

文章编号: 1000-7032(2024)09-1531-08

高功率 1 150 nm 垂直外腔面发射半导体激光器

张志军¹, 陈 贺², 张 卓^{3*}, 刘志君¹, 张建伟³, 杜子业^{3,4},
周寅利³, 张 星⁵, 陈 超³, 宁永强³, 王立军³

(1. 辽宁科技学院 电气与自动化工程学院, 辽宁 本溪 117004;

2. 华晨宝马汽车有限公司, 辽宁 沈阳 110000;

3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 特种发光科学与技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

4. 中国科学院大学 大珩学院, 北京 100049;

5. 长春中科长光时空光电技术有限公司, 吉林 长春 130102)

摘要: 针对目前激光医疗、食品药品检测等领域对橙黄色激光的应用需求, 开展了高功率基频光 1 150 nm 垂直外腔面发射半导体激光器(VECSEL)研究。提出激光谐振腔内大尺寸基模光斑外腔结构, 使 VECSEL 腔内模式匹配较大泵浦光斑尺寸, 实现了高功率激光输出; 提出增益峰-腔模失谐结构, 增益峰与腔模温漂系数不同, 高泵浦功率下具有良好的增益峰-腔模匹配, 实现高泵浦功率工作下的激光波长稳定控制。制备的 VECSEL 器件在 1 150 nm 激光波长的输出功率达到 9.38 W, 并获得良好的圆形对称的输出光斑形貌, 光斑在正交方向上的发散角分别为 7.3° 和 7.5°。

关键词: 半导体激光器; 垂直外腔面发射半导体激光器; 增益芯片; 应变量子阱

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240126

High Power 1 150 nm Vertical External-cavity Surface Emitting Semiconductor Laser

ZHANG Zhijun¹, CHEN He², ZHANG Zhuo^{3*}, LIU Zhijun¹, ZHANG Jianwei³, DU Ziyue^{3,4},
ZHOU Yinli³, ZHANG Xing⁵, CHEN Chao³, NING Yongqiang³, WANG Lijun³

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi 117004, China;

2. BMW Brilliance Automobile Co., Ltd., Shenyang 110000, China;

3. Key Laboratory of Luminescence Science and Technology, Chinese Academy of Sciences & State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

4. Daheng College, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

5. Changchun ACE Photonics Co., Ltd., Changchun 130102, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhangzhuo@ciomp.ac.cn

Abstract: Aiming at the application requirements of orange-yellow laser in the fields of laser medicine, food and drug detection, we have carried out research on high-power fundamental frequency 1 150 nm vertical external cavity surface emitting semiconductor laser (VECSEL). In this paper, a large-size fundamental mode spot external cavity structure in the laser resonant cavity is proposed to make the VECSEL cavity mode match the larger pump spot size to

收稿日期: 2024-05-08; 修订日期: 2024-05-22

基金项目: 2024 辽宁省教育科技创新团队项目(2024JYTKYT-D-21); 辽宁省教育厅青年项目(LJKQZ20222339); 2023 年辽宁省教育厅基本科研(面上)项目(JYTMS20231799); 辽宁科技学院 2023 年博士科研启动基金项目(2307B01); 吉林省产业核心技术攻关项目(20220201066GX); 吉林省中青年卓越人才团队项目(20240601031RC); 国家自然科学基金(62304224, 62274165, 62090061); 中国博士后科学基金资助项目(GZC20232977, 2024T170998)

Supported by 2024 Liaoning Provincial Department of Education Science and Technology Innovation Team Project (2024JYTKYT-D-21); Youth Project of Liaoning Provincial Department of Education (LJKQZ20222339); Basic Scientific Research (general) Project of Liaoning Provincial Department of Education in 2023 (JYTMS20231799); Liaoning University of Science and Technology 2023 Doctoral Research Start-up Fund Project (2307B01); Jilin Province Industrial Core Technology Research Project (20220201066GX); Jilin Province Young and Middle-aged Outstanding Talent Team Project (20240601031RC); National Natural Science Foundation (62304224, 62274165, 62090061); China Postdoctoral Science Foundation (GZC20232977, 2024T170998)

achieve high-power laser output. The gain peak-cavity mode detuning structure is proposed. The gain peak is different from the temperature drift coefficient of the cavity mode. The gain peak-cavity mode matching is good at high pump power, and the laser wavelength stability control under high pump power is realized. The output power of the VECSEL device prepared by us reaches 9.38 W at the laser wavelength of 1 150 nm, and a good circular symmetrical output spot morphology is obtained. The divergence angles of the spot in the orthogonal direction are 7.3° and 7.5°, respectively.

Key words: semiconductor laser; vertical external cavity surface emitting semiconductor laser (VECSEL); gain chip; strained quantum well

1 引 言

光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器 (Vertical external-cavity surface-emitting semiconductor laser, VECSEL) 兼具半导体激光器和固体激光器的优点, 具有功率高、波长覆盖范围广、光束质量好、波长可调谐等优点^[1-3]。VECSEL 独特的外部谐振腔结构内可以置入非线性光学晶体、标准具、双折射滤波片等光学元器件进行频率转换、线宽压窄、波长调谐等操作, 极大地扩展了半导体激光器的波长覆盖范围及应用领域^[4-7]。

随着激光技术的进步, 波长在 560~600 nm 波段的橙黄色激光已经在生物医学、食品药品检测、纳导星探测等领域得到了广泛的应用^[8-13]。橙黄色激光具有良好的穿透性, 可选择性地被血红蛋白吸收, 可以用于血管瘤、鲜红斑痣、视网膜脱落等疾病激光治疗^[8-10]。橙黄色激光可以有效激发大气中的钠原子, 实现空间目标的探测与识别^[12-13]。缺乏高性能、低成本、小体积的橙黄色激光光源限制了橙黄光激光技术应用的发展。目前, 560~600 nm 波段缺乏直接输出激光的高增益半导体材料, 采用材料增益较高的 1 120~1 200 nm 波段基频光进行倍频输出橙黄光的方案是近年来研究的热点^[14-15]。固体激光器可以通过腔内倍频的方式实现橙黄色激光输出, 但是存在体积较大、系统复杂等问题^[16]。而 VECSEL 体积相对较小, 并且具有灵活的外部谐振腔结构和较高的腔内循环功率, 可以在高光功率密度的腔内置入非线性晶体实现高效率频率转换^[17]。通过高功率近红外波段 VECSEL 腔内倍频的技术方案可以实现高功率、高光束质量的可见光波段激光输出。因此, 实现高性能橙黄色激光输出的核心问题在于高功率、高光束质量的基频光 VECSEL 增益芯片的设计和制备。

560~600 nm 波段橙黄色激光对应的基频光

波长在 1 120~1 200 nm, InGaAs 量子阱需要较高的 In 组分实现长波长激光输出。而高 In 组分的 InGaAs 量子阱与 GaAs 衬底晶格尺寸不匹配, 具有较大的压应变, 量子阱的 In 组分越高材料应变越大。光泵浦 VECSEL 增益芯片结构无需掺杂, 通过量子阱两侧的泵浦光吸收层吸收泵浦光实现光生载流子的注入, 调控泵浦光的泵浦区域可以实现大面积均匀的载流子注入。高功率 VECSEL 有源区一般采用 10 层左右的量子阱来提供足够高的材料增益^[18], 而高 In 组分量子阱增益芯片结构在外延生长制备中会产生应变积累带来大量晶格缺陷, 严重影响器件工作性能。为解决增益芯片内应变积累问题, 芬兰坦佩雷大学 Tomi 等^[19]在 InGaAs 量子阱晶格中添加少量的氮原子形成 InGaNAs 量子阱结构。氮原子的添加降低了量子阱的晶格常数, 从而降低增益芯片内部的应变积累。但是, 在增益芯片结构外延生长过程中氮原子的组分控制困难, 无法实现精准的 InGaNAs 量子阱结构生长^[20]。美国亚利桑那大学、德国乌尔姆大学等^[21-23]单位为解决上述问题, 提出采用具有反向应变效应的 GaAsP 材料层进行应变补偿的方案缓解增益芯片内部应变效应。压应变 InGaAs 量子阱两侧采用具有张应变效应的 GaAsP 势垒层进行应变补偿, 抵消 InGaAs 带来的应变效应, 实现了高增益、低缺陷的增益芯片制备。近年来, 国内对 1 120~1 200 nm 波段 VECSEL 研究进展较慢, 中国科学院长春光机所提出二次应变补偿技术解决量子阱应变积累问题, 报道了 1 160 nm VECSEL 超过 1 W 的输出^[24]。国内其他单位相关报道较少。VECSEL 增益峰随温度的升高会向长波长方向漂移, 高泵浦功率下工作的激光器芯片温度较高, 量子阱增益峰存在一定的偏移量^[25]。因此, 增益芯片量子阱结构的增益峰设计要在输出波长的短波长方向偏移, 与激光器 F-P 腔模式

存在一定的失谐量,使激光器在高温工作时实现较好的增益峰-腔模匹配^[26-28]。

本文报道了高功率1 150 nm波段VECSEL的研制结果。提出外部谐振腔内光束分布控制,增大增益芯片表面基模光束半径匹配大尺寸泵浦光斑,实现高功率激光输出;提出增益峰-腔模失谐结构,实现高泵浦功率下激光波长输出的稳定控制。介绍了采用的器件结构、外部谐振腔结构对腔内基模光束尺寸的影响,重点介绍了器件性能测试结果。

2 实 验

2.1 器件结构

VECSEL系统结构如图1所示,由循环水冷却系统散热底座、半导体制冷器(Thermoelectric cooler, TEC)、铜热沉、增益芯片、输出耦合镜和泵浦系统组成。其中,泵浦系统由最大输出功率为100 W的光纤耦合输出808 nm半导体激光器和光纤输出端的聚焦镜组构成。聚焦镜组用来调节增益芯片表面泵浦光斑尺寸。TEC可以精准地控制增益芯片工作温度,由散热底座的循环水冷却系统带走TEC工作时产生的废热。

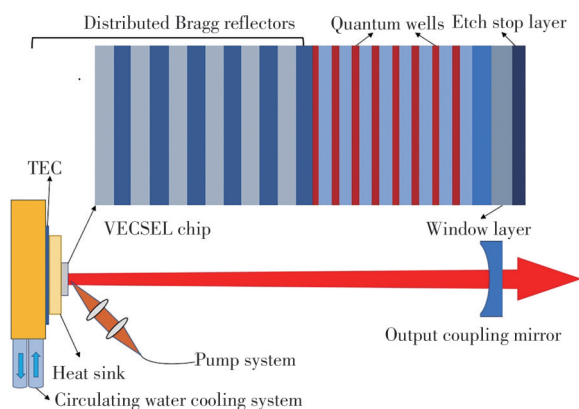


图1 VECSEL系统结构示意图及增益芯片结构示意图

Fig.1 VECSEL system structure diagram and gain chip structure diagram

增益芯片结构采用底部发射结构,在衬底上倒着生长增益芯片结构,之后移除衬底露出窗口层,如图1中插图所示。VECSEL增益芯片由分布式布拉格反射镜(Distributed Bragg reflector, DBR)、多量子阱有源区、窗口层和刻蚀停止层组成。最外层的DBR由30对1/4波长厚度的GaAs/AlAs材料层相互堆叠形成,在1 150 nm波段具有宽带宽高达99.9%的反射率。有源区内有9个周

期性分布的 $\text{In}_{0.38}\text{GaAs}$ 量子阱结构,每个量子阱的厚度为7 nm。应变补偿材料层厚度采用Matthews和Blakeslee平衡模型计算,高In组分量子阱两侧分布5 nm厚的GaAsP材料层进行应变补偿。两个量子阱之间插入 $\text{Al}_{0.06}\text{GaAs}$ 势垒层使量子阱位于光场振荡的波峰位置,提供周期性增益。势垒层也作为光吸收层,吸收泵浦光,产生光生载流子。有源区外侧生长势垒较高100 nm厚的Al-GaAs窗口层,防止有源区内光生载流子溢出发生非辐射跃迁。最内层是130 nm厚的InGaP刻蚀停止层,用于在衬底剥离工艺中保护增益芯片结构。底部发射增益芯片结构外延制备完成之后,首先通过蒸镀金属层对最外侧DBR结构进行预金属化,然后将外延片切割成3 mm×3 mm的增益芯片焊接至热沉。焊接后的增益芯片通过机械减薄的方式移除大部分衬底,剩余约300 μm的衬底使用化学腐蚀的方式剥离。在化学腐蚀过程中,InGaP刻蚀停止层对化学试剂($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2=1:20$)反应较慢,可以有效地保护增益芯片结构。

2.2 外腔结构设计

VECSEL外部谐振腔由增益芯片底部的DBR和输出耦合镜构成,激光模式在腔内振荡获得周期性增益。泵浦系统采用倾斜泵浦方式,泵浦系统与增益芯片夹角约为40°。泵浦光倾斜照射到增益芯片表面,泵浦光斑呈椭圆形,而增益芯片表面基模光斑为圆形,增益芯片表面的基模光斑尺寸与泵浦光斑匹配时,激光器能获得最佳输出。增大泵浦光斑尺寸并调节外腔结构保持腔内基模光斑匹配,可以在保持高光束质量的同时增大输出功率,实现输出功率的缩放。VECSEL可支持的最大泵浦光斑尺寸与热沉散热能力相关,泵浦光斑尺寸的临界半径为^[29]:

$$\omega_{\text{crit}} = \sqrt{\frac{8}{\pi} \frac{\kappa_{\text{hs}} d}{\kappa_{\text{se}}}}, \quad (1)$$

其中 d 是增益芯片材料的厚度, κ_{hs} 是热沉的热导率, κ_{se} 是增益芯片材料的热导率。根据公式推算,本文中使用铜热沉的VECSEL泵浦光斑临界半径约为250 μm。激光器工作时的泵浦光斑必须小于临界泵浦光斑尺寸。因为泵浦光斑尺寸增大会使增益芯片表面的传热面积增大,导致增益芯片的热阻降低。一旦超过临界泵浦光斑尺寸,增益芯片热阻将小于热沉的热阻,热沉将失去散热作用,导致有源区内热量快速积累,造成激光器热熄灭。

增益芯片表面的基模光斑尺寸由输出耦合镜曲率半径和外部谐振腔腔长共同决定,通过控制曲率半径和外部谐振腔腔长可以实现基模光斑尺寸的精准控制。输出耦合镜曲率半径为 300, 400, 500 mm 时,增益芯片表面基模光斑尺寸随外部谐振腔腔长变化如图 2 所示。不同曲率半径的输出耦合镜的腔内基模光斑随外部谐振腔腔长的增加具有相同的变化趋势。随着外部谐振腔腔长的增加,增益芯片表面光束半径逐渐增大,在腔长约为输出耦合镜曲率半径 1/2 时达到最大值。本文中 VECSEL 器件的临界泵浦光斑尺寸约为 250 μm ,因此选择曲率半径为 400 mm 的输出耦合镜,外部谐振腔腔长约为 200 mm。

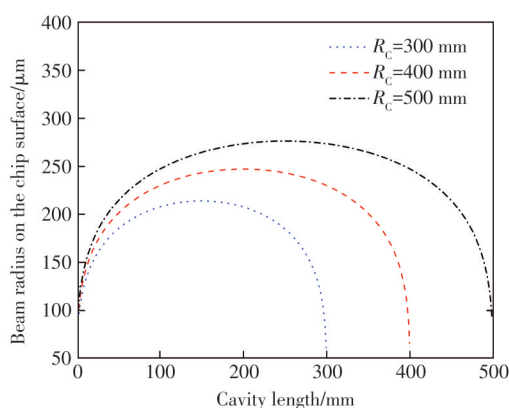


图 2 不同曲率半径下增益芯片表面基模光束与外部谐振腔腔长的关系

Fig.2 The relationship between the fundamental mode beam on the surface of the gain chip and the cavity length under different curvature radii

3 结果与讨论

VECSEL 增益芯片移除衬底后,通过反射谱和增益谱的测量对其基本性能进行表征,如图 3 所示。反射光谱由红色曲线标出,增益谱在 1 150 nm 附近具有大约 110 nm 宽度的高反射率带。反射带中有一个明显的凹陷,是增益芯片结构法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 共振效应引起的 F-P 腔模式,对应 VECSEL 的激光输出位置^[26]。F-P 腔模式位于 1 152 nm,代表 VECSEL 的激射波长。增益芯片解理后的芯片边缘没有材料层阻挡,可以直接测量量子阱产生的光致发光 (Photoluminescence, PL) 光谱。在 TEC 控制温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,调节泵浦光功率为 3.9 W,从增益芯片的边缘测量的 PL 谱归一化之后用黑色点线标出。在芯片边缘测量的 PL 谱是没有经过腔模修

饰的量子阱的本征增益。未经腔模修饰的量子阱的 PL 谱峰值位于 1 136 nm。从增益芯片的正面测量的 PL 谱归一化之后用蓝色点划线标出。经过腔模修饰的 PL 峰值位于 1 140 nm,与腔模位置存在 12 nm 的偏移。随着温度的升高,增益芯片材料增益和折射率发生变化,导致量子阱增益峰值的红移和腔模位置的红移。量子阱增益峰值的温度漂移速度比腔模温度漂移速度快^[25]。因此,随着 VECSEL 工作温度的升高,激光器增益峰越接近腔模位置。在泵浦功率较高的时候,增益峰值与腔模式相匹配,可以实现高功率激光输出。

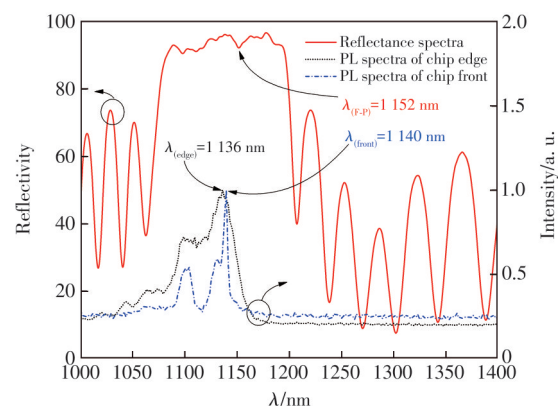


图 3 增益芯片反射谱与芯片边缘和芯片表面测得的增益谱

Fig.3 Gain chip reflection spectra and gain peaks measured at the edge and surface of the chip

VECSEL 增益芯片的增益光谱会随有源区温度的升高而出现红移。因此,在 TEC 控制温度为 20 $^{\circ}\text{C}$ 时,对不同泵浦功率下增益芯片正面的增益光谱进行了测量,结果如图 4 所示。VECSEL 的腔模位置随温度红移的速度远低于量子阱增益峰红移的速度^[25]。因此,我们固定腔模位置为 1 152 nm,观察增益峰随泵浦功率增加产生的温度漂移。随着泵浦功率的提升,有源区内光生载流子注入增多,量子阱材料增益明显增加。在泵浦功率为 22.3 W 时,增益光谱出现明显的增益峰,增益峰位于 1 140 nm。随着泵浦功率继续提升,有源区温度快速升高,增益光谱峰值出现明显的红移。在泵浦功率为 33.9 W 时,增益峰位于 1 153 nm,已经漂移到腔模右侧。随着泵浦功率继续提升,有源区内温度积累过高,非辐射复合增加,导致材料增益降低。此时,VECSEL 增益芯片无外部腔镜结构,增益芯片吸收的泵浦功率无法

输出,有源区温度升高过快,导致材料增益降低提前出现。

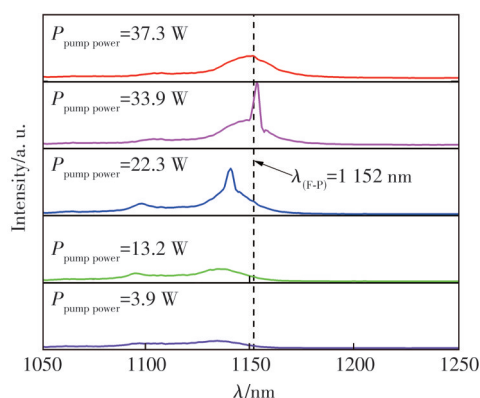


图4 增益芯片增益光谱随泵浦功率的变化

Fig.4 The variation of gain spectrum of gain chip with pump power

根据模拟结果,采用曲率半径为400 mm的输出耦合镜(1 150 nm波段反射率~97.5%)搭建外部谐振腔进行VECSEL输出性能测试。在循环水冷却系统制冷为20℃的条件下,TEC控制工作温度分别为0℃、5℃和10℃,测得VECSEL功率曲线如图5所示。不同工作温度的功率曲线存在相似的变化趋势。随着泵浦功率增加,输出功率逐渐增加,并且存在线性增长区域。泵浦功率继续增加,散热器无法及时导出增益芯片产生的废热,导致有源区内部工作温度较高,非辐射跃迁增加,输出效率降低,出现热翻转。由于VECSEL增益芯片增益峰与腔模的失谐结构设计,工作温度较高时,增益峰与腔模失谐量减少,激光器阈值泵浦功率降低。在泵浦功率达到热翻转前,相同吸收泵浦功率下,工作温度越高,激光器输出功率也越高。在工作温度为0℃时,1 150 nm激光最高输

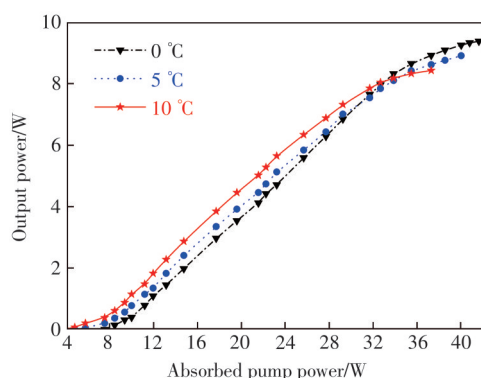


图5 VECSEL输出功率与吸收泵浦功率的关系

Fig.5 The relationship between the output power of VECSEL and the absorbed pump power

出功率达到9.38 W。

不同泵浦功率下VECSEL输出波长的变化与半高全宽的变化如图6所示。随着泵浦功率的提升,不同工作温度的激光器输出波长均向长波长漂移,输出波长呈阶梯状从1 136 nm漂移到1 150 nm。相同泵浦功率下,工作温度越高的激光器输出波长向长波长漂移越多。增益峰随温度升高产生温度漂移导致输出波长红移,工作温度越高,输出波长向长波长漂移越多。本文中泵浦光斑半径约为250 μm,激光器泵浦区域尺寸较大。高泵浦功率下,因热沉散热速率有限,引起泵浦区域内存在温度梯度分布,导致输出激光模式存在差异,输出模式简并后的光谱较宽。不同工作温度的激光光谱的半高全宽范围在3~7.1 nm。

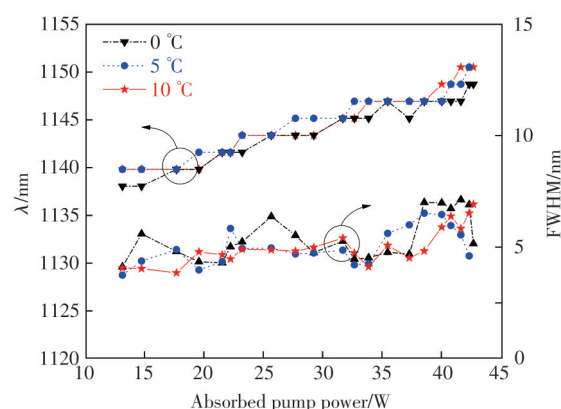


图6 VECSEL输出波长与半高全宽随泵浦功率的变化

Fig.6 The variation of VECSEL output wavelength and full width at half maximum with pump power

VECSEL工作温度为0℃、输出功率为9.38 W时,对激光输出波长与在远场光场分布发散角进行了测试。激光输出波长如图7(a)所示,输出波长为1 150 nm,半高全宽为5.16 nm。输出波长光谱无明显侧峰,激光器在高泵浦功率下实现稳定的1 150 nm激光输出。激光输出光束远场发散角分布如图7(b)所示,插图为电荷耦合器件(Charge-coupled device, CCD)直接捕获的输出光束的二维强度分布轮廓。VECSEL激光输出为圆形对称光斑,呈高斯分布,输出光束在水平和竖直方向上的发散角(全角 $1/e^2$)分别为7.3°和7.5°。在高泵浦功率下,激光器可以保持较好的圆形对称光束强度分布,并且拥有较小的发散角。

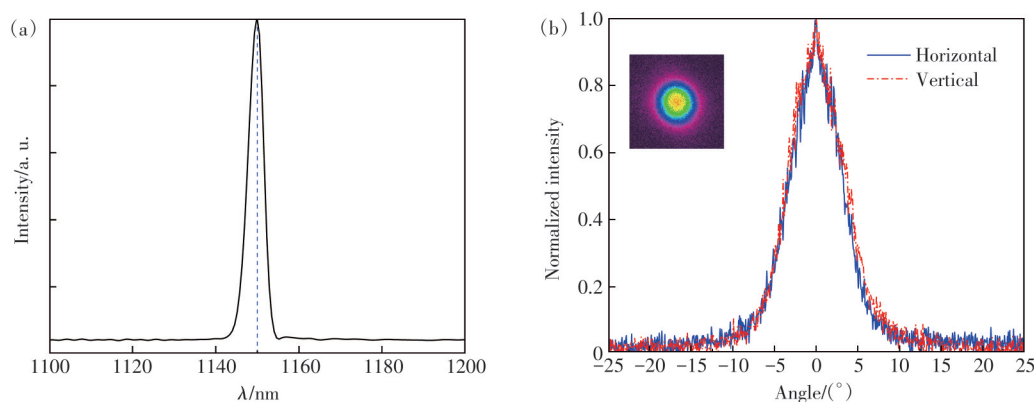


图7 (a)VECSEL输出光谱;(b)光束强度远场分布,插图为输出光束轮廓

Fig.7 (a)VECSEL output spectrum. (b)Far-field distribution of beam intensity. The illustration is the outline of the output beam

4 结 论

本文提出了 VECSEL 增益峰-腔模失谐增益芯片结构,在高泵浦功率下实现良好的增益峰-腔模匹配,结合腔内基模光束调节匹配大泵浦光斑尺寸,实现了波长稳定控制的高功率输出。所制备的 VECSEL 器件在 1 150 nm 激光波长的输出功率达到 9.38 W,并获得良好的圆形对称的输出光斑形貌。未来可通过腔内倍频输出橙黄色激光,

满足橙黄光医疗、食品药品检测等需求。总体看来,VECSEL 输出功率仍有提升空间,后续工作中将对 VECSEL 散热结构进行改进,以进一步提高基频光功率水平;探究高效率倍频外腔结构,实现高性能橙黄色激光输出。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240126>.

参 考 文 献:

- [1] NECHAY K, PERTTILÄ R, ESSAULOVA A, *et al.* High-power VECSEL with intracavity UV generation for flow cytometry applications [C]. *Proceedings of SPIE 12853, High-speed Biomedical Imaging and Spectroscopy IX, San Francisco, USA, 2024*: 1285306.
- [2] 张继业, 张建伟, 曾玉刚, 等. 高功率垂直外腔面发射半导体激光器增益设计及制备 [J]. *物理学报*, 2020, 69(5): 054204.
 ZHANG J Y, ZHANG J W, ZENG Y G, *et al.* Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2020, 69(5): 054204. (in Chinese)
- [3] 王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展 [J]. *发光学报*, 2015, 36(1): 1-19.
 WANG L J, NING Y Q, QIN L, *et al.* Development of high power diode laser [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2015, 36(1): 1-19. (in Chinese)
- [4] TSAI S L, CHO C Y. Generating dual-wavelength VECSEL by selecting birefringence filter material and the application toward mid-infrared region *via* intracavity OPO [J]. *Opt. Express*, 2023, 31(15): 24555-24565.
- [5] CASTILLO-PINTO C, CLERC M, OTTEVAERE H, *et al.* Experimental characterization of quasiperiodic route to chaos in a VECSEL with SESAM [J]. *Opt. Lett.*, 2024, 49(2): 383-386.
- [6] ZHANG Z, ZHANG J W, ZHOU Y L, *et al.* Wireless optical power transmission based on the off-axis VECSEL of long resonator [J]. *Optics & Laser Technology*, 2023, 158: 108926.
- [7] NECHAY K, SCHRAMM A, MÄHÖNEN M, *et al.* Narrow linewidth VECSELs for Ba⁺ cooling at 493 nm [C]. *Proceedings of SPIE 12868, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) XIII, San Francisco, USA, 2024*: 1286802.
- [8] ILHAN C, CITIRIK M, ÖZDEMİR M. Non-damaging retinal laser therapy in chronic central serous chorioretinopathy [J]. *Int. Ophthalmol.*, 2023, 43(8): 2875-2882.

- [9] 顾勇刚, 牛健, 杨坚, 等. 激光在医疗领域中的应用 [J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(2): 283-295.
GU Y G, NIU J, YANG J, *et al.* Application of laser in the medical field [J]. *Chin. Opt.*, 2023, 16(2): 283-295. (in Chinese)
- [10] NAFIE L A. Recent advances in linear and nonlinear Raman spectroscopy. Part XIV [J]. *J. Raman Spectrosc.*, 2020, 51(12): 2354-2376.
- [11] 叶向晖, 沈于兰, 申兰慧, 等. 拉曼光谱法在食品药品分析中的应用与进展 [J]. 中国药业, 2017, 26(1): 1-5.
YE X H, SHEN Y L, SHEN L H, *et al.* Application and development of Raman spectroscopy in food and pharmaceutical analysis [J]. *China Pharm.*, 2017, 26(1): 1-5. (in Chinese)
- [12] HACKETT S, ALBRECHT A R, YANG Z, *et al.* Vertical external cavity surface emitting lasers for sodium guidestar applications and improvement of current guidestar systems [C]. *Proceedings of SPIE 9734, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) VI, San Francisco, USA*, 2016: 97340Y.
- [13] KANTOLA E, RANTAMÄKI A, LEINO I, *et al.* VECSEL-based 590-nm laser system with 8 W of output power for the treatment of vascular lesions [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2019, 25(1): 7202108.
- [14] GUINA M, RANTAMÄKI A, HÄRKÖNEN A. Optically pumped VECSELs: review of technology and progress [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2017, 50(38): 383001.
- [15] KANTOLA E, LEINONEN T, RANTA S, *et al.* High-efficiency 20 W yellow VECSEL [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(6): 6372-6380.
- [16] CHEN Y F, CHEN C M, LEE C C, *et al.* Efficient solid-state Raman yellow laser at 579.5 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2020, 45(19): 5612-5615.
- [17] RAHIMI-IMAN A. Recent advances in VECSELs [J]. *J. Opt.*, 2016, 18(9): 093003.
- [18] EKINS-DAUKES N J, KAWAGUCHI K, ZHANG J. Strain-balanced criteria for multiple quantum well structures and its signature in X-ray rocking curves [J]. *Cryst. Growth Des.*, 2002, 2(4): 287-292.
- [19] THRÄNHARDT A, KUZNETSOVA I, SCHLICHENMAIER C, *et al.* Nitrogen incorporation effects on gain properties of GaInNAs lasers: experiment and theory [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, 86(20): 201117.
- [20] LEINONEN T, HÄRKÖNEN A, KORPIJÄRVI V M, *et al.* 589 nm multi-watt narrow linewidth optically pumped semiconductor laser for laser guide stars [C]. *Advanced Solid-state Photonics, San Diego, USA*, 2010: ATuA10.
- [21] FAN L, HESSENIUS C, FALLAHI M, *et al.* Highly strained InGaAs/GaAs vertical-external-cavity surface-emitting laser for the generation of coherent yellow-orange light [C]. *Proceedings of SPIE 6871, Solid State Lasers XVII: Technology and Devices, San Jose, USA*, 2008: 687119.
- [22] KANTOLA E, PENTTINEN J P, RANTA S, *et al.* 72-W vertical-external-cavity surface-emitting laser with 1 180 nm emission for laser guide star adaptive optics [J]. *Electron. Lett.*, 2018, 54(19): 1135-1137.
- [23] PASCHKE K, BUGGE F, BLUME G, *et al.* Watt-level continuous-wave diode lasers at 1 180 nm with InGaAs quantum wells [C]. *Proceedings of SPIE 8965, High-power Diode Laser Technology and Applications XII, San Francisco, USA*, 2014: 896509.
- [24] 张卓, 宁永强, 张建伟, 等. 1 160 nm 光泵垂直外腔面发射激光器设计及制备 [J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701020.
ZHANG Z, NING Y Q, ZHANG J W, *et al.* Design and fabrication of 1 160-nm optically-pumped vertical-external-cavity surface-emitting [J]. *Chin. J. Lasers*, 2020, 47(7): 0701020. (in Chinese)
- [25] TROPPER A C, HOOGLAND S. Extended cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Prog. Quantum Electron.*, 2006, 30(1): 1-43.
- [26] YANG H P D, LU C, HSIAO R, *et al.* Characteristics of MOCVD- and MBE-grown InGa(N)As VCSELs [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2005, 20(8): 834-839.
- [27] 张志军, 陈贺, 张建伟, 等. 单片双波长输出垂直外腔面发射激光器 [J]. 发光学报, 2022, 43(8): 1266-1272.
ZHANG Z J, CHEN H, ZHANG J W, *et al.* Dual-wavelength emission of vertical external cavity surface emitting laser with single gain chip [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(8): 1266-1272. (in Chinese)
- [28] 宫玉祥, 张卓, 张建伟, 等. 增益腔模大失配型垂直外腔面发射激光器侧向激励抑制 [J]. 发光学报, 2023, 44(2): 314-320.
GONG Y X, ZHANG Z, ZHANG J W, *et al.* Restraining lateral lasing in vertical external cavity surface emitting laser with large mismatch between gain and cavity mode [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(2): 314-320. (in Chinese)

- [29] HARING R, PASCHOTTA R, ASCHWANDEN A, *et al.* High-power passively mode-locked semiconductor lasers [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, 38(9): 1268-1275.



张志军(1983-),男,黑龙江北安人,博士,副教授,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事机器人机器视觉、激光雷达技术的研究。

Email: lky91855@163.com



张卓(1996-),男,安徽阜阳人,博士,特别研究助理,2023年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事高性能面发射半导体激光器的光束与模式调控的研究。

Email: zhangzhuo@ciomp.ac.cn