

文章编号: 0258-7025(2007)08-1048-03

激光二极管抽运全固态 355 nm 连续波 紫外激光器

吕彦飞¹, 张喜和¹, 姚治海¹, 檀慧明², 夏 菁¹, 王志强³, 李昌立¹, 张凤东¹

¹ 长春理工大学物理系, 吉林 长春 130022; ² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
³ 北京跟踪与通讯技术研究所, 北京 100094

摘要 通过优化设计激光谐振腔, 实现了激光二极管(LD)抽运腔内三次谐波转换355 nm紫外激光器的高效率输出. 实验中采用复合腔结构, 利用BIBO I类临界相位匹配进行腔内和频, 当注入到Nd:YAG和Nd:YVO₄晶体的抽运功率分别为20 W和8 W时, 获得最大功率为114 mW的TEM₀₀连续波355 nm的紫外激光输出, 光-光转换效率为0.4%, 4 h功率稳定度优于±3.2%.

关键词 激光器; 全固态激光器; 复合腔; 和频; 紫外激光

中图分类号 TN 248.1 **文献标识码** A

Laser-Diode Pumped All-Solid-State Continuous-Wave Ultraviolet Laser at 355 nm

LÜ Yan-fei¹, ZHANG Xi-he¹, YAO Zhi-hai¹, TAN Hui-ming²,
XIA Jing¹, WANG Zhi-qiang³, LI Chang-li¹, ZHANG Feng-dong¹

¹ Department of Physics, Changchun University of Sciences and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
The Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
³ Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China

Abstract A laser-diode pumped all-solid-state 355 nm continuous-wave ultraviolet laser with intra-cavity tripling and efficient output was achieved by cavity design optimization. Ultraviolet laser at 355 nm is obtained by using a doubly cavity, and type-I critical phase matching BIBO crystal for intra-cavity sum frequency mixing. With incident pump power of 20 W in Nd:YAG and 8 W in Nd:YVO₄, TEM₀₀ mode ultraviolet laser at 355 nm of 114 mW is obtained at last, corresponding to an optical-to-optical efficiency of 0.4%, and the power stability in 4 h is better than ±3.2%.

Key words lasers; all-solid-state lasers; doubly cavity; sum-frequency; ultraviolet laser

1 引言

紫外激光器具有波长短、易聚焦、能量集中、分辨率高等优点, 在超高密度光驱、精密材料加工、紫外固化、光刻、光印刷、医疗、光谱分析和科学研究等领域有广泛的应用前景. 随着全固态激光技术的发展, 结构紧凑的全固态紫外激光器必然成为紫外激

光器发展的主要方向, 但紫外波段多处于非线性晶体可实现相位匹配的边缘, 有效非线性系数小, 转换效率低. 目前, 对获得全固态紫外激光最直接、最成熟的方法是对掺Nd³⁺固体激光近红外波进行腔内或腔外频率转换. 国外已有大量文章对三次^[1]、四次^[2]或五次谐波^[3]脉冲紫外激光器进行了报道, 国内也有许多报道脉冲紫外激光器的文章^[4~8]. 而对

收稿日期: 2006-12-04; 收到修改稿日期: 2007-03-19

基金项目: 国防科工委国防基础科研项目(A3620060122)资助课题.

作者简介: 吕彦飞(1976—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 主要从事光学设计、全固态激光器、激光毁伤机制及非线性光学频率变换技术等方面的研究. E-mail: custlaser@163.com

连续紫外激光器报道得较少, 1994 年 C. Zimmermann 等^[9]用主振荡激光二极管(LD)功率放大器为光源,首次采用 KN 作为倍频晶体,得到了蓝光,用 BBO 四倍频获得了 2.1 mW 的连续紫外激光输出,接下来,国外又有一些作者对连续紫外激光器进行了报道^[10~12],目前 Coherent 公司已经推出了 200 mW 的连续 266 nm 紫外产品^[13]. 国内在连续紫外激光的获得上起步很晚,申高等^[14]报道了连续 355 nm 激光输出,输出功率仅限毫瓦量级. 本文采用复合腔结构,使一个分臂的基频光和另一个分臂的倍频光均获得较高的光功率密度,从而可以提高和频效率,当注入的总抽运功率为 28 W 时,获得最大输出功率为 114 mW 的连续 355 nm 紫外激光.

2 实验方案

全固态连续波 355 nm 紫外激光器实验装置如图 1 所示,采用的是复合谐振腔结构.

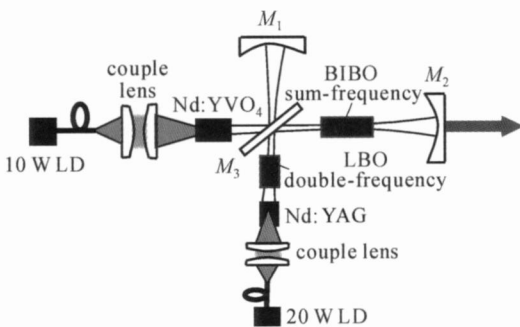


图 1 实验装置图

Fig.1 Schematic of experimental setup

抽运源是最大输出功率为 20 W 和 8 W 的光纤耦合激光二极管阵列,通过温度调解,使抽运光中心波长与 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 的中心吸收波长重合,经过准直聚焦系统(传输耦合效率约为 82%)会聚成半径均为 200 μm 的抽运光斑注入到 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 晶体中. Nd:YVO₄ 晶体中 Nd³⁺ 的掺杂原子数分数为 0.5%,尺寸为 3 mm × 3 mm × 5 mm,左端面镀 1064 nm 高反膜 ($R > 99.8\%$)/808 nm 增透膜 ($T > 95\%$),右端面镀 1064 nm 增透膜 ($T > 99.9\%$);Nd:YAG 晶体中 Nd³⁺ 的掺杂原子数分数为 1.0%,尺寸为 4 mm × 3 mm,下端面镀 1064 nm 高反膜 ($R > 99.8\%$)/808 nm 增透膜 ($T > 99.8\%$),上端面镀 1064 nm 增透膜 ($T > 99.9\%$),在两激光晶体的侧面裹上一层铜箔安装在紫铜热沉上,通过半导体制冷器进行温度控制. 曲率

半径为 200 mm 的平凹镜 M_1 作为反射镜,凹面镀 1064 nm/532 nm 高反膜 ($R > 99.99\%$);曲率半径为 200 mm 的平凹镜 M_2 作为输出镜,凹面镀 1064 nm/532 nm 高反膜 ($R > 99.99\%$) 和 355 nm 增透膜 ($T > 99.5\%$),平面镀 355 nm 增透膜 ($T > 99.5\%$);合束器 M_3 由 1 mm 厚的 K9 玻璃经过镀膜制成,双面 45° 入射时镀 1064 nm 增透膜 ($T > 99.9\%$),使 Nd:YVO₄ 晶体的左端面和 M_2 构成一个谐振腔,此谐振腔的振荡波长为 1064 nm,同时合束器 M_3 靠近 Nd:YAG 晶体的一面还需镀上 45° 入射时 532 nm/355 nm 高反膜 ($R > 99.99\%$),使 Nd:YAG 晶体的下端面和 M_1 构成另一个谐振腔,此谐振腔的基频波长为 1064 nm,经过 LBO 晶体倍频后,产生 532 nm 波长在腔内振荡. 这样,两个谐振腔的交叠区便有 532 nm 和 1064 nm 波长同时振荡,在交叠区放置经过确定切割角度后的 BIBO 晶体,经过非线性倍频可以产生 355 nm 紫外激光,由 M_2 输出到腔外;非线性和频晶体 BIBO 采用 I 类临界相位匹配,由 SNLO 软件计算,尺寸为 2 mm × 2 mm × 10 mm 的 BIBO 晶体沿 xz 轴的切割角度为 $\theta = 56.4^\circ$, $\phi = 0^\circ$;由 1064 nm (e) 和 532 nm (e) 和频产生 355 nm (o),BIBO 晶体的有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = 2.68 \text{ pm/V}$,BIBO 的两端面镀 1064 nm/532 nm/355 nm 三色增透膜;非线性倍频晶体 LBO 也采用 I 类临界相位匹配,尺寸为 2 mm × 2 mm × 15 mm,LBO 晶体沿 xy 轴的切割角度为 $\theta = 90^\circ$, $\phi = 11.3^\circ$;由 1064 nm (o) 和 1064 nm (o) 倍频产生 532 nm (e),LBO 晶体的有效非线性系数为 $d_{\text{eff}} = 0.832 \text{ pm/V}$,LBO 的两端面镀 1064 nm/532 nm/355 nm 三色增透膜. 利用 ABCD 矩阵和稳定腔条件,考虑到 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 的热效应以及谐振腔的基横模与激光晶体内有效增益体积之间的空间匹配,通过计算机数值计算,实验中以 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 作为增益介质的谐振腔的腔长分别取 70 mm 和 64 mm.

3 实验结果

采用 BIBO 晶体进行腔内和频,当注入到 Nd:YAG 的抽运功率为 20 W 时,测量了 355 nm 紫外激光输出功率随注入到 Nd:YVO₄ 的抽运功率的变化,如图 2 所示.

从图 2 中可以看出,激光器的阈值功率约为 0.8 W. 当注入到 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 晶体的抽

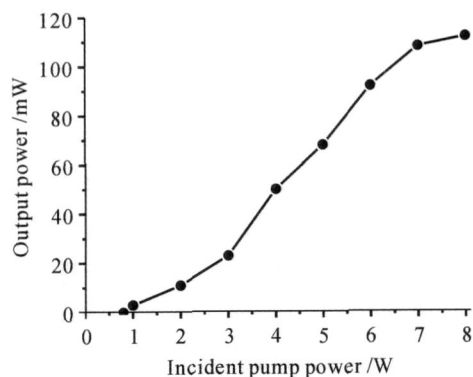


图2 355 nm 紫外激光输出功率随入射抽运光功率的变换关系

Fig. 2 Output power at 355 nm versus incident pump power

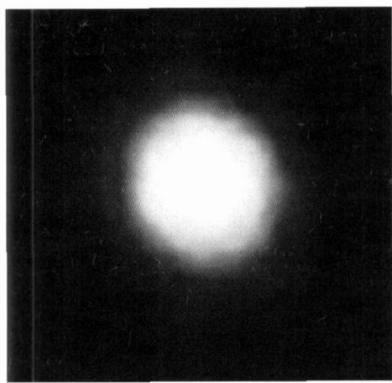


图3 紫外激光远场光斑

Fig. 3 Far field UV laser spots

运功率分别为20 W和8 W时,获得的355 nm紫外激光输出功率为114 mW,并且可以看出当注入到 Nd :YVO₄的抽运功率达到8 W时,激光输出功率开始达到饱和,这就说明1064 nm的光功率密度已经大于532 nm的光功率密度,如果想要获得更高的输出功率,必须还得提高532 nm的光功率密度,这就需要提高注入到 Nd :YAG的抽运功率。

在355 nm紫外激光输出功率为114 mW时所拍摄的激光光斑如图3所示,可以看出激光光斑为TEM₀₀模。

4 结 论

以Nd :YVO₄和Nd :YAG晶体作为增益介质,利用非线性晶体BIBO I类临界相位匹配,通过复合腔在腔内和频获得114 mW连续波基横模355 nm紫外激光,激光输出功率稳定,光束质量好。实验结果表明采用两种激光晶体进行腔内和频是获得355 nm紫外激光的有效方法,并可以将该技术推

广到其他两种激光晶体的基频光与倍频光进行腔内和频,还可以获得更多其他波长紫外激光。因此,本文所利用的腔内和频技术为全固态紫外激光器的发展提供了一个新的方向。

参 考 文 献

- 1 H. Furuya, H. NaKao, I. Yamada *et al.*. Alleviation of photoinduced damage in Gd_xY_{1-x}Ga₄O(BO₃)₃ at elevated crystal temperature for noncritically phase-matched 355-nm generation [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(21):1588~1590
- 2 Tetsuo Kojima, Susumu Konno, Shuichi Fujikawa *et al.*. 20-W ultraviolet-beam generation by fourth-harmonic generation of all-solid-state laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1):58~60
- 3 Yusuke Mori, Ikuo Kuroda, Satoshi Nakajima *et al.*. New nonlinear optical crystal: cesium lithium borate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(13):1818~1820
- 4 Chen Guofu, Wang Xianhua, Du Geguo. All-solid-state ultra violet laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(9):785~788
陈国夫,王贤华,杜戈果. 全固态紫外激光器研究[J]. *光子学报*, 1999, **28**(9):785~788
- 5 He Jingliang, Lu Xingqiang, Jia Yulei *et al.*. 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
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
- 6 Wang Yishan, Zhao Shanghong, Yu Lianjun *et al.*. The generation of high-efficiency, all solid-state 263 nm ultraviolet lasers pulse [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(10):917~919
王屹山,赵尚弘,于连君等. 高效全固态263 nm紫外激光脉冲的产生[J]. *光子学报*, 2000, **29**(10):917~919
- 7 Zhou Chen, Ye Ziqing, Zheng Quan *et al.*. Investigation for passively Q-switched Cr⁴⁺:YAG all-solid-state ultraviolet laser of fourth-harmonic generation [J]. *Laser Technology*, 2003, **27**(4):339~341
周 城,叶子青,郑 权等. Cr :YAG被动调Q4倍频全固态紫外激光器的研究[J]. *激光技术*, 2003, **27**(4):339~341
- 8 Zhang Shaojun, Dong Shengming, Li Fuqi *et al.*. Efficient third-harmonic-generation of 1064nm 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
- 9 C. Zimmermann, V. Vuletic, A. Hemmerich *et al.*. All solid state laser source for tunable blue and ultraviolet radiation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(18):2318~2320
- 10 Low Goldberg, Dahv A. V. Kliner. Deep-UV generation by frequency quadrupling of high-power GaAlAs semiconductor laser [J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(10):1145~1147
- 11 K. Kondo, M. Oka, H. Wada *et al.*. Demonstration of long-term reliability of a 266-nm, continuous-wave, frequency-quadrupled solid-state laser using β -BaB₂O₄ [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(3):195~197
- 12 Jun Sakuma, Yuichi Asakawa, Minoru Obaru. Generation of 5-W deep-UV continuous-wave radiation at 266 nm by an external cavity with a CsLiB₆O₁₀ crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1):92~94
- 13 www.coherent.com.cn.
- 14 Shen Gao, Tan Huiming, Liu Fei. Optimization design for all-solid-state 355 nm continuous-wave ultraviolet laser [J]. *Optics Precision Engineering*, 2006, **14**(5):731~735
申 高,檀慧明,刘 飞. 全固态355 nm连续紫外激光器的优化设计[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(5):731~735