

基于四倍频的垂直外腔面发射深紫外激光器

彭雪芳¹, 王涛^{1*}, 朱仁江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, 吉林 长春 130033;³北京工业大学物理与光电工程学院, 北京 100124;⁴重庆师范大学重庆国家应用数学中心, 重庆 401331

摘要 深紫外激光器在光刻机、微纳激光加工等领域中有着广阔的应用前景。设计了一款结构紧凑的四倍频垂直外腔面发射深紫外激光器。利用特殊设计的半导体增益芯片、折叠镜以及后端反射镜, 得到 V 形激光谐振腔。在工作温度为 15 °C 的条件下, 插入 5 mm 长的三硼酸锂(LBO)晶体, 获得了 4.5 W 的高功率蓝光输出。结合倍频蓝光谐振腔的后端反射镜、紫外折叠镜及紫外输出镜构成了单通四倍频结构。将获得的蓝光通过 3 mm 长的 I 类相位匹配偏硼酸钡(BBO)晶体, 利用输出镜(透过率为 50% @ 245 nm)获得了功率为 29.2 mW 的 246.8 nm 深紫外激光输出。

关键词 垂直外腔面发射激光器; 非线性频率转换; 四倍频; 深紫外光

中图分类号 TN245

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL241214

1 引言

波长位于 200~280 nm 区间内的连续波深紫外(DUV)激光器, 在科研领域中展现出了巨大的应用潜力。这一特定波段的深紫外光因具备高光子能量特性, 而被广泛地应用于多个前沿领域。例如, 在高亮度伽马射线的产生中, DUV 光因其独特的光学属性而发挥着关键作用^[1]。此外, 在拉曼光谱分析中, DUV 光作为一种高效且精确的探测手段, 可揭示物质的微观结构和性质^[2-3]。在材料加工领域中, DUV 光的应用前景广阔。无论是精细材料的切割和打孔, 还是表面微结构的制备, DUV 光都展现出了独特的优势^[4]。特别是在芯片加工和半导体检测方面, DUV 激光器的高精度和高效率使其成为不可或缺的工具^[5]。

目前获取深紫外光的方式丰富多样, 主要分为以下几类。首先是气体紫外激光器, 如氦-镉激光器可以发射出 325 nm 左右波段的激光, 或者在金属蒸气激光器中通过非线性频率转换可以实现深紫外 255 nm 激光输出。气体激光器的主要缺陷在于设备体积庞大、能耗较高, 同时其整体效率和输出功率均不够理想。其次是比较常见的固体紫外激光器。固体激光器受到晶体材料的限制, 一般无法直接输出紫外激光, 因此通过固体激光器实现深紫外输出一般都是采用三倍频或

者四倍频的方式。如通过三硼酸锂晶体(LBO)和偏硼酸钡(BBO)晶体, 分别对 914 nm 的 Nd:YVO₄^[6-7]、946 nm 的 Nd:YAG^[8]、1032 nm 的 Yb:YAG^[9]、912 nm 的 Nd:GdVO₄^[10]等进行倍频和四倍频, 均可以得到深紫外激光输出。固体紫外激光器受限于晶体本身的能级结构(大都属于准三能级结构), 四倍频甚至于倍频的转换效率都很低, 因此在利用固体激光器获得深紫外激光时, 常常通过脉冲形式输出提高转换效率, 但其也仅会达到百分之几的量级。另外, 固体激光器的整体系统结构复杂, 成本也较高。

相比于气体和固体深紫外激光器, 半导体紫外激光器是一种符合未来发展趋势的理想紫外激光器, 有着更高的输出功率以及更低的腔内损耗。例如 GaN 基质的紫外激光器辐射出的紫外波段在 300 nm 附近^[11], 而受到半导体材料和工艺的限制, 很难直接获取深紫外波段的激光输出。在半导体激光器中, 同样需要通过非线性频率转换的方式获得深紫外激光输出。半导体激光器因结构不同可分为边发射激光器和面发射激光器。边发射激光器的特点是输出激光功率高, 但光束质量差, 发散角大, 非线性频率转换效率低。而面发射激光器的输出光束质量好, 但是功率不高, 经过非线性频率转换后得到的深紫外激光功率低。半导体深紫外激光器虽然有着结构

收稿日期: 2024-09-18; **修回日期:** 2024-10-17; **录用日期:** 2024-11-25; **网络首发日期:** 2024-12-06

基金项目: 重庆市自然科学基金(CSTB2024NSCQ-MSX0833)、重庆市教委科技研究计划(KJQN202200557, KJQN202300525)、在渝本科高校与中国科学院所属院所合作项目(HZ2021007)、国家自然科学基金(61975003, 61790584, 62025506)、重庆师范大学(人才引进/博士点)基金(23XLB003)

通信作者: *wangt@cqnu.edu.cn; **zhangpeng2010@cqnu.edu.cn

紧凑、输出稳定的特点,但其深紫外的输出功率较低,无法应用到实际场景中。因此,探索和研究输出功率高、结构紧凑、光束质量优良的深紫外激光器仍然是必要的。

垂直外腔面发射激光器(VECSEL)也称半导体碟片激光器(SDL)^[12],结合了半导体激光器的波长可灵活设计等特点,以及固体激光器的功率输出高、光束质量高和结构灵活的优势。这些优点使得 VECSEL 具有较大的应用潜力,得到越来越多的关注,并逐渐成为未来激光技术发展的重要方向之一^[13-14]。

VECSEL 的光学谐振腔具有高激光功率密度,在进行腔内倍频时可以保证较高的转换效率,倍频激光的光束质量得到了保证。进一步地,通过四倍频的非线性频率转换,VECSEL 能够输出深紫外激光。在深紫外 VECSEL 的研究领域中,研究人员取得了许多不错的成果。2008 年,Kaneda 等^[15]证明,通过光泵浦垂直外腔表面发射激光器的非线性频率转换,可以获得 244 nm 深紫外激光。该研究组首先利用 976 nm 的基频光,通过腔内倍频得到一个 TEM₀₀ 模式的功率为 635 mW 的 488 nm 蓝光输出;再将蓝光输出到外部的结构中,通过 LBO 晶体倍频得到了功率为 245 mW 的连续深紫外激光。这里值得关注的是,他们通过在腔内插入双折射滤波片(BRF)和标准具控制激光单频输出,增大了非线性转换效率。2009 年,Kaneda 等^[16]在 V 形谐振腔中,利用 LBO 晶体对 1178 nm 基频光进行倍频处理,获得了 589 nm 激光输出,结合蝶形腔和 BBO 四倍频晶体获得了 295 nm 输出,最终在 18 W 的泵浦功率下获得了功率为 136 mW 的 295 nm 输出。

基于 VECSEL 的四倍频实验都集中在亚利桑那大学,目前 VECSEL 四倍频得到的最高深紫外输出功率是 560 mW。深紫外光谱区域的转换可以使用的材料相当有限,因为必须在基波和谐波处为特定的波长组合进行相位匹配,加上晶体的有效非线性系数由于

2013 年,Paul 等^[17]报道了高达 1.5 W 的稳定的单频输出功率,线宽小于 70 kHz,507.5 nm 输出功率为 600 mW,在光泵浦半导体激光器(OPSL)中产生了功率为 120 mW 的 253.7 nm 深紫外光,用于形成中性的 Hg 磁光阱(MOT)。2016 年,Kaneda 等^[18]利用蝶形腔结构,在室温下用 2.7 W 的单频泵浦光,通过 LBO 腔内倍频得到了功率为 1.62 W 的 458 nm 蓝光输出,转换效率达到 60%,并用 1.62 W 的蓝光输入,通过四倍频,基于 10 mm 长的 BBO 晶体得到了功率为 560 mW 的 229 nm 深紫外激光输出。2016 年,Burd 等^[19]提出并表征了 VECSEL 系统,将其用于囚禁镁离子的量子信息处理实验;对于中性镁的光致电离,使用含有 LBO 晶体的腔内倍频 VECSEL 产生了 570.6 nm 的光;通过外部倍频产生了功率为 23 mW 的 285.3 nm 紫外光和功率为 13 mW 的 279.6 nm 紫外光。2017 年,Yakshin 等^[20]利用 946 nm 的基频光在 234 nm 处获得了功率为 190 mW 的激光输出,并利用 VECSEL 结合 W 腔形模式得到了更紧凑、更高效的深紫外激光器。2021 年,Meyer 等^[21]利用半导体可饱和吸收反射镜(SESAM)锁模,结合 W 腔形与 Z 腔形的复合谐振腔,利用 LBO 晶体将 1060 nm 的光倍频到 530 nm,此时的光光转换效率为 0.2%;利用 BBO 晶体得到 265 nm 深紫外输出,重复频率达到 510 MHz,脉冲宽度为 3 ps,峰值功率达到 300 mW,平均输出功率为 0.525 mW。2023 年,Burd 等^[22]利用 VECSEL 产生了功率为 2.4 W 的 940 nm 激光,并将其转换为功率为 54 mW 的 235 nm 紫外光,用于中性玻原子的光电离。上述深紫外 VECSEL 的主要实验结果总结在表 1 中。

表 1 深紫外 VECSEL 的主要研究成果
 Table 1 Main research results of DUV VECSEL

Year	Research unit	Wavelength /nm	Maximum output power /mW	Ref.
2008	University of Arizona	244	215	[15]
2009	University of Arizona	295	136	[16]
2013	University of Arizona	253.7	120	[17]
2016	University of Arizona	229	560	[18]
2016	National Institute of Standards and Technology	279.6	13	[19]
2016	National Institute of Standards and Technology	285.3	23	[19]
2017	University of Arizona	234	190	[20]
2021	University of Arizona	265	0.525	[21]
2023	University of Arizona	235	54	[22]
2024	Chongqing Normal University	246.8	29.8	This work

晶体对称性而向短波长方向变小,所以深紫外的产生具有挑战性。除了此研究单位外,基于 VECSEL 四倍频都无法获得高的深紫外输出,且部分尝试脉冲深紫外,其输出的峰值功率都在 mW 量级。本文利用 I 类相位匹配 LBO 晶体进行腔内倍频,获得了高功率高光

束质量的倍频蓝光激光输出。利用外部结构,通过 BBO 晶体实现了 245 nm 的深紫外激光输出。在该激光器中,利用高功率的蓝光激光进行四倍频的实验,可以在非单频状态下获得腔外四倍频的深紫外输出。这种简单紧凑的结构适用于实际应用。

2 实验装置

本实验中所用的增益芯片设计波长为 980 nm。金属有机化合物气相外延(MOCVD)法生长的外延片主要由衬底、窗口层、有源区、分布式布拉格反射镜(DBR)构成,其生长结构如图 1 所示^[23]。首先,在 GaAs 衬底上生长高 Al 组分的 $\text{Al}_{0.6}\text{GaAs}$ 腐蚀阻挡层。该层在后续的基质腐蚀去除过程中,对选择性腐蚀过程起到阻挡作用,使选择性腐蚀过程止于该层。接着,生长 GaAs 保护层。在腐蚀阻挡层被腐蚀后,该层即为增益芯片的最外层,其为抗氧化材料,能够有效保护芯片。然后,生长有源区。该有源区主要由 12 对 $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAsP}_{0.02}$ 多量子阱(MQWs)构成。其中, $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量子阱材料中 In 的含量是根据设计波长 980 nm 来确定的,但在 GaAs 基质上外延生长时会引入约 1.4% 的压应变,这可能会对外延生长的质量产生影响。本实验所用增益芯片中的量子阱个数(12 个)较多,因此必须对上述应变进行补偿。我们选用张应变材料 GaAsP 来进行应变补偿。为了尽可能地减少外延生长中材料种类的频繁更换,更好地确保外延生长的质量,本芯片设计选择的 GaAsP 层不仅作为应力补偿层,还兼具量子阱的势垒层的功能。因为势垒层是泵浦光子的吸收层,所以其材料带隙能必须小于实验所用 808 nm 泵浦光子的能量。在 GaAsP 中,P 的含量需要进行精细且合理的设计。其含量需足够高,以便有效补偿多量子阱引入的应力;然而,P 的含量又不能过高,否则 InGaP 就无法吸收泵浦光子。实验中所用 P 的摩尔分数为 0.02,其引入的张应变约为 0.072%。 $\text{GaAsP}_{0.02}$ 的吸收带边约为 840 nm,可以确保其对泵浦光子的吸收效率。理论上,要完全补偿外延生长厚度为 8 nm 的 $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ 量

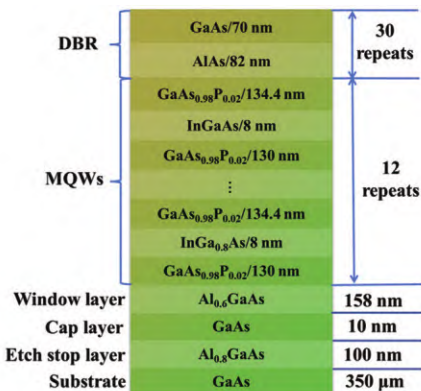


图 1 VECSEL 外延片结构示意图^[23]

Fig. 1 Schematic of structure of VECSEL epitaxial wafer^[23]

子阱所引入的应力,所需的 $\text{GaAsP}_{0.02}$ 层厚度约为 150 nm。然而,增益芯片的谐振周期增益结构限制了势垒层的厚度,使其只能为 130 nm。因此,芯片中的应力并未得到完全补偿。尽管如此,应力已经得到了绝大部分的补偿,这足以确保外延生长过程中不会出现明显影响生长质量的缺陷。此外,后续获得的较好的倍频激光输出功率也间接证明了这一点。增益芯片最后生长的部分是 DBR,由 30 对 GaAs/AlAs 交替构成,每层的光学厚度为 1/4 激光波长,即 980 nm。MQWs 的荧光峰值波长设计值和 DBR 的中心波长设计值均为 980 nm。

首先,对生长完成的外延片进行衬底减薄处理,并对其外延结束面进行金属化处理,然后进行解理划片。接下来,利用钢焊料将增益芯片、金刚石和热沉焊接在一起。泵浦源选用的是波长为 808 nm 的光纤输出半导体激光器。泵浦光通过聚焦系统以特定角度照射到增益芯片上,形成的光斑直径约为 600 μm。

实验中所用的激光谐振腔如图 2 所示,其中 TEC 为半导体热电制冷装置。蓝光谐振腔由增益芯片、曲率半径为 50 mm 的平凹反射镜 M1(反射率为 $>99\%$ @980 nm,透射率为 $>99.8\%$ @490 nm)以及平面反射镜 M2(反射率为 $>99\%$ @980 nm & 490 nm)构成。完成频率转换后的倍频蓝光在 M1 处输出,并经过曲率为 100 mm 的折叠镜 M3(反射率为 $>99\%$ @980 nm,490 nm & 325 nm),最终到达尾端镜 M4。该尾端镜为一个平面镜(反射率为 $>99\%$ @980 nm,透射率为 $>98\%$ @490 nm & 325 nm)。

双折射滤波片以布儒斯特角被插入激光谐振腔,起到起偏作用,同时也能够在一定程度上抑制激光

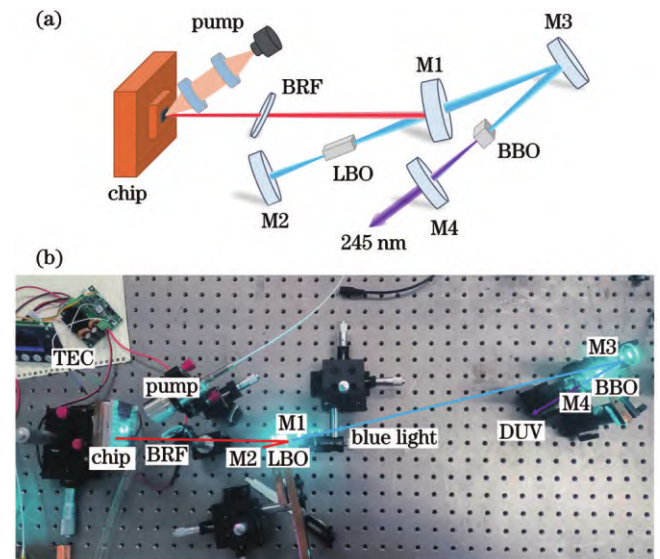


图 2 实验腔结构图。(a) 蓝光倍频深紫外腔结构示意图; (b) 实验装置实物图

Fig. 2 Experimental cavity structure diagram. (a) Blue frequency-doubled deep ultraviolet cavity structure diagram; (b) photograph of experimental setup

的多纵模输出,从而有助于提高倍频转换效率。鉴于 LBO 晶体的 I 类相位匹配的有效非线性系数 $0.827 \text{ pm/V}^{[24]}$ 明显大于其 II 类相位匹配的有效非线性系数,选择 I 类相位匹配的 LBO 晶体,其尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,并将其置于 M1 和 M2 之间的激光束腰处。其中四倍频 BBO 晶体尺寸为 $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$,采用 I 类相位匹配方式,将其放置在 M3 与 M4 之间的束腰处^[25-26]。

3 分析与讨论

首先测试了实验所用的增益芯片的发光特性,其测试结果如图 3 所示。BDR 的反射谱中心波长在 980 nm 附近,其反射率在 95% 以上的反射谱覆盖 $938 \sim 1013 \text{ nm}$ 区域。DBR 的反射谱中心波长与设计波长 980 nm 基本一致。如图 3 所示,由不同泵浦功率下的增益芯片荧光(PL)谱可知,PL 谱的峰值波长随着泵浦功率的升高发生红移,其红移速率约为 0.031 nm/W 。由此可知,在泵浦功率为 50 W 的条件下,增益芯片内部的温度上升了约 3.9 K 。增益芯片的初始 PL 谱的峰值波长是 978.2 nm ,泵浦光功率由 5 W 逐渐增加到 50 W ,最终 PL 谱的峰值波长为 979.4 nm ,仅漂移了 1.2 nm 。这表明所设计增益芯片的内部散热性能良好。

接下来,对所需要的倍频蓝光进行测量。实验使

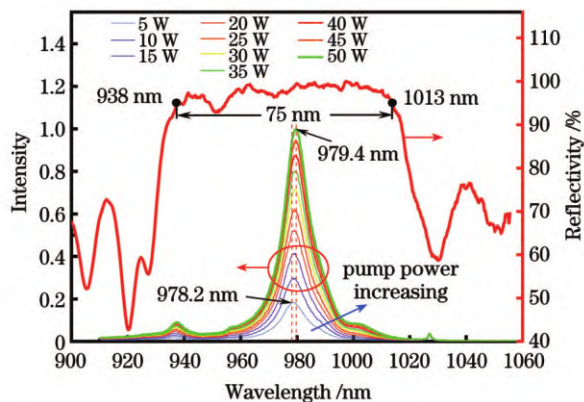


图 3 VECSEL 增益芯片反射谱与荧光谱

Fig. 3 Reflection spectrum and PL spectrum of VECSEL gain chip

用一个平凹 V 形腔来实现倍频蓝光激光输出,得到图 4(a)所示的结果,其中左上角插图展示的是激光器最大输出时的蓝光激光波长。图 4(b)为吸收泵浦光到倍频蓝光的转换效率曲线。由图 4(a)可知,当吸收泵浦功率逐渐增大时,蓝光功率并没有出现下降的趋势,其对应的光光转换效率逐渐增加。在 TEC 温度为 15°C ,吸收泵浦功率为 38.5 W 的条件下,倍频蓝光的最大输出功率(P_{max})为 4.5 W ,其半峰全宽(FWHM)为 1.79 nm 。在激光连续运转下,吸收泵浦光到倍频蓝光的转换效率最大为 11.6% 。

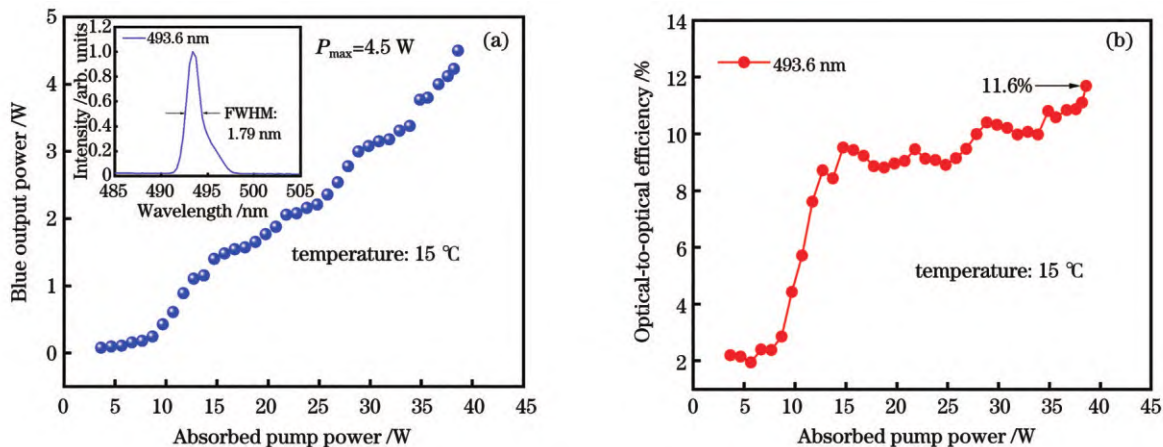


图 4 蓝光 VECSEL 的输出功率与光光转换效率。(a) VECSEL 倍频蓝光的输出特性曲线,插图为激光器最大输出时的蓝光波长;(b)吸收泵浦光到倍频蓝光的转换效率曲线

Fig. 4 Output power and optical-to-optical efficiency of blue VECSEL. (a) Blue output characteristic curve of frequency-doubled VECSEL with blue light wavelength at maximum output of laser shown in inset; (b) conversion efficiency curve of absorbed pump light to frequency-doubled blue light

相较于双凹 V 形腔,此腔形结构输出的蓝光发散角更小。此外,由于倍频晶体的位置并不位于激光束腰的中心,晶体上的能量密度相对较低,这有助于输出功率稳定且光束质量较好的蓝光。

该激光器的发射波长如图 5 所示,基频激光的波长为 980 nm ,倍频蓝光的波长为 490 nm 。当 TEC 为 15°C ,倍频蓝光输出功率为 2 W 时,使用光束质量分

析仪对倍频蓝光进行多次扫描测量,得到图 5 所示的结果。 x 方向和 y 方向的光束质量因子 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.11 和 1.10 ,接近衍射极限,发散角为 25 mrad 。实验结果也验证了该腔形的优势:尽管没有更高的倍频输出,但是有更优良的光束质量与小的发散角,有利于后续四倍频的实验。

为进一步研究倍频蓝光的激光束腰在腔内的变化

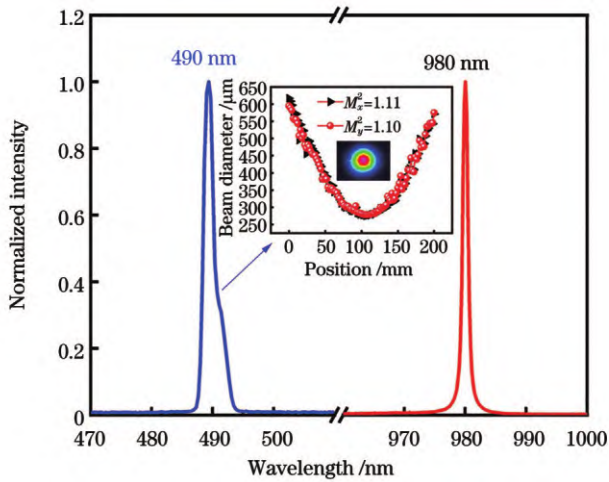


图5 VECSEL基频激光与倍频蓝光的光谱及光束质量(插图)
Fig. 5 Spectra of fundamental and frequency-doubled VECSELs with beam quality shown in inset

趋势,实验前利用软件对腔内光斑变化进行了模拟分析,探究了束腰位置和大小情况,并绘制了相应的变

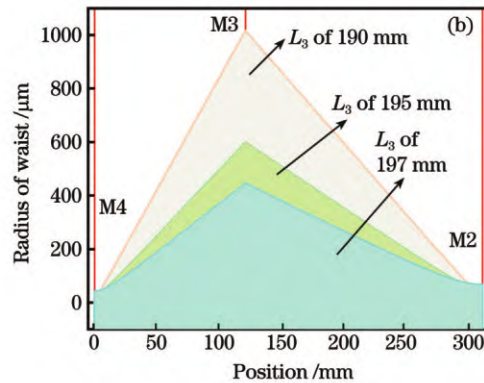
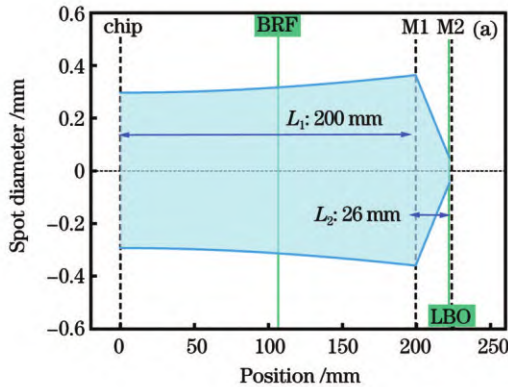


图6 二倍频蓝光腔内的基频激光腔模半径与四倍频深紫外腔内蓝光光斑的束腰半径。(a)基频激光腔模半径;(b)蓝光光斑的束腰半径
Fig. 6 Cavity mode radii of fundamental frequency laser in double-frequency blue light cavity and beam waist radii of blue light spot in frequency-quadrupled deep UV cavity. (a) Cavity mode radii of fundamental frequency laser; (b) beam waist radii of blue light spot

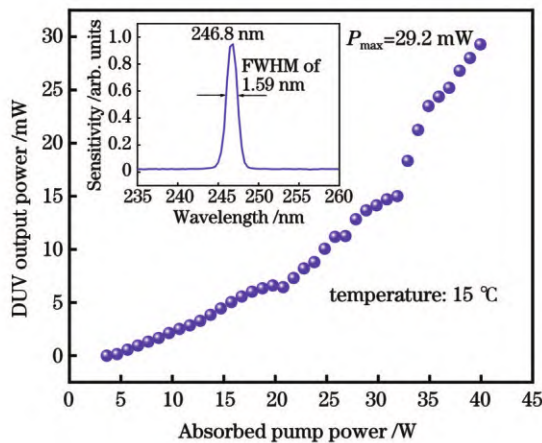


图7 VECSEL四倍频深紫外激光器的输出特性曲线,插图为输出紫外激光的光谱

Fig. 7 Output characteristic curve of frequency-quadrupled VECSEL DUV laser with spectrum of output UV laser shown in inset

对该激光器的稳定性进行测试。将初始功率设定为 10.00 mW,在初始波长为 246.8 nm 处观察了 80 min 的功率,其中每 5 min 记录一次功率数值。图 8 描绘了

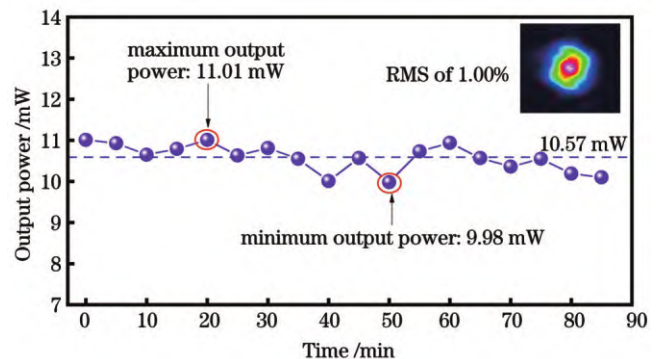


图8 VECSEL四倍频深紫外激光器的功率稳定性及深紫外光斑

Fig. 8 Power stability of frequency-quadrupled VECSEL DUV laser with DUV spot shown in inset

该深紫外激光器的输出功率稳定性以及紫外光光斑。在给定条件下,该激光器的平均输出功率为 10.57 mW,均方根(RMS)稳定性为 1.00%,最大输出功率偏离平均输出功率 4.2%,最小输出功率偏离平均输出功率 5.6%。该激光器的稳定性在未来的工作中需要进一步改善。

4 结 论

利用平凹 V 形腔倍频蓝光的特点和优势,结合所产生的倍频蓝光,通过四倍频得到 246.8 nm 深紫外输出。结果表明,利用该腔结构得到的倍频蓝光,可实现高功率输出,同时光束质量优良,发散角小,输出模式更加稳定。实验选用 I 类相位匹配的 LBO 晶体作为倍频晶体,当 TEC 工作温度为 15 °C 时,在腔内插入 0.5 mm 厚的 BRF,利用 5 mm 长的 LBO 得到功率为 4.5 W 的 493 nm 高功率蓝光输出。进一步利用 I 类相位匹配的 BBO 晶体,实现了功率为 29.2 mW 的 246.8 nm 深紫外输出。上述的实验结果受限于泵浦功率以及各个光学镜片的镀膜。这种通过 VECSEL 四倍频得到的深紫外输出,激光光斑接近圆形,且激光器结构紧凑,易于实现。该波段的深紫外激光在杀菌消毒、甲醛处理等领域中都可以发挥出巨大的作用。

参 考 文 献

- [1] 吉于今, 楚学影, 董旭, 等. 紫外偏振敏感的 CsPbBr₃ 纳米薄膜的可见光发射[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 CsPbBr₃ nano-films[J]. Chinese Optics, 2023, 16(1): 202-213.
- [2] 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 S Y, Guo Y X, et al. Research progress of remote detection with ultraviolet Raman spectroscopy[J]. Chinese Optics, 2019, 12(6): 1249-1259.
- [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] 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, 1251.
Nie S L, Guan Y C. Review of UV laser and its applications in micromachining[J]. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(12): 1169-1179, 1251.
- [5] 王子文, 曹雪辰, 张艳林, 等. 采用 BBO 晶体产生 266 nm 深紫外激光过程中的热特性研究[J]. 中国激光, 2024, 51(14): 1401003.
Wang Z W, Cao X C, Zhang Y L, et al. Thermal characteristics of 266 nm DUV laser generated by BBO crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(14): 1401003.
- [6] 苏艳丽, 何京良, 姜其畅, 等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 晶体五倍频 213 nm 深紫外激光器[J]. 中国激光, 2006, 33(12): 1590-1592.
Su Y L, He J L, Jiang Q C, et al. Efficient 213 nm radiation fifth harmonic generation of a laser diode-pumped Nd:YVO₄ laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(12): 1590-1592.
- [7] 王金艳, 马放, 郑磊, 等. 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.
Wang J Y, Ma F, Zheng L, et al. An ultraviolet laser at 228 nm with adjustable repetition rate and narrow pulse width[J]. Chinese Optics, 2024, 17(1): 100-107.
- [8] 刘慧, 姚育成, 黄楚云. LD 侧面抽运全固态 Nd:YAG 紫外激光器的研究[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 303-306.
Liu H, Yao Y C, Huang C Y. Research of laser diode side-pumped all-solid-state Nd:YAG ultraviolet lasers[J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 303-306.
- [9] Liu K, Li H, Qu S Z, et al. 20 W, 2 mJ, sub-ps, 258 nm all-solid-state deep-ultraviolet laser with up to 3 GW peak power[J]. Optics Express, 2020, 28(12): 18360-18367.
- [10] 程成, 金秦隆, 赵志斌, 等. 全固态 Nd:GdVO₄ 四倍频 228 nm 深紫外激光器[J]. 海南师范大学学报(自然科学版), 2024, 37(1): 30-36.
Cheng C, Jin Q L, Zhao Z B, et al. All-solid-state Nd:GdVO₄ quadruple frequency 228 nm deep ultraviolet laser[J]. Journal of Hainan Normal University (Natural Science), 2024, 37(1): 30-36.
- [11] Taketomi H, Aoki Y, Takagi Y, et al. Over 1 W record-peak-power operation of a 338 nm AlGaIn multiple-quantum-well laser diode on a GaN substrate[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(5S): 05FJ05.
- [12] Liu H Y, Ma H D, Bian Q, et al. Microsecond pulsed yellow emission by intracavity doubled optically pumped two-chip VECSEL[J]. Laser Physics Letters, 2023, 20(4): 045002.
- [13] Gaafar M A, Rahimi-Iman A, Fedorova K A, et al. Mode-locked semiconductor disk lasers[J]. Advances in Optics and Photonics, 2016, 8(3): 370-400.
- [14] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A. Optically pumped VECSELs: review of technology and progress[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(38): 383001.
- [15] 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.
- [16] Kaneda Y, Fallahi M, Hader J, et al. Continuous-wave single-frequency 295 nm laser source by a frequency-quadrupled optically pumped semiconductor laser[J]. Optics Letters, 2009, 34(22): 3511-3513.
- [17] Paul J R, Lytle C R, Kaneda Y, et al. Optically pumped external-cavity semiconductor lasers for precision spectroscopy and laser cooling of atomic Hg[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8606: 86060R.
- [18] 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.
- [19] Burd S C, Allcock D T C, Leinonen T, et al. VECSEL systems for the generation and manipulation of trapped magnesium ions[J]. Optica, 2016, 3(12): 1294-1299.
- [20] Yakshin M, Hessenius C, Prasad C, et al. A compact, efficient deep UV optically pumped VECSEL[C]//Conference on Lasers and Electro-Optics, May 14-19, 2017, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2017: SM3M.4.
- [21] Meyer J T, Lukowski M L, Hessenius C, et al. All-intracavity fourth harmonic generation in a passively mode locked VECSEL for ultrafast UV emission[J]. Optics Communications, 2021, 499: 127255.
- [22] Burd S C, Penttinen J P, Hou P Y, et al. VECSEL systems for quantum information processing with trapped beryllium ions[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2023, 40(4): 773-781.
- [23] 王涛, 彭雪芳, 贺亮, 等. 509 nm 高功率宽调谐外腔面发射激光器[J]. 物理学报, 2024, 73(12): 124204.
Wang T, Peng X F, He L, et al. 509 nm high power wide-tuned external cavity surface emitting laser[J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(12): 124204.
- [24] Smith A V. How to use SNLO nonlinear optics software to select nonlinear crystals and model their performance[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4972: 50-57.
- [25] 俞航航, 张志韬, 玄洪文. 基于国产商用 CLBO 晶体的高转换效率、高功率深紫外 266 nm 激光[J]. 中国激光, 2024, 51(7): 0701020.

Yu H H, Zhang Z T, Xuan H W. High-conversion-efficiency high-power deep-ultraviolet 266 nm laser based on domestic commercially available CLBO crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(7): 0701020.

[26] 张一凡, 张泽亮, 齐鹏飞, 等. 基于 β -BBO 晶体级联倍频的深紫

外可调谐激光数值模拟[J]. 中国激光, 2024, 51(18): 1801004.

Zhang Y F, Zhang Z L, Qi P F, et al. Numerical simulation in deep-ultraviolet tunable laser based on cascaded frequency doubling in β -BBO crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(18): 1801004.

Frequency-Quadrupled Vertical External-Cavity Surface-Emitting Deep Ultraviolet Laser

Peng Xuefang¹, Wang Tao^{1*}, Zhu Renjiang¹, Jiang Lidan¹, Tong Cunzhu², Song Yanrong³, Zhang Peng^{4**}

¹College of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China;

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

³College of Physics and Optoelectronic Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

⁴National Center for Applied Mathematics in Chongqing, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China

Abstract

Objective The significance of deep-ultraviolet (DUV) band light is its unique sterilization and disinfection ability, environmental performance, and wide application in other fields. Specifically, deep ultraviolet light can destroy the deoxyribonucleic acid (DNA) or ribonucleic acid (RNA) structure of microorganisms, such as bacteria and viruses, thereby achieving efficient sterilization and disinfection. In addition, DUV technology has been applied in multiple fields such as water purification, air purification, medical treatment, biological research, national defense security, and ultraviolet communication, demonstrating broad application prospects. Therefore, the DUV bands are crucial in improving the quality of human life and promoting technological progress. Deep-ultraviolet vertical-external-cavity surface-emitting laser (VECSEL) can achieve high output power, excellent beam quality, and tunable wavelength by optimizing the resonant cavity structure to meet the urgent demand for DUV laser sources in scientific research and industrial fields. Stable and efficient DUV VECSELs provide advanced analytical tools and technical means in fields such as materials science, biomedicine, and environmental monitoring. In addition, research on DUV VECSEL will promote the development of nonlinear optical frequency conversion and quantum frequency conversion technologies, providing key technical support for cutting-edge fields such as quantum communication and quantum computing. Overall, research on DUV VECSEL aims to expand the application boundaries of laser technology and promote technological progress and industrial development.

Methods First a gain chip with a center wavelength of 980 nm is designed. A high-Al-composition $\text{Al}_{0.6}\text{GaAs}$ etch stop layer is grown on a GaAs substrate to block selective corrosion. Subsequently, a GaAs cap layer is grown, and after the etch-stop layer is corroded, this layer becomes the outermost layer of the gain chip, providing protection for the chip. Next, the active region is grown, which is mainly composed of 12 pairs of $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAsP}_{0.02}$ multiple quantum wells (MQWs). The content of In in the $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}$ quantum-well material corresponds to a design wavelength of 980 nm, but epitaxial growth on the GaAs substrate introduces a compressive strain of approximately 1.4%, which affects the quality of epitaxial growth. To minimize the frequent replacement of material types during epitaxial growth and better ensure the quality of epitaxial growth, this chip design specifically uses the GaAsP layer not only as a stress compensation layer but also as a barrier layer for quantum wells. Therefore, the content of P in GaAsP needs to be finely and reasonably designed to be sufficiently high to compensate for the stress introduced by multiple quantum wells. However, if the content of P is too high, InGaP cannot absorb pump photons. The final growth part of the gain chip is the distributed Bragg reflector (DBR), which is composed of 30 pairs of alternating GaAs/AlAs, with each layer having an optical thickness of $1/4$ laser wavelength, which is 980 nm. Next is the performance testing of the gain chips, especially temperature and power testing, which directly affects the quality and efficiency of the final output light. Temperature and power testing are particularly important, because they can intuitively reflect the stability and output power of chips in different working environments. It is particularly noteworthy to observe the redshift phenomenon between the chip design wavelength and the actual output wavelength. Subsequently, the design of optical resonant cavities and the optimization of crystal selection are also key steps in improving optical conversion efficiency. When using a flat concave cavity structure, it is necessary to accurately match the core diameter of the pump with the laser spot inside the resonant cavity and calculate the waist position of the laser inside the cavity through simulation. This is directly related to the placement and length selection of the subsequent crystals. Based on the waist size, the optimal crystal length can be calculated, and

the crystal can be accurately placed at the position of the laser waist to achieve high-frequency doubling conversion efficiency and high-power blue light output. Finally, the high-power blue light obtained is further converted into 245 nm deep ultraviolet light through barium metaborate (BBO) crystals.

Results and Discussions We use a specially designed semiconductor gain chip (Fig. 1). The characteristics and advantages of the flat concave V-shaped cavity frequency-doubled blue light combined with the generated frequency-doubled blue light for fourth-harmonic generation result in a DUV output at 246.8 nm. The results indicate that the frequency-doubled blue light obtained using this cavity structure has excellent beam quality, close to the diffraction limit, a small beam divergence angle, and a more stable output mode while producing high power. In this study, a type-I phase-matched lithium triborate (LBO) crystal is selected as the frequency-doubling crystal. At an operating temperature of 15 °C using thermoelectric cooler (TEC), a 0.5 mm thick birefringent filter is inserted into the cavity. Using a 5 mm long LBO, we obtain a high-power blue light output of 4.5 W at a wavelength of 493 nm (Fig. 4). After passing through the type-I phase-matched BBO crystal, a DUV output of 29.2 mW at a wavelength of 246.8 nm is obtained (Fig. 7). This frequency-quadrupled VECSEL has advantages such as excellent beam quality, easy implementation, and a compact structure.

Conclusions This paper presents the output of a compact frequency-quadrupled vertical external cavity surface that emits a DUV laser. A V-type laser resonant cavity is constructed using specially designed semiconductor gain chips, folding mirrors, and rear-end mirrors. Under a working temperature of 15 °C, a high-power blue light output of 4.5 W is obtained by inserting a 5 mm long LBO crystal. A single-pass four-fold structure is formed by combining the rear reflection mirror, ultraviolet folding mirror, and ultraviolet output mirror of the frequency-doubling blue resonant cavity. The obtained blue light passes through a 3 mm long type I phase-matched BBO crystal, resulting in a 246.8 nm DUV laser output with a power of 29.2 mW through an output mirror with a transmittance of 50% at a wavelength of 245 nm. The aforementioned experimental results are limited by the pump power and coating of each optical lens. The DUV laser in this band can play a significant role in sterilization, disinfection, formaldehyde treatment, and other fields.

Key words vertical external-cavity surface-emitting laser; nonlinear frequency conversion; quadruplicated frequency; deep ultraviolet light