

蓝光抽运 Pr:KYF 晶体及腔内倍频 紫外激光技术

倪天怡 李永亮 张天乙 阮仁秋

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 报道了一种蓝光(471 nm)抽运的全固态 Pr:KYF 激光器。其入射抽运激光阈值功率为 0.4 W, 当注入的抽运功率为 2.5 W 时, 得到了最大 212 mW 的 610 nm 波长的激光输出。然后采用 I 类临界相位匹配的 β -BaB₂O₄ (BBO) 晶体进行内腔倍频, 得到了最大 11 mW 的二次谐波 305 nm 紫外激光输出。通过刀口法可测量到在 TEM₀₀ 模式下, 输出光束的质量因子 $M^2 = 1.25$; 光-光转换效率达 4.4%; 输出功率在 30 min 内的不稳定性优于 4.3%。采用 USB-4000 型光谱仪检测到输出为 305 nm 的激光光谱。

关键词 激光; 蓝光抽运; 内腔倍频; Pr:KYF 晶体

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.091405

Blue Laser Pumped Intracavity Frequency Doubling Pr:KYF Ultraviolet Laser at 305 nm

Ni Tianyi Li Yongliang Zhang Tianyi Ruan Renqiu

(School of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract An all-solid-state blue laser (471 nm) pumped Pr:KYF laser is demonstrated. The incident pump power threshold is 0.4 W. With an incident pump power of 2.5 W, the maximum output power is 212 mW. Moreover, intracavity second-harmonic generation (SHG) is also achieved with a maximum ultraviolet power of 11 mW by using a β -BaB₂O₄ (BBO) nonlinear crystal. The system emits nearly TEM₀₀ mode with beam quality factor $M^2 = 1.25$ measured by the knife-edge technique. The optical-to-optical conversion efficiency is 4.4%, and the fluctuation of the output power is about 4.3% in 30 min. The spectra of 305 nm laser are detected using the USB-4000 high resolution spectrometer.

Key words lasers; blue laser pumping; intracavity frequency doubling; Pr:KYF crystal

OCIS codes 140.3480; 140.3280; 190.2620; 320.7090

1 引言

采用非线性光学频率变换技术得到的紫外光源具有结构紧凑、线宽窄、可靠性高的优点, 在科学研究和工业上有很好的应用^[1~4]。为了获得高功率频率可变的固体激光器, 人们利用非线性光学晶体做了大量的研究实验^[5~8], 相关的非线性光学技术和非线性光学晶体材料获得了快速发展。在过去的 20 年里, 多数针对紫外激光器的研究集中在脉冲激光器上, 很少有关于连续紫外激光的研究报道^[9]。然而, 连续紫外光源在很多领域有很好的应用前景, 如新一代高密度光存储、光刻法以及材料加工^[10]。1995 年, Mori 等^[11,12]通过采用 KTP 晶体腔内倍频, 从激光二极管(LD)抽运的 Nd:YAG 激光中产生 2.9 W 的二次谐波, 再使用环形

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-05-22; 网络出版日期: 2012-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(61108029)资助课题。

作者简介: 倪天怡(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事激光技术及应用、非线性光学等方面的研究。

E-mail: ntyjoy@126.com

导师简介: 李永亮(1973—), 男, 副研究员, 主要从事激光技术及应用、非线性光学等方面的研究。

E-mail: liyongliang@cust.edu.cn(通信联系人)

外部谐振腔,通过相位转换器和音圈型电磁仪决定反射镜的位置,用 5 mm 长的 BaB_2O_4 (BBO) 晶体,得到了输出功率为 1.5 W 的 266 nm 连续紫外光。2004 年, Sakuma 等^[13]用 CLBO 晶体腔外倍频,在 266 nm 波段得到了 5 W 的输出功率,相应的转换效率高达 61.8%。2008 年,日本大阪大学研究人员报道了大于 100 W 的 355 nm 紫外激光输出^[14]。2009 年,西北大学采用 LD 侧面抽运 Nd:YAG 电光调 Q,在腔外分别利用 KTP 和 BBO 二倍频和四倍频,获得低重复频率、窄脉宽的 266 nm 紫外激光。在重复频率 1 Hz 时,获得 266 nm 紫外激光最大单脉冲能量 15.4 mJ,脉宽 8 ns,峰值功率高达 1.93 mW;在重复频率 20 Hz 时,获得平均功率 156.2 mW 的 266 nm 紫外激光,四倍频转换效率为 10.63%^[15]。激光晶体在固态紫外激光器中极为重要, Pr^{3+} 的激光特性曾被 Ostroumov 等^[16]报道过。近年来,由于具有更为有效的辐射跃迁,已用掺杂 Pr^{3+} 晶体和玻璃及掺杂 Pr^{3+} 的氟化物制造出了多色激光器(红色、绿色、蓝色)。本文报道波长为 610 nm 的 Pr:KYF 全固态红光激光器,并且通过腔内倍频获得 305 nm 的二次谐波。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。近年来,倍频蓝光固体激光器已有多篇文献报道^[17~20]。在图 1(a)中, F 是焦距为 70 mm 的透镜,用于增强抽运功率密度。抽运光束聚焦在 Pr:KYF 晶体上的束腰光斑半径约为 $65 \mu\text{m}$ 。实验中选用的是掺杂原子数分数为 0.4% 的 Pr:KYF 晶体(尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$), Pr:KYF 晶体两端面均镀有 471、610、305 nm 减反膜,晶体侧面用铟铂包裹并固定于紫铜热沉块中,热沉块的温度通过制冷系统控制在 $(15 \pm 0.1) \text{ }^\circ\text{C}$ 。平面腔镜 M1 镀有 471 nm 减反膜, 610 nm 和 305 nm 全反射膜,输出镜 M2 的曲率半径为 50 mm,在 610 nm 处通过镀膜得到的实际透射率为 3.4%, M1 与 M2 构成的平-凹腔的腔长为 24 mm。

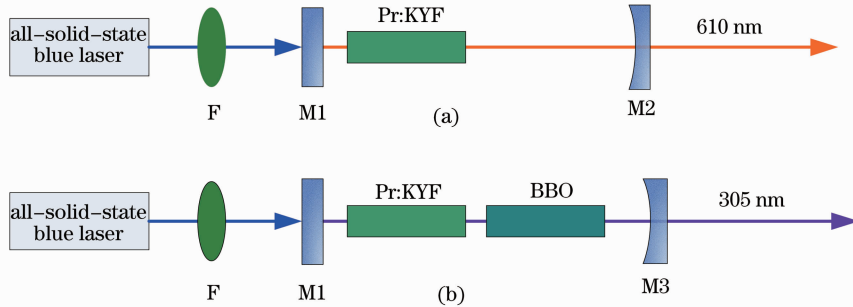


图 1 实验装置原理图。(a) 610 nm 激光器原理图; (b) 305 nm 倍频激光器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup. (a) Fundamental 610 nm laser; (b) frequency doubled 305 nm laser

图 1(b)为腔内倍频 305 nm 激光器原理图。输出镜 M3 的曲率半径为 50 mm,左端面镀 610 nm 高反膜和 305 nm 减反膜,右端面镀 305 nm 减反膜。选择了 I 类临界相位匹配切割的 BBO 晶体作为倍频晶体,原因是其具有高损伤阈值,且在 XY 主平面内具有很小的走离角($\theta = 90^\circ$, $d_{\text{eff}} = 1.89 \text{ pm/V}$), BBO 晶体的尺寸是 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$,两端面均镀有 610 nm 和 305 nm 减反膜,以减小腔内的反射损失, M1 与 M3 构成的平-凹腔的腔长为 22 mm。

3 结果与讨论

通过改变抽运功率,分别测量并获得了 610 nm 和 305 nm 激光输出功率随注入抽运功率变化的关系,如图 2 所示。入射抽运功率的激光阈值为 0.4 W。通过图 1(a)的装置,当入射抽运功率达到 2.5 W 时,610 nm

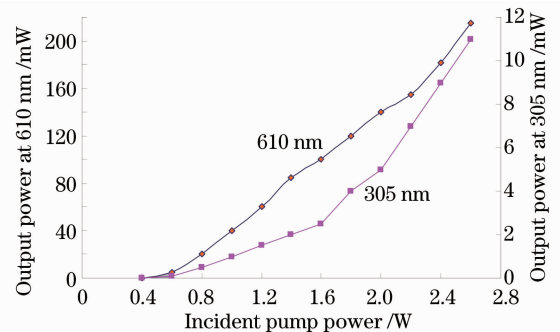


图 2 注入功率-输出功率特性曲线

Fig. 2 Input-output powers characteristics

激光最大输出功率达到 212 mW;通过图 1(b)的装置,当入射抽运功率达到 2.5 W 时,二次谐波 305 nm 连续紫外光输出功率为 11 mW。通过刀口法可以测量到,在 TEM₀₀ 模式下,305 nm 激光光束的质量因子 $M^2 = 1.25$,光-光转换效率达到了 0.4%。图 3 为 305 nm 激光光斑形状。图 4 为使用荷兰 AVANTES 公司的 AvaSpec-UV-NIR256 型一体式光谱仪(光谱范围 0.2~2.5 μm)检测到的 305 nm 激光光谱。通过实验记录可得出,输出功率在 30 min 内不稳定性约为 4.3%,如图 5 所示。



图 3 305 nm 激光光斑形状

Fig. 3 Beam shape of ultraviolet laser at 305 nm

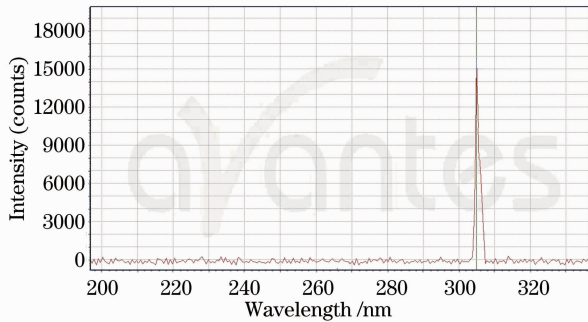


图 4 305 nm 紫外激光光谱

Fig. 4 Spectrum of the 305 nm ultraviolet laser

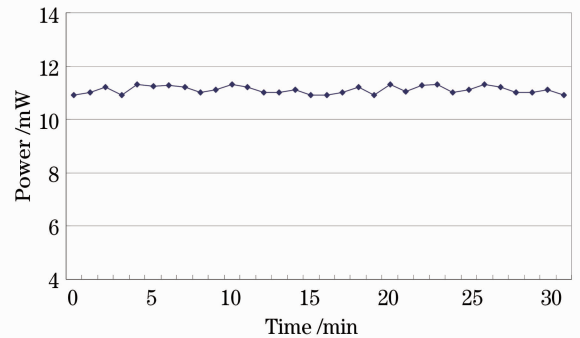


图 5 30 min 内的输出功率不稳定性曲线

Fig. 5 Fluctuation of the output power in 30 min

4 结 论

成功地实现了预先设计的全固态蓝光抽运腔内倍频 Pr:KYF-BBO 激光器在 305 nm 的激光输出。当输出波长为 610 nm 时,连续光的输出功率可达到 212 mW;经倍频后,输出了波长为 305 nm 的紫外激光,其最大功率达到了 11 mW。证明了通过采用 Pr:KYF 晶体和 BBO 非线性晶体可以得到紫外激光输出,这是一种新的获得紫外激光的途径。但目前光-光转换效率尚不理想,需在后续工作中进行深入的理论研究和实验探索,以进一步提高输出光功率和质量。

参 考 文 献

- Lan Xinju. Laser Technology [M]. Beijing: Science Press, 2000. 224~225
蓝信钜. 激光技术[M]. 北京:科学出版社, 2000. 224~225
- Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. The Principle of Laser [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. 24~200
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘 等. 激光原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2004. 24~200
- Huang Dexiu, Liu Xuefeng. Semiconductor Lasers and Their Applications [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999. 107~109
黄德修, 刘雪峰. 半导体激光器及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1999. 107~109
- Liu Qiang, Yan Xingpeng, Chen Hailong *et al.*. New progress in high-power all-solid-state ultraviolet laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(9): 2289~2298
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
- P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters *et al.*. Generation of optical harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1961, **7**(4): 118~119
- M. Bass, P. A. Franken, A. E. Hill *et al.*. Optical mixing [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **8**(1): 18
- J. A. Giordmaine. Mixing of light beams in crystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **8**(1): 19~20
- P. D. Maker, R. W. Terhune, M. Nisenoff *et al.*. Effects of dispersion and focusing on the production of optical harmonics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **8**(1): 21~22

- 9 A. Sylvan, P. K. Bhadani, R. G. Harrison. Small solid-state switched pulser-sustainer TEA CO₂ laser [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1991, **2**(2): 49~53
- 10 C. X. Wang, G. Y. Wang, A. V. Hicks *et al.*. High-power Q-switched TEM₀₀ mode diode-pumped solid-state lasers with >30 W output power at 355 nm[C]. *SPIE*, 2006, **6100**: 610019
- 11 Yusuke Mori, Ikuo Kuroda, Satoshi Nakajima *et al.*. New nonlinear optical crystal; cesium lithium borate [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(13): 1818~1820
- 12 Yusuke Mori, Ikuo Kuroda, Satoshi Nakajima *et al.*. Nonlinear optical properties of cesium lithium borate [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1995, **34**(3A): L296~L298
- 13 Jun Sakuma, Yuichi Asakawa, Minoru Obara. 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
- 14 D. Rajesh, M. Yoshimura, T. Eiro *et al.*. UV laser-induced damage tolerance measurements of CsB₃O₅ crystals and its application for UV light generation [J]. *Opt. Mater.*, 2008, **31**(2): 461~463
- 15 Bai Yang, Liu Peipei, Shen Zhaoguo *et al.*. LD pulse side-pumped EO Q-switched Nd:YAG UV laser with short pulse width at low repetition rate [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(7): 1617~1620
白 杨, 刘沛沛, 沈兆国 等. LD 脉冲侧面抽运 Nd:YAG 电光调 Q 低重频窄脉宽紫外激光器[J]. 光子学报, 2009, **38**(7): 1617~1620
- 16 Vasily Ostroumov, Wolf Seelert, Lukas Hunziker *et al.*. 522/261 nm CW generation of Pr³⁺:YLF laser pumped by OPS laser [C]. *SPIE*, 2007, **6451**: 645104
- 17 Wang Janguang, Li Yongliang, Tian Yinghua *et al.*. All-solid-state continuous-wave all-intracavity sum-frequency mixing blue laser at 488 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1669~1672
王君光, 李永亮, 田迎华 等. 全固态腔内和频 488 nm 连续蓝光激光器[J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1669~1672
- 18 Zheng Quan, Zhao Ling, Dong Shengming. High efficient blue laser generation at 473 nm by BIBO crystal[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1030~1032
郑 权, 赵 岭, 董胜明. BIBO 晶体腔内倍频高效率 473 nm 蓝光激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(9): 1030~1032
- 19 Lü Yanfei, Zhang Xihe, Xia Jing *et al.*. All solid-state continuous-wave cyan laser at 501 nm[J]. *Laser & Infrared*, 2008, **38**(11): 1080~1082
吕彦飞, 张喜和, 夏 菁 等. 全固态连续波 501 nm 青光激光器[J]. 激光与红外, 2008, **38**(11): 1080~1082
- 20 Li Yongliang, Jiang Huilin, Ni Tianyi *et al.*. Diode-pumped CW frequency-doubled Nd:GSAG-LBO blue laser at 471 nm [J]. *Laser Phys. Lett.*, 2011, **8**(4): 259~262