

LD 端面泵浦 355 nm 紫外激光器

杨 涛,赵书云,张 弛,刘 磊,王 旭,姜东升
(华北光电技术研究所,北京 100015)

摘要:采用大功率激光二极管模块光纤耦合端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,声光调 Q ,腔外三倍频方式实现 355 nm 紫外激光输出。通过计算设计了高效稳定基频谐振腔,在腔外采用 LBO I 类相位匹配和 LBO II 类相位匹配的方式倍频和和频,并采用 $4f$ 系统对 1064 nm 基频光和 532 nm 倍频光进行聚焦,减小了球差效应对光束的影响以提高和频效率。在泵浦功率 32.3 W,得到 15.9 W 1064 nm 连续基频激光输出,光光效率 49%。在 20 kHz 调制频率下,得到 1.45 W 355 nm 紫外激光输出。通过 Spiricon 光束质量分析仪进行测试,在大功率输出时,紫外激光光束质量因子 $M_x^2 = 1.6, M_y^2 = 1.56$ 。

关键词:LD 端面泵浦;声光调 Q ;三倍频;紫外激光器; $4f$ 系统;球差

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.03.008

LD end pumped 355 nm UV lasers

YANG Tao, ZHAO Shu-yun, ZHANG Chi, LIU Lei, WANG Xu, JIANG Dong-sheng
(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: A high power diode-end-pumped Nd:YVO₄ all-solid-state ultraviolet laser was demonstrated under acousto-optic Q -switched operation, which include a stable and high efficient fundamental wave cavity, using type I phase-matched LBO as second harmonic generation crystal and type II phase-matched LBO as third harmonic generation crystal. To improve the frequency-tripled efficiency, a $4f$ system is used to focus the laser into THG LBO crystal, which reduce spherical aberration of focusing lens effectively. The CW output power of fundamental wave is 15.9 W at the incident pump power of 32.3 W, optical-to-optical efficiency is 49%. The output power of 355 nm UV laser reaches to 1.45 W at 20 kHz repetition rate. By the test, UV laser beam quality factor M_x^2 is 1.6, M_y^2 is 1.56 at the maximum output.

Key words: diode-end-pumped; acousto-optic Q -switching; third harmonic generation; ultraviolet laser $4f$ system; spherical aberration

1 引言

全固态紫外激光器的发展和应用是当前国内外引人关注的研究热点之一,全固态紫外激光器与传统的准分子紫外激光器相比较,具有体积小、效率高、寿命长、光束质量好、无毒、不需要更换特殊气体、价格便宜等许多优点。而且紫外激光具有更短的波长,可以获得更小的聚焦光斑。加工材料时,高能量的光子直接破坏材料的化学键,热影响区域微乎其微。因此,全固态紫外激光器在激光微加工、激光精密加工等应用方面有着广阔的前景。在国外工业发达国家,全固态紫外激光器已成为激光划片、微

细钻孔等微电子加工的最理想激光光源。全固态紫外激光器已成为激光技术研究领域的热点之一^[1-7]。在实验中,我们采用简易稳定的直线腔、光纤耦合端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体的方式实现基频激光输出,在腔外采用 LBO 晶体 I 类相位匹配倍频和 II 类相位匹配和频的方式,实现了瓦量级基模紫外激光功率的输出。

作者简介:杨 涛(1980-),男,工程师,主要从事高功率固体激光器的研究。E-mail:yangtaotom@sohu.com

收稿日期:2012-01-13; **修订日期:**2012-02-23

2 理论分析

2.1 泵浦光与谐振腔基模的匹配

在端面泵浦结构中,通过选择合适的聚焦光学元件能够调节二极管泵浦辐射的束腰位置、大小和发散角,使聚焦的泵浦光束与谐振腔的基模光束实现良好空间匹配。图 1 为使用 LASCAD 软件模拟得到的泵浦光在激光晶体内的分布图。当泵浦光束腰与激光晶体入射端面之间距离为 2 mm,晶体内部泵浦光束发散角较小,近似呈直线传播,这样分布的泵浦光与谐振腔内激光模式有更好的交叠,更容易得到较好的光束质量和更高的光光效率。

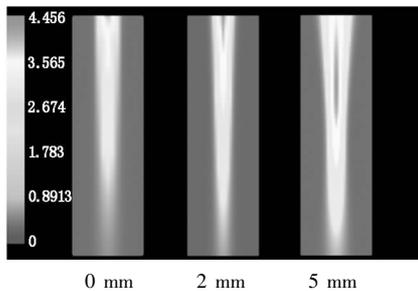


图 1 LASCAD 软件模拟 Nd:YVO₄ 晶体内部泵浦光分布

2.2 端面泵浦谐振腔研究

根据标准的 ABCD 传输矩阵理论,利用数值计算方法,设计了谐振腔参数。计算中把激光晶体中的热透镜等效于一个凹面反射镜 R_2 ,等效谐振腔如图 2 所示,腔参数为 $L = 300$ mm, $R_1 = 200$ mm。在我们感兴趣的泵浦功率范围内,测得的热透镜焦距 f_T 变化范围为 120 ~ 180 mm, R_2 的曲率半径变化范围与之一致。此腔有如下特点:①在 $f_T = 120 \sim 180$ mm 范围内, $g_1 g_2 = 0.75 \sim 0.33$,均在稳区中心附近变化。图 3 为稳定性参数 $g_1 g_2$ 随 f_T 的变化关系;② $f_T = 120 \sim 200$ mm 的变化范围内,基模半径 ω 的变化范围为 0.32 ~ 0.34 m,如图 4 所示,变化率低于 10%,这样的设计更易获得高效稳定的基模激光输出。

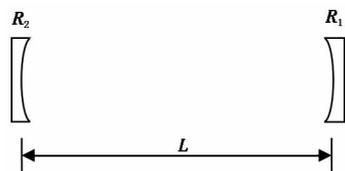


图 2 等效谐振腔

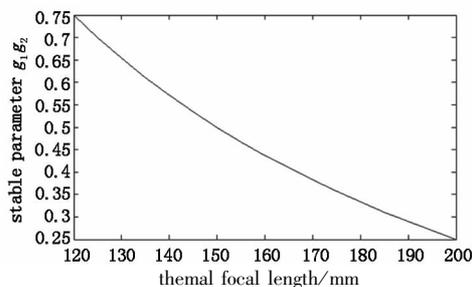


图 3 稳定性参数 $g_1 g_2$ 随 f_T 的变化

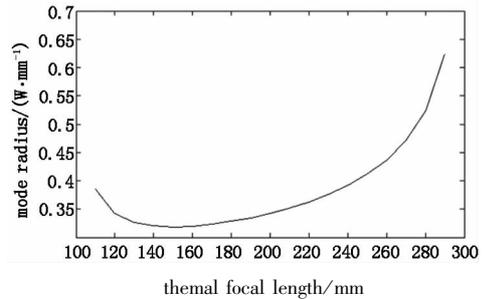


图 4 基模半径 ω 随 f_T 的变化

2.3 高效率倍频及和频技术

2.3.1 高效倍频技术

倍频效率为二次谐波功率与入射基波功率之比,其表达式为^[8]:

$$\eta_{\text{SHG}} = \frac{I_{2\omega}}{I_{\omega}} = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2 L^2}{n_{\omega}^2 n_{2\omega} \epsilon_0 c \lambda_{\omega}^2} I_{\omega} \left[\sin\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) / \left(\frac{\Delta k L}{2}\right) \right]^2$$

由上式,倍频转换效率强烈的依赖于 Δk ,当 $\Delta k = 0$ 时,相位因子 $\sin\left(\frac{\Delta k L}{2}\right) / \left(\frac{\Delta k L}{2}\right) = 1$,才可能获得最高的转换效率。

在实验中,采用了 LBO 晶体 I 类非临界相位匹配的方式,通过精确控温在 150.4 °C,相位匹配角 $\theta_m = 90^\circ$, $\Delta k \approx 0$,走离角接近于零,并选择倍频晶体前透镜的焦距和位置,实现了高效率倍频。

2.3.2 高效和频技术

在高效和频技术的研究中,除了需要考虑和频晶体中激光功率密度等因素外,还要考虑和频晶体中倍频光与基频光的空间交叠^[9]。实验中采用 LBO 晶体 I 类非临界相位匹配的方式进行倍频,倍频光与基频光几乎没有走离角,和频晶体中两光束的交叠区域会更大。

由于色散等原因,倍频光与基频光通过透镜后,它们各自的焦点并不重合,为了使两光束的交叠区域更大,试验中使用 $4f$ 系统。 $4f$ 系统可以通过选择两个平凸透镜的焦距及距离来调节聚焦光斑的大小,而且球差效应较小;虽然也可以通过选择单个凸透镜来聚焦,但小焦距的凸透镜会带来大的球差,而较大焦距的凸透镜,只有放置在物距较远时才能得到较小的成像光斑,这样的激光器腔长比较大。

3 实验装置

实验装置如图 5 所示,泵浦源采用美国 nlight 公司生产的光纤输出激光二极管模块,该模块最大功率 40 W,输出光纤纤芯为 400 μm , $\text{NA} = 0.22$ 。通过自制的放大比例为 1:2 的耦合透镜端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体,晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 10 mm,掺杂浓度 0.2at%,晶体的一面镀 808 nm 增透膜和 1064 nm 全反膜,作为基频谐振腔全反镜面;另一面

镀 808 nm 和 1064 nm 增透膜。谐振腔总长设计为 300 mm, 输出镜曲率为平凹 200 mm, $T_{1064\text{ nm}} = 15\%$ 。腔外倍频晶体之前放置的聚焦透镜焦距为 50 mm, 倍频晶体 LBO 采用 I 类非临界相位匹配, 尺寸为 3 mm × 3 mm × 20 mm, 精确控温在 150.4 °C。基频光与倍频光通过两片焦距为 70 mm 的透镜聚焦在和频晶体内部, 和频晶体 LBO 的尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm, 采用 II 类临界相位匹配, 角度调谐。基频谐振腔中用的声光 Q 开关晶体通光方向长度为 10 mm, 由中心频率为 27 MHz, 射频功率为 50 W 的声光驱动电源驱动, 在频率 1 ~ 100 kHz 的范围内连续可调。

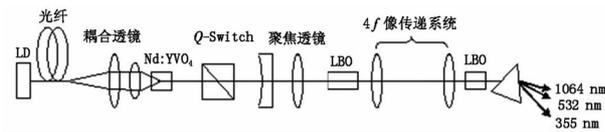


图5 紫外激光器实验装置

4 实验结果

图6给出了1064 nm基频谐振腔在连续运转情况下输入输出功率曲线, 此腔的阈值泵浦功率大约为 13 W, 当泵浦功率 $P_{in} > 25$ W 时, 光光转换效率接近 50%, 在泵浦功率为 32.3 W, 1064 nm 最高输出功率达到 15.9 W, 光光转换效率为 49%。

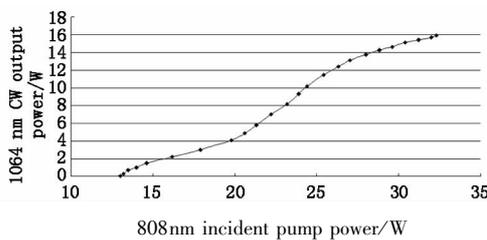
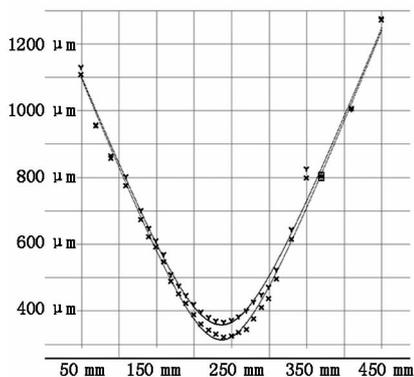


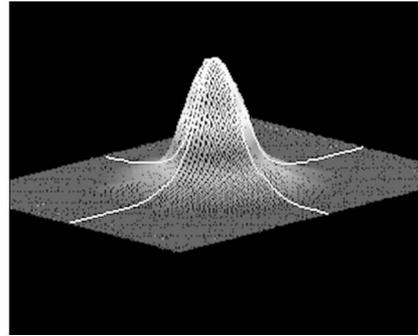
图6 1064 nm 基频谐振腔输入输出曲线

在 1064 nm 激光输出功率达到最大时, 用 Spiricon 光束质量分析仪测试其光束质量。

图7(a)表示不同距离处测得的光斑直径大小, 得到的光束质量因子值分别为 $M_x^2 = 1.3, M_y^2 = 1.48$, 为基模输出。图7(b)是激光光束远场空间分布图。



(a) 测量点处的激光光斑大小



(b) 激光远场光强分布

图7 测量点处的激光光斑大小及激光远场光强分布图

腔内加入声光调 Q 晶体, 调 Q 频率为 20 kHz, 腔外实现倍频与和频。在不同的泵浦功率条件下, 分别测试了 1064 nm, 532 nm 和 355 nm 激光的平均输出功率。测试结果如图8所示, 在泵浦功率为 32.3 W 时, 得到 1064 nm 输出功率 10.2 W、脉宽 22 ns, 532 nm 最大输出功率 5.3 W、脉宽 23 ns, 355 nm 最大输出功率 1.45 W, 脉宽 22 ns。1064 nm 基频光到 532 nm 绿光的光光效率为 52%, 1064 nm 基频光到 355 nm 紫外光的光光效率为 14.2%。图9(a)为此时的紫外激光光斑照片。用 Spiricon 光束质量分析仪测试此时紫外激光输出的光束质量, 光束质量因子值分别为 $M_x^2 = 1.6, M_y^2 = 1.56$, 为 TEM₀₀ 模。图9(b)为测得的紫外激光远场光斑分布。

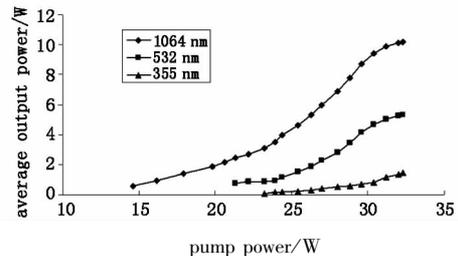
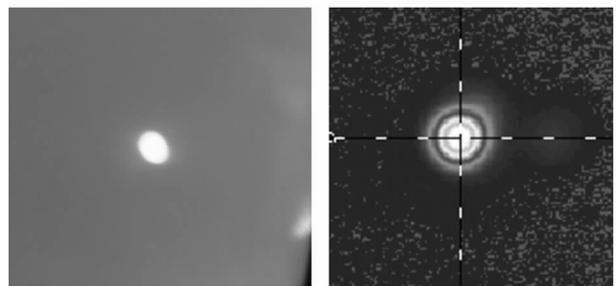


图8 激光功率输入输出曲线



(a) 紫外激光输出光斑图

(b) 紫外激光远场光斑分布

图9 紫外激光输出光斑图入远场光斑分布

5 结论

采用大功率光纤耦合泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体, 声光调 Q 实现了高功率高光束质量基频光输出, 在腔外采用 LBO 晶体 I 类相位匹配倍频和 II 类相位

匹配和频的方式,在和频时首次采用 $4f$ 系统进行聚焦,有效地提高了三倍频的倍频效率。最终在泵浦功率32.3 W,调制频率为20 kHz的条件下,紫外激光输出功率达到最大1.45 W。

参考文献:

- [1] Hodgson N, Dudley D, Gruber L, et al. Diode-pumped TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser with output power greater than 12 W at 355 nm [C]//Technical Digest of CLEO'2001, CTHC4:389.
- [2] Konno S, Kojima T, Fujikawa S, et al. High-average-power-high-repetition-diode-pumped third-harmonic Nd:YAG laser [C]//Technical Digest of CLEO'01, CTHC6:391.
- [3] Tan Chengqiao, Zheng Quan, Xue Qinghua, et al. LD end pumped Nd:YAG outcavity fourth harmonic generation high power ultraviolet laser [J]. Laser & Infrared, 2005, 35 (7):490-492. (in Chinese)
谭成桥,郑权,薛庆华,等. LD端泵Nd:YAG/Cr:YAG腔外变频产生高功率紫外[J]. 激光与红外, 2005, 35 (7):490-492.
- [4] Zhang Jing, Fan Zhongwei, Qi Yan, et al. Efficient intracavity dispersion Q CW Nd:YAG UV laser [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17 (12):1474-1476. (in Chinese)
张晶,樊仲维,齐岩,等. 高效腔内色散调Q Nd:YAG紫外激光器[J]. 光电子·激光, 2006, 17 (12):1474-1476.
- [5] Shi Chaohui, Fan Zhongwei, Zhang Ying, et al. High efficiency and high power all-solid-state ultraviolet laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34 (1):29-32. (in Chinese)
石朝辉,樊仲维,张瑛,等. 高效率高功率全固态紫外激光器[J]. 中国激光, 2007, 34 (1):29-32.
- [6] Zhang Yufeng, Wang Yunqian, Ma Ying, et al. LD end pumped all-solid-state UV lasers [J]. Laser & Infrared, 2007, 37 (12):1262-1264. (in Chinese)
张玉峰,王运谦,马莹,等. LD端泵全固化紫外激光器[J]. 激光与红外, 2007, 37 (12):1262-1264.
- [7] Liu Qiang, Yan Xingpeng, Chen Hailong, et al. New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37 (9):2289-2298. (in Chinese)
柳强,闫兴鹏,陈海龙,等. 高功率全固态紫外激光器研究新进展[J]. 中国激光, 2010, 37 (9):2289-2298.
- [8] W Koechner. Solid-State laser engineering 5th [M]. Edition, Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
克希耐尔. 固体激光工程 [M]. 5版. 北京:科学出版社, 2002.
- [9] J W Pieterse, A B Petersen, C Pohalski, et al. Q-switched laser system providing UV light: U. S. 5835513, 1998 [P].