中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

重复频率可调窄脉宽228 nm紫外激光器

王金艳 马放 郑磊 田东贺 陈曦 郑权

An ultraviolet laser at 228 nm with adjustable repetition rate and narrow pulse width

WANG Jin-yan, MA Fang, ZHENG Lei, TIAN Dong-he, CHEN Xi, ZHENG Quan

引用本文:
王金艳, 马放, 郑磊, 田东贺, 陈曦, 郑权. 重复频率可调窄脉宽228 nm紫外激光器[J]. 中国光学, 2024, 17(1): 100-107. doi: 10.37188/CO.2023-0058
WANG Jin-yan, MA Fang, ZHENG Lei, TIAN Dong-he, CHEN Xi, ZHENG Quan. An ultraviolet laser at 228 nm with adjustable repetition rate and narrow pulse width[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(1): 100-107. doi: 10.37188/CO.2023-0058

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2023-0058

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

瓦级319nm单频连续紫外激光的实现及铯原子单光子Rydberg激发

Realization of a watt-level 319-nm single-frequency CW ultraviolet laser and its application in single-photon Rydberg excitation of cesium atoms

中国光学（中英文）. 2019, 12(4): 701 https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0701

200 Hz高重复频率SBS脉宽压缩实验研究

200 Hz high repetition frequency SBS pulse width compression experiment

中国光学（中英文）. 2018, 11(5): 736 https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0736

采用BCB平整技术的高速850 nm垂直面发射激光器

High-speed 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers with BCB planarization technique

中国光学（中英文）. 2018, 11(2): 190 https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0190

锂离子动力电池极片的激光切割分析

Analysis of laser cutting of lithium-ion power battery pole piece

中国光学（中英文）. 2018, 11(6): 974 https://doi.org/10.3788/CO.20181106.0974

二次成像型库德式激光通信终端粗跟踪技术

Coarse tracking technology of secondary imaging Coude-type laser communication terminal

中国光学（中英文）. 2018, 11(4): 644 https://doi.org/10.3788/CO.20181104.0644

水平腔面发射半导体激光器研究进展

Research progress of horizontal cavity surface emitting semiconductor lasers

中国光学（中英文）. 2017, 10(2): 194 https://doi.org/10.3788/CO.20171002.0194

文章编号　2097-1842(2024)01-0100-08

重复频率可调窄脉宽 228 nm 紫外激光器

王金艳[1], 马　放[1], 郑　磊[1], 田东贺[1], 陈　曦[1*], 郑　权[1,2]
（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: 紫外激光器是研究紫外共振拉曼光谱的重要工具, 拉曼信号可以通过共振拉曼效应得到增强, 从而降低拉曼测量的探测极限。本文研究了一种输出波长为 228 nm 的窄脉宽全固态紫外激光器。首先, 以 Nd:YVO_4 作为增益介质, 采用电光调 Q 腔倒空技术, 实现了纳秒量级 914 nm 基频光输出。然后, 经过偏硼酸锂 (LBO) 晶体产生二次谐波, 最终经偏硼酸钡 (BBO) 晶体获得四次谐波 228 nm 紫外激光。在此基础上, 进一步研究了不同重复频率时基频光和倍频光功率的变化规律, 优化了紫外激光器的输出效率。实验结果表明: 当总抽运功率为 30 W 时, 在 10 kHz 重复频率下, 可获得最高平均功率为 84 mW 的 228 nm 紫外激光输出。228 nm 激光在 5~25 kHz 重复频率范围内连续可调, 脉冲宽度保持在 2.8~2.9 ns, 能够满足紫外光谱检测技术领域的应用需求。

关　键　词: 228 nm 激光器; 紫外激光; 腔倒空技术; 二次谐波
中图分类号: TN248.1　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2023-0058

An ultraviolet laser at 228 nm with adjustable repetition rate and narrow pulse width

WANG Jin-yan[1], MA Fang[1], ZHENG Lei[1], TIAN Dong-he[1], CHEN Xi[1*], ZHENG Quan[1,2]
（1. *Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Changchun* 130103, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Science, Changchun 130033, *China*）
* *Corresponding author, E-mail: chenxi@cnilaser.com*

Abstract: Ultraviolet lasers play an important role in the study of ultraviolet resonance Raman spectroscopy. The Raman signals can be enhanced by the resonant Raman effect, thereby reducing the detection limit of Raman measurement. We focus on the study of a narrow-pulse all-solid-state ultraviolet laser with an output wavelength of 228 nm. The Nd:YVO_4 is used as the gain medium and the electro-optic Q-switched cavity dumped technique is applied to achieve a fundamental frequency output of 914 nm in pulse width of several nanoseconds. Then, the second-harmonic light is generated by LiB_3O_5(LBO), and the fourth-harmonic 228 nm UV laser is obtained by beta-barium-borate (BBO) crystal. On this basis, further research has been conducted on the variation of fundamental and second harmonic laser power at different repetition rates. Due

收稿日期: 2023-03-31; **修订日期:** 2023-04-19
基金项目: 吉林省重点研发计划(No. 20220201088GX)
Supported by key Research and Development Plan of Jilin Province (No. 20220201088GX)

to the low gain of Nd:YVO_4 at 914 nm, the average power of the laser is saturated and decreases with increased repetition rate. The output efficiency of UV laser is optimized by adjusting the focus lens. At the pump power of 30 W and the repetition frequency of 10 kHz, a 228 nm UV laser output with the highest average power of 84 mW is obtained. The UV laser is continuously adjustable within the range of 5−25 kHz repetition frequency and the pulse width is maintained at 2.8 to 2.9 ns, which meets the application requirements in the field of UV spectroscopy detection technology.

Key words: 228 nm laser; ultraviolet laser; cavity dumped laser; second harmonic

1　引　言

紫外波段光源在材料加工、光谱检测技术领域有着重要的应用[1-2]。紫外共振拉曼光谱技术是一种利用紫外光源的重要检测技术,其能够充分利用研究对象的紫外共振增强效应选择性激发拉曼信号,将信号强度提升几个数量级。不仅可以极大地降低拉曼测量的探测极限,还可以引入到电子选择方面[3-6],用于研究生物分子结构、制药和临床应用、痕量爆炸物非接触安全检测[7-8]。在材料加工方面,波长小于 250 nm 的光源可用于布拉格光栅或波导的制造[9]。

目前,可直接获得紫外波段输出的方案有准分子激光器,但是其光束质量差、体积大、运行成本高等缺点严重约束了其应用前景。近年来,得益于非线性技术的成熟,全固态紫外激光器的研究获得了较大的进展,其具有光束质量好、运行成本低、体积紧凑等优点,成为最有潜力、可替代准分子激光器的一种技术方案[10]。2014 年, Deyra L 等人使用调 Q Nd: YAG 光纤激光器作为基频光源,在腔外进行非线性频率变换得到了四次谐波 236.5 nm 激光输出,当重复频率为 20 kHz 时,平均功率为 600 mW[11]; 2016 年, Kaneda Y 等人利用 916 nm 垂直腔面发射半导体激光器 (VECSEL) 进行四倍频,得到了连续输出功率为 216 mW 的 229 nm 激光[12]。 2020 年, Bykov S V 等人报道了使用 Nd:$GdVO_4$晶体实现普通声光调 Q 和电光调 Q 结构的 228 nm脉冲输出。电光调 Q 方案中,得到平均功率为 50 mW,脉冲宽度为 20 ns,重复频率为 6 kHz 的 228 nm 紫外激光,并利用该激光器测量了多肽、氨基酸、核苷酸和爆炸物的绝对差分拉曼截面[13]。同年, Dai SH T 等人,利用钛宝石 787 nm 激光的倍频光与 532 nm 激光和频,实现了 3 mJ 226 nm 的激光输出,并成功用于激光诱导荧光测速仪[14]。

全固态激光技术中,调 Q 激光技术是获得高重复频率、窄脉宽及高峰值功率脉冲激光的重要途径。通常情况下,电光调 Q 与声光调 Q 能获得 10 ns 左右的脉冲激光,但要实现 10 ns 以下或更短的脉冲激光输出却很难。而从脉冲激光的产生原理来讲,腔倒空技术 (也称为脉冲透射式调 Q) 与其他调 Q 激光器的不同之处在于,储能单元由工作物质变成了谐振腔。腔倒空技术更易获得窄的脉冲时间及高的峰值功率[15-18]。

鉴于以上技术背景及实际应用需求,本文报道了一种结合腔倒空技术和非线性频率变换的紫外激光器,中心波长为 228 nm,平均输出功率为 84 mW,脉冲宽度为 2.8 ns。

2　实验装置及原理

2.1　工作物质的选择

为获得 228 nm 紫外激光输出,基频光选择 Nd:YVO_4 作为增益介质,图 1 显示了 Nd:YVO_4 晶体中 Nd^{3+}离子的激光发射能级。Nd:YVO_4 晶体常见的发射峰有 914 nm、1 064 nm 和 1 342 nm。对应的受激发射截面分别为 1.7×10^{-19} cm^2、25×10^{-19} cm^2、6×10^{-19} cm^2。为避免 1 064 nm/1 342 nm 与 914 nm 波长的竞争,采取镜片镀高透膜的方式,以增加 1 064 nm/1 342 nm 的损耗,抑制其增益的产生。914 nm 的受激跃迁发生在$^4F_{3/2}\rightarrow{}^4I_{9/2}$ 能级,为准三能级跃迁,低能级为基态能级分裂的 5 个子能级中的最上能级。由于存在热平衡,$^4I_{9/2}$ 在室温下部分填充,为激光的重吸收创造了条件。显然,增益介质以相同的波长发射和吸收会显著降低激光效率。通过降低 Nd^{3+}浓度、优化晶体长度和泵浦光束发散角等,可以最小化这种

重吸收的负面影响。也可以通过冷却 Nd:YVO_4 晶体来抑制重吸收，低温降低了基态子能级的粒子数[19]。

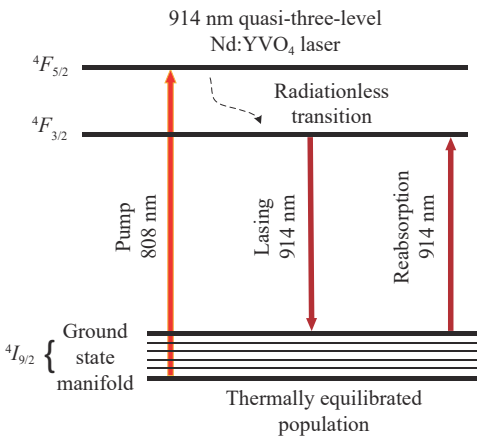


图 1　Nd^{3+}离子跃迁能级图

Fig. 1　Nd^{3+} ion transition energy-level diagram

非线性频率变换部分包括二次谐波 (SHG) 和四次谐波 (FHG) 过程：914 nm→457 nm、457 nm→228 nm。对于二倍频非线性晶体，本文选择生长技术比较成熟的 LBO 晶体。914 nm 基频光为线偏振光，运用 I 类相位匹配条件，可以提高转化效率。经理论计算得知 LBO 晶体在该波长的走离角为 12.5 mrad，小的走离角产生的二次谐波光束质量较好，有利于提高四次谐波效率。常见的可用于紫外波段的非线性晶体有 LBO、BBO、CLBO、KBBF、RBBF。LBO、CLBO 没有合适的匹配角，综合考虑走离角和非线性系数，BBO 晶体是产生四次谐波的最佳选择[20]。

2.2　实验装置

为获得几纳秒的脉冲宽度，将基频光 914 nm 部分的谐振腔设计成基于电光调 Q 的腔倒空结构。实验采用端面抽运方式，通过谐振腔设计，可实现振荡光与抽运光的模式匹配，输出高光束质量的基频光。该激光器的实验装置如图 2 所示。

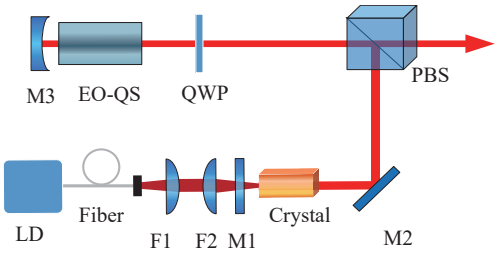


图 2　914 nm 基频光实验装置示意图

Fig. 2　Experimental setup of 914-nm laser

在激光器中，抽运源是中心波长为 808 nm 的连续激光二极管 (LD) 阵列，最大输出功率为 30 W，光纤芯径为 400 μm、数值孔径 (NA) 为 0.22，经过 2 倍放大的透镜组后耦合至增益介质中。为减轻晶体热效应及重吸收的影响，增益介质 Nd: YVO_4 的掺杂浓度为 0.1%，长度为 10 mm，晶体双面镀 808 nm、914 nm 增透膜，晶体使用水冷控温，实验中设定温度为 15 °C。平面反射镜 M1，镀 808 nm、1 064 nm 增透膜、914 nm 全反膜 (R>99.8%)；平面镜 M2 镀 914 nm 45°全反膜 (R>99.8%)；平凹镜 M3 曲率半径 R=1 000 mm，凹面镀 914 nm 全反膜 (R>99.8%)。偏振分光棱镜 (PBS) 表面镀 914 nm 增透膜，胶合面镀 914 nm P 偏振透射及 S 偏振反射膜。QWP 为 914 nm 1/4 波片。EO-QS 为电光 Q 开关，以 BBO 为电光晶体，BBO 晶体具有电光系数高、消光比高、损伤阈值高等优点，端面镀 914 nm 增透膜。

在基频光谐振腔工作过程中，Nd: YVO_4 晶体的最高增益方向沿着 S 偏振方向，在 Q 开关不加电压的情况下，由 PBS 反射的 S 偏振光两次通过 QWP 后变为 P 偏振光，被 PBS 全部透射。此时，谐振腔无法形成激光振荡，而增益介质持续吸收抽运光以粒子数反转形式储存能量。如果给 Q 开关加上 1/4 波电压，Q 开关起到 1/4 波片的作用，S 偏振光两次通过 1/4 波片和 Q 开关后偏振态不发生改变，此时，PBS 透过率为 0%。激光在腔内往复振荡而不断被放大。在脉冲能量达到最大值时，快速去掉 Q 开关上的电压，PBS 透过率变为 100%，谐振腔内储存的激光能量在腔内往返一次后全部输出到腔外，形成高峰值功率、窄脉宽激光。

为了实现高效率、高光束质量的基频光输出，进行谐振腔设计，使抽运光和振荡光满足模式匹配。考虑晶体的热透镜效应，将晶体等效为焦距为 f 的薄透镜。将图 2 所示实验装置等效为图 3 所示简易谐振腔。图 3 中 L_1 为 M1 到晶体中心的距离，L_2 为晶体中心到 M3 的距离。

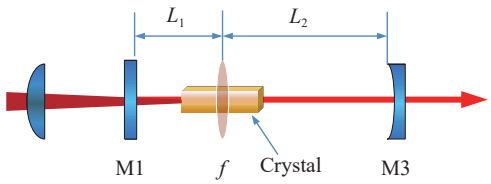


图 3　简化谐振腔示意图

Fig. 3　Schematic diagram of a simplified resonant cavity

晶体的热焦距与抽运功率的关系表达式为:

$$f=\frac{\pi K\omega_{\mathrm{p}}^{2}}{P_{\mathrm{ph}}(\mathrm{d}n/\mathrm{d}t)}\cdot\frac{1}{1-\exp(-\alpha l)}\quad,\qquad(1)$$

其中: K 为晶体热传导系数; ω_{p} 为抽运光在晶体中的光腰半径; P_{ph} 为泵浦激光的热致功率; $\mathrm{d}n/\mathrm{d}t$ 为激光晶体的热光系数, 即折射率随温度的变化率; α 为晶体的吸收系数; l 为激光晶体长度。根据 ABCD 矩阵及稳区条件, 代入谐振腔内的束腰半径公式

$$\omega(x)=\frac{\sqrt{\lambda|b|}}{\pi}\cdot\left[1-\left(\frac{a+d}{2}\right)^{2}\right]^{-\frac{1}{2}}\quad,\qquad(2)$$

式中 $\omega(x)$ 为谐振腔内任意一点的光斑半径; a, b, d 为腔内光束传输矩阵元素; λ 为激光波长。

计算模拟不同腔长时 Nd: YVO_4 晶体处光斑半径随抽运功率的变化, 由于耦合聚焦系统的焦距为 25 mm, 考虑器件的空间距离, 设定 L_1 的长度为 20 mm。经计算仿真获得 L_2 为不同长度时晶体内基模半径随泵浦功率变化关系, 如图 4 (彩图见期刊电子版)所示。

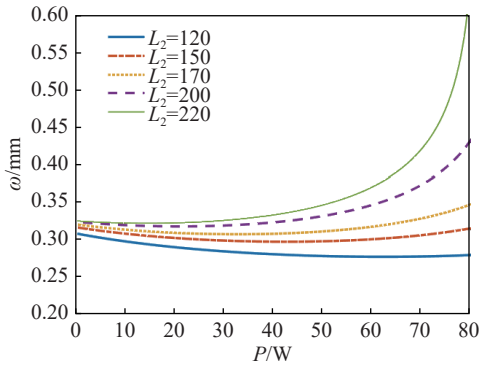


图 4　不同腔长时, 晶体内基模半径随抽运功率的变化

Fig. 4　Fundamental mode radius in crystals varying with pump power when the cavity length is different

由图 4 可看出, L_2 在 150 mm 到 170 mm, 总腔长为 170~190 mm 时, 激光晶体内振荡光基模半径为 0.3~0.32 mm, 其与抽运光束腰半径 (约 0.4 mm) 的比值接近 0.8∶1, 且振荡光基模半径随抽运功率的变化不敏感, 既能够实现振荡光与抽运光的良好模式匹配, 又保证了激光器谐振腔的稳定性。

紫外激光实验装置如图 5 所示。使用凸面镜将 914 nm 基频光耦合入 LBO 晶体中, LBO 采用 I 类 (o+o→e) 非临界相位匹配方式, 切割角为 θ = 90°, Φ = 21.8°。LBO 晶体长度为 15 mm, F1 焦距为 40 mm, 双面镀 914 nm、457 nm 增透膜。二向色镜 M_a 将未转化的 914 nm 基频光反射, 且对 457 nm 的透射率大于 99.8%。F2 将 457 nm 蓝光再次聚焦, 选择 I 类 (o+o→e) 非临界相位匹配的 BBO 作为四倍频晶体, 切割角为 θ = 61.6°, Φ = 0°, 长度为 5 mm。M_b 镀 457 nm 反射膜, 228 nm 紫外激光从 M_b 透射。

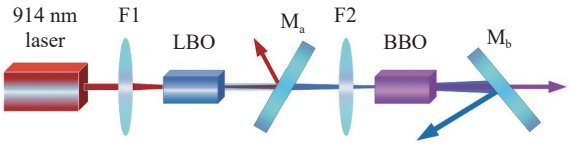


图 5　228-nm 激光实验装置示意图

Fig. 5　Experimental setup of 228-nm laser

3　实验结果与分析

首先研究了高重复频率 914 nm 腔倒空激光器, 频率范围为 5~25 kHz。当抽运功率达到 30 W 时, 在每个频率下调整电光开关的加压时间, 以提供最高的单脉冲能量。图 6、图 7 显示了不同重复频率下 914 nm 基频光和 457 nm 倍频光的平均输出功率和脉冲能量变化趋势。由图 6、图 7 可知, 在较低重复频率时, 平均功率随着频率的升高而升高, 达到一定频率时出现饱和并呈下降趋势。随着频率的增加, 脉冲能量呈下降趋势。这是由于频率增加带来谐振腔累积的能量逐渐减少。更重要的是, 与文献报道的1 064 nm 的腔倒空不同, Nd:YVO_4 晶体本身在 914 nm 处的增益低, 使能量下降的速度更快, 平均功率出现饱和的频率更低。914 nm 激光器在 10 kHz 处提供的最大平均功率为 1.04 W, 457 nm 倍频光的平均功率为 420 mW。基于腔倒空原理, 914 nm 基频光的脉冲宽度几乎不随重复频率变化, 保持在 (3.3±0.1) ns。457 nm 倍频光受到非线性作用的影响, 脉宽变窄, 脉冲宽度保持在 2.8−2.9 ns。

四次谐波的转换效率与二次谐波的光斑分布、光束质量、聚焦功率密度和非线性晶体的特性有关。F2 的焦距直接影响二次谐波耦合进非线性晶体的功率密度。功率密度越大, 效率越高。但由于 BBO 晶体小的接收角和较大的走离

效应，聚焦不能无限制地小，强聚焦会导致短焦深和大的发散角，反而减小了谐波在晶体内的有效作用长度。

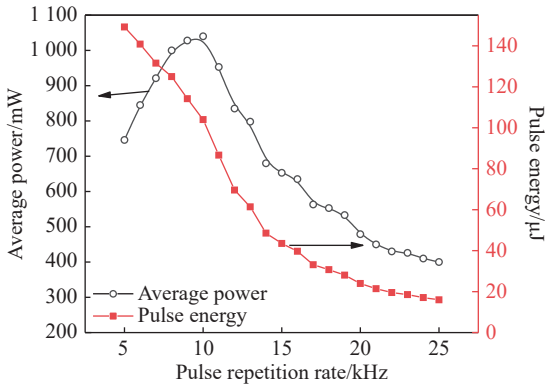


图 6　914 nm 激光的平均功率与脉冲能量随脉冲重复频率的变化情况

Fig. 6　Average output power and pulse energy varying with pulse repetition rate for 914-nm laser

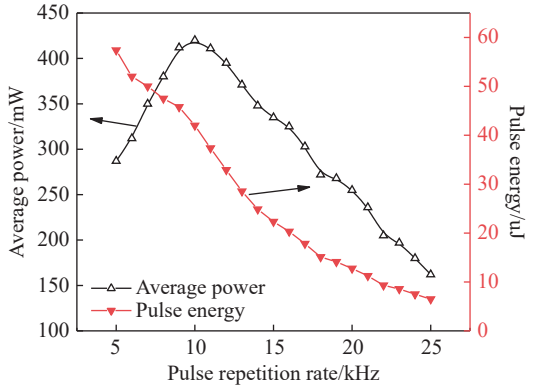


图 7　457 nm 激光的平均功率与脉冲能量随脉冲重复频率的变化情况

Fig. 7　Average output power and the pulse energy varying with pulse repetition rate for 457-nm laser

为分析紫外激光输出功率的相关特性，实验中使用焦距分别为 30 mm、40 mm 和 50 mm 聚焦镜。重复频率为 10 kHz 时，二次谐波在焦点处的平均功率密度分别为 320 W/mm^2、200 W/mm^2 和 178 W/mm^2，对应的瑞利长度理论计算值分别为 0.7 mm、1.7 mm 和 2 mm。在不同的焦距下，需精细调节 BBO 晶体的角度及束腰在 BBO 晶体中的位置。在最佳的状态下，分别获得了 32 mW、84 mW 和 57 mW 的 228 nm 紫外激光。聚焦镜焦距为 40 mm 时，既具有足够的功率密度，又有合适的非线性作用距离。光谱仪测试中心波长为 228.59 nm，见图 8。不同重复频率下的紫外光输出功率，如图 9 所示，228 nm 激光在 5~25 kHz 重复频率范围内可调节，频率为 10 kHz 时可提供最高平均输出功率为 84 mW。测试 2 小时得到的功率稳定性为 1.46%，见图 10。脉宽始终保持在 2.8~2.9 ns，脉冲序列及宽度测试结果如图 11 所示。图中 11(a)、11(b) 分别为 228 nm 激光在重复频率为 10 kHz 时的脉冲序列和单脉冲波形；图 11(c)、11(d)分别表示频率为 18 kHz 时的脉冲序列和单脉冲波形。实验中，需调节 Q 开关的加压时间，否则会导致脉冲频率不稳定。

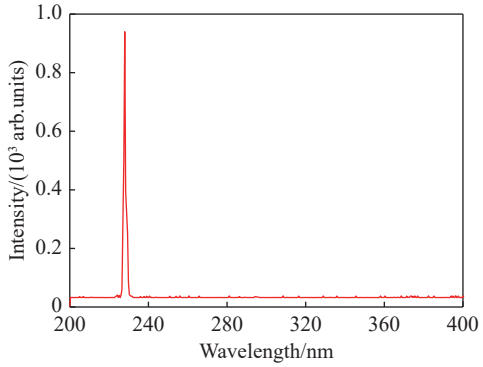


图 8　228 nm 光谱图

Fig. 8　Spectrum of 228-nm laser

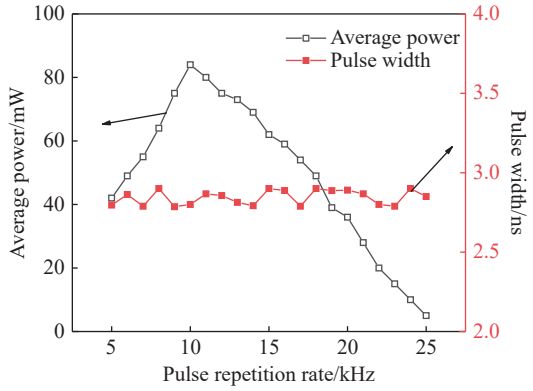


图 9　228 nm 激光平均功率与脉宽随脉冲重复频率的变化情况

Fig. 9　Average output power and pulse width varying with repetition rate of 228-nm laser

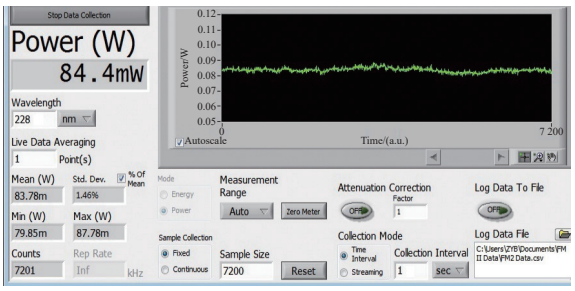


图 10　228 nm 激光功率稳定性

Fig. 10　Power stability of 228-nm laser

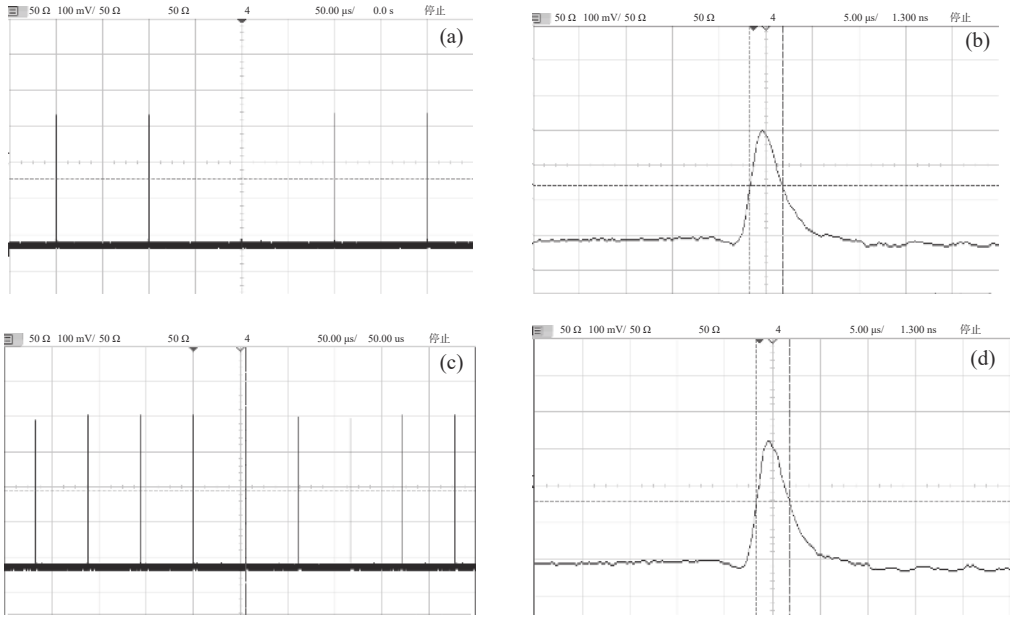


图 11　288 nm 输出脉冲序列和脉宽。(a)、(b) 分别为 10 kHz时的脉冲序列和脉宽; (c)、(d) 分别为 18 kHz 时的脉冲序列和脉宽

Fig. 11　Pulse sequence and pulse width of 228-nm laser. (a) Pulse sequence and (b) pulse width at 10 kHz; (c) pulse sequence and (d) pulse width at 18 kHz

由于 LBO 和 BBO 晶体在产生二次谐波的过程中都存在走离效应, 特别是 BBO 的倍频走离角为 75.3 mrad, 导致 228 nm 的输出光斑为椭圆形。用狭缝扫描式光斑分析仪 (Thorlabs BP209-VIS/M) 测量 228 nm 激光光斑分布, 见图 12(彩图见期刊电子版)。图 12(a) 表示垂直于光传播方向的二维空间强度分布; 图 12(b) 为光斑的三维分布图; 图 12(c)、12(d) 分别为水平和竖直方向的光强分布。光斑尺寸为 1.2 mm×3.5 mm, 椭圆度为 34%。

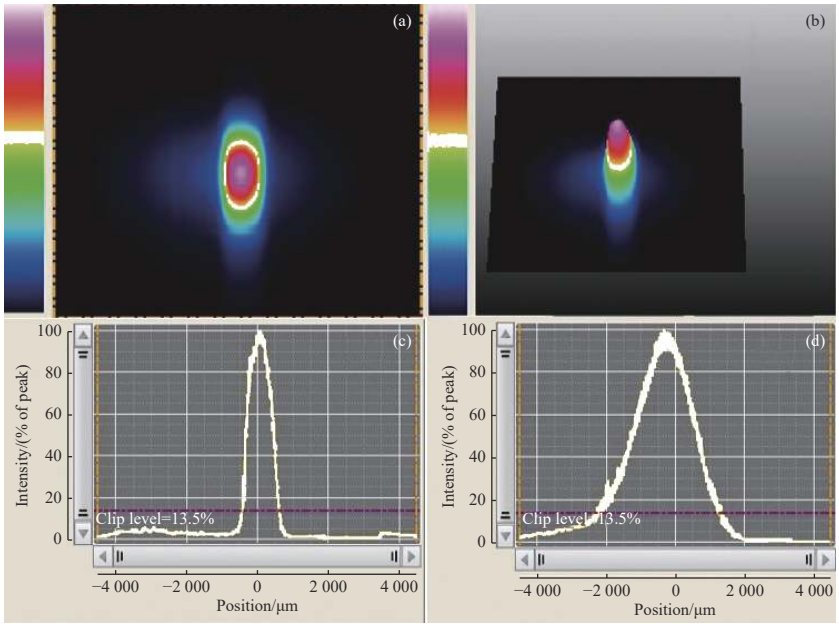


图 12　紫外激光光斑强度分布图。(a) 二维空间强度分布; (b) 三维空间强度分布; (c) 水平方向强度分布; (d) 竖直方向强度分布

Fig. 12　Spot intensity distribution diagrams of ultra-violet laser. (a) Two-dimensional spatial intensity distribution; (b) three-dimensional spatial intensity distribution; (c) horizontal intensity distribution; (d) vertical intensity distribution

4 结 论

本文报道了一种基于电光腔倒空结构与腔外四倍频结构的全固态 228 nm 紫外激光器。通过谐振腔设计，确定了谐振腔结构和非线性晶体的参数。分析了腔倒空基频光的输出特性，由于 Nd: YVO_4 晶体在 914 nm 处的增益低，在高频时平均功率出现饱和并呈下降趋势。研究了不同参数聚焦镜对紫外激光输出的影响，实现了测量波长为 228.59 nm 的紫外激光输出。在 5~25 kHz 频率范围内连续可调节，频率为 10 kHz 时可提供最高平均输出功率为 84 mW 的激光，脉宽始终保持在 2.8~2.9 ns。

本文提供了一种实现窄脉宽 228 nm 紫外激光的新方法，与该波长已有报道相比，具有平均功率高，频率可调，脉宽不随频率变化等优点，满足紫外共振拉曼光谱研究的应用要求。但影响四次谐波产生的因素有很多，相信经过更详细的优化，该激光器的效率有望进一步提升。

参考文献：

[1] 何玉青, 魏帅迎, 郭一新, 等. 远程紫外拉曼光谱检测技术研究进展[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1249-1259.
HE Y Q, WEI SH Y, GUO Y X, *et al*.. Research progress of remote detection with ultraviolet Raman spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1249-1259. (in Chinese)

[2] 吉于今, 楚学影, 董旭, 等. 紫外偏振敏感的$CsPbBr_3$纳米薄膜的可见光发射(英文)[J]. 中国光学（中英文）, 2023, 16(1): 202-213.
JI Y J, CHU X Y, DONG X, *et al*.. Visible light emission of ultraviolet polarization sensitive $CsPbBr_3$ nano-films[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 202-213. (in Chinese)

[3] HOLTUM T, BLOINO J, PAPPAS C, *et al*.. Ultraviolet resonance Raman spectroscopy of anthracene: experiment and theory[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2021, 52(12): 2292-2300.

[4] KUMAMOTO Y, TAGUCHI A, KAWATA S. Deep-ultraviolet biomolecular imaging and analysis[J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(5): 1801099.

[5] OJAGHI A, CARRAZANA G, CARUSO C, *et al*.. Label-free hematology analysis using deep-ultraviolet microscopy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(26): 14779-14789.

[6] SOLTANI S, OJAGHI A, ROBLES F E. Deep UV dispersion and absorption spectroscopy of biomolecules[J]. *Biomedical Optics Express*, 2019, 10(2): 487-499.

[7] SOLTANI S, OJAGHI A, QIAO H, *et al*.. Prostate cancer histopathology using label-free multispectral deep-UV microscopy quantifies phenotypes of tumor aggressiveness and enables multiple diagnostic virtual stains[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1): 9329.

[8] WYNN C M, PALMACCI S, KUNZ R R, *et al*.. Noncontact detection of homemade explosive constituents via photodissociation followed by laser-induced fluorescence[J]. *Optics Express*, 2010, 18(6): 5399-5406.

[9] GAGNÉ M, KASHYAP R. New nanosecond Q-switched Nd: VO_4 laser fifth harmonic for fast hydrogen-free fiber Bragg gratings fabrication[J]. *Optics Communications*, 2010, 283(24): 5028-5032.

[10] 牛娜, 窦微, 浦双双, 等. 蓝光二极管抽运Pr: YLF腔内倍频连续深紫外激光器[J]. 中国光学, 2021, 14(6): 1395-1399.
NIU N, DOU W, PU SH SH, *et al*.. Continuous deep ultraviolet laser by intracavity frequency doubling of blue laser diode pumped Pr: YLF[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1395-1399. (in Chinese)

[11] DEYRA L, MARTIAL I, DIDIERJEAN J, *et al*.. Deep-UV 236.5 nm laser by fourth-harmonic generation of a single-crystal fiber Nd: YAG oscillator[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2236-2239.

[12] KANEDA Y, YARBOROUGH J M, MERZLYAK Y, *et al*.. Continuous-wave, single-frequency 229 nm laser source for laser cooling of cadmium atoms[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 705-708.

[13] BYKOV S V, ROPPEL R D, MAO M, *et al*.. 228-nm quadrupled quasi-three-level Nd: $GdVO_4$ laser for ultraviolet resonance Raman spectroscopy of explosives and biological molecules[J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2020, 51(12): 2478-2488.

[14] DAI SH T, JIANG T, WU H CH, *et al*.. Tunable narrow-linewidth 226 nm laser for hypersonic flow velocimetry[J].

Optics Letters, 2020, 45(8): 2291-2294.

[15] 石朝辉, 刘学松, 黄玉涛, 等. 500 kHz, 6 ns高重复频率电光腔倒空Nd: YVO_4激光器[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1002006.
SHI ZH H, LIU X S, HUANG Y T, *et al*.. 500 kHz, 6 ns high repetition-rate electro-optical cavity dumped Nd: YVO_4 laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1002006. (in Chinese)

[16] LIU K, CHEN Y, LI F Q, *et al*.. High peak power 4.7 ns electro-optic cavity dumped TEM_{00} 1342-nm Nd: YVO_4 laser[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(4): 717-720.

[17] YU X, WANG C, MA Y F, *et al*.. Performance improvement of high repetition rate electro-optical cavity-dumped Nd: $GdVO_4$ laser[J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(2): 309-313.

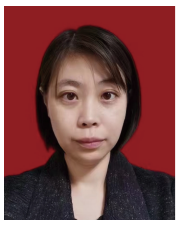
[18] LIU K, HE L J, BO Y, *et al*.. Pulse width adjustable *Q*-switched cavity dumped laser by rotating a quarter-wave plate and a Pockels cell[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2467-2470.

[19] CHEN F, SUN J J, YAN R P, *et al*.. Reabsorption cross section of Nd^{3+}-doped quasi-three-level lasers[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 5620.

[20] 王晓洋, 刘丽娟. 深紫外非线性光学晶体及全固态深紫外相干光源研究进展[J]. 中国光学, 2020, 13(3): 427-441.
WANG X Y, LIU L J. Research progress of deep-UV nonlinear optical crystals and all-solid-state deep-UV coherent light sources[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(3): 427-441. (in Chinese)

作者简介：

王金艳(1988—), 女, 吉林长春人, 高级工程师, 2013 年于长春理工大学获得光学硕士学位, 现任职于长春新产业光电技术有限公司, 主要从事固体激光器技术与应用方面的研究。 E-mail: wangjy@cnilaser.com



陈　曦(1985—), 女, 吉林长春人, 高级工程师, 2012 年于长春理工大学获得光学硕士学位, 现任职于长春新产业光电技术有限公司, 主要从事固体激光器技术与应用方面的研究 。 E-mail: chenxi@cnilaser.com