

509 nm 高功率宽调谐外腔面发射激光器*

王涛¹⁾ 彭雪芳¹⁾ 贺亮¹⁾ 沈小雨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, 长春 130033)

3) (北京工业大学理学院, 北京 100124)

4) (重庆师范大学重庆国家应用数学中心, 重庆 401331)

(2024 年 4 月 11 日收到; 2024 年 4 月 26 日收到修改稿)

报道了一种高功率宽调谐外腔面发射绿光激光器, 利用设计的 1018 nm 半导体增益芯片、折叠镜以及后端镜构成结构紧凑的 V 型腔, 使用长度为 10 mm 的 I 类相位匹配三硼酸锂 (LiB_3O_5 , LBO) 非线性频率变换晶体进行腔内倍频, 实现了 509 nm 波长的高功率绿光输出. 通过在腔内插入双折射滤波片 (birefringent filter, BRF), 可获得连续调谐的激光波长. 当 BRF 厚度为 1 mm 时, 基频激光和倍频绿光的波长调谐范围分别为 47.1 nm 和 20.1 nm. 可调谐绿光的最大输出功率为 8.23 W, 对应的倍频转换效率为 68.2%, 相应的从吸收泵浦光到倍频绿光的光-光转换效率为 16.6%.

关键词: 外腔面发射激光器, 腔内倍频, 双折射滤波片, 可调谐**PACS:** 42.55.-f, 42.55.Px, 42.62.-b**DOI:** 10.7498/aps.73.20240499

1 引言

波长可连续调谐的高功率绿光激光器在生物医学、激光显示、激光雷达、光谱分析、激光加工等诸多方面有着非常广泛的应用^[1-5]. 光泵浦垂直外腔面发射激光器 (vertical-external-cavity surface-emitting lasers, VECSELs), 又称半导体碟片激光器 (semiconductor disk lasers, SDLs), 能在较高的输出功率水平下, 同时保持良好的光束质量^[6,7]. 其半导体量子阱材料构成的增益介质具数十纳米的增益带宽, 结合灵活的外部谐振腔结构, 为高功率下较宽的波长连续调谐提供了可能性^[8,9].

VECSEL 在产生绿光方面具有几个显著的优势. 一是输出功率高, VECSEL 能够以较高电光转换效率产生高功率的绿光输出^[10]. 二是光束质量好, VECSEL 产生的绿光通常具有很好的光束质量, 即具有接近衍射极限的较小发散角. 三是波长可连续调谐^[11], VECSEL 可以利用外腔中的插入元件来实现激光波长的连续调谐.

近年来, 在 1 μm 波长附近的近红外可调谐 VECSEL 取得了不少进展. 2010 年 Borgentun 等^[12]采用直线谐振腔结构和 1 mm 厚的双折射滤波片 (birefringent filter, BRF), 实现了从 967—1010 nm 的连续调谐. 2011 年 Borgentun 等^[13]采用直线腔结构和 2 mm 厚的 BRF, 实现了中心波长 995 nm

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

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

附近最大输出功率 7.5 W 和 32 nm 的波长调谐范围. 2015 年, Nakdali 等^[14]采用直线腔和 1 mm 厚的 BRF, 得到了 37 nm 的波长调谐范围. 2017 年 Broda 等^[15]通过对增益芯片的特殊设计, 采用 V 型谐振腔, 在中心波长 985 nm 处, 实现了 95 nm (937—1032 nm) 波长调谐范围. 2023 年 Qiu 等^[16]采用直线腔和 1 mm 厚的 BRF, 获得了从 1044.5—1092.1 nm 连续可调的波长覆盖.

在绿光波段, 2008 年 Maclean 等^[17]使用 Z 型结构谐振腔及 4 mm 厚的 BRF, 实现了 10 nm(526—536 nm) 的波长连续可调谐, 在调谐范围内输出功率的最大值超过 1 W. 2012 年 Lin 等^[18]利用 VECSEL 泵浦的腔内连续拉曼激光器和温度调谐的三硼酸锂 (LiB_3O_5 , LBO) 晶体, 在绿光波段实现了 17.5 nm (548.5—566 nm) 的调谐. 同年, Hein 等^[19]采用 V 型结构谐振腔及 2 mm 厚的 BRF, 在 513—535 nm 的绿光光谱范围内获得 22 nm 的调谐, 并在 524.7 nm 处得到 4.1 W 的最大输出功率. 2014 年 Lukowski 等^[20]报道了一种共线双波长 VECSEL, 利用 T 型结构谐振腔和 1 mm 厚度 BRF, 获得了 5 nm 的调谐范围和超过 2 W 的绿光输出功率. 2019 年, 邱小浪等^[21]在直线谐振腔中插入 LBO 晶体, 利用

0.15 mm 厚的标准具, 产生了 4 nm 波长可调谐的倍频绿光, 在中心波长 559 nm 处的最大输出功率为 65 mW. 上述可调谐绿光 VECSEL 的主要实验结果总结在表 1 中.

在上述报道的绿光激光器中, 不管是输出功率、可调谐范围还是转换效率, 都获得了比较好的结果, 但是高输出功率、宽调谐范围、高转换效率三者不能同时兼得. 本文用紧凑的 V 型谐振腔和 I 类相位匹配 LBO 作为非线性晶体, 研究不同厚度的 BRF 对腔内倍频 VECSEL 的调谐特性和输出功率的影响, 获得了 8.23 W 的高功率输出和超过 20 nm 的波长调谐范围, 对应的吸收泵浦光到倍频绿光的光-光转换效率达到 16.6%. 这种高功率的波长可调谐绿光激光器可以满足更多实际应用场景的需要, 进一步拓展绿光 VECSEL 的应用范围.

2 实验装置

本实验所用增益芯片的设计波长为 1018 nm. 外延片采用逆向生长结构, 其生长顺序如图 1(a) 所示. 首先在 GaAs 衬底上沉积高 Al 组分的 AlGaAs

表 1 可调谐绿光 VECSEL 的主要结果
Table 1. Reported experimental results of tunable green VECSEL.

年份	研究单位	中心波长/nm	调谐范围/nm	输出功率/W	转换效率/%	文献
2008年	University of Strathclyde	530	10	1	11	[17]
2012年	Macquarie University	560	17.5	0.8	4.2	[18]
2012年	Ulm University	520	22	4.1	22	[19]
2014年	University of Arizona	532	5	2	5	[20]
2019年	重庆师范大学	559	4	65 mW	3.3	[21]
2024年	本工作	509	20.1	8.23	16.6	

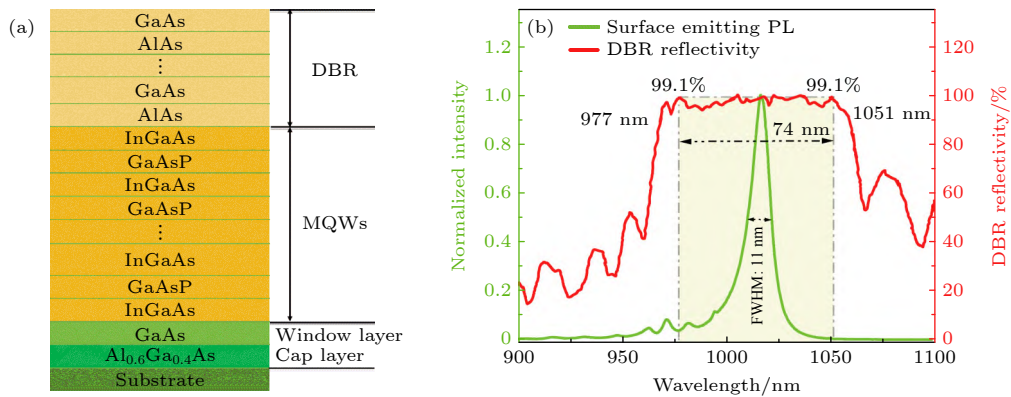


图 1 (a) VECSEL 外延片结构示意图; (b) 增益芯片的反射谱及荧光谱

Fig. 1. (a) Schematics of the epitaxial structure of the VECSEL wafer; (b) the reflection spectrum and the PL spectrum of the gain chip.

腐蚀阻挡层, 然后生长 GaAs 保护层. 接下来是由 12 对 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}_{0.9}\text{P}_{0.1}$ 多量子阱 (multiple quantum wells, MQWs) 构成的有源区, 其中的 GaAsP 势垒层在有源区同时起到应变补偿和泵浦吸收的作用. 所以, GaAsP 中 P 的组分要进行合理优化设计, 以此保证既能补偿量子阱中的应变, 又能使泵浦的能量被有效地吸收. 然后是分布布喇格反射镜 (distributed Bragg reflector, DBR), 由 30 对 GaAs/AlAs 交替构成, 每层的光学厚度为 $1/4$ 波长, 设计波长为 1018 nm, 得出 DBR 的厚度约为 $4.7\text{ }\mu\text{m}$. 图 1(b) 为 DBR 的反射谱和增益芯片的荧光 (photoluminescence, PL) 谱. DBR 反射谱的中心波长在 1016 nm 附近, 其反射率在 99.1% 以上的带宽约为 74 nm, 覆盖波长从 977—1051 nm. 增益芯片 PL 谱的峰值波长也位于 1016 nm 处, 其半高全宽度 (full width at half maximum, FWHM) 为 11 nm. 图 1 中增益芯片较宽的 PL 谱和 DBR 足够高反射率带宽的反射谱, 为后续高功率下宽波长调谐提供了基础.

将生长好的外延片在衬底减薄至 $120\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 然后进行金属化处理, 再切割成 $4\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 尺寸的芯片. 后续利用钢焊料将增益芯片、金刚石和铜热沉焊接在一起. 铜热沉后端连接半导体热电制冷装置 (thermoelectric cooling, TEC) 和水冷系统, 对增益芯片的温度进行适时控制. 图 2(a) 是实验所用到的 V 型激光谐振腔结构图, 图 2(b) 为实验装置的实物图. 图 2(a) 的激光谐振腔是一个由增益芯片、曲率半径为 50 mm 的 M_1 、以及平面反射镜 M_2 构成 V 型腔结构. M_1 镀有对 1018 nm 具有 99.9% 反射率和对 509 nm 具有 99.5% 透过率的膜层. 作为折叠镜, M_2 镀有对 1018 nm 和 509 nm 都是 99.9% 反射率的膜层. 倍频绿光在折叠镜 M_1 处输出, 不会再返回到增益芯片, 以产生不必要的吸收, 形成增益芯片中的冗余热量.

泵浦源采用 808 nm 波长的光纤耦合输出半导体激光器, 泵浦光束经过 1:1 成像比例的透镜对以大约 30° 入射角被聚焦到增益芯片上, 形成的泵浦光斑直径约为 $600\text{ }\mu\text{m}$. 基频光通过以布儒斯特角放置的 BRF 后变为线偏振光, 以满足后续 LBO 晶体中频率变换对相位匹配的需要. 所用 I 类相位匹配非线性晶体 LBO 的尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 10\text{ mm}$, 其两个通光面均镀有对 1018 nm 和 509 nm 波长增透的膜层.

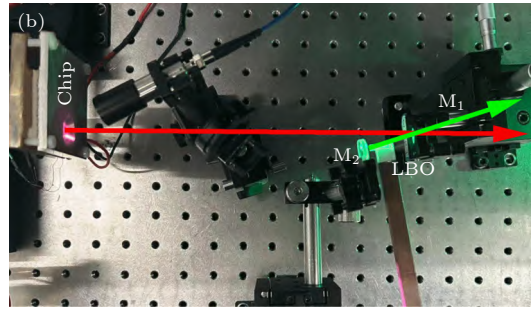
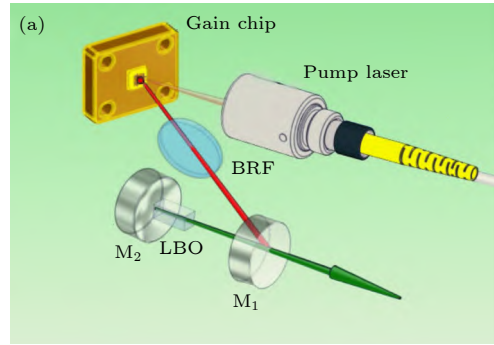


图 2 (a) 倍频绿光 VECSEL 的 V 型谐振腔结构图; (b) 实验装置实物图

Fig. 2. (a) The V-type resonant cavity of the frequency-doubled green VECSEL; (b) the photograph of the experimental setup.

在非线性频率变换过程中, 想要获得高转换效率, 需要选择合适的谐振腔、非线性晶体及其相位匹配类型. 谐振腔的设计主要考虑了增益芯片上激光光斑与泵浦光斑满足模式匹配条件, 以及在非线性晶体上获得尽可能小的光束束腰. 本实验中激光在增益芯片上的光斑直径约为 $600\text{ }\mu\text{m}$, 与 $600\text{ }\mu\text{m}$ 泵浦尾纤芯径经过 1:1 成像后投射在芯片上的泵浦光斑大致相同. 非线性晶体 LBO 晶体放置在 M_1 和 M_2 之间的光束束腰处, 束腰的直径约为 $50\text{ }\mu\text{m}$. 实验所用的 V 型谐振腔的腔模半径随位置以及腔内激光的偏振态的变化如图 3 所示.

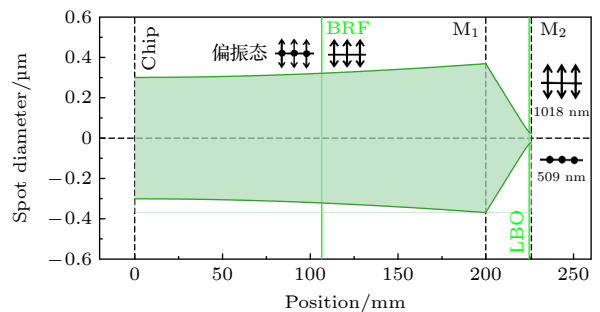


图 3 V 型谐振腔内基频激光腔模半径随位置的变化

Fig. 3. Changes of the cavity mode in the V-type cavity with various position.

非线性晶体 LBO 的长度优化至关重要. 一定条件下, 频率转换效率会随着晶体的长度增加而增加, 但一定的光束束腰尺寸存在一个理想晶体长度与之匹配. 束腰为 ω_0 时所对应的晶体最佳长度 L 为^[22]

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

其中 λ 为激光波长. 本实验中的波长为 1018 nm, LBO 晶体所在处激光束腰直径约为 50 μm , 计算得出晶体的最佳长度约为 8.7 mm. 考虑到上述数值为估算值, 实验中选择了略长的 10 mm 长度的 LBO.

最后, 使用 Sandia Nat 公司开发的开源软件 SNLO 软件对非线性晶体 LBO 进行建模. 鉴于 LBO 晶体的 I 类相位匹配的有效非线性系数 0.827 pm/V^[23,24] 明显大于其 II 类型相位匹配的有效非线性系数, 实验选择了 I 类相位匹配的 LBO, 并将波长调谐元件 BRF 以布儒斯特角放置在谐振腔中, 产生线偏振光, 满足 LBO 的相位匹配要求.

3 结果与讨论

在插入 LBO 晶体产生倍频绿光之前, 先对 VECSEL 的基频激光调谐性能进行了测试. 在 TEC 设定温度为 11 $^{\circ}\text{C}$, 泵浦吸收功率为 50 W 的条件下, 腔内以布儒斯特角分别插入厚度为 1, 2, 4 mm 的 BRF, 围绕 BRF 的光轴旋转从而实现波长连续调谐. 图 4 显示了 BRF 厚度为 1, 2, 4 mm 时基频激光的波长调谐范围, 其最大值为 47.1 nm, 对应波长范围为 994.8—1041.8 nm. 使用 2, 4 mm 的 BRF 分别得到了 38.8, 32.4 nm 的连续可调谐范围.

接下来测量了插入非线性晶体 LBO 后所得倍频绿光的波长可调谐范围. 在上述基频激光调谐实验中, 已经验证 3 种厚度的 BRF 均可以实现较宽范围的连续波长调谐. 在此基础上, 首先插入长度为 10 mm 的 LBO 晶体, 实现绿光激光输出. 然后, 使用厚度为 1, 2, 4 mm 的 BRF 作为调谐元件, 以布儒斯特角插入谐振腔对倍频绿光进行波长调谐. 在 TEC 设定温度为 11 $^{\circ}\text{C}$, 泵浦吸收功率为 50 W 的条件下, 用厚度为 1 mm 的 BRF 获得了 20.1 nm 的最大连续可调谐范围. 如图 4(a) 所示, 波长在 497.7—517.8 nm 可调. 采用 2, 4 mm 的 BRF, 分别获得了 17.3, 12.8 nm 的连续可调谐范围, 如图 4(b), (c) 所示.

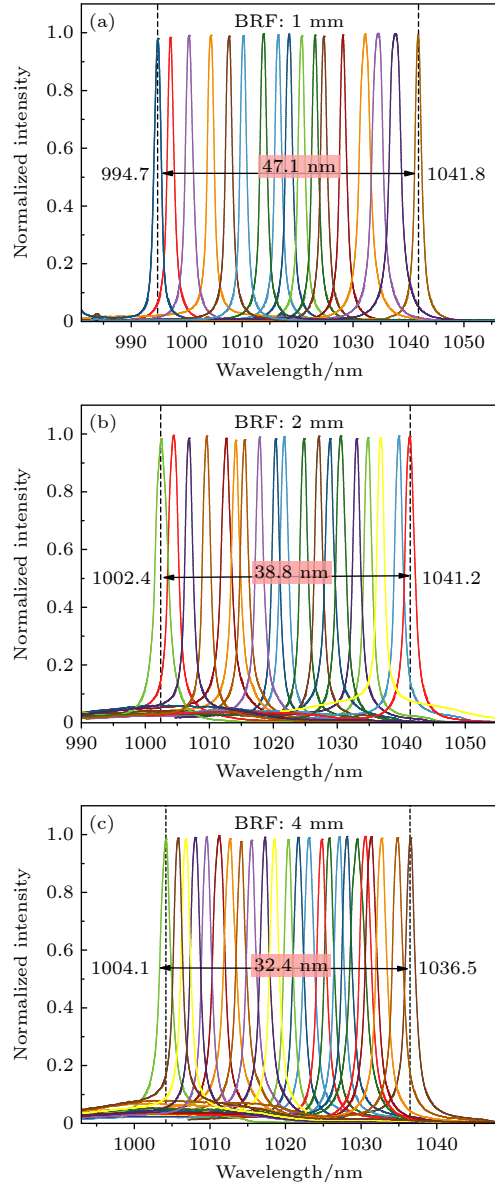


图 4 BRF 厚度为 1, 2, 4 mm 时基频激光的波长调谐范围
Fig. 4. Tuning range of the fundamental laser with BRF thicknesses of 1, 2, and 4 mm.

基频激光的波长调谐范围应为倍频绿光的波长调谐范围的两倍左右. 结合图 4(a) 与图 5(a) 可知, 倍频绿光的波长调谐范围未到基频激光的一半, 这是由于基频激光边缘波长功率影响使得倍频效率不高, 倍频绿光最大波长调谐带宽为 20.1 nm.

BRF 的厚度越大, 相应的自由光谱范围越小, 插入 BRF 后 SDL 的波长调谐能力越弱, 会直接影响激光器的波长调谐范围. 同时, 越厚的 BRF 引入的腔内损耗也会增大, 可调谐激光器的输出功率相应减小, 也直接影响倍频绿光的波长调谐范围. 图 6 描述了在 TEC 设置温度为 11 $^{\circ}\text{C}$, 泵浦吸收功率为 50 W 的条件下, 插入厚度为 1, 2, 4 mm 的

BRF 测得激光器的倍频光输出功率, 分别为 7.05, 8.23, 3.90 W. 最后对激光的光束质量进行测量. 实验使用 THORLABS 的光束质量分析仪 (型号为: M00546490) 对光束质量及发散角进行测量. 其原理是采用 CCD 面阵器件作为图像传感器直接探测, 将光束经衰减和变换后入射照射到 CCD 的感光面上实现测量. 得到 M_x^2 和 M_y^2 分别为 1.00 和 1.03, 倍频绿光的发散角为 22 mrad, 约为 1.26° .

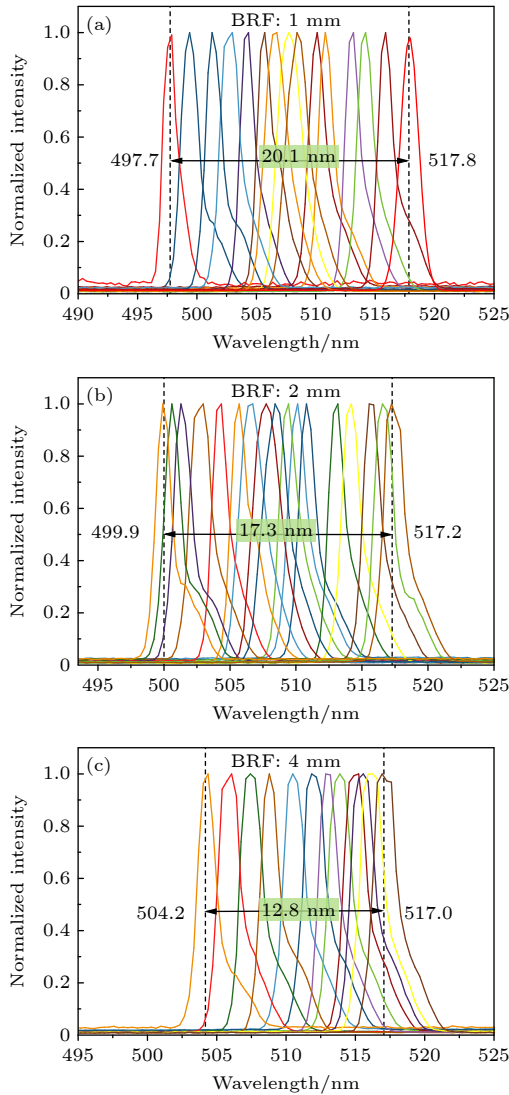


图 5 BRF 厚度为 1, 2, 4 mm 倍频绿光的波长调谐范围
Fig. 5. Tuning range of the frequency-doubled green laser with BRF thicknesses of 1, 2, and 4 mm.

接下来对该可调谐激光器的最大输出特性进行研究, 测量没有放置非线性晶体 LBO 时基频激光的输出功率, 然后对比实验所得的最大倍频蓝光功率 (即 LBO 长度为 10 mm, BRF 厚度为 2 mm 条件下的倍频绿光输出功率). 如图 7 所示, 当 TEC

设置温度为 11°C 时, 基频激光与倍频激光的阈值均为 2.5 W 左右. 当吸收泵浦功率为最大值 50 W 时, 基频激光输出功率为 12.07 W, 倍频绿光输出功率为 8.23 W, 对于整个激光器的倍频转换效率最高为 68.2%. 随着泵浦功率的增大, 吸收泵浦光到绿光的光学转换效率呈现逐渐增大的趋势. 整个过程中, 最大光-光转换效率为 16.6%.

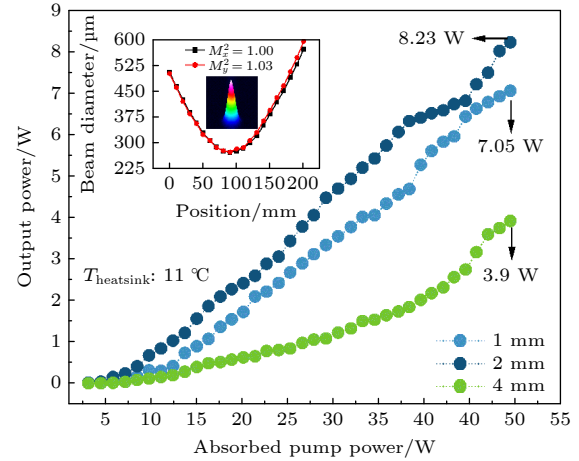


图 6 腔内插入厚度为 1, 2, 4 mm 的 BRF 时倍频绿光的输出功率曲线

Fig. 6. Output powers of the frequency-doubled green laser under different BRF thicknesses of 1, 2, and 4 mm.

不同厚度的 BRF 不仅用于对激光波长进行调谐, 而且对激光线宽也具有一定程度的压缩作用, 进而影响激光器整体的输出性能, 激光的谱线宽度定义为

$$\Delta\delta = \frac{\lambda^2}{2\Delta nd}, \quad (2)$$

其中, λ 为激光波长, $\Delta n = n_o - n_e$ 是 o 光和 e 光的折射率差, d 为 BRF 的厚度, BRF 越厚压窄线宽效果越好. 图 8 为 VECSEL 自由运转及插入不同厚度 BRF 时输出激光的谱线宽度. 自由运转下 509 nm 激光的线宽为 2.65 nm, 在腔内插入 1, 2, 4 mm 厚度 BRF 情况下, 509 nm 激光的线宽分别为 2.32, 1.71, 1.47 nm, 线宽最大压缩了 44.5%. 可以看出, 在谐振腔内使用单个 BRF 时, BRF 的厚度越大, 激光谱线宽度越窄, 与理论相符.

结合图 5(a)、图 6 以及图 8 可知, 3 种厚度的 BRF 并非越薄越好. 从输出功率和调谐范围来看, 相比 2 mm 厚的 BRF, 1 mm 厚的 BRF 带来的腔损耗小, 但是压窄激光线宽的效果差, 对应的输出功率偏低.

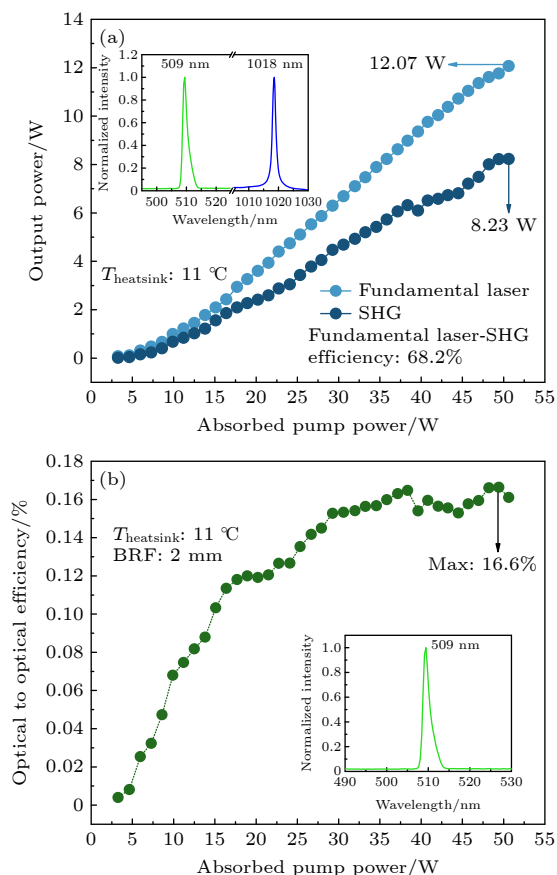


图 7 (a) 基频激光与倍频绿光功率对比曲线; (b) 吸收泵浦光到倍频绿光转换效率曲线

Fig. 7. (a) Comparison of the output powers of the fundamental laser and the frequency-doubled green laser; (b) the optical-to-optical efficiency from absorbed pump laser to green laser.

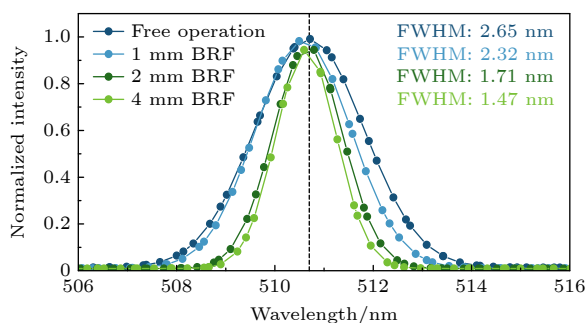


图 8 自由运转及插入不同厚度 BRF 时 VECSEL 的光谱线宽

Fig. 8. Spectral linewidths of the VECSEL under free operation and inserting BRF with different thicknesses.

4 结 论

利用设计波长为 1018 nm 的半导体增益芯片, 结合结构紧凑的 V 型谐振腔和 I 类相位匹配 LBO 晶体进行腔内倍频, 实现了 509 nm 的高功率和宽

调谐 VECSEL. 使用 1 mm 厚的 BRF 获得了基频光 47.1 nm 和倍频绿光 20.1 nm 的最大连续可调谐范围. 使用 2 mm 的 BRF 时该激光器在连续调谐过程中绿光最大输出功率超过 8 W, 倍频转换效率达到 68.2%. 使用 4 mm 的 BRF 时绿光激光线宽为 1.47 nm, 压窄线宽效果最好. 倍频绿光 VECSEL 的光束质量优良, M^2 因子在 x 和 y 方向分别为 1.00 和 1.03, 接近衍射极限. 该激光器可以同时获得较高的输出功率、较宽的调谐范围、以及良好的光束质量, 在生物医学、激光显示、光谱分析、激光加工等许多领域发挥重要作用, 具有很大的市场应用价值.

参考文献

- [1] Xu Q Y, Chen S W 2004 *Physics* **33** 508 (in Chinese) [徐庆扬, 陈少武 2004 *物理* **33** 508]
- [2] Zhou Y H, Zhang J, Feng A X, Shang D Z, Chen Y, Tang J, Yang H H 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 0602116 (in Chinese) [周远航, 张健, 冯爱新, 尚大智, 陈云, 唐杰, 杨海华 2021 *中国激光* **48** 0602116]
- [3] Jin X, Zhang L, Zhou Y, Wang L, Chao F F 2019 *Chin. J. Laser Med. Surg.* **28** 308 (in Chinese) [金熙, 张磊, 周颖, 王磊, 曹芬芬 2019 *中国激光医学杂志* **28** 308]
- [4] Nie W, Kan R F, Yang C G, Chen B, Xu Z Y, Liu W Q 2018 *Chin. J. Lasers* **45** 0911001 (in Chinese) [聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 陈兵, 许振宇, 刘文清 2018 *中国激光* **45** 0911001]
- [5] Lin H, Wang X M, Lu J J, Li W Z 2010 *Laser Optoelectron. P.* **47** 120101 (in Chinese) [林宏, 王新民, 卢金军, 李卫中 2010 *激光与光电子学进展* **47** 120101]
- [6] Rahimi-Iman A 2016 *J. Optics-UK* **18** 093003
- [7] Guina M, Rantamäki A, Härkönen A 2017 *J. Phys. D Appl. Phys.* **50** 383001
- [8] Mangold M, Wittwer V J, Sieber O D 2012 *Opt. Express* **20** 4136
- [9] Chang-Hasnain C J. 2000 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **6** 978
- [10] Li H J, Zhang M, Li F Q 2016 *Chin. J. Lasers* **43** 0302003 (in Chinese) [李慧娟, 张森, 李凤琴 2016 *中国激光* **43** 0302003]
- [11] Wu Y, Shen Y, Addamane S, Reno J L, Williams B S 2021 *Opt. Express* **29** 34695
- [12] Borgentun C, Bengtsson J, Larsson A, Demaria F, Hein A, Unger P 2010 *Semiconductor Lasers and Laser Dynamics IV. SPIE Brussels Belgium April 3, 2010* p7720247
- [13] Borgentun C, Hassenius C, Bengtsson J, Fallahi M, Larsson A 2011 *IEEE Photonics J.* **3** 946
- [14] Nakdali D A, Gaafar M, Shakfa M K, Zhang F, Vaupel M, Fedorova K A, Koch M 2015 *IEEE Photonic. Tech. L.* **27** 1128
- [15] Broda A, Wójcik-Jedlińska A, Sankowska I, Wasiak M, Wieckowska M, Muszalski J 2017 *IEEE Photonic. Tech. L.* **29** 2215
- [16] Qiu X L, Wang C, Li J, Li C C, Xie X Y, Wang Y L, Wei X 2022 *IEEE Photonics J.* **14** 1545707
- [17] Maclean A J, Kemp A J, Calvez S, Kim J Y, Kim T, Dawson M D, Burns D 2008 *IEEE J. Quantum Elect.* **44** 216
- [18] Lin J P, Helen M P, David J S, Craig J H, Malcolm-Graeme P A 2012 *Opt. Express* **20** 5219
- [19] Hein A, Menzel S, Unger P 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 111109
- [20] Lukowski M, Hassenius C, Fallahi M 2014 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **21** 432

- [21] Qiu X L, Chen X H, Zhu R J, Zhang P, Guo Y H Y, Song Y R 2019 *Chin. J. Lasers* **46** 0401002 (in Chinese) [邱小浪, 陈雪花, 朱仁江, 张鹏, 郭于鹤洋, 宋晏蓉 2019 *中国激光* **46** 0401002]
- [22] Boyd G D, Kleinman D A 1968 *J. Appl. Phys.* **39** 3597
- [23] Smith A V 2018 *Crystal Nonlinear Optics: With SNLO Examples* (Albuquerque: AS-Photonics)
- [24] Smith A V 2003 *Proc. SPIE* **4972** 50

509 nm high power wide-tuned external cavity surface emitting laser^{*}

Wang Tao¹⁾ Peng Xue-Fang¹⁾ He Liang¹⁾ Shen Xiao-Yu¹⁾ Zhu Ren-Jiang¹⁾
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 11 April 2024; revised manuscript received 26 April 2024)

Abstract

High power widely tunable green lasers have potential applications in many fields such as biomedicine, lidar, laser spectroscopy, laser display, underwater wireless optical communication, and fine processing of nonferrous metals. Vertical-external-cavity surface-emitting lasers, also known as semiconductor disk lasers, have the advantages of high power, good beam quality, and wide bandwidth of gain medium. In this work, a gain chip with a reverse-growth epitaxy structure and an emitting wavelength of 1018 nm is designed. In the DBR reflection spectrum, a bandwidth of 74 nm is achieved above a reflectivity of greater than 99.1%, laying a solid foundation for achieving high-power widely tunable output. The laser cavity combines a 1018 nm semiconductor gain chip, a folded mirror, and a plane mirror to construct a compact V-type resonant cavity. A class-I phase-matched LBO nonlinear crystal with a length of 10 mm is placed at the beam waist of the cavity to realize an efficient frequency doubling process to produce a 509 nm green laser. To meet the requirement for the polarization during frequency conversion and to tune the oscillating wavelength of the laser, a birefringent filter (BRF) is employed in the laser resonant cavity. When the thickness of the used BRF is 1 mm, the obtained wavelength tuning range of the fundamental laser and the frequency doubled green laser are 47.1 nm and 20.1 nm, respectively, showing a good tuning capability of the laser. The laser's performance varies with the thickness of the BRF. When using a 2 mm BRF, a maximum power output of the frequency-doubled green laser reaches 8.23 W during continuous tuning, indicating an ideal compatibility of wide tuning characteristics with a high power output. Meanwhile, its beam quality M^2 factors are 1.00 and 1.03 in the x - and y -direction, respectively, demonstrating a near diffraction-limited excellent beam quality. This green laser also possesses a frequency doubling conversion efficiency of up to 68.2%, which can efficiently converse the fundamental laser into the frequency doubled green laser. The optical-to-optical conversion efficiency from the absorbed pump light to the frequency-doubled green light also reaches 16.6%. Meanwhile, from the spectral linewidths of the green lasers under different thickness values of BRFs it is found that the thicker the BRF, the narrower the laser line width is, which is consistent with the theoretical result.

Keywords: external cavity surface emitting laser, intracavity frequency doubling, green laser birefringent filter, tunable laser

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

DOI: 10.7498/aps.73.20240499

* Project supported by the Cooperation Project between Chongqing Local Universities and Institutions of Chinese Academy of Sciences, Chongqing Municipal Education Commission, China (Grant No. HZ2021007), 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 Foundation, China (Grant No. 23XLB003).

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