

实用化 266 nm 紫外激光器的研究

赵书云,肖磊,王旭,张弛,刘磊
(固体激光技术重点实验室,北京 100015)

摘要:报道了 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 晶体、声光调 Q 1064 nm 准连续紫外激光,采用 LBO 晶体和 BBO 晶体分别进行腔内二倍频和腔外四倍频,从而获得 266 nm 紫外激光输出,脉冲宽度 22 ns、重复频率为 20 kHz、平均功率 1.12 W,光-光转换效率(532~266 nm)21.37%。

关键词:266 nm 紫外激光;二次谐波;四次谐波

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.08.009

Study on a practical 266 nm ultraviolet laser

ZHAO Shu-yun, XIAO Lie, WANG Xu, ZHANG Chi, LIU Lei
(Science and Technology on Solid-state Laser Laboratory, Beijing 100015, China)

Abstract: An acousto-optic Q-switched 1064 nm quasi-continuous laser with a LD end-pumped Nd:YVO₄ crystal is reported. A LBO crystal and a BBO crystal are respectively used in the cavity for intracavity frequency doubling and extracavity frequency quadrupling. A 266 nm ultraviolet laser output with a pulse width of 22 ns, a repetition of 20 kHz and an average power of 1.12 W is obtained. And the optical-optical efficiency is 21.37%.

Key words: 266 nm ultraviolet; second harmonic generation; fourth harmonic generation

1 引言

紫外激光器与传统的红外和可见波段的激光器相比具有更短的波长,不仅可以获得更小的聚焦光斑,而且在一些特殊的材料上具有更高的吸收系数,因此紫外激光可应用于硅和陶瓷材料的加工、蓝宝石晶体划线、多层 PCB 电路板铜层的打孔等。除此之外,紫外激光器也可广泛应用于超高密度光驱、精密材料加工、紫外固化、光刻、光印刷、医疗、光谱分析、科学研究等领域。本文采用平-凹腔设计,通过 LD 端面泵浦 Nd:YVO₄ 激光晶体,使用声光 Q 开关进行调制,产生平均功率 10.6 W 的 1064 nm 准连续激光;采用 II 类临界相位匹配的 LBO 晶体进行腔内倍频,产生平均功率 6.47 W 的 532 nm 绿光;然后采用 I 类临界相位匹配 BBO 晶体进行腔外四倍频,实现了高平均功率、高效率、高光束质量的准连续 266 nm 紫外激光输出^[1-2]。

2 倍频原理

倍频的方式一般可分为腔内倍频和腔外倍频两种方式。腔内倍频的方式比腔外倍频的方式二次谐波转换效率较高,这主要是因为腔内倍频时非线性晶体内的基频光的功率密度比采用腔外倍频是要高很多。在设计激光谐振腔时,必须结合倍频晶体抗损伤阈值来设计非线性晶体处的功率密度。在内腔倍频激光器中,当激光输出时有一个最佳透过率,把二次谐波看作基波的非线性损耗,最佳透过率相对于二次谐波的转换率。在小信号近似下的最佳透过率和最佳耦合系数与激光增益无关,当耦合系数到最佳值时,在任何泵浦水平下,都会保持最佳耦合,这与一般激光器的最佳耦合不同。为了提高二次谐

基金项目:预研基金(No. 9140A02012310DZ21)资助。

作者简介:赵书云(1978-),男,工程师,从事固体激光技术的研究工作。E-mail:with-it@sohu.com

收稿日期:2012-05-10;修订日期:2012-05-15

波的输出功率,在满足倍频晶体损伤阈值的条件下,尽可能大地增大激光棒中的模体积,同时减小倍频晶体中的光束大小,即将倍频晶体放在基频光的束腰处,而且二次谐波的功率密度随腔内损耗的增大而迅速下降,为此必须尽量减小腔内所有元件的损耗。二次谐波转换效率^[3-5]如式(1)所示:

$$\frac{P_{2\omega}}{P_{\omega}} = \tanh^2 \left[l_c K^{0.5} \left(\frac{P_{\omega}}{A} \right)^{0.5} \frac{\sin(l_c \Delta k / 2)}{l_c \Delta k / 2} \right] \quad (1)$$

其中, $K = 2 \left(\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r} \right)^{1.5} \omega^2 d_{\text{eff}}^2$, Δk 为相位失配; l_c 为非线性晶体长度; A 为基频光束截面积; ω 为基频光束频率; d_{eff} (As/V^2) 为晶体的有效非线性系数; μ_0 和 ϵ_0 分别为真空中的磁导率和真空中的介电常量; ϵ_r 为非线性晶体的相对介电常量; P_{ω} 为基波功率。式(1)可近似写为:

$$P_{2\omega} = \eta \frac{P_{\omega}^2}{A} \quad (2)$$

其中:

$$\eta = l_c^2 K \frac{\sin^2(l_c \Delta k / 2)}{l_c \Delta k / 2}$$

式(1)和式(2)表明,为了提高倍频效率,提高基频光功率 P_{ω} 和减小基频光束截面积 A , 就可以增大磁导率 μ 。实验中需要减小相位失配,因此在满足相位匹配条件下,如果存在部分基频光在倍频晶体上的入射角偏离相位匹配角,就会造成的相位失配^[6-10]。所以压缩基频光发散角,会提高倍频效率。另外,基频光脉冲宽度越小也可以提高倍频效率,这是因为越短的激光脉冲会产生越高的峰值功率密度。所以,优化设计基频光的谐振腔,减小基频光的光束发散角和提高基频光的功率密度都是提高谐波转换效率的关键因素之一。

3 实验装置

实验中,采用中心波长为 808 nm,最大输出功率 40 W,光纤直径 400 μm 的半导体激光器(DILAS 公司生产)作为泵浦源,泵浦光经过准直聚焦系统耦合到增益介质 Nd:YVO₄ 上;Nd:YVO₄ 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm,掺杂浓度为 0.5%;Nd:YVO₄ 晶体在靠近泵浦光的端面镀 808 nmHT/1064 nmHR 膜,另一面镀 1064 nmAR 膜;二倍频晶体 LBO 尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm,采用 II 类非临界相位匹配,两面均镀有 532 nmAR/1064 nmAR 膜;输出耦合镜 OC 为平凹镜,凹面镀 532 nmAR/1064 nmHR 膜,

平面镀 532 nmAR;四倍频晶体 BBO 尺寸为 4 mm × 4 mm × 8 mm,采用 I 类临界相位匹配,两面均镀有 532 nmAR/266 nmAR 膜;腔长为 90 mm,为得到短的调 Q 脉冲激光,应尽量缩短谐振腔的腔长。输出的 532 nm 绿光经过聚焦透镜 L 后入射四倍频晶体 BBO 中,实现 266 nm 的激光输出,最后通过分光棱镜将 266 nm 激光与 532 nm 激光分离开。具体实验装置如图 1 所示。

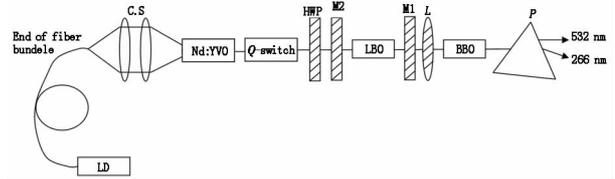


图 1 瓦级全固态 266 nm 激光器光路示意图

实验中使用自行研制的一体化驱动源(内部包括二极管驱动源、声光驱动源),二极管驱动源输出参数:输出电流范围 0 ~ 30 A,电流控制精度 ± 0.1 A,输出电压范围为 0 ~ 3 V;声光 Q 开关采用法国 AA 公司型号为 QCQ40 - A1.5 - L1064 - Z32,驱动系统超声频率 40.68 MHz;脉冲调制重复频率 20 kHz,对波长 1064 nm 的一级衍射效率可达 65%;恒温冷水机为北京长流科学仪器公司生产,控温精度可达到 ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

图 1 是瓦级输出的 266 nm 紫外激光器的光路示意图。其中, M_1 为激光腔镜; M_2 为二色性镜; c. s (coupling system) 表示 LD 耦合系统; HWP (half wave plate) 表示半波片; L (lens) 表示聚焦透镜; P (prism) 表示布鲁斯特分光棱镜。

4 实验结果

当激光二极管的泵浦功率为 32 W 时,获得了 532 nm 激光的平均功率为 5.24 W,脉冲宽度为 23 ns,重复频率为 20 kHz,峰值功率高达 11.39 kW 的绿光输出。测量 532 nm 激光的光束质量 M_x^2 为 1.12, M_y^2 为 1.02 (如图 2 所示)。由于没有响应紫外波段的 CCD,无法测量 266 nm 激光的光束质量。

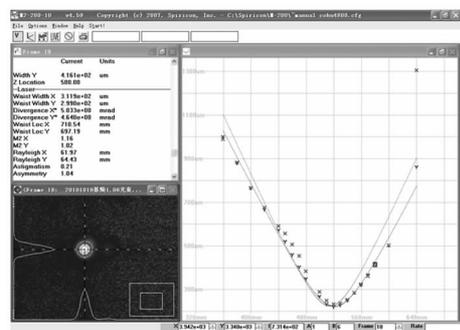


图 2 测量的 532 nm 激光光束质量

腔外经过透镜聚焦 I 类临界相位匹配 BBO 晶体四倍频获到 266 nm 紫外激光输出,其中平均功率 1.12 W、脉冲宽度 22 ns、光-光(532~266 nm)转换效率 21.37%。通过棱镜分光后可得到 266 nm 的荧光光斑呈细长条形分布,这与 BBO 晶体在相位匹配条件下的二次谐波走离角(83.78°)很大有关。

为了实现 266 nm 紫外激光的高效输出,首先可以提高 532 nm 激光的输出功率。通过优化谐振腔的设计,将 LBO 晶体的放置在 1064 nm 基频光束腰位置,同时要控制 532 nm 激光的光束发散角。当 808 nm LD 泵浦光注入时,1064 nm 激光的输出功率一直随泵浦功率提高而线性增大;当 LD 泵浦功率超过 31 W 后,1064 nm 激光的输出功率增长幅度开始变小。通过模拟计算可以得出高功率泵浦条件下引起功率增长缓慢的原因:首先,高功率泵浦 Nd:YVO₄ 晶体时,基频光在 Nd:YVO₄ 晶体内部的模体积的改变,导致激光晶体处泵浦光模与腔模的失配从而造成了输出效率下降;其次,高功率泵浦时 Nd:YVO₄ 晶体内部的热透镜效应带来谐振腔变化,引起束腰位置改变,离开 LBO 晶体内部。通过优化高功率泵浦时的谐振腔腔型或者向前或向后移动 Nd:YVO₄ 晶体,都可以改变 LBO 晶体上基频光的模体积。当基频光在 LBO 晶体处的光斑直径就越接近束腰位置,则激光的输出功率继续增长。谐振腔优化后的激光的输出平均功率与泵浦功率的关系如图 3 所示。

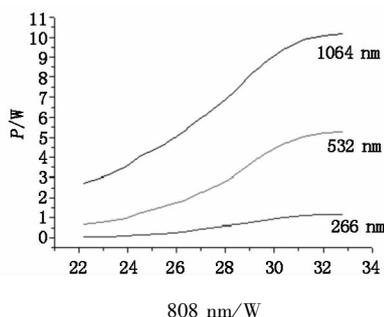


图3 泵浦注入功率与激光输出功率的曲线图

其次,要想提高四倍频的转换效率,可以通过增加 BBO 晶体的长度和提高二倍频光的功率密度来实现。由于 532 nm 激光在 BBO 晶体内沿传播方向诱发的极化波不断辐射出的四倍频光一直偏离基频光的走离角传播,从倍频晶体出射的倍频光斑在入射平面内被拉长条形;而在垂直入射面上光斑大小并没有改变。对 BBO 晶体来说,走离角造成影响晶

体的长度不可能太长。根据 BBO 晶体走离效应限制及 BBO 晶体在对 266 nm 波长的透过率只有 80%,晶体的最佳长度为 8 mm。在满足相位匹配条件下,通过聚焦透镜减小基频光束在 BBO 晶体上截面积,以提高基频光的功率密度,进而提高 BBO 晶体的转换效率。当稳定的基频光注入时,入射到晶体上的功率密度随着基频光的光斑面积(束腰半径 ω)减小而增大。但受到 BBO 晶体的接收角限制,聚焦透镜不能无穷小。实验对 266 nm 激光的长条形光斑进行优化,通过 $f = 100$ mm 柱透镜压缩光束的走离,在距离柱透镜 800 mm 处用接收的光斑大小和形态与 532 nm 激光基本相近,达到工程化使用要求。如图 4 所示是设计的产品样机,产品经用户连续使用功率稳定性 $\leq 3\%$ (RMS)。



图4 实用化样机实物照片

5 结论

我们采用非线性频率变换的方法,利用二倍频 LBO 晶体和四倍频 BBO 晶体把 LD 泵浦的 Nd:YVO₄ 晶体 1064 nm 基频光转换为 266 nm 紫外光,通过优化谐振腔设计,合理的电源和水冷设计,可见光波段和紫外波段膜系设计,得到了高光束质量的 1.12 W 紫外光,脉宽 26 ns,频率 20 kHz,功率稳定性 $\leq 3\%$ (RMS),光-光(532~266 nm)转换效率为 21.37%;并研制出实用化样机一台,已经在通讯领域应用。

参考文献:

- [1] H KV Lotsch, Walter Koechner. Solide-state laser engineering[C]. 6th ed. New York: Springer Science Business Media Inc., 2006.
- [2] Kmetec J D, Macklin J J, Young J F. Short wavelength coherent radiation: generation and applications[C]// Bucksbaum P H, Ceglio NM OSA oc, 176-198.
- [3] Liu Jingang, kim Dalwoo Kim. Optimization of intracavity doubled passively Q-switched solid-state laser[J]. Quant.

- Electron, 1999, QE - 35(11) :1724 - 1734.
- [4] Yao Jianquan. Nonlinear optics frequency conversion and laser tuning technology [M]. Beijing: Science Press, 1995:258 - 268. (in Chinese)
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995:258 - 268.
- [5] Lu Baida. Solid-state lasers[M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2002. (in Chinese)
吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002.
- [6] Cheng Guanghua, Yu Lianjun, Wang Yishang, Experimental study of all-solid-state second harmonic and fourth harmonic generation in Ti:Sapphire laser[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(3) :330 - 334. (in Chinese)
程光华, 于连君, 王屹山, 等. 高效全固化紫外四倍频激光器的研究[J]. 光学学报, 2003, 23(3) :330 - 334.
- [7] Cheng Guanghua, Wang Qishan, Yu Lianjun. High efficient second harmonic at 416 nm and fourth harmonic generation at 208 nm in compacted all-solid-state Ti:Sapphire laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2004, 31(7) : 769 - 772. (in Chinese)
程光华, 王屹山, 于连君, 等. 高效全固化钛宝石腔内倍频蓝光和四倍频[J]. 中国激光, 2004, 31(7) : 769 - 772.
- [8] Chen Guofu, Wang Xianhua, Du Geguo. All-solid-state ultraviolet laser [J]. Acta Photonica Sinica, 1999, 28(9) : 785 - 787. (in Chinese)
陈果夫, 王贤华, 杜戈果. 全固态紫外激光器研究[J]. 光子学报, 1999, 28(9) :785 - 787.
- [9] He Jingliang, Lu Xingqing, Jia Yulei. All-solid-state Nd:YVO₄ UV laser at 266 nm by fourth harmonic using a BBO crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(10) :2106 - 2108(in Chinese)
何京良, 卢兴强, 贾玉磊, 等. BBO 四倍频全固态 Nd:YVO₄ 紫外激光器[J]. 物理学报, 2000, 49(10) : 2106 - 2108.
- [10] Zhang Yufeng, Wang Yunqian, Ma Ying, LD end pumped all-solid-state UV laser [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(12) :1262 - 1264. (in Chinese)
张玉峰, 王运谦, 马莹. LD 端泵全固化紫外激光器[J]. 激光与红外, 2007, 37(12) :1262 - 1264.