全固态高重复频率 244 nm 紫外激光器

王金艳[1]，李奇[1]，陈曦[1]*，郑权[1,2]，李世杰[1]，陈磊[1]

[1]长春新产业光电技术有限公司，吉林 长春 130103；

[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

摘要 研究了全固态脉冲运转腔外倍频 244 nm 深紫外激光器。采用 V 型谐振腔及主动调 Q 技术，对双二极管阵列抽运的 914 nm 和 1047 nm 基频光进行腔内和频产生 488 nm 高重复频率脉冲激光。在总抽运功率为 44 W 时，488 nm激光输出功率为 527 mW。利用 I 类相位匹配 BBO 晶体进行腔外倍频，实现了平均功率为 28 mW 的 244 nm深紫外激光输出，重复频率为 4 kHz，脉冲宽度为 17.8 ns，倍频效率为 5.3%。

关键词 激光器；全固态激光器；紫外激光；244 nm 激光

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**：10.3788/CJL201946.0901010

A High-Frequency All-Solid-State Ultraviolet Laser at 244 nm

Wang Jinyan[1], Li Qi[1], Chen Xi[1]*, Zheng Quan[1,2], Li Shijie[1], Chen Lei[1]

[1]*Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin* 130103, *China*;

[2]*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

Abstract An all-solid-state ultraviolet 244 nm laser by external cavity double-frequency is designed. Via V-shaped folded-cavity and actively Q-switched technique, the 914 nm and 1047 nm fundamental frequency beams pumped by the double diode arrays are used for intracavity sum frequency generation of a 488 nm high-frequency pulse laser. At the total pumping power of 44 W, the 488 nm laser output power is 527 mW. Using type I phase-matched BBO crystal, the 244 nm deep ultra-violet laser with an average output power of 28 mW is achieved. The repeat rate is 4 kHz with a pulse width of 17.8 ns, and the frequency-doubling conversion efficiency is 5.3%.

Key words lasers; all-solid-state lasers; ultra-violet laser; 244 nm laser

OCIS codes 140.3480; 140.3540; 140.3580; 140.3610

1 引 言

紫外激光因其波长短、单光子能量高、热效应低等优点，在光谱分析、光存储、微细制造中具有独特优势，受到了研究者的广泛关注。

与长波长的激光器相比，紫外激光器的输出光束产生的热效应区小，可以将碳化及其他热应力的影响降至最低。紫外激光在玻璃、树脂和铜这 3 种材料中都有很高的吸收率，这使其成为工业领域中各种印制电路板(PCB)材料加工的最佳选择，适用于电路板生产、电路布线等基本工艺，以及生产袖珍型嵌入式芯片等高级工艺[1-2]。244 nm 深紫外激光可用于双光子吸收法研究氢原子和氘原子的 1S→2S 跃迁光谱结构，钠原子的塞曼超精细分裂光谱结构，及斯塔克分裂和位移等光谱结构[3]，还可用于原子冷却、离子定量分析和拉曼光谱分析等领域[4]。

在全固态激光出现之前，244 nm 连续激光通常用昂贵的 488 nm 氩离子激光器进行腔内倍频实现，且效率很低。直到 2003 年才陆续出现以光泵半导体倍频的方式替代氩离子的激光器[5]。2008 年，Kaneda 等[6]利用光泵半导体腔内倍频产生 488 nm 激光，再次倍频实现大于 200 mW 的连续 244 nm 激光输出。2017—2018 年，Burkley 等[7-8]利用掺钇光纤激光四倍频的方式产生 243.1 nm 的紫外激光，

收稿日期：2019-06-18；**修回日期**：2019-06-27；**录用日期**：2019-07-09

基金项目：长春市“双十工程”(16SS18)

* **E-mail**：chenxi@cnilaser.com

首先利用掺铒光纤放大产生 972.5 nm 基频光，再用三硼酸锂(LBO)晶体产生 486.3 nm 的倍频光，最后用硼酸铯锂(CLBO)晶体获得连续的 1.4 W，243.1 nm四倍频紫外激光输出。这是目前报道中在此波段连续输出功率最高的激光器，尚未见 244 nm 脉冲激光器的报道。

本文利用声光 Q 开关分别调节掺钕钒酸钇(Nd…YVO_4)晶体的 914 nm 激射光和掺钕氟化钇锂(Nd…YLF)晶体的 1047 nm 激射光的腔内损耗，即调 Q 技术。LBO 晶体对两个激射光和频后实现 488 nm 脉冲输出，再通过偏硼酸钡(BBO)晶体倍频获得平均功率为 28 mW 的 244 nm 深紫外脉冲激光输出。

2　实验装置与结果

为获得 488 nm 的和频光，增益介质选择 Nd…YVO_4晶体和 Nd…YLF 晶体，对应的基频光波长为 914 nm 和 1047 nm。

Nd…YVO_4 晶体中的 Nd^{3+} 离子主要有 3 条激光跃迁谱线，分别为 914、1064、1342 nm，其中 914 nm谱线对应$^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{9/2}$能级的跃迁，激光下能级是基态分裂的子能级，具有相当数量的粒子存在，所以该谱线为准三能级系统，这会导致 914 nm 谱线的阈值很高。同时，由于 914 nm 谱线的发射截面是 1064 nm 谱线发射截面的 1/9，谱线竞争非常激烈。为获得 914 nm 激光振荡，需从谐振腔的腔镜膜系设计的角度考虑，增加 1064 nm 谱线的损耗，抑制其振荡[9-10]。

Nd…YLF 晶体根据不同的偏振吸收，可以获得不同波长的激光振荡[11]。π 偏振吸收可以获得 1047 nm 和 1321 nm 的谱线，σ 偏振吸收对应 1053 nm和 1313 nm 的谱线。1321 nm 和 1313 nm 的增益很弱，通常的镜片镀膜损耗可以不予考虑。为获得需要的 1047 nm 激光，晶体选用 a 轴切割方式。由于 Nd…YLF 晶体的应力裂纹极限小，且抽运功率又比较高，分别对钕离子掺杂浓度为 0.5%，0.8%，1%(原子数分数)的晶体进行实验，在保证激光角度稳定的前提下折中考虑效率，最终选取掺杂浓度为 0.5%，尺寸为 3 mm×3 mm×10 mm 的晶体。

激光器谐振腔采用复合腔型，两个子腔采用 V 型折叠腔。实验装置如图 1 所示，两抽运源 LD1 和 LD2 输出波长均为 808 nm，使用光纤耦合输出，光纤芯径为 400 μm。耦合镜组 1(coupler1)和耦合镜组 2(coupler2)分别将两个 LD 输出的抽运光聚焦到晶体中。Nd…YVO_4 晶体(C1)的长度为 7 mm，Nd^{3+} 掺杂浓度为 0.3%，靠近抽运源的一端镀 914 nm高反膜(HR)和 808 nm，1064 nm 抗反膜(AR)，在 1064 nm 透射率大于 99.5%，可以完全抑制 1064 nm 的模式竞争，保证 914 nm 激光的增益；C1 的另一端镀 914 nm 的抗反膜。Nd…YLF 晶体(C2)靠近抽运源的一端镀 808 nm 的抗反膜和 1047 nm的高反膜；C2 另一端镀 1047 nm 的抗反膜。LBO(C3)非线性晶体采用Ⅰ类相位匹配，切割角度 $\theta=90°$，$\varphi=27.1°$，其 θ 为波矢方向与光轴方向的夹角，φ 为波矢量在 XOY 面上的投影与 X 轴的夹角。M1 为 45°平面合束镜，对 914 nm 和1047 nm 进行合束；M2、M3 分别为曲率半径为 100 mm 的凹面镜和平面镜；C1 全反面与 M1、M2、M3 构成 914 nm基频光谐振腔；C2 全反面与 M2、M3 构成 1047 nm 基频光谐振腔。声光 Q 开关 Q1 和 Q2 分别对914 nm和 1047 nm 谐振腔起调 Q 作用，以实现高频激光脉冲振荡，实验中调制信号的重复频率设置为4 kHz。LBO 晶体置于距离 M3 2 mm 处，进而保证488 nm蓝光激光转换效率。凸透镜F的

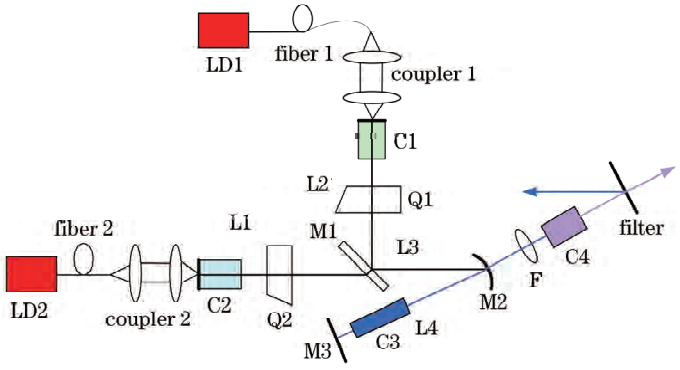


图 1　实验装置图

Fig. 1　Experimental setup

焦距为20 mm，焦点处放置 BBO 晶体(C4)，切割角度 $\theta=54.5°$，对 488 nm 激光进行倍频，最终实现 244 nm 深紫外激光输出。C1、C2、LBO、BBO 放置于紫铜卡具中，由半导体制冷器(TEC)分别控制温度。

除上所述器件的位置关系外，还需要注意 Nd…YVO_4 晶体和 Nd…YLF 晶体都具有偏振特性，LBO 和频晶体采用Ⅰ类相位匹配，要求两个基频光进入晶体的偏振方向一致。两增益介质掺杂离子的上能级寿命不同，且声光 Q 开关的上升沿和下降沿时间不同，导致两个基频光达到脉冲峰值的时间不同，而只有当两个脉冲在时间上重合时，才能实现基频光向和频光的高效率转换。实验中调节两个脉冲之间的延时使之完全重合。

为了得到 488 nm 激光输出功率的最优结果，实验中分别使用长度为 5、10、15 mm 的 3 种 LBO 作为和频晶体。当 LD1 的输出功率为 26 W，LD2 的功率为 18 W 时，3 种长度的 LBO 晶体获得的平均功率分别为 232、527、554 mW，但光束质量变差。为兼顾转换效率和光束质量，选择 10 mm 长的 LBO 晶体，经相机式光束轮廓分析仪测量的488 nm 激光输出光斑近似圆形，直径为 2.5 mm，发散角为 3.3 mrad，椭圆度为 0.90，并测得脉冲重复频率为 4 kHz，脉冲宽度为 23.6 ns。经长度为 8 mm 的 BBO 晶体倍频后，得到 244 nm 紫外激光光谱，如图 2 所示，中心波长为 244.32 nm。244 nm 激光的输出功率随着 488 nm 激光平均功率的增加呈递增趋势，变化关系如图 3 所示。获得紫外激光最高输出功率为 28 mW，脉冲宽度为 17.8 ns，如图 4 所示。紫外激光的脉冲宽度较 488 nm 蓝光的脉宽窄是由于脉冲刚开始和将结束时 488 nm 激光的功率密度低，不足以使 BBO 晶体产生倍频的紫外激光。244 nm激光输出光斑为椭圆形，大小为 2.2 mm×6.9 mm，如图 5 所示。

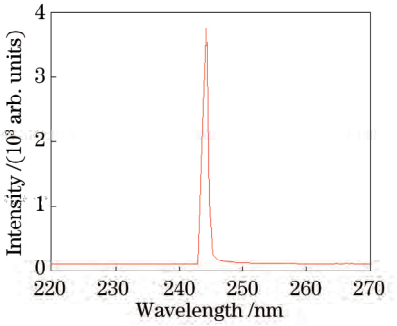


图 2　紫外输出激光光谱

Fig. 2　Ultra-violet output spectrum

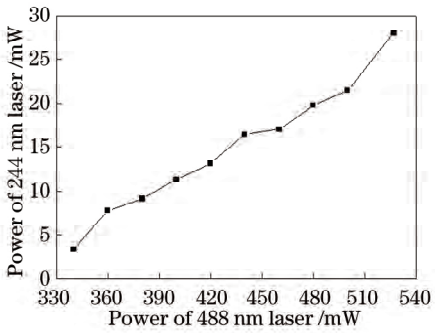


图 3　紫外激光相对于蓝光激光的输出功率

Fig. 3　Output power of ultra-violet laser versus blue laser

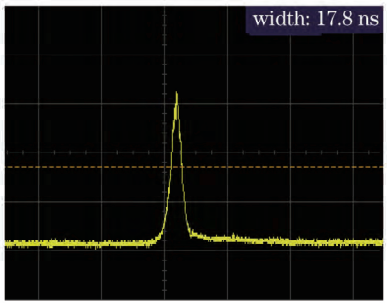


图 4　紫外激光脉冲宽度

Fig. 4　Pulse width of ultra-violet laser

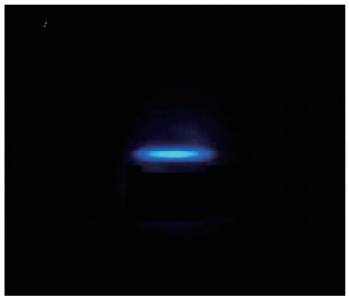


图 5　紫外激光光斑

Fig. 5　Spot of ultra-violet laser

实验中蓝光向紫外光的倍频转换效率为 5.3%，制约其效率的因素主要是 BBO 晶体的走离角大，产生相位失配；BBO 晶体的允许角小，蓝光的光束质量对其影响较大；腔外倍频方式中基频光的功率密度较腔内倍频的方式低。此外倍频转换效率还与蓝光的脉冲宽度、聚焦透镜的焦距等有关。

3　结　　论

报道了全固态脉冲运转 244 nm 深紫外激光器。对 Nd…YVO_4 和 Nd…YLF 两种增益介质的光谱特性进行分析，分别选择两增益介质的 914 nm 和 1047 nm 谱线作为基频光；采用Ⅰ类位相匹配 LBO 晶体对脉冲运转的基频光进行腔内和频，实现 488 nm脉冲蓝光激光，再利用 BBO 晶体腔外倍频

方式获得 244 nm 深紫外脉冲激光输出；测量了紫外激光的光谱、输出功率与输入功率变化曲线、脉冲宽度等参数；对实验结果及影响因素进行了分析。

参 考 文 献

[1] Nie S L, Guan Y C. Review of UV laser and its applications in micromachining[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(12): 1169-1179.
聂世琳, 管迎春. 紫外激光器及其在微加工中的应用[J]. 光电工程, 2017, 44(12): 1169-1179.

[2] Tang J, Liao J H, Meng H Y, *et al*. Ultraviolet laser and its application in laser processing[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44(8): 52-56.
唐娟, 廖健宏, 蒙红云, 等. 紫外激光器及其在激光加工中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(8): 52-56.

[3] He G S, Liu S H. High power optics[M]. Beijing: Science Press, 2011: 260-262.
赫光生, 刘颂豪. 强光光学[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 260-262.

[4] Nelson W H, Dasari R, Feld M, *et al*. Intensities of calcium dipicolinate and bacillus subtilis spore Raman spectra excited with 244 nm light [J]. Applied Spectroscopy, 2004, 58(12): 1408-1412.

[5] Shchegrov A V, Lee D, Watson J P. 490-nm coherent emission by intracavity frequency doubling of extended cavity surface-emitting diode lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4994: 197-205.

[6] Kaneda Y, Yarborough J M, Li L, *et al*. Continuous-wave all-solid-state 244 nm deep-ultraviolet laser source by fourth-harmonic generation of an optically pumped semiconductor laser using $CsLiB_6O_{10}$ in an external resonator [J]. Optics Letters, 2008, 33(15): 1705-1707.

[7] Burkley Z, Rasor C, Cooper S F, *et al*. Yb fiber amplifier at 972.5 nm with frequency quadrupling to 243.1 nm[J]. Applied Physics B, 2017, 123: 5.

[8] Burkley Z, Brandt A D, Rasor C, *et al*. Frequency-stabilized deep-UV laser at 243.1 nm with 1.4 W output power[J/OL]. (2018-11-24)[2019-06-02]. https://arxiv.org/abs/1811.09874.

[9] Yao J Q, Xu D G. All solid state laser and nonlinear optical frequency conversion technology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 58-61.
姚建铨, 徐德刚. 全固态激光器及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 58-61.

[10] Wang J G, Li Y L, Tian Y H, *et al*. All-solid-state continuous-wave all-intracavity sum-frequency mixing blue laser at 488 nm[J]. Chinese Journal of 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.

[11] Pan S D. The research on characteristics of crystal and performance of diode-pumped Nd⋯YLF lasers [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2007: 16-30.
潘淑娣. Nd⋯YLF 晶体特性及全固态激光器研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2007: 16-30.