

基于外腔面发射激光器腔内三倍频的可调谐紫外激光器*

成佳¹⁾ 伍亚东¹⁾ 晏日¹⁾ 彭雪芳¹⁾ 朱仁江¹⁾ 王涛¹⁾
蒋丽丹¹⁾ 佟存柱²⁾ 宋晏蓉³⁾ 张鹏^{4)†}

1) (重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 401331)

2) (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

3) (北京工业大学理学部, 北京 100124)

4) (重庆师范大学, 重庆国家应用数学中心, 重庆 401331)

(2023 年 12 月 7 日收到; 2024 年 1 月 8 日收到修改稿)

紫外激光器具有频率高、波长短、单光子能量大以及空间分辨率高等特点, 在精细加工、生命科学、光谱学等许多方面应用前景广阔. 本文报道了一种基于外腔面发射激光器腔内三倍频的可调谐紫外激光器. 该激光器采用了 W 型谐振腔, 并插入双折射滤波片作为偏振和波长调谐元件, 通过 I 类相位匹配的 LBO 晶体对 980 nm 基频光进行倍频产生 490 nm 蓝光, 再通过 I 类相位匹配的 BBO 晶体对 980 nm 基频光和 490 nm 倍频光进行和频获得 327 nm 紫外输出. 当 LBO 和 BBO 晶体的长度都为 5 mm 时, 在环境温度为 15 °C, 泵浦功率为 47 W 的条件下, 实验输出的 327 nm 紫外激光功率达到 538 mW. 选择厚度为 2 mm 的双折射滤波片作为调谐元件, 可获得的紫外激光器输出波长的连续调谐范围为 8.6 nm. 该紫外激光器同时显示了良好的光束质量和较好的功率稳定性.

关键词: 可调谐, 外腔面发射激光器, 非线性频率变换, 三倍频

PACS: 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.73.20231923

1 引言

紫外波段的激光, 以其高频特性和大光子能量, 展现出对多种材料的优异吸收性能. 这使得其能够有效加工包括不锈钢、铜、陶瓷、玻璃、聚合物以及半导体等在内的多种难以通过其他波段激光处理的材质. 此外, 紫外激光的短波长特性使其能够聚焦形成更为细小的光斑, 可实现更高的空间分辨率, 从而在微纳尺度上完成精细加工. 由于紫外

光的光子携带较大的能量, 其对材料的加工方式可被视为“冷加工”, 即几乎不受热效应的影响, 可确保加工的极高质量^[1,2]. 紫外激光器在数据存储领域的应用中, 所生产的磁盘的数据存储空间相较于蓝光激光器提升了高达 20 倍, 显著提高了存储密度和分辨率^[3]. 目前, 紫外光已在光化学、光生物学、激光诱导物质原子荧光以及医疗等多个领域展现出广泛的应用前景^[4-6]. 未来, 紫外激光技术有望为新一代纳米技术、材料科学以及等离子物理等学科的发展提供强有力的技术支撑.

* 在渝本科高校与中国科学院所属院所合作项目 (批准号: HZ2021007)、重庆市教委科技计划重大项目 (批准号: KJZD-M201900502)、重庆市教委科技计划 (批准号: KJQN202200557, KJQN202300525)、国家自然科学基金面上项目 (批准号: 61975003, 61790584, 62025506) 和重庆师范大学基金 (批准号: 23XLB003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangpeng2010@cqu.edu.cn

目前, 紫外光源的获取主要有以下几种方法. 首先, 准分子激光器是一种常用的手段, 例如通过高电流电子束激发液态 Xe 的准分子激光器能够产生 172 nm 的发射波长^[7], 而 XeCl 准分子紫外激光器则能产生 308 nm 的波长^[8]. 然而, 由于准分子紫外激光器输出光束的质量较差, 且能量损失较大, 这在一定程度上限制了其应用范围. 其次, 固体紫外激光器利用非线性材料进行频率转换来获得紫外波长. 常见的固体紫外激光器发射波长为 1064 nm, 通过三倍频技术可获得 355 nm 的紫外波长, 四倍频技术则能产生 266 nm 的深紫外波长^[9-11]. 然而, 固体紫外激光器的结构较为复杂, 控制成本较高, 且其紫外发射波长较为单一, 波长设计受到限制.

垂直外腔面发射激光器 (vertical-external-cavity surface-emitting laser, VECSEL)^[12], 也称为半导体碟片激光器 (semiconductor disk laser, SDL), 结合了激光二极管抽运固体激光器和垂直腔面发射激光器的优点, 展现出高输出功率^[13]、连续调谐、波长可设计以及优良的光束质量等显著优势^[14,15]. 其独特的外部腔体结构使得在腔内插入非线性光学元件成为可能, 进而实现非线性频率变换, 如倍频、三倍频和四倍频等操作.

VECSEL 具有三种实现紫外输出的方式: 第一种方式是将可见光作为基频光发射波长, 在腔内插入非线性晶体进行二倍频获得紫外输出; 第二种方式是激光器发射波长在近红外波段, 通过倍频晶体将近红外波段的波长转换为可见光, 再通过和频晶体对倍频光和基频光进行和频输出紫外光; 第三种方式为基频光发射波长处于近红外波段, 经过连续的两倍频, 即四倍频后, 得到更短波长的紫外激光输出. 这三种方式各具特色, 为紫外激光器的研发和应用提供了多样化的选择.

二倍频方面, 2006 年, Hastie 等^[16]使用 Z 型腔结构的 VECSEL, 基频光发射波长 675 nm, 腔内插入非线性晶体进行倍频后在 338 nm 处得到 120 mW 的紫外输出功率; 同年, Jennifer 等^[17]在此基础上, 将泵浦功率增大到 7 W, 输出功率增加到 120 mW, 紫外激光的调谐范围为 5 nm; 2012 年, Schwarzbäck 等^[18]使用 V 型腔结构 VECSEL, 对 632 nm 基频光, 使用非线性晶体 BBO 进行频率转换, 产生 331 nm 的紫外激光, 输出功率超过 100 mW, 获得紫外光波长的最大调谐范围为

7.5 nm.

三倍频方面, 2009 年, Shu 等^[19]设计 M 型腔 VECSEL, 基频光发射波长为 1064 nm, 采用在腔内不同臂中分别插入非线性晶体 LBO 进行倍频和频, 得到了 450 mW 的紫外输出功率, 紫外激光波长为 355 nm; 2016 年, Polanik 和 Alexander^[20]设计了 Z 型折叠腔结构 VECSEL, 将和频晶体和倍频晶体一前一后放置放在靠近后端镜的束腰处, 来提高转换效率消除走离角, 在 327 nm 处获得了最大输出功率为 23 mW 的紫外激光.

四倍频方面, 2008 年 Kaneda 和 Yarborough^[21]通过近红外 976 nm 光泵浦 VECSEL 的非线性频率转换, 在 244 nm 波长处获得 215 mW 的连续输出. 2019 年, Mikhail Yakshin 等设计 V 型折叠腔进行腔外倍频获得 234 nm 紫外输出, 最大功率接近 200 mW. 实验中将倍频晶体 BBO 放在后端镜前, 把基频激光先转换为 468 nm 波长的蓝光输出, 然后在后端输出镜后放一个透镜将蓝光于聚焦 BBO 晶体上, 实现四倍频, 得到 234 nm 紫外激光. 2021 年, Meyer 等^[22]报道了在 VECSEL 腔内四倍频获得锁模紫外脉冲. 通过在利用较为复杂的八镜腔结构, 利用了非线性晶体 LBO 作为倍频晶体、BBO 作为四倍频晶体在锁模的基础上进行腔内四倍频, 获得的输出功率为 525 μ W, 输出波长为 265 nm, 紫外脉冲的峰值功率最大为 300 mW.

外腔面发射紫外激光器的研究采用了不同的方案来产生紫外激光输出. 其中, 一种方案是利用 BBO 倍频晶体直接产生紫光; 另一种方案则是采用 LBO 作为倍频晶体, 并结合 LBO 或 BBO 作为和频晶体, 以产生三次谐波的紫外波段激光输出. 还有一种方案是通过级联 BBO, 经过四倍频后获得更短波长的紫外激光. 然而, 在上述工作中, 特别是通过三倍频获得紫外的方式中, 为了确保基频光与倍频光的偏振态相匹配, 研究者们通常采用 II 类相位匹配的 BBO 作为和频晶体. 尽管这种方案在一定程度上限制了紫外激光器的输出功率, 但其有效非线性系数 (1.15 pm/V) 相对较小. 这些研究为紫外激光器的进一步发展提供了有益的参考, 但仍需在输出功率和其他性能方面进行持续优化.

本文中设计了一种新型的 W 型五镜谐振腔, 并利用 I 类相位匹配的 LBO 作为倍频晶体. 为了充分利用 BBO 的较大的有效非线性系数 (1.99 pm/V), 我们选择 I 类相位匹配的 BBO 作为

和频晶体. 实验中成功获得了 327 nm 紫外波段 VECSEL 的最高输出功率, 达 538 mW, 创下了该领域的新记录. 此外, 通过在腔内插入双折射滤波片作为偏振和波长调谐元件, 在 327 nm 波段实现了迄今为止最大的波长调谐范围, 达到 8.6 nm. 实验中的紫外 VECSEL 激光器展现出优异的光束质量和良好的功率稳定性. 这种新型紫外激光器具有可设计的波长, 有望达到与固体紫外激光器相媲美的紫外转换效率, 并在实际工程环境中得到广泛应用.

2 激光增益芯片特性与实验装置

实验使用的激光增益芯片的外延结构简图如图 1(a) 所示. 外延片采用逆序生长, 首先在 GaAs 衬底上生长高 Al 成分的 AlGaAs, 构成刻蚀阻挡层. 然后是 GaAs 保护层和阻止载流子扩散的高 Al 成分 AlGaAs 窗口层. 接下来生长的是 InGaAs/GaAsP 多量子阱有源区, 其中的势垒层 GaAsP 中 P 的含量需要仔细配置, 使得 GaAsP 层既能吸收泵浦光的能量, 又能够补偿多量子阱的应变. 再接着是分布布拉格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR), 由 30 对含低折射率和高折射率 Al 成分的 AlGaAs 层交替组成. 外延片的结束层是 GaAs, 起到对增益芯片的抗氧化保护作用. VECSEL 增益芯片有源区多量子阱的发射波长设计值为 980 nm, DBR 的反射谱中心波长设计值为 980 nm, 高反射率 ($R > 95\%$) 的反射带宽设计值为 80 nm.

生长结束后的外延片被划分成尺寸为 4 mm × 4 mm 的小块, 在外延结束端面依次镀钛-铂-金进行金属化, 然后键合在一块金刚石热沉上以保证增益芯片的良好散热性能, 最后再焊接至接有水冷系统的铜块上. 实验测量了 DBR 的反射谱、增益芯片的光致荧光谱 (photoluminescence, PL) 和激光光谱, 结果如图 1(b) 所示. 由图可知, DBR 反射谱的中心波长为 981 nm, 高反射率光谱范围在 941—1023 nm, 带宽为 82 nm. 有源区多量子阱 PL 的峰值波长在 978 nm 附近. 激光谱处于 982 nm 位置. 可见, 增益芯片的外延生长质量比较理想, 各项指标大致符合设计值.

实验装置的实物图如图 2 所示. 泵浦光源是一台最大输出功率为 75.3 W 的 808 nm 光纤耦合输

出半导体激光器, 其光纤芯径为 400 μm . 泵浦光经过准直后聚焦在增益芯片上, 其入射角度大约为 30°. 增益芯片表面没有做任何镀膜处理, 因为菲涅耳反射, 所以只有约 70% 的泵浦光进入增益芯片, 被有源区吸收利用.

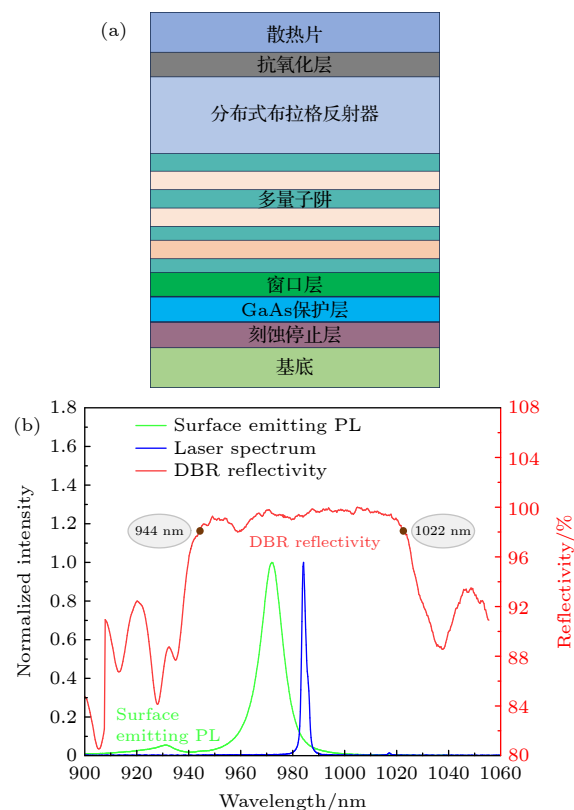


图 1 (a) 增益芯片外延结构简图; (b) DBR 反射谱、有源区多量子阱 PL 谱及激光光谱

Fig. 1. (a) Schematics of the epitaxial structure of gain chip; (b) the reflection spectrum of DBR, the PL spectrum of the multiple quantum wells in active region, and the laser spectrum.

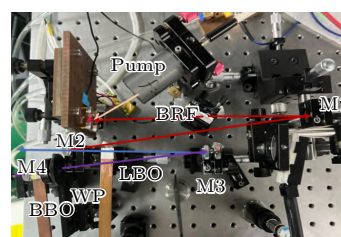


图 2 紫外 VECSEL 实物图

Fig. 2. Photograph of the ultraviolet VECSEL.

激光谐振腔从增益芯片的 DBR 开始, 延展至后端平面镜 M4 为止, 构成一个 W 型五镜腔结构. 第一折叠镜 M1 曲率是半径为 150 mm 的平凹反射镜, 对 980 nm 基频光、490 nm 倍频光和 327 nm 紫外光镀有高反射率膜层. 第二折叠镜 M2 使用曲

率半径为 50 mm 的平凹反射镜, 对 980 nm 基频光和 327 nm 紫外光镀有高反射率膜层, 并对 490 nm 倍频光镀有增透膜层. 谐振腔中完成两次频率转换后剩余的蓝光, 从 M2 处输出, 以免返回至增益芯片被其吸收产生废热. 第三折叠镜 M3 是曲率半径为 100 mm 的平凹反射镜, 对 980 nm 和 490 nm 波长镀有高反射率膜层, 对 327 nm 波长镀有高透过率膜层. 实验中往返两次经过和频晶体后产生的紫外激光, 从 M3 处输出. 谐振腔的后端镜 M4 为平面反射镜, 对 980, 490 和 327 nm 波长镀有高反射率膜层.

谐振腔内在包含增益芯片的一臂, 以布儒斯特角插入 2 mm 厚的未镀膜双折射滤波片 (birefringent filter, BRF), 将基频光转变为线偏振光, 以满足后续频率转换过程中相位匹配的需要. BRP 在本实验中同时作为波长调谐元件, 并能一定程度地压窄基频光的线宽, 有利于提升频率变换中的转换效率. 在包含和频晶体的一臂, 在位于和频晶体之前, 垂直于光轴插入一块 980 nm 波长的 1/2 零级波片, 旋转 980 nm 基频激光的偏振态, 以满足和频过程中相位匹配的需要.

将长度为 5 mm, 切割角度为 17° 的非线性倍频晶体 LBO 置于 M2 和 M3 之间的束腰处, 利用其 I 类相位匹配, 将腔内 980 nm 的基频光转换成 490 nm 的二次谐波. 另将长度为 5 mm, 切割角度为 34.3° 的非线性晶体 BBO 插入在 M3 和 M4 之间的束腰处 (靠近 M4), 利用其 I 类相位匹配, 将倍频过程中剩余的 980 nm 基频光和倍频过程中产生的 490 nm 二次谐波进行和频, 转换成 327 nm 的紫外激光.

非线性频率变换过程中, 要获得高的转换效率, 不仅需要选择合适的非线性晶体及其相位匹配类型, 优化晶体所处位置处激光模式的大小 ω_0 、以及晶体的长度 L 也至关重要, 因为激光模式 ω_0 的大小确定了晶体中的激光功率密度, 而晶体的长度 L 则规定了频率转换所能发生的空间尺寸, 两者都会影响频率转换的效率. 又因为高斯光束在晶体中是以一定发散角传播的, 以及在非线性晶体中基频激光和转换光两者之间存在走离效应, 所以 ω_0 和 L 两者又是相互关联、相互制约的. 对于既定长度为 L 的非线性晶体, 参与频率转换的基频激光的模式大小的优化值可以表示为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\lambda L}{(2\pi) \times 2.84}}, \quad (1)$$

其中 λ 是参与频率转换的基频激光的波长.

图 3 描述的是在实验所用的 W 型谐振腔中, 基频激光腔模光斑半径随谐振腔位置的变化情况, 其中以增益芯片所处位置为坐标原点. 除去增益芯片和后端平面反射镜上的腰斑而外, 谐振腔中有两个束腰. 倍频晶体 LBO 长度为 5 mm, 放置在位于 M2 和 M3 之间的最小的束腰处, 束腰光斑的半径约为 33 μm , 以获得较高的倍频转换效率. 和频晶体 BBO 长度为 5 mm, 置于靠近后端平面反射镜的束腰处, 考虑到 BBO 晶体的走离角较大, 此处的光束束腰半径稍大一些, 约为 63 μm .

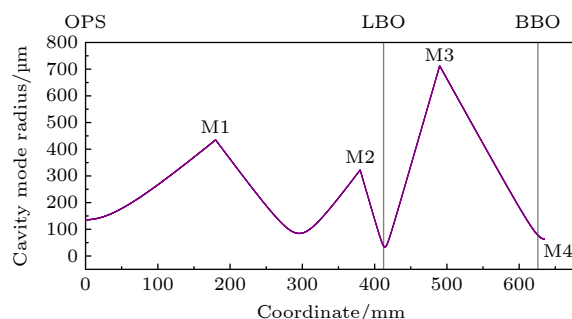


图 3 紫外 VECSEL 谐振腔中基频光腔模光斑半径大小随谐振腔位置的变化情况

Fig. 3. Evolution of the cavity mode radius of fundamental laser with the various position of the ultraviolet VECSEL.

在优化了非线性晶体所在位置基频光的腔模大小以及晶体本身的长度的基础上, 要进一步提高频率转换过程中的效率, 可以采用更多的技术手段. 比如, 参与频率转换的基频光和完成了转换的高次谐波之间存在走离效应, 是临界相位匹配中不可避免的问题, 因此, 可引入非临界相位匹配的方法, 来避免走离效应带来的限制. 同时, 也可以使用两块对称放置的非线性晶体, 对上述走离角进行一定程度的补偿, 从而有效增大频率转换的晶体长度, 明显提升频率转换的效率^[23-25]. 此外, 还可以使用准相位匹配的非线性晶体, 克服相位匹配晶体中相干长度的局限, 也可能较大幅度地提高非线性频率转换过程中的效率.

3 结果与讨论

在增益芯片的铜热沉温度为 15 $^{\circ}\text{C}$ 时, 没有放置非线性晶体 LBO 和 BBO 时基频激光的输出功

率, 与实验所得的紫外激光的输出功率随吸收泵浦功率变化的曲线如图 4 所示. 由图 4 可知, 基频 VECSEL 激光的阈值为 5 W, 斜效率 (slope efficient, SE) 为 15.9%. 紫外激光的斜效率为 1.2%. 当芯片吸收的泵浦功率为 47 W 时, 基频激光最大输出功率为 7.8 W, 紫外激光最大输出功率为 538 mW, 相应的从泵浦光到紫外激光的转换效率为 1.1%, 基频光到紫外的光-光转换效率为 7%. 将泵浦功率继续往上升, 由于增益芯片的热效应, VECSEL 将出现热反转现象, 基频光与紫外输出功率也会随之下跌.

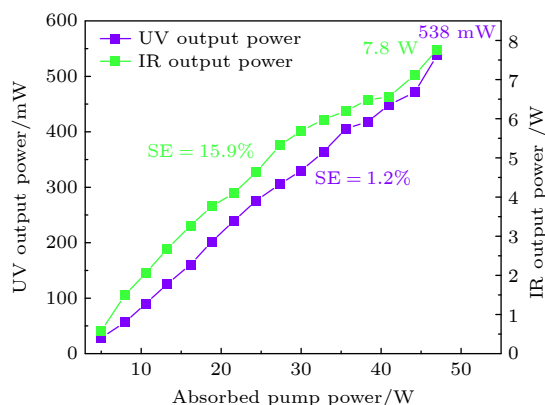


图 4 基频 VECSEL 和紫外 VECSEL 的输出功率
Fig. 4. Output powers of the IR VECSEL and UV VECSEL.

与一般固体激光增益介质相比, 半导体介质具有更大的增益带宽, 因而半导体激光器也更加适合于制作波长可调谐激光器. 实验中, 在包含激光增益芯片的一臂, 插入单个 BRF 作为波长调谐元件, 即可实现对 VECSEL 的基频光、倍频光及紫外输出的波长进行连续调谐. 当芯片吸收的泵浦功率为 30 W 时, 实验使用厚度为 2 mm 的 BRF 以布儒斯特角插入谐振腔内, 所得基频光、倍频光和紫外激光的波长调谐曲线分别如图 5(a)–(c) 所示. 图 5(a) 显示, 基频光的中心波长为 981 nm, 波长调谐范围约 34.1 nm; 图 5(b) 中, 倍频光的中心波长为 490 nm, 激光波长从 483.9–498.3 nm 连续可调谐, 波长变化范围约 14.3 nm; 由图 5(c) 可以看出, 紫外激光器通过双折射滤波片可实现波长从 323.7–332.3 nm 的连续调谐, 总体调谐范围约为 8.6 nm. 图 5(c) 中同时画出了不同波长下激光器对应的输出功率. 在波长为 328 nm 处, 激光器有最大的输出功率为 327.5 mW.

光束质量优良是 VECSEL 的优点之一. 在基

频激光和倍频激光的最大输出功率条件下, 实验测量了基频激光和倍频激光的光束质量, 分别显示在图 6(a), (b) 中. 因为 327 nm 紫外激光超出了实验所使用仪器的波长范围, 所以没有直接测得其光束质量, 但因为紫外激光为基频激光和倍频激光和频产生, 所以, 基频激光和倍频的光束质量在一定程度上也反映了紫外激光的光束质量情况. 从图 6(a) 可知, 基频光束的 M^2 因子在 X 方向上为 1.00, Y 方向上为 1.02. 图 6(b) 显示, 倍频光的 M^2 因子在 X 方向上为 1.01, Y 方向上为 1.00. 两者均为近衍射极限的高斯光束.

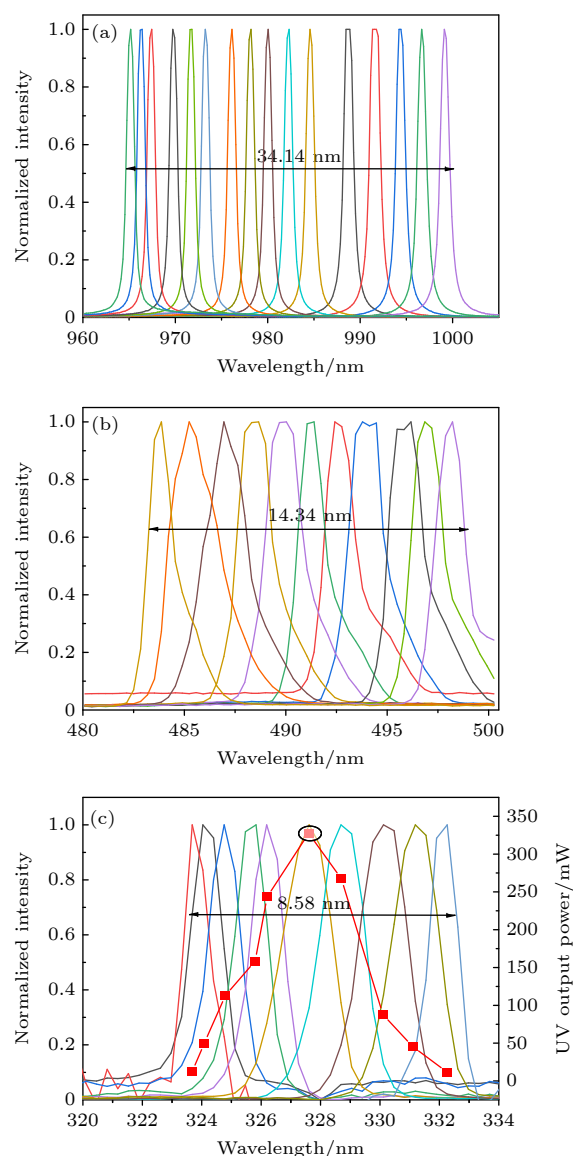


图 5 (a) 基频激光的波长调谐图; (b) 倍频激光的波长调谐图; (c) 紫外激光的波长调谐与输出功率图

Fig. 5. (a) Wavelength tuning of the fundamental laser; (b) wavelength change of the frequency doubled laser; (c) tuning range and powers of the UV output.

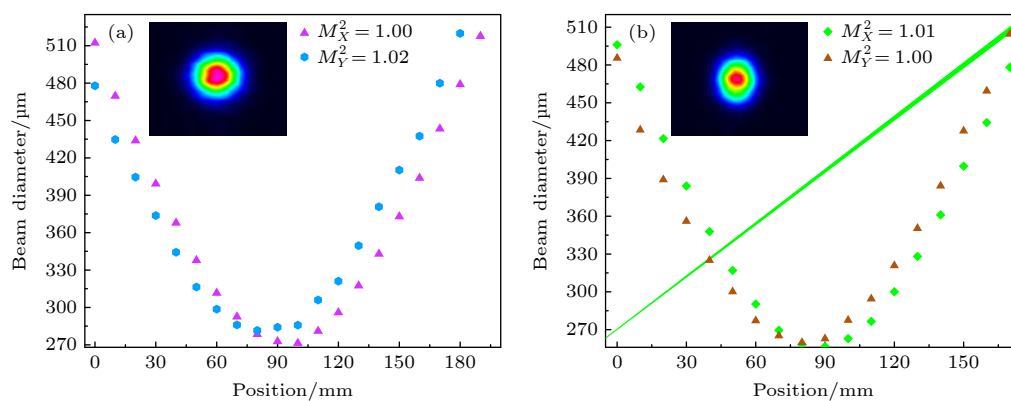


图6 (a) 基频激光的光束质量 M^2 因子, 插图为光强的二维分布图; (b) 倍频激光的光束质量 M^2 因子, 插图为对应的二维光强分布图

Fig. 6. (a) Beam quality M^2 factor of the fundamental laser, the inset shows a 2-dimension distribution of the laser spot; (b) M^2 factor of the frequency-doubled laser, and the 2-dimension distribution of the laser intensity is also shown as an inset.

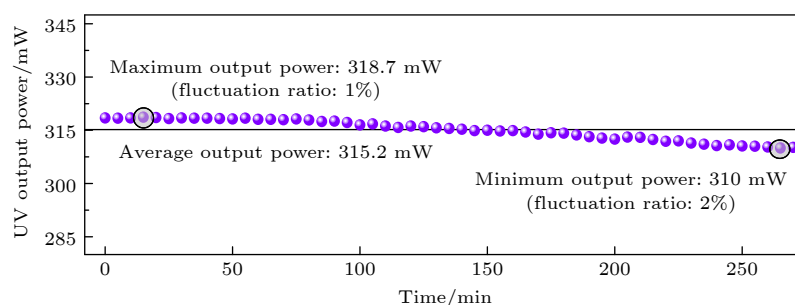


图7 紫外 VECSEL 输出功率的稳定性

Fig. 7. Stability of the output powers of the ultraviolet VECSEL.

实验测得的 4.5 h 内紫外 VECSEL 激光器的稳定性如图 7 所示. 激光器的输出功率在前 4.5 h 内输出功率的稳定性较好. 在所考察的 4.5 h 期间, 紫外激光的平均功率为 315.2 mW, 输出最大功率为 318.7 mW, 对应的功率波动为 1%; 输出最小功率为 310 mW, 对应的功率波动为 2%. 总的来说, 该紫外 VECSEL 的输出功率稳定性在 2% 以内. 对于激光器在热管理方面的进一步优化, 可望更进一步提升紫外输出功率的稳定性, 使其达到工程实用化的要求.

4 结 论

利用 W 型谐振腔设计出一种基于外腔面发射激光器的三倍频可调谐紫外激光器. 该激光器通过在腔内插入长度为 5 mm 的 I 类相位匹配 LBO 晶体和长度为 5 mm 的 I 类相位匹配 BBO 晶体, 实现了倍频和和频过程, 产生了波长为 327 nm 的紫外激光. 在吸收泵浦功率为 47 W 的条件下, 该紫外激光器的输出功率达到了 538 mW, 对应的泵浦

光到紫外激光的光-光转换效率约为 1.1%. 此外, 还采用厚度为 2 mm 的布儒斯特角插入的 BRF 作为波长调谐元件, 实现了紫外激光器波长的连续调谐, 调谐范围达到了 8.6 nm. 该紫外 VECSEL 的光束质量优良, 输出功率在 4.5 h 内的稳定性小于 2%. 这种高功率、高光束质量、波长可调谐的紫外激光器具有与传统固体激光器相比拟的转换效率, 而且能提供更广泛的发射波长. 在激光加工、生命科学、量子科学等领域, 该紫外激光器具有较大的潜在应用价值.

参考文献

- [1] Tang J, Liao J H, Meng H Y 2007 *Laser Optoelectron. Prog.* **44** 52 (in Chinese) [唐娟, 廖健宏, 蒙红云 2007 *激光与光电子学进展* **44** 52]
- [2] Yu J, Zeng Z J, Zhu S G 2008 *Infrared* **29** 9 (in Chinese) [俞君, 曾智江, 朱三根 2008 *红外* **29** 9]
- [3] Li L, Li Z J, He Y Y 2005 *Laser J.* **6** 1 (in Chinese) [李林, 李正佳, 何艳艳 2005 *激光杂志* **6** 1]
- [4] Sasaki T, Mori Y, Yoshimura M 2000 *Mat. Sci. Eng. R.* **30** 54
- [5] Wang C X, Wang G Y, Hicks A V 2006 *Proc. SPIE* **6100** 19
- [6] Hodgson N, Li M, Held A 2003 *Proc. SPIE* **4977** 281

- [7] Basov N G, Danilychev V A, Popov Y M 1970 *JETP Lett.* **12** 329
- [8] Rhodes C K 1979 *Mol. Phys.* **1** 2
- [9] Oka M, Liu L Y, Wiechmann W 1995 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **1** 859
- [10] Yap Y K, Inagaki M, Nakajima S 1996 *Opt. Lett.* **21** 1348
- [11] Deyra L, Martial I 2014 *Opt. Lett.* **39** 2236
- [12] Jewell J L, Harbison J P, Scherer A 1991 *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 1332
- [13] Crump P, Wenzel H, Erbert G 2012 *Proc. SPIE* **8241** 222
- [14] Rahimi-Iman A 2016 *J. Optics-UK* **18** 093003
- [15] Guina M, Rantanäki A, Härkönen A 2017 *J. Phy. D Appl. Phys.* **50** 383001
- [16] Hastie J E, Morton L G, Dawson M D 2006 *J. Opt. Soc. Am. B* **1** 109
- [17] Jennifer E H, Morton L G, Kemp A J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **89** 061114
- [18] Schwarzbäck T, Kahle H, Eichfelder M 2011 *J. Opt. Soc. Korea* **1** 22
- [19] Shu Q Z, Caprara A L, Berger J D 2009 *Proc. SPIE* **7193** 339
- [20] Polanik M, Hirlinger A J 2016 *Annu. Rep.* **8** 140
- [21] Kaneda Y, Yarborough J M, Li L 2008 *Opt. Lett.* **33** 1705
- [22] Meyer J T, Lukowski M L, Hessenius C 2021 *Opt. Commun.* **499** 127255
- [23] Zondy J J 1991 *Opt. Commun.* **81** 427
- [24] Nightingale J L, Becker R A, Willis P C 1987 *Appl. Phys. Lett.* **51** 716
- [25] Smith A V, Armstrong D J, Alford W J 1998 *J. Opt. Soc. Am. B* **15** 122

Tunable ultraviolet laser based on intracavity third harmonic generation of external cavity surface emitting laser^{*}

Cheng Jia¹⁾ Wu Ya-Dong¹⁾ Yan Ri¹⁾ Peng Xue-Fang¹⁾Zhu Ren-Jiang¹⁾ Wang Tao¹⁾ Jiang Li-Dan¹⁾Tong Cun-Zhu²⁾ Song Yan-Rong³⁾ Zhang Peng^{4)†}¹⁾ (College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)²⁾ (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)³⁾ (Faculty of Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)⁴⁾ (National Center for Applied Mathematics in Chongqing, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

(Received 7 December 2023; revised manuscript received 8 January 2024)

Abstract

Ultraviolet laser has high frequency, short wavelength, large single-photon energy, and high spatial resolution, and has wide applications in many fields such as fine processing, life sciences, and spectroscopy. In this work, a wavelength tunable ultraviolet laser based on intracavity third harmonic generation from an external-cavity surface-emitting laser is reported. The W-type resonant cavity of the laser is composed of a distributed Bragg reflector (DBR) at the bottom of the gain chip, three plane-concave mirrors, and a rear plane mirror. On the arm containing the gain chip, a birefringent filter is inserted at the Brewster angle as the polarization and wavelength tuning element, which can also narrow the linewidth of the fundamental laser to a certain extent. A type-I phase-matched LBO crystal is placed on the beam waist between the folding mirrors M2 and M3 to convert the 980 nm fundamental laser into 490 nm blue light, and a type-I phase-matched BBO crystal is inserted in the beam waist near the rear mirror to produce a 327 nm ultraviolet output from the remained 980 nm fundamental laser and the frequency-doubled 490 nm second harmonic. Before the BBO crystal, a half-wave plate at 980 nm is employed to change the polarization of the fundamental laser, so as to meet the type-I phase-matching condition of the used BBO crystal. Owing to the larger nonlinear coefficient of the type-I phase-matched BBO crystal, and its obviously higher transmittance at 327 nm wavelength than the usually used LBO crystal, the output power is obtained to be 538 mW at 327 nm ultraviolet wavelength, corresponding to a conversion efficiency of 1.1% from pump light to ultraviolet laser. The experiment is performed under conditions of 15 °C temperature, 47 W absorbed pump power, 5 mm-length LBO and 5 mm-length BBO crystals. By using a 2 mm-thick birefringent filter as the tuning element, 34.1 nm tuning range of the 980 nm fundamental laser, 14.3 nm tuning range of the 490 nm second harmonic, and 8.6 nm tuning range of the 327 nm third harmonic are obtained. The ultraviolet laser exhibits good beam quality as well as acceptable power stability with the maximum power fluctuation less than 2% within 4.5 h.

Keywords: tunable, external-cavity surface-emitting laser, nonlinear frequency conversion, third harmonic generation

PACS: 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b

DOI: 10.7498/aps.73.20231923

^{*} Project supported by the Cooperation Project between Chongqing Local Universities and Institutions of Chinese Academy of Sciences, Chongqing Municipal Education Commission (Grant No. HZ2021007), the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant No. KJZD-M201900502), the Science and Technology Research Program of Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant Nos. KJQN202200557, KJQN202300525), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61975003, 61790584, 62025506), and the Chongqing Normal University Fund Project, China (Grant No. 23XLB003).

[†] Corresponding author. E-mail: zhangpeng2010@cqu.edu.cn