

文章编号: 0258-7025(2007)01-0029-04

高效率大功率全固态紫外激光器

石朝辉^{1,2,3}, 樊仲维³, 张 瑛³, 张 晶^{1,2,3}, 牛 岗^{1,2,3}, 王培峰^{1,2,3}, 崔建丰^{1,2,3}, 裴 博³

(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; ³ 北京国科世纪激光技术有限公司, 北京 100085)

摘要 报道了采用大功率国产光纤束端面抽运 Nd:YVO₄ 激光晶体的腔外三倍频紫外激光器, 用声光调 Q 技术实现了高功率高光束质量基频光输出。采用 LBO I 类相位匹配和 LBO II 类相位匹配的腔外倍频方法, 并利用凹面反射镜的方式进行聚焦, 避免了 1064 nm 和 532 nm 激光聚焦时由于波长的不同而产生的色差效应, 有效地提高了三倍频的倍频效率。最终在注入抽运光功率为 23.3 W, 声光调 Q 激光器的调制频率为 20 kHz 的工作条件下, 基频光输出功率为 7.28 W 时, 得到紫外激光输出功率为 1.86 W, 1064 nm 基频光到 355 nm 紫外激光的光-光转换效率为 25.5%, 此外, 对紫外激光光束质量的测试表明, 该紫外激光器具有高功率输出的同时仍有很好的光束质量。

关键词 激光技术; 紫外激光器; 全固态; 声光调 Q; 端面抽运; 二倍频; 三倍频; 色差效应

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

High Efficiency and High Power All-Solid-State Ultraviolet Laser

SHI Zhao-hui^{1,2,3}, FAN Zhong-wei³, ZHANG Ying³, ZHANG Jing^{1,2,3},
NIU Gang^{1,2,3}, WANG Pei-feng^{1,2,3}, CUI Jian-feng^{1,2,3}, PEI Bo³

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China
³ Beijing GK Laser Technology Co., Ltd, Beijing 100085, China

Abstract A high power end-pumped Nd:YVO₄ all-solid-state ultraviolet (UV) laser was demonstrated under acousto-optic Q-switched operation, using type I phase-matched LiB₃O₅ (LBO) as second harmonic generation (SHG) crystal and type II phase-matched LBO as third harmonic generation (THG) crystal. To improve the optical to optical (O-O) efficiency of fundamental wave to THG UV laser, a concave reflection mirror is used to focus the laser into THG LBO crystal, which avoids the chromatic aberration of traditional focusing lens effectively. Finally, the output power of 355 nm UV laser reaches to 1.86 W at the incident pump power of 23.3 W, and the output power of fundamental wave is about 7.28 W at 20 kHz repetition rate, and O-O conversion efficiency is about 25.5% accordingly. The test results of UV laser beam quality indicate that the laser can still work at a good beam quality even at the maximum output, which means that the UV laser can have a very good beam quality even at the high power output.

Key words laser technique; ultraviolet laser; all-solid-state; acousto-optic Q-switching; end-pumped; second harmonic generation; third harmonic generation; chromatic aberration

1 引 言

随着半导体激光产业的迅猛发展, 以半导体激

光器作为抽运源的全固态激光器 (DPSSL) 的研究取得了巨大的进展。半导体激光器抽运的全固态红

收稿日期: 2006-04-25; 收到修改稿日期: 2006-06-14

作者简介: 石朝辉 (1980—), 男, 博士研究生, 现在北京国科世纪激光技术有限公司从事高功率全固态激光器及其频率变换技术研究。E-mail: shizh@126.com

导师简介: 樊仲维 (1965—), 男, 吉林人, 研究员, 博士生导师, 主要从事衍射光学理论与器件、光学仪器设计与研制、大功率全固态激光技术与谐波产生技术、全色激光显示技术、高亮度半导体激光耦合技术等方面的研究。

E-mail: fanzw@coscentral.org

外及可见波段的激光器已经在很多行业取得了大量的应用,例如激光调阻、存储芯片维修、太阳能电池划线、激光标刻等。与传统的红外和可见波段的激光器相比,紫外激光器具有更短的波长,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医疗、光化学、光生物学等科研领域。与传统的准分子紫外激光器相比,全固态紫外激光器具有光束质量好、功率稳定性好、可靠性高、使用方便、体积小等诸多优点。近年来利用非线性频率变换技术获得高功率紫外激光输出的研究已成为激光技术领域的一个研究热点^[1~9]。文中采用激光二极管(LD)光纤束模块端面抽运 Nd:YVO₄ 激光晶体,腔内插入声光调 Q 器件,实现高功率准连续 1064 nm 基频激光输出,腔外分别采用 I 类相位匹配 LBO 作为倍频和 II 类相位匹配的 LBO 作为三倍频晶体,采用凹面反射镜将倍频后的绿光和未倍频的基频光进行聚焦,有效地避免了普通单透镜聚焦时产生的色差效应,最终实现了高功率、高效率的准连续 355 nm 紫外激光输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,抽运源为北京国科世纪激光公司生产的大功率半导体激光器光纤束模块(型号为 GKFM-30),该模块的最大输出功率为 30 W,出口光纤束直径为 1.1 mm,数值孔径(NA)为 0.11。输出激光中心波长为 807 ~ 810 nm (25 °C),通过调节制冷系统的工作温度,使其工作波长接近 808.7 nm,与 Nd:YVO₄ 晶体的吸收峰相匹配。通过采用自行研制的非球面光学耦合系统将抽运光整形为直径 750 μm 左右的圆形光斑,系统的传输透过率为 92%。Nd:YVO₄ 激光晶体中 Nd³⁺ 的原子数分数为 0.3%^[10,11],晶体尺寸为 3 mm ×

3 mm × 10 mm, *a* 轴切割,通光方向长度为 10 mm。晶体的两个通光面分别镀 1064 nm 和 808 nm 增透膜 ($R_{1064\text{ nm}} < 0.5\%$, $R_{808\text{ nm}} < 5\%$),晶体的侧面用铝箔包住,装在用循环水冷却的紫铜块内,制冷系统温度设定在 18 °C。为获取大的基模体积,谐振腔采用简单的平行平面腔结构,腔长为 200 mm 左右。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 为输出耦合镜,输出透过率为 $T = 20\% @ 1064\text{ nm}$ 。平面镜 M_3 和 M_4 是 1064 nm 的单点全反镜 ($R > 99.8\%$),入射角为 45°。 f_1 是焦距为 50 mm 的平凸薄透镜,两个端面分别镀 1064 nm 和 532 nm 增透膜 ($R_{1064\text{ nm}} < 0.2\%$, $R_{532\text{ nm}} < 0.2\%$)。 f_1 透镜的焦平面处放置一类临界相位匹配 LBO 二倍频晶体,晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm,晶体的两个端面镀 1064 nm 和 532 nm 的双增透膜 ($R_{1064\text{ nm}} < 0.2\%$, $R_{532\text{ nm}} < 0.2\%$)。 M_5 为平凹反射镜,凹面曲率半径为 100 mm,凹面镀 1064 nm 和 532 nm 高反膜 ($T_{1064\text{ nm}} < 0.2\%$, $T_{532\text{ nm}} < 0.2\%$)。在凹面反射镜的焦平面处放置二类临界相位匹配 LBO 三倍频晶体,晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 10 mm,晶体的两个端面镀 1064 nm, 532 nm 和 355 nm 的三色增透膜。 f_2 为焦距 50 mm 的平凸薄透镜,镀膜与三倍频激光晶体一致,其作用是对输出的紫外激光进行准直,压缩紫外光的发散角。 M_5 和 M_6 为入射角 45° 的平面镜分光镜,反射面镀膜为对 1064 nm 和 532 nm 高反,对 355 nm 高透,不仅起到折转紫外激光输出方向的功能,同时可以滤掉 1064 nm 和 532 nm 激光。基频激光器中采用的声光 Q 开关为美国 Neos 公司生产的熔石英 Q 开关,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,在调制重复频率为 1~100 kHz 的范围内连续可调^[12]。

3 实验结果和讨论

由于 Nd:YVO₄ 激光晶体的上能级寿命为 96 μs 左右,20 kHz 左右为其最佳工作频率,实际实验数据也证明了这一点。声光调 Q 激光器的调制频率设置为 20 kHz,在不同的工作电流下分别测试了 1064 nm, 532 nm 和 355 nm 激光的平均输出功率,测试的结果见图 2。测试激光输出功率时,采用的是相干公司 PM100-19C 型功率计。随着抽运光功率的不断增大,输出激光功率也在不断增大,在注入的

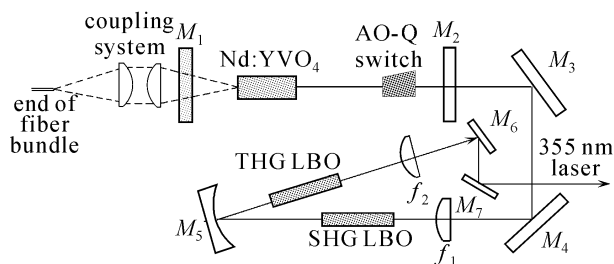


图 1 全固态紫外激光器的实验装置

Fig. 1 Configuration of the all-solid-state UV laser

抽运光功率为23.3 W时,紫外激光输出功率最大,达到1.86 W。注入抽运光功率继续增加,基频光和二倍频光功率也随之增大,但是紫外激光输出功率反而减小。其原因是高功率抽运下,虽然基频光和二倍频光的功率增大了,但其光束质量急剧恶化,导致三倍频晶体中的合频效率下降使紫外光输出功率降低。

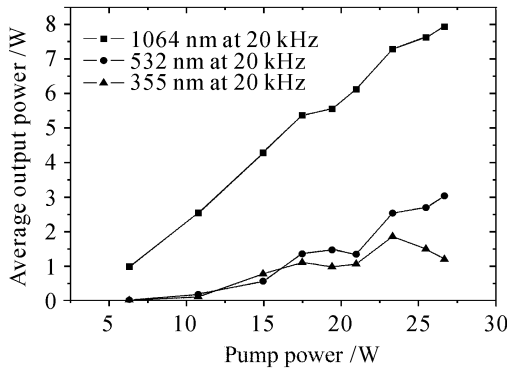


图2 平均激光输出功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 2 Average output power versus incident pump power

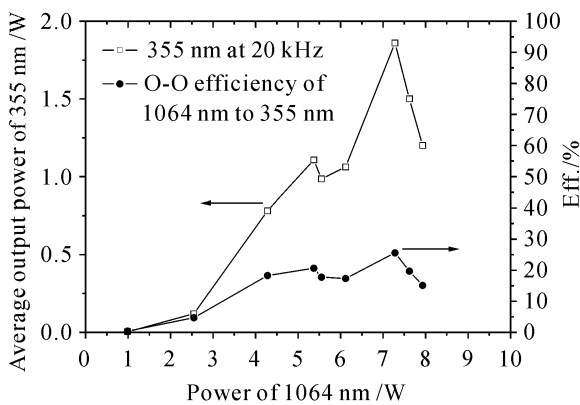


图3 355 nm 激光平均输出功率和光-光转换效率随基频光功率的变化曲线

Fig. 3 355 nm average output power and O-O conversion efficiency versus 1064 nm power

为了评价系统的光-光转换效率,分别测试了不同基频光输出功率下的三倍频激光输出功率,见图3。可以看出在基频光输出功率为7.28 W时,紫外激光输出功率达到了最大值1.86 W,相应的红外基频光到紫外激光的光-光转换效率也达到了25.5%。

为了更好地衡量调Q工作下的紫外激光输出特性,采用DET-210型快速光电二极管和Tektronix 300 MHz示波器对紫外激光的脉冲宽度进行了测量,测试结果如图4。20 kHz重复频率下,在最大输出功率为1.86 W时,355 nm紫外激光的脉冲宽度为12.1 ns。相应地,单脉冲能量为93 μ J,激光峰值功率为7.7 kW。

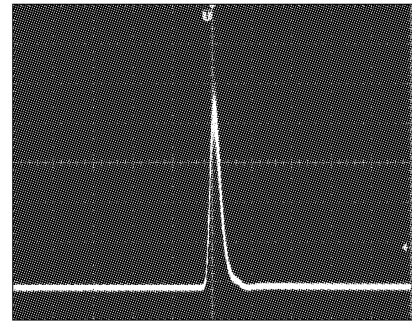


图4 紫外激光的单脉冲波形

Fig. 4 Pulse shape of Q-switched UV laser with the maximum output power

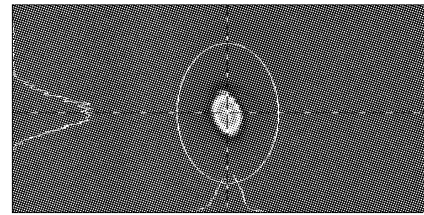


图5 紫外激光在最大输出功率下的远场光斑分布

Fig. 5 Far field beam profile with the maximum output power

同时用Spiricon M^2 -200光束质量分析仪对紫外激光的输出光束质量做了测试,在355 nm紫外激光为1.86 W输出条件下,测得光束质量因子分别为 $M_x^2 = 1.50, M_y^2 = 1.39$,可见此时输出激光的光束质量为 TEM_{00} 模。图5为激光的远场光斑分布情况。

为了研究紫外激光器的长期稳定性,测试了激光器在900 mW左右输出连续8 h的稳定性,测试时每隔1 h记录一次数据,8个测试数据为:880 mW, 892 mW, 907 mW, 872 mW, 890 mW, 987 mW, 917 mW, 911 mW,稳定性为 $\pm 2.3\%$ 。

4 结 论

采用大功率国产光纤束模块抽运Nd:YVO₄激光晶体,用声光调Q技术实现高功率高光束质量基频光输出,在腔外采用LBO I类相位匹配和LBO II类相位匹配的技术路线,放弃了三倍频时通常采用的单透镜聚焦的方式,而创新性地采用凹面反射镜的方式进行聚焦,避免了1064 nm和532 nm激光聚焦时由于波长的不同而产生的色差效应,有效地提高了三倍频的倍频效率。最终,在注入的抽运光功率为23.3 W时,声光调Q激光器的调制频率为20 kHz的工作条件下,紫外激光输出功率达到最大1.86 W,1064 nm基频光到355 nm紫外激光的光-光

转换效率达到了25.5%。355 nm紫外激光的脉冲宽度为12.1 ns,单脉冲能量为93 μ J,激光峰值功率为7.7 kW。该激光器将在激光微细加工、模具成型、科研等领域具有重要的应用前景。

参 考 文 献

- Alce V. Hicks, Charles X. Wang, Gary Y. Wang. Advances in high power diode-pumped ultraviolet lasers [C]. *SPIE*, 2004, **5332**:120~133
- H. Kitano, T. Matsui, K. Sato *et al.*. Efficient 355-nm generation in CsB₃O₅ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(4):263~265
- Gao Lanlan, Tan Huiming. LD end-pumped all-solid-state ultraviolet laser [J]. *Optoelectronic Technology*, 2003, **23**(2):109~112
高兰兰,檀慧明. LD端面抽运全固态紫外激光器[J]. 光电子技术, 2003, **23**(2):109~112
- Fan Xiuwei, Wang Yun, Peng Qianqian *et al.*. Laser-diode pumped Nd:GdVO₄ ultraviolet laser [J]. *Laser and Infrared*, 2005, **35**(5):331~334
范秀伟,王云,彭倩倩等. 二极管泵浦Nd:GdVO₄晶体紫外激光器的研究[J]. 激光与红外, 2005, **35**(5):331~334
- Wang Yun, Fan Xiuwei, Peng Qianqian *et al.*. LD pumped Nd:GdVO₄ crystal ultraviolet laser with LBO frequency tripling [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(5):551~553
王云,范秀伟,彭倩倩等. LD泵浦Nd:GdVO₄晶体LBO三倍频紫外激光器研究[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(5):551~553
- Tan Chengqiao, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. LD end pumped Nd:YAG outcavity fourth harmonic generation high power ultraviolet laser [J]. *Laser and Infrared*, 2005, **35**(7):490~492
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
- Tan Chengqiao, Xue Qinghua, Jia Fuqiang *et al.*. LD-pumped Nd:YAG outcavity fourth harmonic generation high power ultraviolet laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9):1289~1292
谭成桥,薛庆华,贾富强等. LD泵浦Nd:YAG/Cr:YAG腔外频率变换高功率紫外激光器[J]. 光子学报, 2005, **34**(9):1289~1292
- Wu Yicheng, Chang Feng, Fu Peizhen *et al.*. High-average-power third harmonic generation at 355 nm with CsB₃O₅ crystal [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2005, **22**(6):1426~1428
- Zhang Shaojun, Dong Shengming, Li Fuqi *et al.*. Efficient third-harmonic-generation of 1064 nm laser with BiB₃O₆ crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1087~1089
张少军,董圣明,李福奇等. 新型BiB₃O₆晶体高效和频产生355 nm紫外激光[J]. 中国激光, 2003, **30**(12):1087~1089
- Zhang Hongrui, Gao Mingyi, Zheng Yi *et al.*. High power diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1):19~21
张红瑞,高明义,郑义等. 大功率激光二极管端面抽运的Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(1):19~21
- Liu Junhai, Lu Junhua, Lü Jianren *et al.*. Mode matching in high power laser diode array end pumped Nd:YVO₄ solid-state laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(2):186~189
刘均海,吕军华,卢建仁等. 高功率端面抽运Nd:YVO₄固体激光器模匹配的研究[J]. 光学学报, 2000, **20**(2):186~189
- Du Chenlin, Liu Junhai, Wang Zhengping *et al.*. LD-pumped acouso-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser with high repetition rates and short pulse width [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(6):489~491
杜晨林,刘均海,王正平等. LD抽运声光调Q高重复频率短脉宽Nd:YVO₄激光器[J]. 中国激光, 2002, **A29**(6):489~491