

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 Jinyan¹, Li Qi¹, Chen Xi^{1*}, Zheng Quan^{1,2}, Li Shijie¹, Chen Lei¹

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

²Changchun 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氦原子的 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]利用掺钕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@cnlaser.com

首先利用掺钕光纤放大产生 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($\text{Nd}:\text{YVO}_4$)晶体的 914 nm 激光光和掺钕氟化钇($\text{Nd}:\text{YLF}$)晶体的 1047 nm 激光光的腔内损耗,即调 Q 技术。LBO 晶体对两个激光光和频后实现 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 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体和 $\text{Nd}:\text{YLF}$ 晶体,对应的基频光波长为 914 nm 和 1047 nm。

$\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 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 $^4\text{F}_{3/2} \rightarrow ^4\text{I}_{9/2}$ 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]。

$\text{Nd}:\text{YLF}$ 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 $\text{Nd}:\text{YLF}$ 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。 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 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。 $\text{Nd}:\text{YLF}$ 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 $\theta=90^\circ$, $\varphi=27.1^\circ$,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

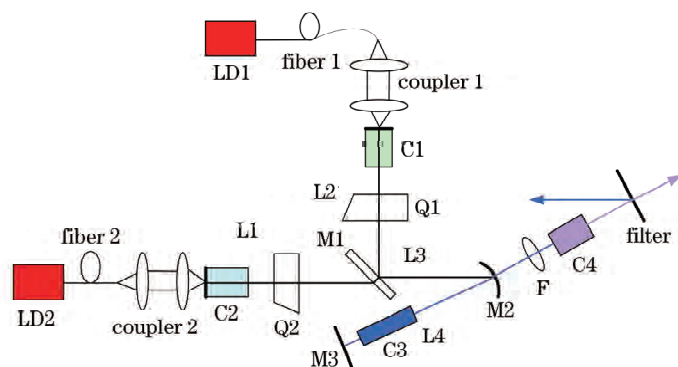


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

焦距为 20 mm, 焦点处放置 BBO 晶体(C4), 切割角度 $\theta = 54.5^\circ$, 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。

除上述器件的位置关系外, 还需要注意 Nd:YVO₄ 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。

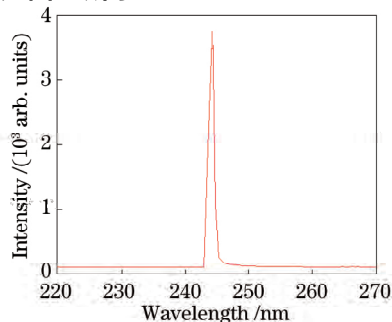


图 2 紫外输出激光光谱

Fig. 2 Ultra-violet output spectrum

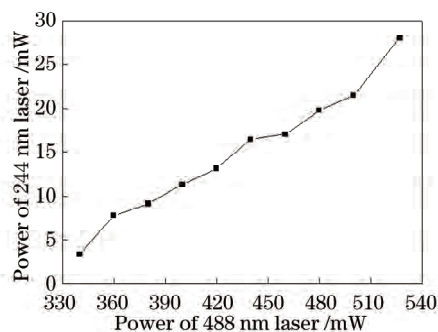


图 3 紫外激光相对于蓝光激光的输出功率

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

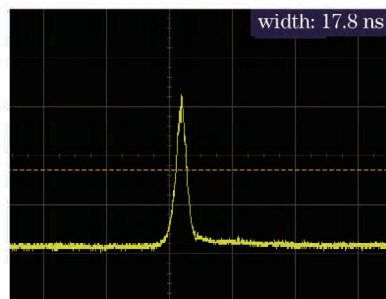


图 4 紫外激光脉冲宽度

Fig. 4 Pulse width of ultra-violet laser

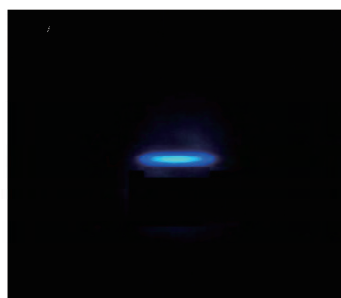


图 5 紫外激光光斑

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:YVO₄ 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 类相位匹配 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 CsLiB₆O₁₀ 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 Nd³⁺:YLF lasers [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2007: 16-30.
潘淑娣. Nd³⁺: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.