

垂直外腔面发射半导体激光器的双波长调控研究

李雪^{1,2}, 张继业^{1*}, 张建伟¹, 张星^{1,3*}, 张卓^{1,2}, 曾玉刚¹, 张俊¹,
周寅利¹, 朱洪波¹, 宁永强¹, 秦莉¹, 王立军¹

- (1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学材料与光电研究中心, 北京 100049;
3. 长春中科长光时空光电技术有限公司, 吉林 长春 130102)

摘要:报道了一种结构紧凑的垂直外腔面发射激光器(Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser, VECSEL)及其双波长调控。通过调控泵浦功率,实现了 VECSEL 输出的两个激光波长之间的相互转换,双波长的间隔接近 50 nm。VECSEL 的输出功率曲线呈现明显的两次翻转,翻转点对应了激光波长的转换。这是由于泵浦功率变化改变了增益芯片内部的温度,进而通过热调谐使得发光区增益峰值被调谐到腔模的不同位置。在 0 °C 时,每个激光波长的最大输出功率都在 1.5 W 以上。随着泵浦功率的改变,激光波长可以在 950 nm 和 1000 nm 之间切换,同时还可以在 1.5 W 以上的功率水平下实现双波长同时激励。这种可切换波长及双波长同时激励的 VECSEL 器件在光调制、差频等领域有较大应用潜力。

关键词:垂直外腔面发射半导体激光器; 波长调控; 双波长

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

Switchable dual-wavelength vertical-external-cavity surface-emitting laser

LI Xue^{1,2}, ZHANG Jj-Ye^{1*}, ZHANG Jian-Wei¹, ZHANG Xing^{1,3*}, ZHANG Zhuo^{1,2}, ZENG Yu-Gang¹,
ZHANG Jun¹, ZHOU Yin-Li¹, ZHU Hong-Bo¹, NING Yong-Qiang¹, QIN Li¹, WANG Li-Jun¹

- (1. State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
3. Ace Photonics, Co., Ltd., Changchun 130102, China)

Abstract: This paper presents the design method and test results of a switchable dual-wavelength vertical-external-cavity surface-emitting laser (VECSEL). The two lasing wavelengths with the separation of 50 nm are generated at different pumping powers using one single gain chip. During the operation of the VECSEL, the thermal rollover of output power is observed twice. The first rollover indicates the first switch of lasing wavelength, which is due to the temperature rise within the gain chip and its tuned gain spectrum. The maximum output power of each emitting wavelength exceeds 1.5 W at 0 °C. The lasing wavelength can be switched between 950 nm and 1000 nm with the change of pump power, and dual-wavelength emission with output power of more than 1.5 W is demonstrated. We believe that this kind of switchable dual-wavelength VECSEL device has great application potential as dual-wavelength laser sources for providing technical support for mid-infrared radiation.

Key words: vertical external cavity surface emitting laser, switchable wavelength, dual-wavelength

收稿日期: 2022-01-12, 修回日期: 2022-07-07

Received date: 2022-01-12, revised date: 2022-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(62104225, 61874117, 11674314), 国家重点研发计划项目(2018YFB0504600), 吉林省科技发展计划项目(20200401006GX)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (62104225, 61874117, 11674314), National Key Research and Development Program of China (2018YFB0504600), Science and Technology Program of Jilin Province (20200401006GX)

作者简介(Biography): 李雪(1992-), 女, 博士研究生, 主要从事半导体激光器件的设计与实验工作 Email: lixue14@mail.ucas.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding authors): Email: zhangjiye@ciomp.ac.cn, zhangx@ciomp.ac.cn

引言

双波长激光器是一种具有较大应用潜力的光源,其应用范围包括非线性频率变换^[1]、双波长干涉技术^[2]、光通信^[3]、光动力学医疗^[4]等领域,因此备受国内外众多研究者的关注。由于半导体激光器具有效率高、质量轻、波长范围广、可靠性高等优势,如果能通过半导体激光器实现双波长激光输出,则十分有利于推动双波长光源的实用化进程^[5-6]。

垂直外腔面发射半导体激光器(Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser, VECSEL)兼具固体激光器和半导体激光器的优点,能够同时获得高输出功率和高光束质量^[7-9]。此外,VECSEL具有灵活的外腔结构,可以在腔内加入多种光学元件,从而实现波长调谐^[10]、锁模^[11]和非线性频率转换^[12]等功能。因此,VECSEL具有成为理想双波长半导体激光器的潜力,研究者们也一直致力于实现双波长VECSEL。

早期报道的双波长VECSEL使用了具备不同量子阱组分的增益芯片,实现了波长间隔58 nm的双波长激射^[13]。在这种VECSEL系统中,增益芯片的增益谱覆盖范围较宽,使其输出波长具有一定的可调谐范围。根据VECSEL本身增益带宽大的特点,利用腔内插入法布里-珀罗标准具和布鲁斯特窗口镜,实现了波长间隔为2.1 nm的双波长VECSEL^[14]。以上两种方案都属于结构简单且紧凑的双波长VECSEL设计思路,但是为了降低两种腔内模式之间的相互作用,必须减弱腔内耦合效应。由于单个增益芯片不能在双波长工作时提供两种不同的增益波长,因此需要两个不同的增益芯片来实现波长分离。研究者们基于双增益芯片搭建各种类型的折叠腔,如在一个共线T型谐振腔中,实现了波长间隔35 nm至52 nm的双波长输出^[15];采用Y型谐振腔,实现波长间隔达到147 nm的双波长输出^[16]等。以上双波长输出方案都使VECSEL的结构变得更复杂,增加了光源的整体尺寸。此外,结构更复杂的双波长VECSEL方案,如在增益介质中使用空间分离器件^[17]、使用衍射光栅^[18]以及叶片式的光学元件^[19]等也已经被证实可行。

在本文中,我们报道激射波长间隔达到50 nm的波长可切换VECSEL技术。与以往的双波长VECSEL结构设计相比,我们主要通过对增益谱的热调制实现波长转换。首先介绍VECSEL设计采用的基本思路与模拟结果,其次对制备的VECSEL器

件功率、光谱及光束特性进行详细分析,最后对该工作做总结介绍。

1 VECSEL结构设计

VECSEL的增益芯片采用了底发射的面发射激光器结构,如图1所示,在未掺杂的GaAs衬底上先后生长了阻挡层、共振周期结构的多量子阱有源区以及布拉格反射镜(Distributed Bragg Reflector, DBR)结构。在有源区和衬底之间生长了GaInP作为刻蚀阻挡层,主要用于仿制衬底去除工艺对芯片结构的破坏,并且其具有比泵浦吸收区更高的势垒,也能够阻止载流子扩散到表面形成非辐射复合。此增益芯片的有源区由9个InGaAs/GaAsP/AlGaAs应变量子阱组成。由于量子阱数目较多,用GaAsP作为应变补偿层补偿InGaAs量子阱的应变。DBR反射镜由27.5对交替GaAs/AlAs层组成。为了最大化热管理,VECSEL增益芯片被分割成4 mm×4 mm的正方形,然后倒装焊接到金刚石散热片上。在采用化学刻蚀去除GaAs衬底后,VECSEL器件被焊接固定在铜散热器上。散热器的温度由热电冷却器(Thermo Electric Cooler, TEC)控制,TEC热端机械固定到水冷散热器上。

VECSEL的输出耦合镜采用反射率为96%、曲率半径为80 cm的光学反射镜,耦合镜的反射谱中心为980 nm,设计带宽为100 nm。采用808 nm半导体激光器对增益芯片进行泵浦,泵浦光斑直径约为200 μm。泵浦光束以相对于VECSEL增益芯片表面的法线30°的角度聚焦在芯片上。图1中的插图显示了所设计的VECSEL增益芯片各层结构的折射率和光场分布。在整体结构设计中,9个量子阱的位置位于驻波波峰中心位置,形成共振周期结构,避免了空间烧孔效应,并且能够获得更高的光学增益^[20]。

VECSEL激光器增益介质厚度仅数微米,因此,为了获得优越的性能,发光区的材料增益必须足够大。在本文中,我们采用1 μm波段相对成熟的InGaAs/GaAsP/AlGaAs材料体系作为发光区的量子阱/应变补偿层/势垒层材料结构。对于InGaAs量子阱,其材料组分及厚度的选择主要考虑VECSEL激光器所需的增益谱峰值对应的发光波长位置。图2(a)为采用Crosslight公司的PICS3D软件模拟的发光波长在980 nm、970 nm、960 nm以及950 nm时,InGaAs量子阱的In组分及量子阱厚度对应关系。这4个发光波长所对应的量子阱组分与厚度关系的

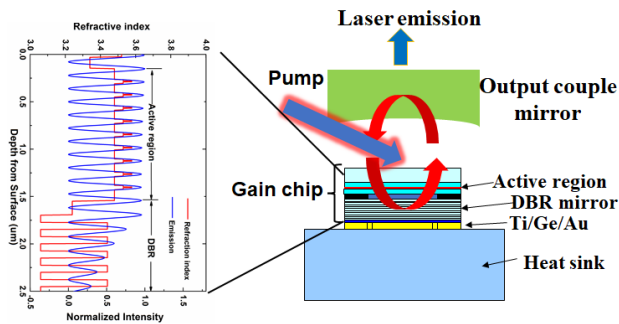


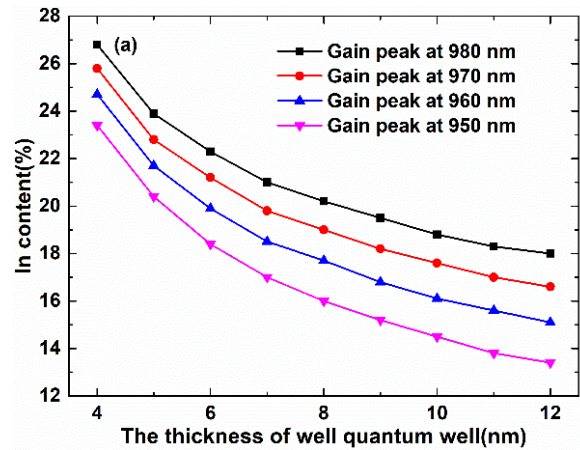
图1 VECSEL系统工作示意图,插图为该器件增益芯片的驻波光场

Fig. 1 Schematic of the VECSEL and the normalized optical field distribution within the gain chip

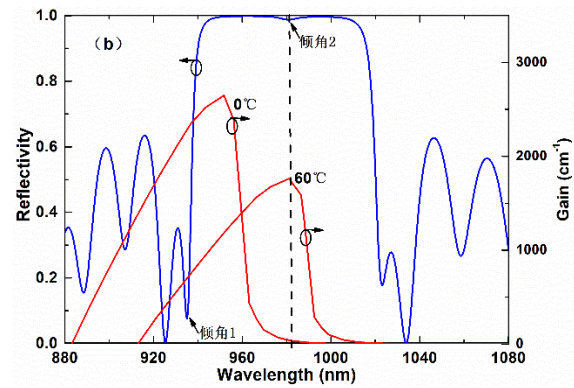
变化曲线都是呈现下降趋势。这是由于量子阱厚度的增加,导致能级量子效应减弱,相应的激光波长随之增加;而在相同量子阱厚度下,In组分越多,则量子阱能级对应的发光波长也会增加^[21]。因此,要实现所设计的发光波长,量子阱厚度与In组分呈现反比关系。考虑到InGaAs与GaAs的晶格失配效应,为保证良好的发光区材料制备质量,我们选取的量子阱厚度为8 nm。

图2(b)展示了所设计的VECSEL结构发光区增益谱和VECSEL整体反射谱。根据光学传输矩阵理论,计算得到的VECSEL增益芯片整体结构的反射谱中,可以很明显地看到腔模位置,即为反射谱曲线中阻带带宽中间位置的下降倾角,对应VECSEL的激光波长。为了获得最佳性能的输出,VECSEL有源区增益谱峰值的设计应与反射谱阻带的下降倾角相对应^[22]。而VECSEL的腔模位置(倾角)由材料折射率温漂决定,一般为 $0.06 \text{ nm}/^\circ\text{C}$;发光区增益谱峰值波长则由材料能带温漂系数决定,在 $0.3 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 左右。考虑到VECSEL器件腔模的温漂是量子阱增益谱温漂的5倍,因此在我们的设计中考虑通过增益预偏移补偿较高温度导致的热失谐,其代价是器件的阈值功率略有增加。如图2(b)所示, 0°C 时VECSEL的反射谱表明,阻带左侧倾角对应的波长为 978 nm ,而此时量子阱增益峰值所对应的波长为 953 nm ,失谐程度达到近 25 nm 。因此,此时带宽中心附近的腔膜位置几乎不能获得任何有效增益。但是在阻带左侧的倾角1可以很好地匹配增益峰值。随着温度的升高,增益峰值迅速向阻带中心附近的倾角2偏移。因此,增益谱在更高的温度下被调谐到另一个谐振模式。

因此,可以预计的是,通过调谐温度有可能使



(a)



(b)

图2 增益峰值对应不同的发光波长时,InGaAs量子阱中In组分与厚度的关系(a),及VECSEL的增益光谱与反射谱(b)
Fig. 2 The relationships between indium contents and thicknesses of InGaAs quantum wells for different gain peak wavelengths (a), and the gain- and reflectivity spectra of the VECSEL(b)

VECSEL输出双波长。

2 VECSEL器件测试结果

本研究中的VECSEL增益芯片的外延材料采用AIXTRON公司的200/4型MOCVD设备生长而成。在完整结构生长前,首先对发光区量子阱结构进行了单独生长与测试,得到了量子阱的光致发光(Photoluminescence, PL)光谱。完成整体结构生长与器件封装后,我们测试了器件的反射谱,如图3所示。反射谱测试系统是在VECSEL器件处于 0°C 下,采用白光光源垂直入射到器件表面,反射光由Ocean Optics USB4000-VIS-NIR光谱仪进行接收。图3中展示了VECSEL器件反射谱阻带位于 $940\sim 1010 \text{ nm}$

波段之间,虽然其整体光谱响应度略有下降,但是整体的反射谱形貌及腔模位置仍然是精准的。反射谱阻带中间位置的下降倾角2清楚地表明VECSEL器件共振波长为974 nm。位于反射谱阻带左侧的倾角1表示在940 nm附近的另一个共振波长。单独测试的发光区的PL光谱峰值位于950 nm附近,相对于腔模位置的波长蓝移约24 nm。因此,在0 °C下,PL光谱已经与反射谱阻带左侧的倾角1相匹配。从图3的测试结果可以看出,VECSEL器件的反射谱及发光区PL光谱位置与图2(b)中的理论设计结果基本吻合。

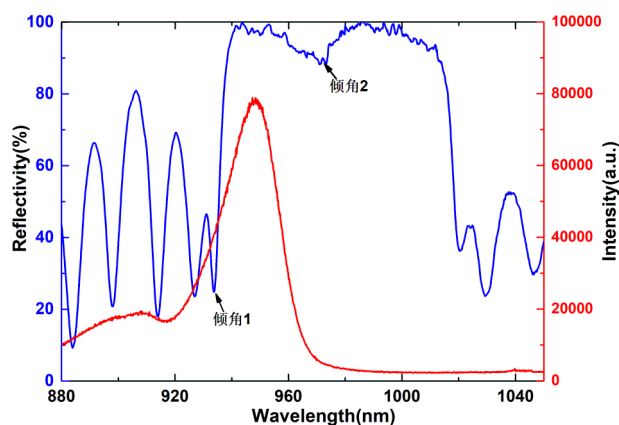


图3 VECSEL增益芯片的发光区PL光谱及整体结构反射谱

Fig. 3 The measured PL spectra of the active region and the reflectivity spectra of the gain chip

VECSEL器件的温度被TEC控制在0 °C时,测试VECSEL器件在不同泵浦功率下的PL光谱,其结果如图4所示。泵浦功率为8 W时,PL光谱只有一个位于950 nm附近的主峰被观察到,表明此时的量子阱发光波长为950 nm左右。伴随着泵浦功率的增加,有源区的温度也随之升高,950 nm附近的PL光谱峰值出现轻微的红移,并且980 nm附近的PL光谱峰值开始出现。当泵浦功率大于12 W时,PL光谱上的两个主峰分别表示在950 nm和980 nm附近的波长发射。随着泵浦功率的进一步增大,PL光谱的两个主峰峰值的相对强度发生改变,这一现象主要是由于量子阱增益谱的快速红移引起的。

随后我们将制备的VECSEL固定在散热装置上并与外腔镜对准,使其工作在激射状态下,在TEC制冷到0 °C的条件下,其激光输出特性如图5所示。从图5(a)可以看出,VECSEL器件的输出功率与泵浦功率呈现两个线性范围。第一个线性区域是从4

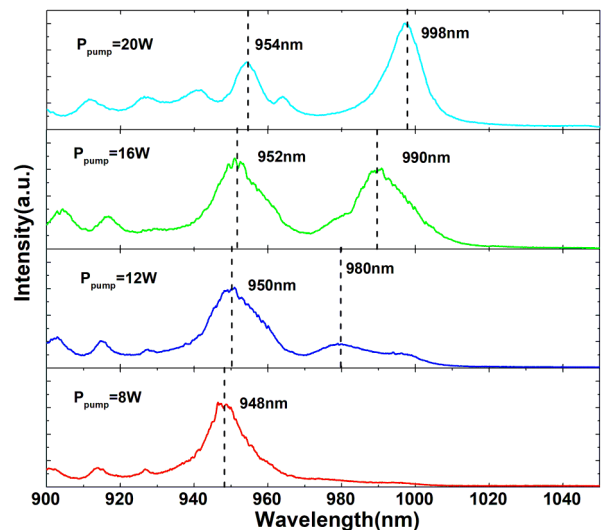


图4 在0 °C下,不同的泵浦功率下测得的PL光谱

Fig. 4 The PL spectra from the VECSEL devices under different pump powers at the temperature of 0 °C

W的阈值泵浦功率开始,持续到15 W的泵浦功率,输出功率达到1.6 W,随后开始出现热翻转。随着泵浦功率的进一步增加,输出功率在第一次翻转后再次增加,进入第二个线性区域。对于第二个线性区域,在泵浦功率达到24 W时,VECSEL器件的激光输出功率达到近2.8 W,并且没有出现功率饱和现象,整体的光-光转换效率达到10%以上。

采用Ophir-Spricon公司的SP620U光斑分析仪测试了波长可切换VECSEL器件的远场发散角,如图5(b)所示。在8 W和20 W两种泵浦功率水平下,VECSEL器件在两个正交方向上的发散角十分接近。在垂直方向上的半峰全宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)角度分别为8.21°与8.16°;在水平方向上的FWHM角度分别为8.12°与8.08°。这些测试结果表明,伴随着泵浦功率的改变,该VECSEL器件能够保持圆形对称的远场输出。

为进一步分析VECSEL器件功率曲线呈现两个线性范围的问题,我们测量了不同泵浦功率下VECSEL器件的激射光谱的变化情况,如图6(a)所示。VECSEL器件的激射光谱随着泵浦的增加呈现出明显的波长切换现象。当泵浦功率由15 W增加到18 W时,激射波长由近950 nm切换到了1 000 nm附近。更重要的是,当泵浦功率在16~17 W左右时,双波长也可以同时发射,对应输出功率曲线在第一个热翻转区域至第二个线性区域之间,如图5(a)所示。这主要因为VECSEL器件在泵浦光功率提高之后,更强的内部自热效应引起了激射波长红移。如

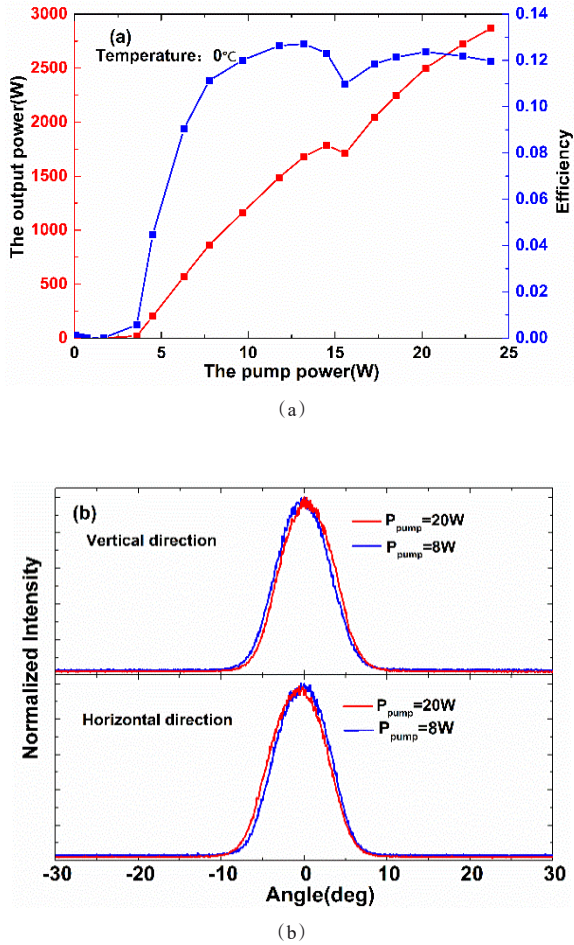


图5 在 0 °C 下, VECSEL 器件的输出性能(a)及其泵浦功率在 8 W 和 20 W 时的远场发散角(b)

Fig. 5 The output performance of VECSEL devices (a) and its beam divergence angles at the pump power of 8 W and 20 W (b)

图3所示,我们的 VECSEL 器件结构采用了近 24 nm 的高增益预偏移设计,而图4的 PL 光谱曲线说明了 950 nm 的波长率先在较低的泵浦功率下激射。由于自热效应,增益芯片内的温度随着泵浦功率的增加而迅速增加,增益谱也迅速红移^[23]。随着泵浦功率的进一步增加,增益谱的峰值会匹配 1 000 nm 的共振波长,最终实现波长从 950 nm 到 1 000 nm 的切换。

为了验证所设计的 VECSEL 器件内部自热效应对于激射波长的影响,我们测量了不同泵浦功率下 VECSEL 器件的激射波长随 TEC 控温的变化情况,如图6(b)所示。VECSEL 器件的激射波长变化曲线随着温度的增加呈现出明显的跃迁现象。当泵浦功

率保持 19 W 不变时,TEC 控温在 -10 °C 的节点处,激射波长的变化曲线由近 950 nm 跃迁到了 1 000 nm 附近。当泵浦功率降低到 15.5 W 时,激射波长的切换节点变为 0 °C。当泵浦功率进一步降低时,激射波长的切换节点已经改变至我们散热装置的控温范围以外。这验证了图2(b)所示的高增益预偏移设计,随着增益芯片内的温度上升导致增益峰值向反射带宽中心附近的腔模位置偏移,从而谐振模式发生改变。

采用型号为 BP209-VIS/M 型光束质量分析仪测量了 VECSEL 器件的光束质量因子 M²。如图7

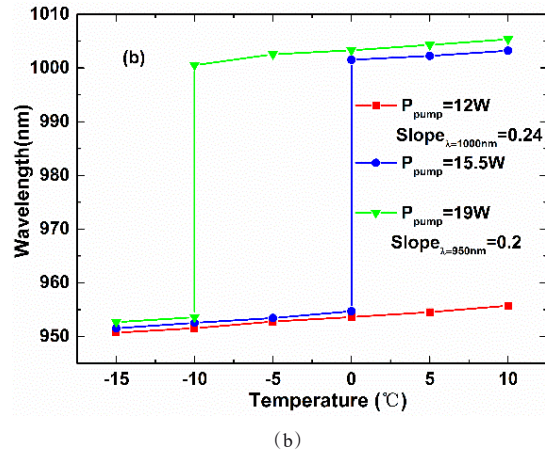
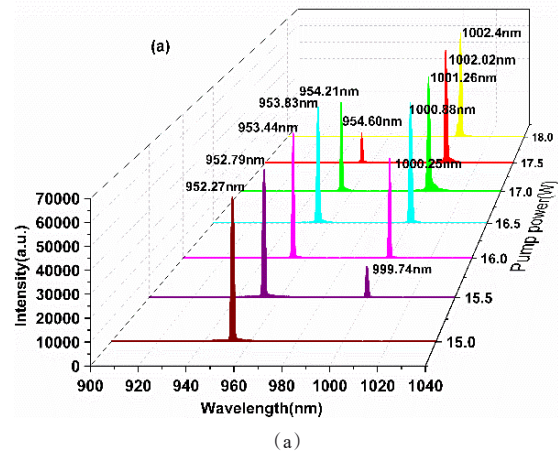


图6 在 0 °C 下, VECSEL 器件出光光谱随泵浦功率的变化关系(a), 以及泵浦功率不变的情况下, VECSEL 器件输出波长随温度的变化关系(b)

Fig. 6 Lasing spectra of the switchable dual-wavelength VECSEL device with the different pump powers at 0 °C (a), and lasing wavelength changing with temperature at the different pump powers (b)

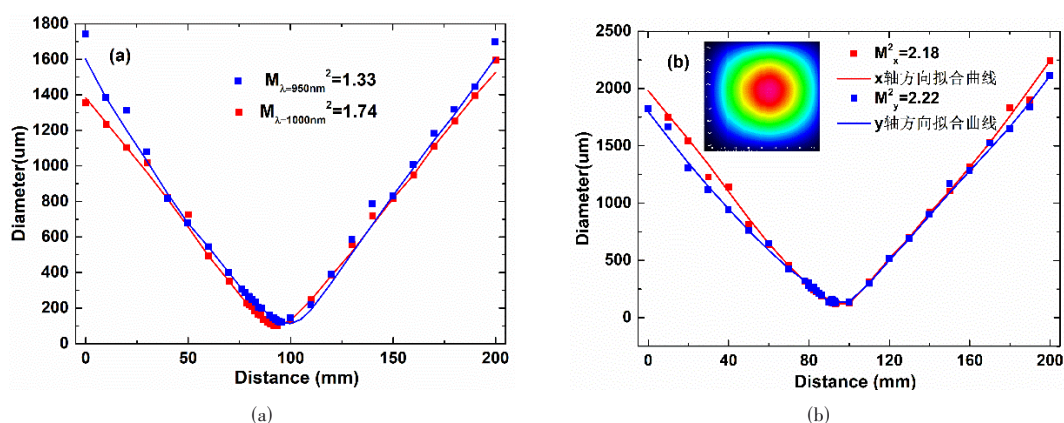


图7 在0 °C下,VECSEL 器件在单一波长输出时的光束质量 M^2 (a),以及 VECSEL 器件在双波长运转时的光束质量 M^2 ,插图为其输出光斑的形貌(b)

Fig. 7 The beam quality M^2 factors of the VECSEL device with single-wavelength (a) and dual-wavelength operation (b) at 0 °C, inserted curves show the shape at the center of the optical field

(a)所示,在0 °C下,泵浦功率为12 W和20 W时,VECSEL 器件处于单波长工作状态下,输出波长分别为950 nm和1 000 nm,测试得到的 M^2 分别为1.33和1.74。在泵浦功率为16.5 W时,VECSEL处于双波长工作状态,测试的 M^2 在两个正交方向的值分别为2.18和2.22,如图7(b)所示。这是因为950 nm和1 000 nm两种发射模式之间的竞争导致了光束质量变差。插图中给出了此时VECSEL 器件输出光斑形貌,仍然呈现出良好的圆形对称形状。

3 结论

提出了一种结构紧凑的双波长VECSEL器件,通过单个增益芯片和简单的直线腔体实现了双波长调控。通过提高增益-腔模预偏移量的增益芯片结构设计,在不同的泵浦功率下,增益谱被调谐到由反射率谱的下降倾角决定的两种模式中的一种,实现了增益芯片激射波长可在950 nm和1 000 nm之间切换。此外,在特定的泵浦功率下,实现了VECSEL双波长同时激射。在0 °C时,两个激射波长对应的最大输出功率均超过1.5 W,双波长的频差在15.66 THz。双波长VECSEL中两种振荡模式的相对强度可以通过微调泵浦功率来调节,且两种振荡模式均表现出良好的稳定性。这种双波长激光器可以避免复杂的增益芯片结构设计和复杂的外延生长,同时也不需要在外腔中插入并调谐光学元件,并且其体积小、坚固、稳定、实用,具有较好的实用价值。

References

- [1] Yuting Z, Miao H, Mengmeng X, *et al.* Experimental investigation on the Y-type cavity tunable dual-wavelength laser based on neodymium-doped vanadate crystals[J]. *Optics Communications*, 2021, **495**:127089.
- [2] Akio T, Haisong J, Kiichi H, *et al.* CW single-wavelength emission by using novel asymmetric configuration for active multi-mode interferometer laser diodes [J]. *IEICE Electronics Express*, 2012, **9**(18):1448-1453.
- [3] Purvinskis R, Giggenbach D, Henniger H, *et al.* Multiple-wavelength free-space laser communications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, **4975**:12-19.
- [4] Triesscheijn M, Baas P, Schellens J, *et al.* Photodynamic Therapy in Oncology[J]. *Oncologist*, 2006, **11**(9):1034-1044.
- [5] Ching-Fuh L, Miin-Jang C, Bor-Lin L. Wide-range tunable dual-wavelength semiconductor laser using asymmetric dual quantum wells[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, **10**(9):1208-1210.
- [6] Zambon V, M Piché, Mccarthy N. Tunable dual-wavelength operation of an external cavity semiconductor laser [J]. *Optics Communications*, 2006, **264**(1):180-186.
- [7] Ji-Ye Z, Jian-Wei Z, Yu-Gang Z, *et al.* Design of gain region of high-power vertical external cavity surface emitting semiconductor laser and its fabrication[J]. *Acta Phys. Sin*, 2020, **69**(5):054204.(张继业,张建伟,曾玉刚,等.光泵浦外腔半导体激光器的研究进展[J]. *物理学报*), 2020, **69**(5):054204.
- [8] Hastie J E, Calvez S, MD Dawson, *et al.* High power CW red VECSEL with linearly polarized TEM00 output beam [J]. *Optics Express*, 2005, **13**(1):77-81.
- [9] Hoehler J, Gibson R, Reed J, *et al.* 500W Peak Power Cavity Dumped 2-micron GaSb-Based VECSEL [J]. *Applied Optics*, 2021, **60**(25):107-112.
- [10] Hessenius C, Lukowski M, Moloney J, *et al.* Wavelength tuning of VECSELs by cavity geometry[C]. *Proceedings of*

- SPIE, 2015, **8242**(82420B): 1–8.
- [11] Tilma B W, Mangold M, Zaugg C A, *et al.* Recent advances in ultrafast semiconductor disk lasers [J]. *Light Sci. Appl.*, 2015, **4**: e310.
- [12] Bondaz T, Laurain A, Moloney J V, *et al.* Generation and Stabilization of Continuous-Wave THz Emission From a Bi-Color VECSEL [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **31**(19): 1569 – 1572.
- [13] Morozov Y, Nefedov I, Aleshkin V. Nonlinear frequency conversion in a double vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Semiconductors*, 2004, **38**(11): 1350 – 1355.
- [14] Fan L, Fallahi M, Hader J, *et al.* Linearly polarized dual-wavelength vertical-external-cavity surface-emitting laser,” *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(18): 181124.
- [15] Hessenius C, Lukowski M, Fallahi M. High-power tunable two-wavelength generation in a two chip co-linear T-cavity vertical external-cavity surface-emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**: 121110.
- [16] Xiaolang Q, Shuangshuang W, Xiaojian Z, *et al.* Dual-wavelength external-cavity surface-emitting laser [J]. *Acta Phys. Sin.*, . (邱小浪, 王爽爽, 张晓健, 等. 双波长外腔面发射激光器. *物理学报*), 2019, **68**(11): 114204.
- [17] Liu H, Gregory G, Syamsundar D, *et al.* Ultra-low noise dual-frequency VECSEL at telecom wavelength using fully correlated pumping [J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(8): 1794–1797.
- [18] Brenner C, Hofmann M, Scheller M, *et al.* Compact diode-laser-based system for continuous-wave and quasi-time-domain terahertz spectroscopy [J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(23): 3859–3861.
- [19] Peng Z, Lin M, Xiaojian Z, *et al.* Compact dual-wavelength vertical-external-cavity surface-emitting laser with simple elements [J]. *Optics Express*, 2021, **29**(11): 16572–16583.
- [20] Hyo-Hoon P, Byueng-Su Y. Low threshold current density and high efficiency surface-emitting lasers with a periodic gain active structure [J]. *Etri Journal*, 1995, **17**(1): 1–9.
- [21] Xuemei L, Xing Z, Jianwei Z, *et al.* 910 nm high peak power vertical-cavity surface-emitting laser source [J]. *J. Infrared Millim. Waves*. (梁雪梅, 张星, 张建伟, 等. 910 nm 高功率垂直腔面发射激光光源. *红外与毫米波学报*), 2019, **38**(5): 6.
- [22] Jiye Z, Jianwei Z, Zhuo Z, *et al.* High-power vertical external-cavity surface-emitting laser emitting switchable wavelengths [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(22): 32612–32619.
- [23] J Chernikov, J Herrmann, M Scheller, *et al.* Influence of the spatial pump distribution on the performance of high power vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(19): 191110.