

全固态准连续 TEM₀₀ 模 Nd:YVO₄/LBO 绿光激光器

郭芳^{1,2,3}, 樊仲维^{1,3}, 张晶^{1,3}, 王培峰^{2,3}, 冯承勇^{1,2,3}

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100080; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039;

3. 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

摘要:通过带光纤耦合的激光二极管模块端面泵浦低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体, 实现了高转换效率的 TEM₀₀ 模准连续绿光激光器。实验采用平平对称腔型设计以获得大的基模体积, 高衍射效率声光调 Q 技术以提高峰值功率密度, 以及 LBO 临界相位匹配来实现腔内倍频。在注入功率 30 W, 重复频率 20 kHz 的条件下, 获得了平均功率为 9.6 W 的 532 nm 激光输出, 实际光-光转换效率达到 33.4%, 相应的 1 064 nm 基频光平均输出功率为 11.8 W, 实际倍频效率为 89.8%。同时, 测得 532 nm 绿光的 M² 因子为 1.09, 脉冲宽度为 28 ns。文中还对影响绿光光束质量和转换效率的因素进行了分析。

关键词: 固体激光器; 绿光激光器; 光束质量; 高转换效率; 声光调 Q; 腔内倍频

中图分类号: TN248.1 **文献标识码:** A

All-solid-state quasi-CW Nd:YVO₄/LBO green laser with TEM₀₀ operation

GUO Fang^{1,2,3}, FAN Zhong-wei^{1,3}, ZHANG Jing^{1,3}, WANG Pei-feng^{2,3}, FENG Cheng-yong^{1,2,3}

(1. *Academy of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039;*

3. *Beijing GK Laser Technology Co. Ltd., Beijing 100085)*

Abstract: A TEM₀₀ operated quasi-CW Nd:YVO₄/LBO green laser is presented by end-pumping the Nd:YVO₄ crystal of 0.3% Nd³⁺ using a laser-diode module. A symmetric cavity structure is used to design the laser to obtain the large TEM₀₀ (fundamental mode) volume, the acoustic-optic Q-switching modulation technology is taken to improve the peak power density, and a I-type critical phase-matching LBO crystal is used to realize the intra-cavity doubling frequency in the laser operation. Experimental results indicate that the laser average output power is 9.6 W at 532 nm and the optical-optical conversion efficiency is 33.4% in a pump

power of 30 W and a repetition frequency of 20 kHz. In correspondence with above, the average output power of the fundamental frequency is 11.8 W and the doubling frequency efficiency is 89.8%. Moreover, experiments also obtain a pulse width of the green beam of 20 ns and a M^2 factor of 1.09.

Key words: solid-state laser; green light laser; beam quality; high conversion efficiency; acoustic-optic Q -switching; intracavity frequency doubling

1 引言

二极管泵浦的全固态激光器具有体积小、效率高、寿命长、易于维护等优点,在科学研究,医疗卫生,工业加工以及军事应用等领域得到越来越广泛的应用。其中,高功率绿光激光器相对于 1 064 nm 基频光来说,光子能量大,材料吸收率好,在芯片切割与划线、电阻微调、薄金属焊接等方面颇具优越性。此外,由于绿光在海水中的良好穿透性,其在水下遥感和通讯领域也前景光明。

端面抽运 Nd:YVO₄ 晶体并采用声光调 Q 技术和腔内倍频技术是获得高功率、高重复频率绿光激光器的重要途径,该方面的研究已取得很大进展^[1,2]。国际上,Coherent 公司和 Photonics 公司已经推出一系列平均输出功率从 200 mW 到 30 W 的全固态调 Q 激光器,其光束质量好,长期工作性能稳定。在国内,天津大学在 2001 年得到输出平均功率为 2.1 W 的近横模连续绿光^[3] 为国内首次报道的高功率声光调制绿光激光器;山西大学量子光学与光量子器件实验室则在 2006 年得到 7 W 的单横模连续绿光输出^[4]。不过为提高转换效率,目前的绿光激光器多采用含凹镜的腔型设计,这种设计会使基频光在倍频晶体处聚焦形成小的束腰,从而在一定程度上降低输出绿光的光束质量。因此,同时具有高光束质量与高转换效率的绿光激光器少见报道。

本文从模式匹配和高效腔内倍频两方面对 LD 抽运的 Nd:YVO₄/LBO 声光调 Q 激光进行研究,得到了高转换效率、高光束质量的连续绿光激光器。实验采用平平对称腔型设计以获得大的基模体积,适当降低 Nd:YVO₄ 晶体掺杂浓度,采用硼酸锂(LBO)非线性晶体 I 类临界相位匹配进行腔内倍频,在注入功率 30 W,重复频率 20 kHz 条

件下,得到了 9.6 W 单横模绿光输出, M^2 因子为 1.09;考虑腔前传输损耗,光-光转换效率达到 33.4%,相应地 1 064 nm 基频光平均输出功率为 11.8 W,实际倍频效率为 89.8%。

2 实验装置与原理

2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。泵浦源为 LIMO 公司的 30 W 半导体激光器光纤束模块,出口光纤束直径 400 μm ,数值孔径 $\text{NA} = 0.22$ 。输出激光中心波长为 807 ~ 810 nm (25 $^{\circ}\text{C}$),通过调节热电制冷片(TEC)制冷系统的工作温度,使其工作波长

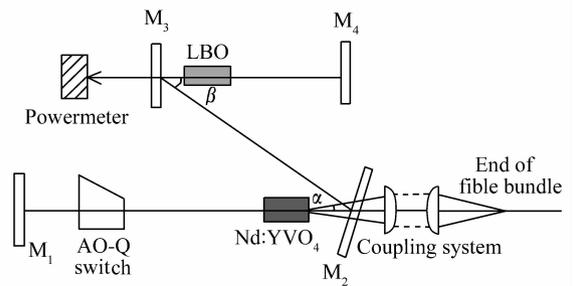


图 1 端面泵浦 Nd:YVO₄/LBO 绿光激光器实验装置
Fig. 1 Configuration of end-pumped Nd:YVO₄/LBO green laser

接近 808.7 nm,与 Nd:YVO₄ 晶体的吸收峰相匹配。采用由 4 片平凸透镜组成的光学成像系统将泵浦光整形形成直径为 800 μm 左右的圆形光斑(即成像比例为 1:2),系统的传输透过率约为 95%。Nd:YVO₄ 激光晶体中 Nd 的原子数分数掺杂浓度为 0.25%,晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 15 mm, a 轴切割,通光方向长 15 mm。晶体的两个通光面分别镀 1 064 nm 和 808 nm 的增透膜

($R_{1064\text{ nm}} < 0.5\%$, $R_{808\text{ nm}} < 5\%$)。LBO 晶体尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm} \times 15\text{ mm}$, 以角度 $\theta = 90^\circ$, $\psi = 10.8^\circ$ 切割, 双端面镀 1064 和 532 nm 双色增透膜 ($R_{1064\text{ nm}} < 0.4\%$, $R_{532\text{ nm}} < 0.4\%$)。LBO 晶体温度控制在 25°C , 采用 I 类临界相位匹配。Nd:YVO₄ 和 LBO 晶体的侧面都用铝箔包裹, 装在紫铜夹持块内, 采用热电制冷片严格控制温度。

为获取大的基模体积, 谐振腔采用 Z 型的平平对称腔结构, 折叠角 $\alpha = 26^\circ$, $\beta = 24^\circ$, 总腔长为 520 mm , 加入 LBO 后考虑折射率影响稍作延长。采用 Z 型腔设计是为了实现对称腔型并且将基频光与倍频光分开。平面镜 M_1 一面对 808 nm 增透 ($R < 5\%$), 另一面对 808 nm 增透 ($R < 5\%$) 和 1064 nm 全反 ($R > 99.5\%$); 平面镜 M_2 和 M_1 完全一样; 平面镜 M_4 对 532 和 1064 nm 单点全反 ($R > 99.8\%$), M_3 为输出耦合镜, 对 532 nm 增透和 1064 nm 全反 ($R_{1064\text{ nm}} > 99.8\%$, $R_{532\text{ nm}} < 0.5\%$)。需要输出 1064 nm 基频光时可以将 M_3 换成对 1064 nm 透过率为 20% 的输出镜。

声光 Q 开关为 GOOCH&HOUSEGO 公司生产的型号为 QS27-3C-M 的熔石英 Q 开关, 通光方向长度为 10 mm ; 中心频率为 27 MHz , 射频功率为 70 W , 其调制重复频率为 $1 \sim 100\text{ kHz}$ 连续可调。

2.2 热透镜激光腔理论分析

在较高泵浦功率下, Nd:YVO₄ 晶体的热透镜效应是很明显的, 在谐振腔设计中必须加以考虑。在端面泵浦光光强分布近似为高斯函数的情况下, 激光晶体可以等效为一个薄透镜, 其热焦距为^[5]:

$$f = \frac{\pi K \omega_p^2}{P_i \xi (dn/dt)} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \quad (1)$$

式中, K 为激光晶体的热传导系数; ω_p 为泵浦光在激光晶体中的光腰半径; P_i 为泵浦功率; ξ 为激光晶体中热损耗的功率与吸收功率之比; dn/dt 为激光晶体的热光系数, 即折射率随温度的变化率; α 为吸收系数; l 为激光晶体长度。对于 Nd 掺杂浓度为 0.5% 的 Nd:YVO₄ 晶体, $K = 0.054\text{ W/cm}^2 \cdot \text{K}$; $dn/dt = (4.7 \pm 0.6)/\text{K}$; $\alpha = 14.8/\text{cm}$; 以聚焦光斑半径为 $400\ \mu\text{m}$ 的光束泵浦 l 为 15 mm , 掺杂浓度为 0.25% 的 Nd:YVO₄ 晶体。

实验测量^[6]结果表明, 当泵浦功率为 30 W 时, 晶体热焦距约为 180 W , 比计算结果要大, 其原因是低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体与较高掺杂浓度晶体的相关参数不同。

实验中采用的 Z 型折叠腔可以等效为图 2 所示的含热透镜的平面平行对称腔, M_1 、 M_2 为平面镜, L_1 、 L_2 为激光晶体中心距离两反射镜的距离。根据 ABCD 矩阵理论分析并验证了对称腔相对于非对称腔具有更大的稳定性^[7], 图 3 为给定 L_1 、 L_2 得出的激光晶体中心基模光斑半径随热焦距变化的曲线。由图 3 可见, 在曲线底部, 光斑半径随热焦距的变化很小, 基本稳定, 即通常所说的热稳腔状态, 此状态下虽然容易获得高的输出功率, 但基模体积较小, 输出光一般为多模运转。在曲线的左边部分, 即稳定区的边缘, 基模体积随着热焦距的减小而迅速增大, 输出光光束质量明显

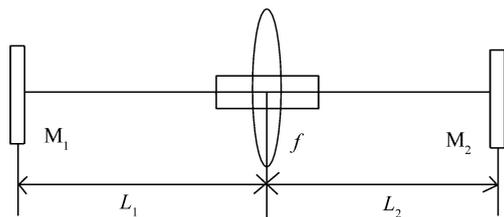


图 2 含热透镜的平面平行腔示意图

Fig. 2 Plane-parallel cavity with thermal lens

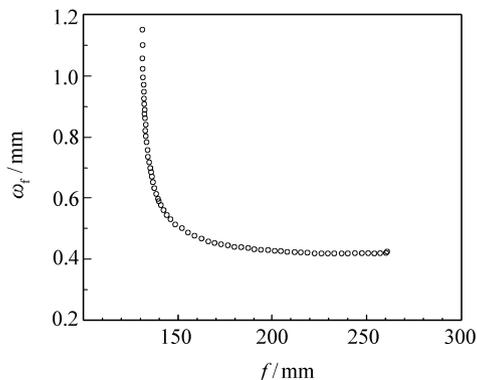


图 3 激光晶体中心基模光斑半径 ω_t 随热焦距 f 的变化 ($L_1 = L_2 = 260\text{ mm}$)

Fig. 3 Waist sizes at rod center versus thermal lens focal lengths ($L_1 = L_2 = 260\text{ mm}$)

好转。如果激光器工作状态设于此处,将容易获得单横模的高功率激光输出。

2.3 高效率腔内倍频的影响因素

连续泵浦的激光器难以提供腔外倍频高转换效率所需要的高功率密度,解决此问题的有效方法是腔内倍频。相同激光器其腔内功率约为输出功率的 $(2-T)/T$ 倍^[8](T 为输出镜对基频光的透过率)。非线性晶体从功能上说相当于基频激光器的输出镜,起到耦合输出器的作用。因此,理论上只需得到与基频光输出镜最佳透过率相当的倍频转换效率,就能将基频光全部转换为谐波输出。但实际上倍频光功率往往明显低于基频光,这是因为一方面非线性倍频单程转换效率达不到基频输出最佳透过率,另一方面插入非线性晶体或添加其他任何腔内元件引起的损耗也对倍频输出产生很大影响^[9,10]。在泵浦功率一定时,将非线性倍频效率等效为线性输出,可以得到远离泵浦阈值时的最佳腔内倍频参数:

$$\eta = \frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \frac{T_{nl}(\beta + T)}{T(\beta + \gamma + T_{nl})}, \quad (2)$$

式中, T 为基频光最佳输出透过率, T_{nl} 为非线性倍频单程转换效率, γ 为倍频晶体的插入损耗, β 为腔内其他损耗。

本实验中基频光的最佳输出透过率约为20%,要实现高效倍频转换需要非线性晶体LBO的单程倍频转换效率也与之相当。单程倍频转换效率除与基频光的功率密度相关,还与采用的非线性晶体参数相关。为达到单横模输出,实验中没有设计腔型使倍频晶体LBO处形成小的光腰以提高基频光功率密度,而是采用声光调Q技术来提高峰值功率密度,同时采用比理论计算结果稍长的倍频晶体LBO(通光方向长20 mm),严格控制LBO温度在25℃(控制精度为 ± 0.1 ℃)。当重复频率20 kHz,泵浦功率为30 W时,计算获得腔内倍频转换效率为91.7%。

3 实验结果及分析

采用相干公司的PM100-19C型功率计,对输

出激光功率进行测量。在重复频率为20 kHz的条件下,532 nm倍频光和1 064 nm基频光的平均输出功率随泵浦功率的变化关系如图4所示。当泵浦功率为30 W时,得到9.6 W的532 nm绿光,考虑腔前传输损耗,实际泵浦功率约为28.5 W,绿光总体光-光转换效率为33.7%。实际上由于输出镜 M_3 对斜入射的绿光具有一定的反

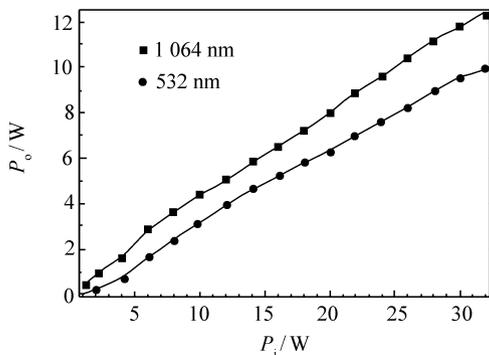


图4 532和1 064 nm激光输出曲线

Fig. 4 Output powers of 532 nm and 1 064 nm lasers

射率,还有一部分绿光沿 $M_2 - M_3$ 折臂的方向通过输出镜 M_3 射出,测得其功率为1.0 W,实际得到绿光总功率为10.6 W,则光-光转换效率达到37.9%。此时对应1 064 nm基频光输出功率为11.8 W,基频光的输出效率并不高,仅为41.4%,但是倍频光输出功率很高,腔内倍频的效率相当高,接近90%,稍低于理论值,原因是计算倍频单程转换效率时没有考虑基波损耗。

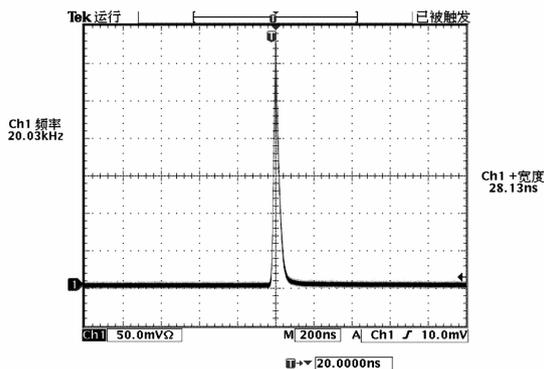


图5 重复频率20 kHz下的声光调Q激光脉冲图形

Fig. 5 Pulse shapes of AO Q-switched laser at 20 kHz

采用 DET-210 型快速光电二极管和泰克 300 MHz 示波器对该重复频率下的脉冲宽度进行测量,所得到的 532 nm 绿光的脉冲宽度为 28 ns,如图 5 所示。通过声光调 Q 技术得到窄的脉冲宽度,使谐振腔内基频光峰值功率密度提高,进而获得高的倍频效率。

采用 Spricon 公司的型号为 M²-200 的光束质量测试仪对 532 nm 输出激光的 M² 进行测量,如图 6 所示。X 轴与 Y 轴方向的 M² 因子均为 1.09,为严格的 TEM₀₀ 模。利用 CCD 采集到的衰减后的光斑分布图像如图 7。

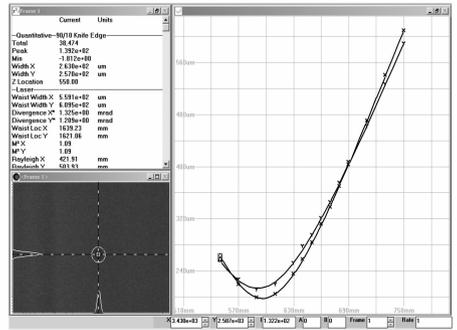
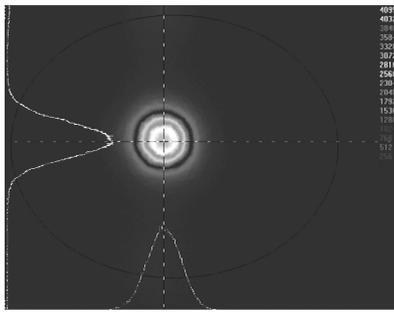


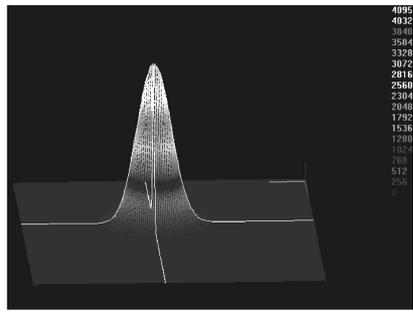
图 6 M² 因子测试图

Fig. 6 M² sector plot



(a) 光斑能量二维分布

(a) Two dimensional distribution of beam energy



(b) 光斑能量三维分布

(b) Three dimensional distribution of beam energy

图 7 输出光斑分布图

Fig. 7 Emitting beam distribution of the laser

4 结 论

通过采用较大光斑半径的泵浦光端面抽运低掺杂浓度的 Nd:YVO₄ 晶体,高衍射效率声光调 Q 开关,利用 LBO 晶体 I 类临界相位匹配进行腔内倍频,实验实现了 TEM₀₀ 模准连续绿光激光器。在注入功率 28.5 W,重复频率 20 kHz 的条件下,获得平均功率为 9.6 W, M² 因子为 1.09 的

532 nm 激光输出,其光-光转换效率达到 33.4%。同时,相应的 1 064 nm 基频光平均功率为 11.8 W,实际倍频效率为 89.8%。

另外,由于采用的输出镜在光束斜入射时对绿光具有一定的反射率,实际上有两路 532 nm 激光输出。如果采用能够避免这一现象的输出镜,主输出方向的单横模绿光平均功率还有望得到提高。

参考文献:

[1] 冯立春,霍玉晶,何淑芳,等. 激光二极管抽运声光调 Q 高重复频率 532 nm 激光器[J]. 中国激光,2005,(4):461-465.
FENG L CH, HUO Y J, HE SH F, et al. LD-pumped acousto-optically Q-switched 532 nm laser with high repetition rate [J]. Chinese J. Laser, 2005, (4):461-465. (in Chinese)

[2] 马红玉,解慧明,李隆,等. 双端泵浦的 Z 型折叠腔声光调 Q 绿光激光器[J]. 西北大学学报(自然科学版),2005,(2):170-173.

- MA H Y, XIE H M, LI L, *et al.*. Double end-pumped Z-folded resonant acoustic-optic Q-switched green laser[J]. *J. Northwest Univ. (Natural Science Edition)*, 2005, (2):170-173. (in Chinese)
- [3] 王杰, 姚建铨, 王鹏, 等. LD 抽运 Nd:YAG 激光器声光调 Q 高效内腔谐波转换[J]. *中国激光*, 2001, (1):4-6.
WANG J, YAO J Q, WANG P, *et al.*. High efficient intracavity SHG in LD pumped AO Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Chinese J. Laser*, 2001, (1):4-6. (in Chinese)
- [4] 李凤琴, 郑耀辉, 张宽收. 全固态高功率连续单横模 Nd:YVO₄/LBO 绿光激光器[J]. *量子光学学报*, 2006, 12(3):176-179.
LI F Q, ZHENG Y H, ZHANG K SH. All-solid-state high power CW Nd:YVO₄/LBO green laser of TEM₀₀ operation[J]. *Acta Sinica Quantum Opt.*, 2006, 12(3):176-179. (in Chinese)
- [5] INNOCENZI M E, YURA H T, FINCHER L, *et al.*. Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid-state lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56(19):1831-1833.
- [6] 张晶, 樊仲维, 石朝辉, 等. 连续 TEM₀₀ 模激光的稳定运转及热焦距补偿研究[J]. *激光与红外*, 2006, (7):539-541.
ZHANG J, FAN ZH W, SHI ZH H, *et al.*. Stable operation of CW TEM₀₀ mode laser and the study of compensating the thermal-lens focal length[J]. *Laser & Infrared*, 2006, (7):539-541. (in Chinese)
- [7] 谢武, 余建华, 毕成, 等. 全固体激光器热透镜效应及其对激光输出和腔稳定性的影响[J]. *中国激光*, 2006, (3):70-73.
XIE W, YU J H, BI CH, *et al.*. Thermal-lens effect and influence on laser output and stability of resonator in the all-solid-state laser[J]. *Chinese J. Laser*, 2006, (3):70-73. (in Chinese)
- [8] KOECHNER W. *Solid-State Laser Engineering*[M]. New York, Springer-Verlag, 2003.
- [9] 王暖让, 王灿召, 苑利钢, 等. 窄脉宽 LD 泵浦全固态绿光激光器的实验研究[J]. *光学技术*, 2007, (1):83-85, 88.
WANG N R, WANG C ZH, YUAN L G, *et al.*. Study on the narrow pulse-width diode-pumped solid-state green laser operation[J]. *Opti. Technique*, 2007, (1):83-85, 88. (in Chinese)
- [10] 姚建铨. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京:科学出版社, 2007.
YAO J Q. *All-solid-state Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)

作者简介:郭芳(1984—),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事固体激光技术的研究。E-mail:fguo-gklaser@163.com
樊仲维(1965—),男,吉林桦甸人,研究员,博士生导师,主要从事固体激光技术的研究。
E-mail:fguo-gklaser@163.com