

量子阱调制双波长光泵浦垂直外腔面 发射半导体激光器

李志伟^{1,2}, 张卓^{1,2}, 张建伟^{1*}, 张星¹, 周寅利¹, 曾玉刚¹, 宁永强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 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要:报道了一种采用单个增益芯片实现双波长输出的光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器(VECSEL)。VECSEL所用的增益芯片发光区由两组不同发光波长的量子阱组成,其中一组发光波长较短的量子阱采用吸收区泵浦的方式,另一组发光波长较长的量子阱采用阱内泵浦方式。在VECSEL工作时,吸收区泵浦的短波长量子阱率先激射,由于发光波长较长的量子阱对短波长量子阱的强度调制效应,此时可以观察到两种波长的光谱峰值强度随时间周期性振荡,采用高灵敏探测器观察到VECSEL此时的输出激光呈现出脉冲输出形式。随着泵浦功率进一步增加,VECSEL的输出激光呈现稳定的双波长输出,激光波长峰位分别位于967.5 nm和969.8 nm。VECSEL双波长稳定输出时的最大激光功率可以达到560 mW,光斑在正交方向呈现对称高斯形貌,正交方向发散角分别为6.68°和6.87°。

关键词: 半导体激光器; 双波长工作; 垂直外腔面发射半导体激光器; 强度调制

中图分类号: TN248.4 文献标识码: A

Quantum well modulated optical pumped vertical external cavity surface-emitting laser for dual-wavelength generation

LI Zhi-Wei^{1,2}, ZHANG Zhuo^{1,2}, ZHANG Jian-Wei^{1*}, ZHANG Xing¹, ZHOU Yin-Li¹, ZENG Yu-Gang¹,
Ning Yong-Qiang¹, WANG Li-Jun¹

(1. State Key Laboratory of Luminescence and Application, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Optically pumped dual-wavelength vertical external cavity surface-emitting semiconductor laser (VECSEL) with a single gain chip is reported. The active region of the gain chip is composed of two groups of quantum wells with different lasing wavelengths, one group of quantum wells with shorter wavelength operates by absorption pumping, and the other group of quantum wells with longer wavelength operates by in-well pumping. When the VECSEL is operating, the short-wavelength quantum wells pumped by the absorption region are first lased, due to the intensity modulation effect of the long-wavelength quantum wells on the short-wavelength quantum wells, it can be observed that the peak intensity of the spectrum oscillates periodically with time, pulsed operation of the VECSEL was observed by the highly sensitive detector. With the increasing of the pump power, stable dual-wavelength emission was achieved, the peak positions of emission wavelength are 967.5 nm and 969.8 nm respectively. The output power of the stable dual-wavelength emission can reach 560 mW, and the far fields show Gaussian cross-sections in orthogonal dimensions, and

收稿日期: 2022-02-10, 修回日期: 2022-03-23

Received date: 2022-02-10, Revised date: 2022-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB2201103), 国家自然科学基金重大项目(62090060), 国家自然科学基金(61874117, 52172165, 61804087), 吉林省科技发展计划项目(20200401006GX)

Foundation items: Supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (2018YFB2201103), the Major Program of National Natural Science Foundation of China (62090060), National Natural Science Foundation of China (61874117, 52172165, 61804087), the Key Projects of Jilin Province Science and Technology Development Plan, China (20200401006GX).

作者简介(Biography): 李志伟(1993-), 男, 吉林松原人, 博士研究生, 主要从事半导体激光器材料及器件研究。E-mail: lizhiwei17@mails.ucas.ac.cn

*通讯作者(Corresponding author): Email: zjw1985@ciomp.ac.cn

the divergence angles of 6.68° and 6.87° are obtained.

Key words: semiconductor lasers, dual-wavelength, vertical external cavity surface-emitting laser (VECSEL), intensity modulation effect

引言

双波长输出半导体激光器在干涉测量、光谱分析、干涉成像以及差频太赫兹等领域有重要应用前景^[1-5]。传统激光器想要获得双波长输出,一般采用不同增益芯片组合发光、采用外部多模式选择光栅以及利用耦合腔效应产生多波长同时振荡等方法,这些方法一般采用至少两种增益介质或者光学系统来实现对不同波长增益或者激光振荡的控制^[6-8]。垂直外腔面发射半导体激光器(Vertical External Cavity Surface-Emitting Laser, VECSEL)结合了固体激光器高光束质量和半导体激光器波长丰富的特点,可以同时实现高输出功率、良好的光束质量、大的覆盖波长范围等^[9-11]。同时,VECSEL拥有灵活的外腔腔型,可以通过在腔内加入光学元件实现滤波及调谐、锁模、倍频等功能^[12-15]。近年来,采用VECSEL方案实现激光的双波长输出成为该领域研究的热点。Hessenius等人于2012年使用两个独立的增益芯片实现了双波长输出的VECSEL^[16]。Lukowski等人于2015年报道了采用类似的双增益芯片VECSEL方案,实现双波长970 nm和1 170 nm的同时激射^[17],重庆师范大学邱小浪等人于2019年通过设计两块不同波长的增益芯片和偏振分束平片,在Y型谐振腔中获得了稳定的双波长VECSEL输出,波长间隔高达147 nm,总输出功率为293 mW^[18]。

通过单增益芯片实现双波长同时输出,可以有效降低整体系统的复杂性,因而对于实现小体积的双波长激光系统有重要意义。Leinonem等人于2008年利用光学通滤波器将单一增益芯片的有源区分开,实现了波长分别为966 nm和1 047 nm的双波长连续光的VECSEL^[19],Jasik等人于2016年利用包含两个不同量子阱的单增益芯片实现了波长分别为991 nm和1 038 nm的双波长输出^[20]。亚利桑那大学通过在外腔内加入法布里-珀罗标准具和布儒斯特窗实现了双波长的和频和差频,但会改变谐振腔的带宽,引起相位漂移^[21-22]。长春光机所张继业等人于2020年报道了利用有源区温度的变化对增益峰的波长调谐特性,实现了一种既可以同时双波长输出,又可以在两个波长间转换激射的VECSEL^[23]。

本文提出了采用带有两组不同发光波长量子阱的增益芯片结构,通过改变外部光学泵浦功率水平,实现了单个增益芯片的双波长同时激射。文章首先介绍了这种增益芯片的设计与制备方法,然后介绍了采用该结构实现的VECSEL工作特性及其内在机理,最后对本文研究工作做简要总结。

1 器件设计与制备

图1(a)是我们设计的VECSEL增益芯片的外延结构示意图。在增益芯片的发光区位置,我们设计了两组不同的量子阱,其中靠近DBR反射镜的一组量子阱称为A组量子阱,由3个6 nm厚的 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ 组成,量子阱两侧为GaAs吸收层,因而此量子阱为吸收区泵浦方式。靠近出光表面的另一组量子阱称为B组量子阱,由2个厚度为7 nm的 $\text{In}_{0.18}\text{Ga}_{0.72}\text{As}$ 构成,该量子阱两侧为 $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}$,该材料对808 nm的泵浦光并无吸收作用,因而该组量子阱为阱内泵浦方式^[24]。

VECSEL有源区的能带图及驻波分布如图1(b)所示,为了获得良好的光学增益,量子阱置于驻波场的波峰处构成周期性谐振增益结构^[25]。两组量子阱的发光波长均在966 nm附近,由于A组量子阱比B组量子阱的厚度小1 nm,因而A组量子阱发光波长略短于B组量子阱。因而VECSEL工作时,B组量子阱所发出的光处于A组量子阱带边位置,对A组量子阱所发的光有吸收作用。然而由于B组量子阱对数较少,易于在外部泵浦光作用下达到载流子反转,因而在较强泵浦功率下,A组量子阱发出的激光并不会被B组量子阱吸收。

采用金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术在砷化镓衬底上生长所设计的如图1(a)所示的外延层结构。采用了逆序生长的方法,即先生长In-GaP刻蚀阻挡层,然后依次生长B组量子阱发光区、A组量子阱发光区以及DBR结构。其中DBR结构由32对AlAs/GaAs层组成。外延生长完成后,将晶圆切成3 mm×3 mm的芯片并将DBR一侧焊接到铜热沉上。将衬底腐蚀掉并蒸镀增透薄膜,最后将带有增益芯片的铜热沉固定到水冷样品支架上。

光泵浦VECSEL增益芯片的腔型原理图如图2

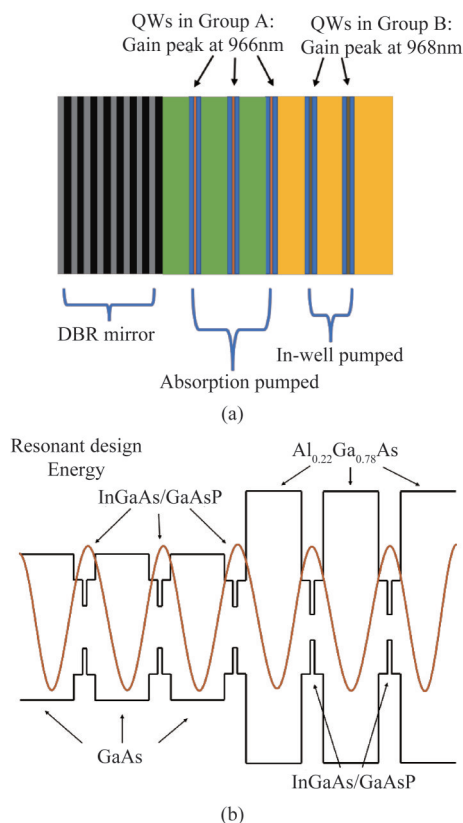


图1 (a) 双波长 VECSEL 增益芯片外延结构图, (b) VECSEL 增益芯片有源区能带图

Fig. 1 (a) Epitaxial structure of dual wavelength VECSEL gain chip, (b) Energy-band and standing wave distribution diagrams of active regions in the gain chip

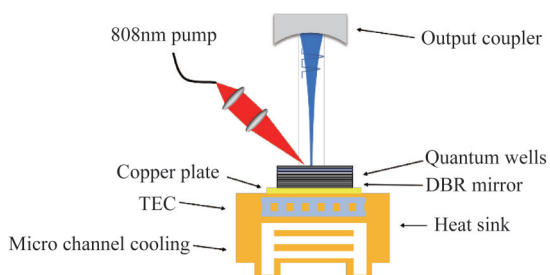


图2 VECSEL 装置图

Fig. 2 Schematic of the VECSEL setup

所示, VECSEL 系统由泵浦激光、热沉及控温 TEC、增益芯片和输出耦合镜组成。直型外腔的腔长及输出耦合镜曲率半径均约为 70 cm, 外腔镜反射率为 97% 以实现较好的工作性能^[26]。泵浦光源采用 808 nm 的光纤输出半导体激光光源, 泵浦光源功率连续可调。泵浦光通过光纤前端的聚焦透镜聚焦到增益芯片表面, 泵浦光斑尺寸约为 200 μm , 泵浦光束与增益芯片表面呈 30° 角。VECSEL 工作时, 增益芯片底部的热沉温度通过半导体制冷片 TEC

控制。

2 实验结果与讨论

采用光纤光谱仪采集不同泵浦功率下增益芯片侧边的光致发光(Photoluminescence, PL)光谱, 结果如图 3 所示。该 PL 光谱反映了未经增益芯片垂直振荡效应调制的发光区真实的 PL 光谱^[23]。从图 3 中的 PL 光谱可以看出, 随着泵浦功率的增加, 整体 PL 光谱强度明显增加。PL 光谱呈现三个主要的光谱峰值, 分别位于 900 nm 附近, 940 nm 附近以及 966 nm 附近。由于增益芯片发光区并无对应高能侧两个波长的材料结构, 因而这两个波长应该为量子阱不同子能级的发光波长。

图 3 中可以看出, 出光波长在 966 nm 附近的量子阱发光峰随泵浦功率的增长最快。虽然发光区采用了两组不同峰值波长的量子阱结构, 然而由于这两组量子阱的波长极为接近, 并且两组量子阱的 PL 光谱有叠加效果, 因而在 966 nm 附近只看到一个明显的光谱峰, 并未出现另一组量子阱的荧光峰。位于 966 nm 附近的 PL 光谱半宽达到近 14 nm, 明显宽于单组量子阱的发光光谱宽度, 因而说明两组量子阱的 PL 光谱出现叠加。

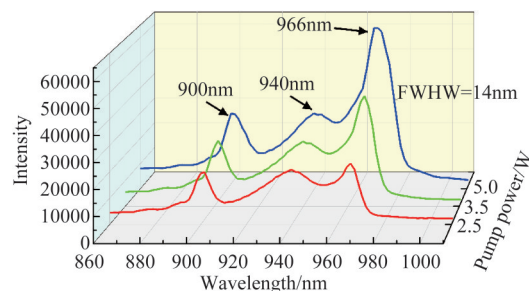


图3 TEC 控温温度为 -10 °C 时, VECSEL 增益芯片在不同泵浦功率下的侧边出光光谱图

Fig. 3 Edge photoluminescence spectra of VECSEL gain chip under different pumping powers when the temperature was controlled at -10 °C by TEC

图 4 为 TEC 控温温度分别为 -10 °C, 0 °C 与 10 °C 下 VECSEL 的输出功率随泵浦光功率的变化曲线。由图中可以看出, 随着工作温度的增加, VECSEL 的斜率效率明显下降。同时, VECSEL 的最大出光功率明显下降。这是因为高温下 VECSEL 内部有着更为严重的热积累效应。在 TEC 温度设定为 -10 °C 时, VECSEL 的最大出光功率达到 560 mW, 而在 10 °C 时 VECSEL 最大出光功率为 455 mW, 功率下降了 18.7%。

图4中 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的光功率曲线在超过阈值后,还存在另一个明显的功率拐点,对应的泵浦功率分别为 2.7 W 、 3.4 W 和 4.1 W 。在泵浦功率到达该拐点对应的泵浦功率之前,光功率曲线的斜率效率相对较低。而当泵浦功率大于该拐点对应的泵浦功率后,VECSEL的斜率效率有较大幅度的提升。该现象主要源于我们所设计的独特的两组量子阱发光结构。

在VECSEL达到工作阈值以后,A组量子阱将首先激射。由于此时的泵浦光功率相对较低,此时B组量子阱尚不能稳定工作。因而B组量子阱对A组量子阱产生的激光有一定的吸收作用,整个发光区的发光效率相对较低,因而斜率效率也相对较低。随着泵浦功率超过功率曲线拐点对应的泵浦功率,此时B组量子阱已经得到足够的泵浦强度,A组量子阱和B组量子阱同时稳定激射,发光区的发光效率得到提升,此时斜率效率明显有一定程度的提升。

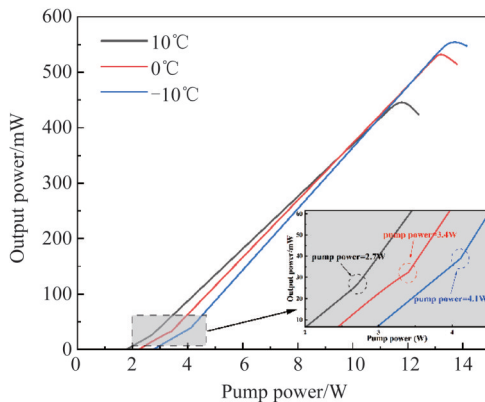


图4 TEC控温温度分别为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,VECSEL的输出光功率随泵浦光功率的变化曲线

Fig. 4 The output power changing with pump power at temperatures of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ controlled by TEC

对TEC控温 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下VECSEL在不同泵浦功率下的光谱特性进行了测量,得到不同泵浦功率下的光谱图如图5所示。可以看出,VECSEL激射光谱随泵浦功率的增大呈现出两种不同工作状态:当泵浦功率超过阈值功率,然而低于图4中的拐点功率时,激光器的出光光谱出现了两个不同位置的光谱峰,峰值波长分别位于 966 nm 和 968 nm 。并且在测试过程中我们发现,这两个光谱峰的强度在不断的周期性跳动,并且一直保持一个光谱峰较强,而另一个光谱峰较弱的状态。在泵浦功率为 3 W 及 3.5 W 时,均出现了该现象,如图5(a)和(b)所示。因而这

说明图1中的B组量子阱对A组量子阱产生了明显的调制效果,出现了半导体量子阱典型的饱和吸收效应。该现象证实了我们分析的图4中在泵浦功率小于拐点功率时,B组量子阱对A组量子阱的调制原理。

图5中当泵浦功率超过拐点功率(4.1 W)时,VECSEL的激光光谱强度不再波动,见图5(c)所示。此时激光器呈现明显的双波长激射,中心波长分别位于 967.5 nm 与 969.8 nm 。由于B组量子阱的数量较少且为阱内泵浦,因而其振荡强度要比A组量子阱弱,因此,B组量子阱对应的 969.8 nm 激光光谱的强度要弱于A组量子阱对应的 967.5 nm 。随着泵浦功率增加,激射波长比图5(a)和(b)中的激光波长略有红移,这是由于泵浦功率持续增加,有源区温度上升导致的。

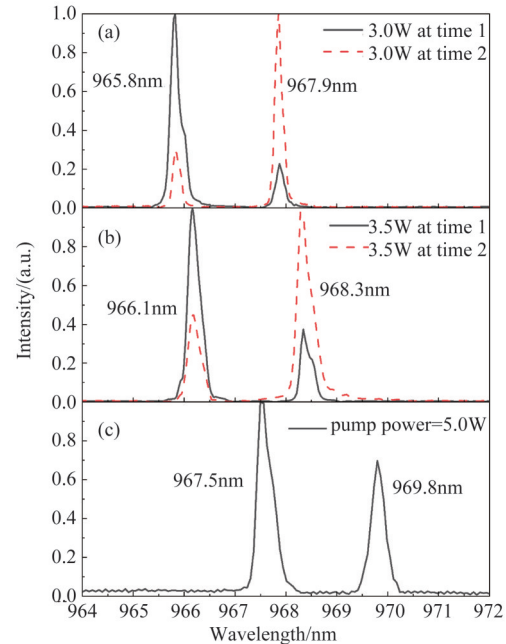


图5 TEC控温温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同泵浦功率下VECSEL的激光光谱图

Fig. 5 The lasing wavelength changing with pump powers at $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ controlled by TEC

由于泵浦功率在超出VECSEL阈值功率但低于功率曲线拐点功率时,激光器的出光波长呈现周期性跳动,因而我们采用高速探测器捕捉输出激光的动态特性变化情况。TEC控温温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同泵浦功率时VECSEL的激光脉冲信号图形如图6(a)-(c)所示。图6(a)中,当泵浦光功率为 2.5 W 时,未达到阈值功率,示波器无响应信号。当泵浦功率增加到 3.5 W 时,输出呈现周期性脉冲振荡,周

期约为 2.5 ns,如图 6(b)所示。随着泵浦功率增大,当泵浦功率超过拐点功率时,输出不再呈现振荡状态,趋于平缓如图 6(c)。这是因为当泵浦功率水平较低时,量子阱之间的调制作用明显,输出的起伏大,当足够高的泵浦功率提供了充分的载流子时,调制作用变得极其微弱,输出无明显扰动。

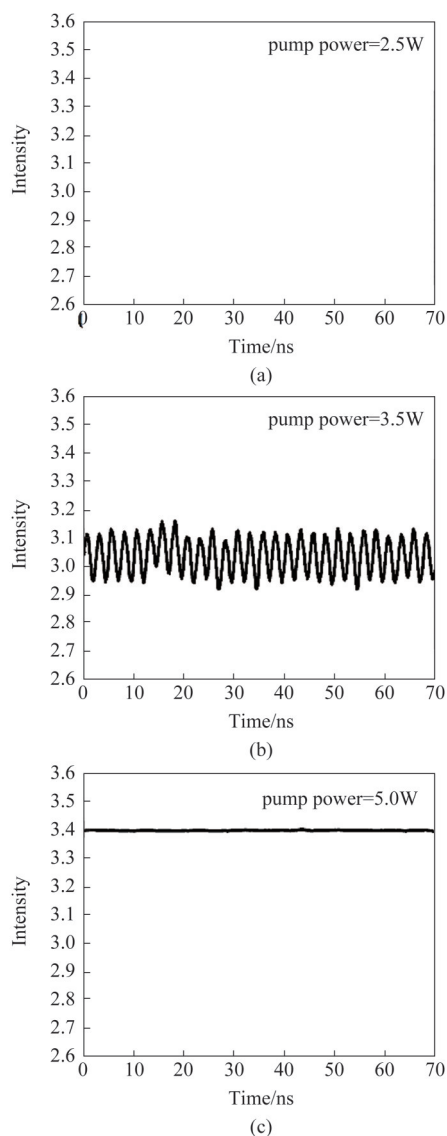


图 6 TEC 控温在 -10°C 温度下 VECSEL 的输出激光脉冲信号图 (a) 2.5 W, (b) 3.5 W, (c) 5 W

Fig. 6 Pulse shape of the output laser beam from the VECSEL under pumping powers of (a) 2.5 W, (b) 3.5 W, (c) 5.0 W at -10°C controlled by TEC

为更好地解释两组量子阱相互作用的载流子动力学,加入了如图 7 所示的对 B 组量子阱二次泵浦的工作原理图。光吸收层吸收泵浦光产生光生载流子被 A 组量子阱捕获,载流子复合发光,通过

内泵浦的方式激发 B 组量子阱价带中的电子跃迁到导带(图 7(a)),当 B 组量子阱中的反转载流子数积累到一定程度时,会复合发光(图 7(b)),这一过程即产生调制作用,造成了光谱的强度波动以及脉冲波形输出,当泵浦水平增加到一定程度时, A 组量子阱捕获了大量的光生载流子, B 组量子阱受激产生于导带中的电子和价带中的空穴布居会降低其对光的吸收,产生所谓的吸收饱和^[27],此时调制作用变得极其微弱(图 7(c)),光谱变得稳定,示波器输出不再振荡。

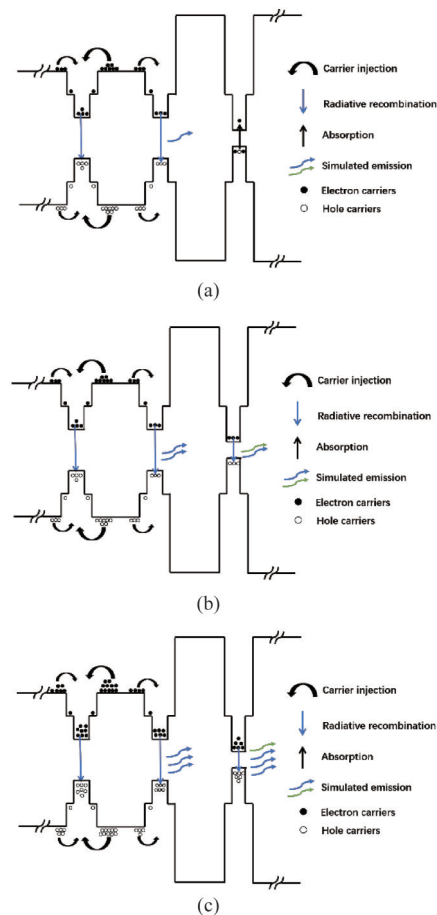


图 7 在低(a),中(b),高(c)泵浦条件下增益芯片有源区载流子输运示意图

Fig. 7 Illustration of carrier transport in active region of gain chip under low (a), medium (b) and high (c) pump conditions

测试了不同温度下增益芯片的时间分辨光谱,见图 8 所示。时间分辨光谱描述了量子阱中载流子弛豫过程,当某种物质被激光激发后,该物质分子吸收能量后从基态跃迁到激发态上,再以辐射跃迁的形式发出荧光回到基态,分子受到光激发后返回到基态之前在激发态的平均停留时间称为荧光寿

命,去掉激发光后,光强降低到峰值强度的 $1/e$ 时所用的时间即认为是载流子的弛豫时间,也就是荧光寿命,荧光寿命主要由量子阱能带结构及温度决定。根据两组量子阱相互作用的载流子动力学分析可知B组量子阱的调制速度取决于反转载流子数积累以及载流子弛豫时间,而调制速度决定了脉冲周期,所以荧光寿命与脉冲周期直接相关。图8中 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下量子阱的荧光寿命分别为 2.09 ns , 2.32 ns 与 2.57 ns , 荧光寿命相差很小。量子阱的荧光寿命测试结果与图6中脉冲激光的周期 2.5 ns 在同一数量级,然而数值上有一定差距。主要是图6中的调制周期 2.5 ns 要大于图8中的荧光寿命测试结果,我们认为这是因为图6中的情况下,量子阱受到的激发强度大,载流子弛豫速率变慢^[28],同时,量子阱内部有一定的载流子积累,载流子有机会跃迁到更高能级,成为热载流子,当低能级的载流子复合时,热载流子会弛豫到低能级,相当于延长了荧光寿命^[29],这些都使得载流子的弛豫时间变长,因而调制周期变长。

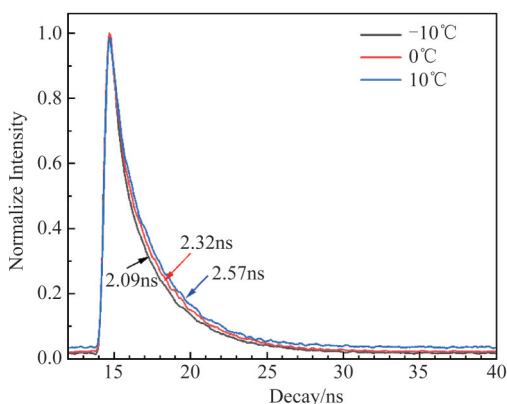


图8 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下增益芯片的荧光衰减寿命曲线

Fig. 8 Decay curve of VECSEL chip at different temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $10\text{ }^{\circ}\text{C}$

采用 CCD 相机测量了 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 工作温度下 VECSEL 在两个正交方向上的远场发散角,如图9所示。此时的泵浦功率为 5 W , VECSEL 处于稳定的双波长激光状态。可以看出,VECSEL 激光器输出的光斑呈现出圆形对称的类高斯光斑形貌,输出的光斑在正交方向上的发散角分别为 6.68° 和 6.87°

3 结论

提出了采用两组不同发光波长的量子阱作为发光层的 VECSEL 增益芯片结构,实现了稳定的双

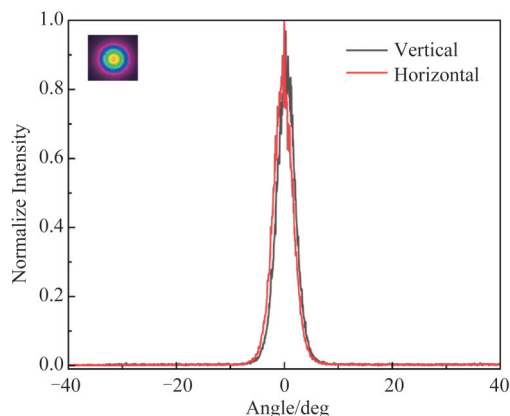


图9 在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下 VECSEL 在泵浦功率为 5 W 时的输出远场分布,插图为输出光斑二维彩图

Fig. 9 Emission far-fields of VECSEL under the pumping power of 5 W at temperature of $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, Inserted is beam profile from our VECSEL captured by a CCD camera

波长输出。在衬底温度为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,我们实现的双波长输出最大功率达到了 560 mW , 激光波长分别在 967.5 nm 和 969.8 nm 。另外,采用提出的这种方案,在泵浦功率较低时,还可以实现 VECSEL 的脉冲调制现象。双波长输出 VECSEL 具有高斯对称的光斑形貌,两个正交方向上的激光发散角仅有 6.68° 和 6.87° 。相信所提出的这种新型增益芯片结构在实现双波长激光以及光光调制等应用中具有很好的前景。

References

- [1] Jagerska J, Jouy P, Hugi A, *et al.* Dual-wavelength quantum cascade laser for trace gas spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.* 2014, 105:161109.
- [2] Shang Y, Ye X, Cao L, *et al.* Coaxial dual-wavelength interferometric method for a thermal infrared focal-plane-array with integrated gratings[J]. *Scientific Reports* 2016, 6: 25993.
- [3] Siebert K J, Quast H, Leonhardt R, *et al.* Continuous-wave all-optoelectronic terahertz imaging [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2002, 80(16):3003-3005.
- [4] Mei J, Zhong K, Wang M, *et al.* Widely-tunable high-repetition-rate terahertz generation in GaSe with a compact dual-wavelength KTP OPO around $2\text{ }\mu\text{m}$ [J]. *Opt. Express* 2016, 24:23368-23375.
- [5] ZHANG Ji-Ye, LI Xue, ZHANG Jian-Wei, *et al.* Research progress of vertical-cavity surface-emitting laser [J]. *Chinese Journal of Luminescence* (张继业, 李雪, 张建伟, 等. 垂直腔面发射激光器研究进展. *发光学报*), 2020, 41(12):1443-1459.
- [6] Paquet R, Blin S, Myara M, *et al.* Coherent continuous-wave dual-frequency high-Q external-cavity semiconductor laser for GHz-THz applications[J]. *Opt. Lett.* 2016, 41: 3751-3754.

- [7] Shutts S, Smowton P M, Krysa A B. Dual-wavelength InP quantum dot lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2014, 104: 241106.
- [8] Price R K, Verma V B, Tobin K E, et al. Y-branch surface-etched distributed bragg reflector lasers at 850 nm for optical heterodyning [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2007, 19:1610-1612.
- [9] Nechay K, Mereuta A, Paranthoen C, et al. High-power 760 nm VECSEL based on quantum dot gain mirror [J]. *IEEE J. Quantum Electron.* 2020, 56:1-4.
- [10] Hou G Y, Shu S L, Peng J, et al. High power (>27 W) semiconductor disk laser based on pre-metalized diamond heat-spreader[J]. *IEEE Photonics Journal* 2019, 11:1-8.
- [11] Calvez S, Hastie J E, Guina M, et al. Semiconductor disk lasers for the generation of visible and ultraviolet radiation [J]. *Laser & Photonics Reviews* 2009, 3:407-434.
- [12] Jiang L D, Zhu R J, Jiang M H, et al. Frequency doubling of an InGaAs multiple quantum wells semiconductor disk laser [J]. *Superlattices Microstruct.* 2018, 113: 785-790.
- [13] Alfieri C G E, Waldburger D, Golling M, et al. High-power sub-300-femtosecond quantum dot semiconductor disk lasers [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2018, 30: 525-528.
- [14] Abram R H, Gardner K S, Riis E, et al. Narrow linewidth operation of a tunable optically pumped semiconductor laser [J]. *Opt. Express* 2004, 12:5434-5439.
- [15] WANG Xiao-Long, ZOU Yong-Gang, HAO Yong-Qin, et al. Characteristics of 850 nm liquid crystal tunable VCSEL with polarization stability and wide tuning range [J]. *Chinese Journal of Luminescence* (王小龙, 邹永刚, 郝永芹, 等. 宽范围、偏振稳定的850 nm液晶可调谐垂直腔面发射激光器特性. *发光学报*), 2020, 41(10): 1287-1293.
- [16] 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.
- [17] Lukowski M, Hessenius C, Bedford R, et al. Tunable type II intracavity difference frequency generation at 5.4 μm in a two chip vertical external cavity surface emitting laser [J]. *Opt. Lett.* 2015, 40:4174-4177.
- [18] Qiu X L, Wang S S, Zhang X J, et al. Dual-wavelength external-cavity surface-emitting laser [J]. *Acta Physica Sinica* 2019, 68:114204.
- [19] Leinonen T, Ranta S, Laakso A, et al. Dual-wavelength generation by vertical external cavity surface-emitting laser [J]. *Opt. Express* 2007, 15:13451-13456.
- [20] Jasik A, Sokol A K, Broda A, et al. Dual-wavelength vertical external-cavity surface-emitting laser: strict growth control and scalable design [J]. *Applied Physics B-Lasers And Optics* 2016, 122:23.
- [21] Scheller M, Yarborough J M, Moloney J V, et al. Room temperature continuous wave milliwatt terahertz source [J]. *Opt. Express* 2010, 18:27112-27117.
- [22] Fan L, Fallahi M, Hader J, et al. Linearly polarized dual-wavelength vertical-external-cavity surface-emitting laser [J]. *Appl. Phys. Lett.* 2007, 90:181124.
- [23] Zhang J, Zhang J, Zhang Z, et al. High-power vertical external-cavity surface-emitting laser emitting switchable wavelengths [J]. *Opt. Express* 2020, 28:32612-32619.
- [24] Mateo C, Brauch U, Schwarzback T, et al. Enhanced efficiency of AlGaInP disk laser by in-well pumping [J]. *Opt. Express* 2015, 23(3):2472-2486.
- [25] Yoo B S, Park H H, Lee E H. IEEE. periodic gain surface-emitting lasers with low threshold current densities [C]. In Proceedings of 7th Annual Meeting of the IEEE Lasers-and-Electro-Optics-Society, Boston, Ma, 1994 Oct 31-Nov 03; pp. 254-255.
- [26] 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 Physica Sinica* 2020, 69:054204.
- [27] LIN Wei-Shu, QIU Zhi-Ren, XU Wen-Cheng. Femto-second relaxation of excited carriers in AlGaAs/GaAs multiple quantum wells [J]. *Acta Optica Sinica* (林位株, 丘志仁, 徐文成. AlGaAs/GaAs多量子阱结构中受激载流子的飞秒弛豫特性. *光学学报*), 1992, 5:390-395.
- [28] XU Zhong-Ying, LI Yu-Zhang, XU Jun-Ying, XU Ji-Zong, ZHENG Bao-Zhen, ZHUANG Wei-Hua, GE Wei-Kun, Hot carrier relaxation processes in GaAs-GaAlAs multiple quantum well structures [J]. *Acta Physica Sinica* (徐仲英, 李玉璋, 徐俊英, 等. GaAs-GaAlAs多量子阱结构中热载流子弛豫过. *物理学报*), 1987, 36(10):1330-1335.
- [29] Pelouch W S, Ellingson R J, Powers P E, et al. Comparison of hot-carrier relaxation in quantum wells and bulk GaAs at high carrier densities [J]. *Physical Review B* 1992, 45(3):1450 - 1453.