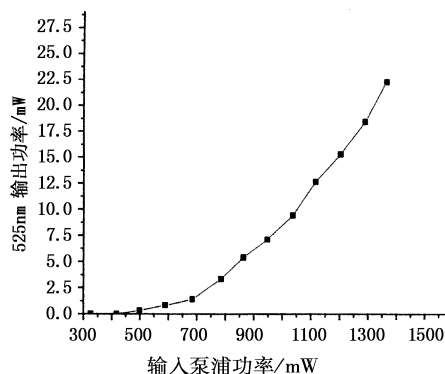


图4 525nm输出功率随入射泵浦功率变化关系

Fig.4 525nm output power vs input pump power

实验中采用的LBO为I类临界相位匹配。由于走离角的存在,倍频光和基频光的最大相互作用长度为:

$$L_{\max} = 1.16\omega_L/\rho \quad (1)$$

对于端面泵浦的小功率全固体激光器,由于其结构紧凑,腔内光腰很小,此处可以近似取光腰为 $\omega_L = 100\mu\text{m}$, LBO 的走离角为 $\rho = 7.41\text{mrad}$, 由公式计算得最大相互作用长度 $L_{\text{max}} = 15.65\text{mm}$ 。在实验选取 LBO 的长度为 10mm , 可以保证较好的光斑质量和较高倍频效率。

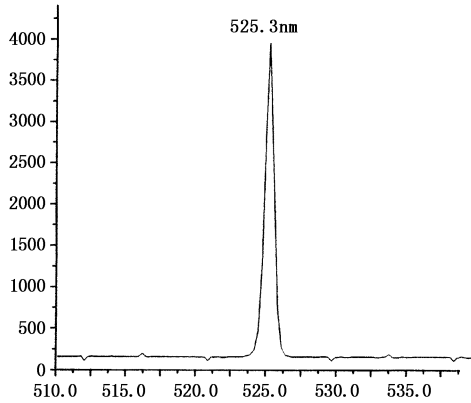


图5 525nm 激光的光谱
Fig.5 the spectrum of 525nm laser

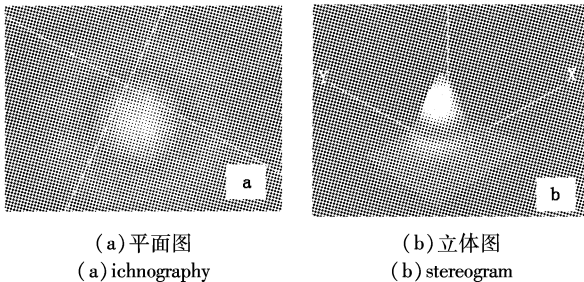


图6 525nm 绿激光光斑质量
Fig.6 the beam quality of 525nm green laser

对于腔内倍频的准三能级的连续激光器,其输出的倍频光的功率可以表示为^[6]:

$$P_{\text{SHout}} = \frac{\pi\omega_L^2 h\nu\eta_{\text{out}}}{4(f_a + f_b)\sigma\tau}\eta_{\text{SHG}}\Phi_0^2 \quad (2)$$

式中, η_{out} 表示输出的倍频光功率占腔内倍频产生的光功率的比例; Φ_0 为归一化的基频光光子数密度; f_b, f_a 分别为激光上能级和下能级的波尔兹曼因数; σ 表示激活介质的受激发射截面; τ 为激光的上能级寿命; η_{SHG} 是一个与 η 成正比的参量, 而且 η 表示倍频晶体将基频光转化为倍频光的能力, 可以用公式表示为^[6]:

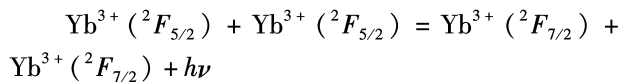
$$\eta = 2\left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{\omega^2 d_{\text{eff}}^2 l_n^2}{r_1^2 r_2^2 c^2} \frac{\sin^2(l_n \Delta k/2)}{(l_n \Delta k/2)^2} \quad (3)$$

式中, μ_0, ϵ_0 分别为自由空间的磁导率和介电常数; ω 为基频光的角频率; d_{eff} 为倍频晶体的有效非线性系数(MKS 单位制); l_n 为倍频晶体的长度; Δk 为相位失配; r_1, r_2 倍频晶体对基频光和倍频光的折射率。

由式(2)和式(3)可以看出, η 和 Φ_0 越大, 输出

的倍频光功率越高。然而 η 和 Φ_0 是两个相关的量, 倍频效率 η 增大必将使得腔内基频光光子数密度减小, 即 Φ_0 减小, 影响着倍频光输出的提高。所以在一般情况下, 为了得到较高的倍频光的输出功率, 常常使倍频晶体有微量的相位失配, 即 $\Delta k \neq 0$ 。

在实验过程中, 也观察到了 Yb:YAG 的蓝绿色的荧光。由一些文献^[7-9]推测这可能是一个离子对共同发射的结果, 即耦合状态的两个激发态的 Yb^{3+} 一起回到基态而发出的荧光。这个过程可以表示为^[9]:



这种合作发光的存在, 影响着激发态的寿命并且它使得激光的输出效率下降。

总之, 我们采用 Spectra-Physics 生产的 2.1W 的 LD 泵浦国产的 Yb:YAG 晶体, 通过 LBO 腔内倍频获得了 22.3mW 525nm 绿光输出, 光斑椭圆度为 0.99, 具有较好的光斑质量。

最后, 特别感谢上海光机所赵志伟老师和长春理工大学刘景和老师为我们提供了 Yb:YAG 晶体实验样品。

参考文献:

- [1] E C Honea, R J Beach, S C Mitchell, et al. High-power dual-pumped Yb:YAG laser [J]. Opt. Lett. 2000, 25 (11):805-807.
- [2] A Giesen, M Karszewski, Chr Stewen, et al. Multiwatt diode-pumped Yb:YAG thin disk laser continuously tunable between 1018nm and 1053nm [J]. Optics Letters, 1995, 20(7):713-715.
- [3] 吴海生, 闫平, 巩马理, 等. $M^2 \leq 1.14$ 的 LD 抽运的 Yb:YAG 微晶片激光器 [J]. 中国激光, 2002, 29 (A11):961-964.
- [4] Haisheng Wu, Ping Yan, Mali Gong, et al. A passively Q-switched diode pumped Yb:YAG microchip laser [J]. Chinese Optics Letters, 2003, 1(12):697-698.
- [5] Valerii V Ter-Mikirtychev, Mark A Dubinskii, Viktor A Fromzel. Q-switched, TEM₀₀-mode, diode-pumped Yb³⁺:YAG laser with extended tenability [J]. Optics Communications, 2001, 197:403-411.
- [6] 王青圃, 张行愚, 李平, 等. 腔内倍频的准三能级连续激光器理论 [J]. 中国科学 (E 辑), 2003, 33 (10):954-960.
- [7] 田乃良, 杜荣建, 林晓东, 等. Yb:YAG 蓝色激光输出 [J]. 光电子·激光, 2004, 15(12):1397-1399.
- [8] 史全林, 杜荣建, 田乃良. Yb:YAG 晶体的可见荧光及其机理研究 [J]. 光电子·激光, 2003, 14(8):889-892.
- [9] 徐晓东, 赵志伟, 宋平新, 等. Yb:YAG 晶体的荧光特性研究 [J]. 光子学报, 2004, 33(6):697-699.