第 47 卷 第 7 期
2020 年 7 月

中 国 激 光
CHINESE JOURNAL OF LASERS

Vol. 47, No. 7
July, 2020

·特邀论文·

1160 nm 光泵垂直外腔面发射激光器设计及制备

张卓[1,2], 宁永强[1], 张建伟[1*], 张继业[1,2], 曾玉刚[1], 张俊[1], 张星[1], 周寅利[1], 黄佑文[1], 秦莉[1], 刘云[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

摘要 1160 nm 波段垂直外腔面发射半导体激光器(VECSEL)是医用橙黄激光的基频光源,但是其发光区的高应变 InGaAs 量子阱会引起严重的应变积累效应,限制高功率输出。提出一种在单个发光区内采用 GaAsP 材料对高应变 InGaAs 量子阱进行二次补偿的方法,保证发光区内的光学吸收层具有高的材料生长质量。提出含 Al 吸收层的结构,以降低 GaAsP 势垒引起的能带阻挡效应,提高了发光区光生载流子的注入效率。所制备的 VECSEL 器件激光波长为 1160 nm,输出功率达 1.02 W,并获得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 10.5°和 11.9°。

关键词 激光物理; 半导体激光器; 光泵浦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 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/CJL202047.0701020

Design and Fabrication of 1160-nm Optically-Pumped Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser

Zhang Zhuo[1,2], Ning Yongqiang[1], Zhang Jianwei[1*], Zhang Jiye[1,2], Zeng Yugang[1], Zhang Jun[1], Zhang Xing[1], Zhou Yinli[1], Huang Youwen[1], Qin Li[1], Liu Yun[1], Wang Lijun[1]

[1]*State Key Laboratory of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;
[2]*Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract In the medical field, the 1160-nm wavelength vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser (VECSEL) is the fundamental frequency lasing source of orange laser. However, the strain accumulation effect induced by the high strain InGaAs quantum well in the luminous zone limits high output power. In this study, the secondary compensation method is proposed for a high strain InGaAs quantum well using the GaAsP material in a single luminescent zone to achieve high material growth quality of optical absorption layers. The structure of the absorption layer containing Al is designed to reduce the photogenic carrier-blocking effect caused by GaAsP barrier and improve the injection efficiency of photogenic carriers. The lasing wavelength and output power of the prepared VECSEL devices are 1160 nm and 1.02 W, respectively. The lasing spot shows symmetrical morphology, and the divergence angles of the spot at orthogonal directions are 10.5° and 11.9°.

Key words laser physics; semiconductor laser; optically-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser; gain chip; strain quantum well

OCIS codes 140.5960; 140.7260; 230.5590

收稿日期: 2020-03-03; **修回日期**: 2020-03-20; **录用日期**: 2020-04-01

基金项目: 总装备部预研领域基金(61404140107)、国家自然科学基金(11674314,61874117,61434005)、吉林省重点科技研发项目(20180201119GX)

* **E-mail**: zhangzhuo18@mails.ucas.edu.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

1 引　言

光泵浦垂直外腔面发射半导体激光器(VECSEL)可以同时实现高光束质量与高功率的激光输出。由于VECSEL的外腔振荡特性,在其外置腔内置入非线性光学晶体可以实现输出波长的转换[1],极大地扩大了半导体激光器的波长覆盖范围。半导体激光器本就具有体积小、质量轻、光电转换效率高等优点[2],VECSEL技术又兼具光束质量高、功率高、波长变换等多种优势。

560～600 nm波段的橙黄色激光在生物医学[3]、食品药品检测、大气遥感[4]等方面有广泛的应用需求:人体血红蛋白对560～600 nm波段的激光吸收率很高,在治疗皮肤和视网膜病变[5]应用中前景广阔;高功率的橙黄色激光可用于军事上空间目标的探测与识别。然而,目前尚无基于560～600 nm波段直接激光输出的高性能半导体材料,因此将长波长1120～1200 nm的VECSEL作为基频光源,在其外腔内插入倍频晶体实现橙黄激光输出的技术方案获得广泛关注[6],是近年来研究的热点之一[7-9]。VECSEL分为电泵浦与光泵浦两种工作方式。目前关于瓦级功率输出的电泵浦1160 nm VECSEL结构鲜有报道,这是因为电泵浦VECSEL的输出功率非常依赖于发光区量子阱(QW)的材料性能。电泵浦VECSEL的发光区一般只包括3～4个量子阱,这是因为过多的量子阱会使输运到各个量子阱的载流子数量差距很大,影响复合效率。1160 nm波段的InGaAs量子阱材料需要极高的In组分。高In组分的InGaAs量子阱与AlGaAs分布式布拉格反射镜(DBR)材料之间具有大的材料应变,直接生长InGaAs量子阱会产生晶格缺陷,导致量子阱增益下降;同时缺陷会带来大的光学损失,使得输出激光难以实现高功率水平。如果通过外加应变补偿层的方法来削弱量子阱应变,则会降低量子阱的光学限制因子,导致激光振荡时得到的有效增益进一步降低,更加限制了VECSEL功率。而在光泵浦1160 nm VECSEL结构中,不需要考虑电注入带来的量子阱数量限制,可以通过周期性地排布近10个量子阱,是电泵浦VECSEL量子阱数量的3倍,可以保证腔内振荡的激光能获得足够高的增益水平,实现瓦级高功率输出。

560～600 nm波段激光对应的基频光波长在1120～1200 nm,获得高性能的VECSEL基频光的关键在于其增益芯片的设计和制备。1120～1200 nm发光波段位于GaAs基材料的长临界波长处,需要采用高应变的量子阱发光材料作为VECSEL的发光层。VECSEL一般需要采用近10层左右的发光层来实现高的发光效率[10],因此,发光波长位于1120～1200 nm的高应变发光层在外延生长过程中极易产生应变积累效应,导致增益芯片发光区产生大量晶格缺陷,限制器件的工作性能,严重时甚至无法正常激射。基于GaAs衬底的近红外波段(760～1060 nm)半导体激光器发展最为成熟[11],InGaAs是该波段应用最广泛的量子阱发光材料,相应的腔内倍频技术也较为完善[12-13]。然而当出光波长大于1100 nm时,InGaAs的材料应变已接近临界厚度[14]。最初,Thränhardt等[15]采用应变较小的InGaNAs作为发光层材料来缓解高应变效应,减少由高应变效应引起的内部材料缺陷,然而难于控制掺N的InGaAs量子阱的生长过程[16],仅有少数几家单位有相关报道。德国乌尔姆大学等单位为解决上述问题,提出了采用应变补偿方式[17]制备VECSEL发光区的方案:量子阱发光层仍然采用高应变的InGaAs,但是势垒层采用具有反向应变效应的GaAsP材料,这样就可以抵消InGaAs带来的应变效应。由于InGaAs和GaAsP的制备工艺均较为成熟,该方案也成为近年来1120～1200 nm VECSEL发光区普遍采用的材料结构方案之一。

采用GaAsP的反向应变效应可以有效缓解InGaAs带来的应力效应,但是由于GaAsP能带较宽,直接将其置于InGaAs量子阱两侧将会降低吸收区产生的光生载流子向InGaAs量子阱的注入效率,因此一般在GaAsP应变补偿层与InGaAs量子阱之间隔一个光吸收层[18]。上述方案中,GaAsP层并不能直接补偿InGaAs的应变效应,因此InGaAs产生的应变会直接作用于两者之间的光吸收层,使得吸收层的材料质量受到一定影响。

本文报道1160 nm波段VECSEL的研制结果,提出先在InGaAs两侧采用仅有5 nm厚的薄层GaAsP对量子阱应变进行初步补偿的方案,再在光吸收层之间插入具有GaAsP应变补偿层的发光区结构。吸收区产生的光生载流子很容易穿过仅有5 nm厚的GaAsP材料层并注入到InGaAs量子阱中,因此该结构不会使InGaAs中光生载流子的注入效率降低。另外,由于对高应变的InGaAs进行了初步补偿,在其上生长的光吸收层的材料质量也会得到有效提高。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2　VECSEL 器件结构

所用 VECSEL 系统结构示意图如图 1(a)所示。VECSEL 系统由热沉及其背部控温半导体制冷器(TEC)、增益芯片、输出耦合镜、泵浦激光组成。其中 VECSEL 的增益芯片吸收泵浦激光，并产生光学增益，是整个系统最核心的部分。

1160 nm 波段的增益芯片结构采用高应变的 InGaAs 量子阱作为发光层。由于 InGaAs 应变量很大，为避免 InGaAs 应变效应影响其上下部分光吸收层材料的质量，在 InGaAs 两侧采用 5 nm 厚的 GaAsP 势垒层，对 InGaAs 产生的应变进行初步补偿；然后在光学吸收层中间插入更高 P 组分的 GaAsP 应变补偿层，完成对 InGaAs 量子阱的完全应变补偿。VECSEL 系统工作时，增益芯片内部光学振荡情况如图 1(b)所示。增益芯片内部采用9 个周期性分布的 InGaAs 量子阱作为发光层，量子阱位于振荡光场的波峰位置，以提供有效的高光学增益。GaAsP 应变补偿层位置如图 1(b)插图所示。采用金属-有机化合物化学气相沉淀外延(MOCVD)技术在 GaAs 衬底上制备 1160 nm VECSEL 增益芯片结构。材料层的制备顺序依次为刻蚀阻挡层、窗口层、多量子阱增益区、DBR；然后将外延生长完的晶圆切割成尺寸为3 mm×3 mm 的方块并将其焊接到铜热沉上，采用衬底剥离工艺去除衬底后进行 VECSEL 光学调试。

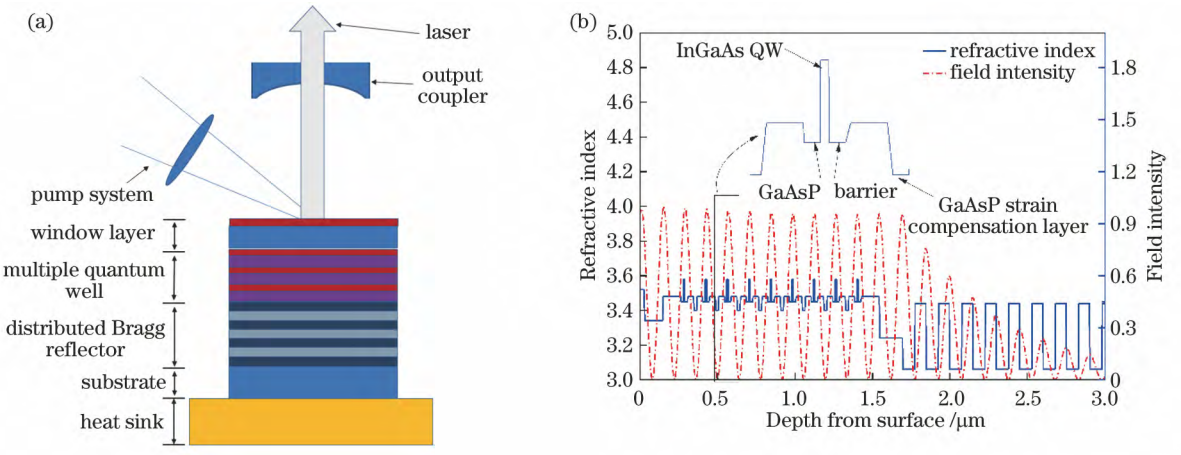

图 1　VECSEL 结构与芯片内部光场分布。(a) VECSEL 系统示意图；(b)增益芯片内层光场分布

Fig. 1　VECSEL structure and light field distribution inside the chip.

(a) Diagram of VECSEL system; (b) optical field distribution in inner layer of gain chip

3　理论设计

InGaAs 量子阱引起的应变效应可以使基于价带的轻空穴(LH)、重空穴(HH)带有效分离，实现低的透明载流子密度和高的材料增益[19]，具有优越的材料性能，在920～1100 nm波段应用广泛。在 InGaAs 材料中，In 组分越高，材料对应的激射波长越长[20]。$In_xGa_{1-x}As$量子阱需要 $x>35\%$的 In 含量，才能将带隙能量降低至输出 1160 nm 波段所需能量。InGaAs 中少量的 In 原子的体积较大，可以很好地牵制位错的移动，有效地阻止暗点和暗线缺陷的密度，提高材料的生长质量[21]；但是 In 组分过高会使晶格应变加剧，形成位错，位错会严重限制芯片的运行和降低使用寿命[22]，而且由于应变积累效应，具有高 In 组分的 InGaAs 在生长过程中很容易产生位错等晶格缺陷[23]。本文使用具有适量的 P 组分的 GaAsP 作为势垒层，对高 In 组分的 InGaAs 量子阱引起的压应变进行初步补偿，提高晶格质量[24]，从而获得具有高增益、高晶格质量的发光区材料结构。

增益芯片的核心材料层为内部发光层量子阱结构，首先对采用 GaAsP 势垒的发光区量子阱能带分立情况及其增益特性进行分析。采用 K-P 能带理论计算量子阱的空穴能级分立情况，如图 2 所示。结果表明厚度为 7 nm 的 InGaAs 量子阱/5 nm GaAsP 势垒结构可以实现较好的空穴子能级分离，尤其是第一重空穴带与第二、第三重空穴带分离较大，这可以有效避免多能级同时激射的问题，说明这种发光结构适合作为 VECSEL 的发光层。

发光区量子阱的增益参数是决定 VECSEL 阈值、输出功率、效率特性的关键参数。随着量子阱内部注入的载流子浓度增加，即光泵浦能量不断增大，需要量子阱具备稳定的增益增长速度，这样 VECSEL 的输出功率不易饱和。图 3 是 InGaAs 量

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

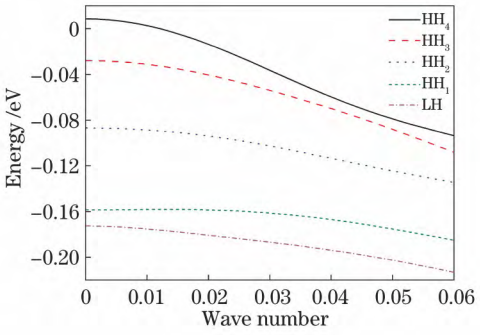

图 2　InGaAs 量子阱的子能级分立

Fig. 2　Sub-energy-level separation of InGaAs quantum wells

子阱在不同光生载流子浓度下的增益谱变化情况。可以看出，随着载流子浓度的增加，量子阱的增益谱峰值持续增长；由于高浓度下光生载流子的填充效应，增益谱的峰值随着光生载流子浓度的增加向短波方向轻微漂移。

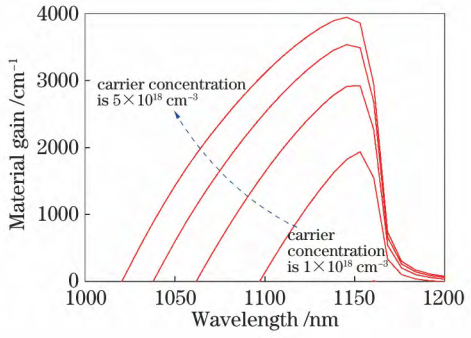

图 3　不同光生载流子浓度下 InGaAs 量子阱的增益光谱

Fig. 3　Gain spectra of InGaAs quantum wells at different carrier concentrations

量子阱的增益谱的峰值随着温度的增加会出现往长波方向漂移的现象。由于 VECSEL 工作时发光区会出现强的热效应，量子阱增益峰值对应的波长将会红移。InGaAs 量子阱的增益峰值处波长红移速度为 0.3 nm/℃，因此，为保证 1160 nm 的 VECSEL 在工作时可以获得足够高的光增益，需要将 InGaAs 的量子阱增益峰值处波长设计的比 VECSEL 的实际发光波长短。由于激光泵浦的热效应，发光区温度与环境温度相比大约高 30 ℃[25]，所对应的波长偏差约为 10 nm，因此将量子阱增益峰值处波长设置在 1150 nm 附近。

VECSEL 工作时，由发光层两侧的吸收层材料吸收泵浦激光，并产生电子与空穴光生载流子，电子与空穴光生载流子分别注入到发光区的量子阱导带与价带能级，然后复合发光。目前在常见的报道中，1160 nm 波段多采用 GaAs 材料作为吸收层材料[26]。在本研究中，由于采用 GaAsP 材料作为势垒层，GaAsP 势垒具有比 GaAs 更高的导带及价带能级位置，因此，为了保证顺利注入光生载流子，采用 AlGaAs 材料作为增益芯片内部的光吸收层材料。为评估 InGaAs/GaAsP 发光区材料结构对 VECSEL 内部光生载流子注入效应的影响，分析实际泵浦过程中电子与空穴光生载流子的分布情况，如图 4 所示。

图 4 中，由 AlGaAs 吸收层、GaAsP 势垒及 InGaAs 量子阱的能带结构可以看出，AlGaAs 吸收层与 GaAsP 势垒的导带(C-band)及价带(V-band)能带交界处没有带阶出现，这说明采用 AlGaAs 作为吸收层可以很好地消除 GaAsP 势垒引起的光生载流子阻挡作用，使得光生载流子可以顺利注入到 InGaAs 量子阱中。由电子(Elec-conc)与空穴(Hole-conc)光生载流子在各层的分布可以看出，量子阱内部的光生载流子浓度很高，比吸收层的高了近 2 个数量级，说明光生载流子基本已全部注入量子阱内；虽然 AlGaAs 与 GaAsP 交界处未出现能带带阶，但是 GaAsP 内部的光生载流子分布明显要低于吸收层及量子阱的，对于空穴光生载流子，这种现象更为明显，这说明光生载流子在量子阱内得到了很好的限制，并没有溢出到势垒层。

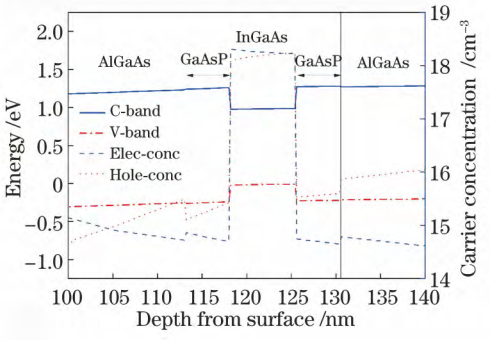

图 4　InGaAs 量子阱增益光谱对比

Fig. 4　Gain spectrum comparison of InGaAs quantum well

4　实验结果

采用 MOCVD 设备对设计的 VECSEL 增益芯片结构进行外延生长，生长顺序依次为刻蚀阻挡层、窗口层、增益芯片发光区、DBR。其中 DBR 采用 GaAs/AlAs 材料以减小 DBR 对数，同时还可以增加热导率。刻蚀阻挡层采用 GaInP 材料，用于实现衬底剥离时的选择性刻蚀工艺。然后，将外延片切成 3 mm×3 mm 大小的芯片，并在芯片的 DBR 上蒸镀 Ti-Pt-Au 金属合金层。随后通过 In 焊料将芯片焊接到铜热沉上。采用机械减薄的方式去除大部

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

分的衬底后，再使用具有选择性腐蚀的溶液去除剩下的衬底。最后，将制备完整的器件固定在装有TEC的铜支架上进行有效的散热。

为验证VECSEL增益芯片表面发光波长是否满足使用要求，采用椭偏仪测试去除衬底后的增益芯片的反射谱特性，如图5所示。增益芯片的反射谱带宽约为80 nm，DBR最大反射率约为99%。反射带近中心位置出现一个明显的光学凹陷，该位置被称为增益芯片的腔模位置。腔模位置代表VECSEL的出光波长[27]，所制备的增益芯片的腔模位置在1160 nm附近，这说明采用MOCVD制备的VECSEL增益芯片结构可以满足对出光波长控制的要求。图5插图为所生长的增益芯片InGaAs发光层的光致发光光谱（PL），PL的发光峰位于1150 nm附近。

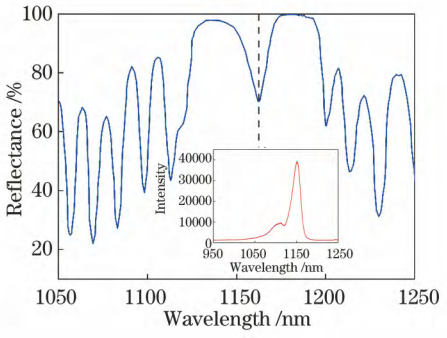

图5　VECSEL增益芯片反射谱

Fig. 5　Reflection spectrum of VECSEL gain chip

将已焊接增益芯片的铜热沉固定在装有TEC控温装置的铜支架上，采用中心波长为808 nm、光斑直径为200 μm的半导体激光模块作为泵浦源，光源以大约45°角度照射到增益芯片的表面，调节光纤前端的准直聚焦透镜系统，使得增益芯片上的泵浦光斑尺寸最小，此时泵浦光斑直径约为200 μm。

图6为采用曲率半径为10 cm的输出耦合镜时，在不同工作温度下增益芯片的输出功率曲线。可以看出，随着工作温度的降低，VECSEL的阈值光功率降低，最大输出功率增加。在0，−10，−20 ℃下，VECSEL的阈值光功率分别为4.6，4.3，3.8 W，这是因为在低温下VECSEL增益芯片的增益谱峰值处波长与腔模波长偏差更大，但是其光增益区增益数值比较高，在阈值附近获得的增益更高，也更容易产生激射。VECSEL在0，−10，−20 ℃下的输出功率水平得到有效提升，分别为0.2，0.6，1.02 W，并且温度降低后，功率曲线的斜率也明显增加，这是因为随着泵浦功率的增加，VECSEL在泵浦区的工作温度急剧增加，增益峰值处波长与腔模波长最终到达匹配数值，激光输出功率开始增加；达到一定输出功率后，继续增加泵浦功率，输出功率反而会下降，这是因为TEC散热效率有限，发光区温度反而升高，热应力增加，输出功率降低[28]。而工作温度越低，增益芯片表面的热扩散速度越快，因此低温下功率曲线的斜率越大。由于低温环境下增益芯片内部热积累速度更慢，因此由热效应引起的增益饱和问题就可以得到缓解，最大激光功率得到提升。

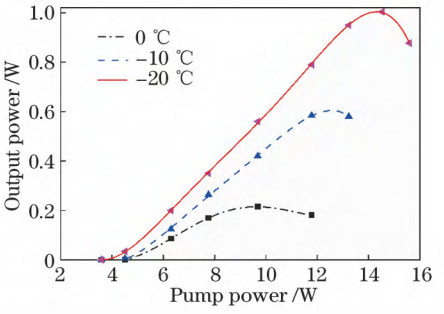

图6　不同增益芯片温度下，VECSEL输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 6　Output power curve of VECSEL with pump power at different gain chip temperatures

表1为VECSEL在1160 nm波段附近激射的参数对比。从表1可以看出，在1160 nm波段附近，电泵浦VECSEL很难有高功率单模输出；而设

表1　不同VECSELs在相近波长处的参数对比

Table 1　Comparison of parameters at similar wavelength of different VECSELs

Mechanism	Types of semiconductor laser	Peak power /mW	Lasing wavelength /nm
Mechanism in Ref.[29]	Electrically pumped	0.18	1170
Mechanism in Ref.[30]	Electrically pumped	1.53	1180
Mechanism in Ref.[31]	Optically pumped	1000	1160
Mechanism in Ref.[32]	Optically pumped (QDs gain region)	2.45	1148
Mechanism in Ref.[33]	Optically pumped (DBR-free)	2000	1150
Mechanism in Ref.[34]	Optically pumped (DBR-free)	2500(two VECSELs)	1160
Proposed mechanism	Optically pumped	1023	1160

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

计制造的 VECSEL 在 1160 nm 波段达到了瓦级输出功率；光泵浦量子点（QDs）半导体激光器在 1160 nm 附近也难有高功率输出；无 DBR 的 VECSEL 能达到瓦级功率输出，但是其制造工艺要求比较高。

VECSEL 的独特优势在于既可以实现高的功率输出，还可以实现圆形对称的光斑形貌。图 7 为在温度为 −20 ℃，激光输出功率为 1.02 W 时，VECSEL 增益芯片在两个正交方向上的远场光场发散角测量结果。插图为 CCD 直接捕获的 VECSEL 输出光斑的二维形貌。VECSEL 输出光斑在垂直和水平方向上的发散角分别为 10.5°和 11.9°，具有良好的光斑对称性，并且光斑的强度呈近高斯分布。从图 7 插图可以看出，捕获的激光光斑的轮廓为圆形结构，并且光场分布均匀性较好。

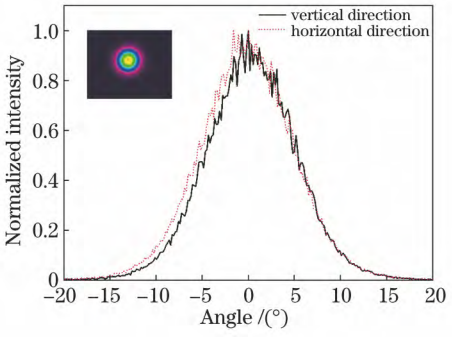

图 7　VECSEL 系统输出光束强度的远场分布，插图为输出光斑的二维彩图

Fig. 7　Far field distribution of output beam intensity of VECSEL system, and the inset is 2D color map of output spot

5　结　论

设计和制备了一种输出波长在 1160 nm 波段的光泵浦 VECSEL。为缓解高应变 InGaAs 引起的材料生长应力，提出了二次应变补偿的设计方案。先用较低应变量的 GaAsP 势垒进行应力初步补偿，再采用吸收层中的 GaAsP 应变补偿层进行全应变补偿，这种方案可以提高吸收层材料的生长质量。从理论上证实这种结构的能带、增益特性及光生载流子注入情况均可以满足应用需求。采用 MOCVD 制备了增益芯片结构，在增益芯片温度为 −20 ℃ 时，实现 VECSEL 系统最大激光功率 1.02 W。VECSEL 输出激光光斑在两个正交方向上的发散角分别为 10.5°和 11.9°，光斑形貌为圆对称结构，均匀性较好。

参　考　文　献

[1] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, et al. Development of high power diode laser [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(1): 1-19.
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.

[2] Qiao C, Su R G, Li X, et al. Design and fabrication of 980 nm distributed Bragg reflection semiconductor laser with high power[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0701002.
乔闯，苏瑞巩，李翔，等. 980 nm 高功率 DBR 半导体激光器的设计及工艺[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 0701002.

[3] Kantola E, Rantamaki 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 Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019, 25(1): 1-8.

[4] 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 [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9734: 97340Y.

[5] Li Y J, Zong N, Peng Q J. Characteristics and progress of vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(5): 050006.
李玉娇，宗楠，彭钦军. 垂直腔面发射半导体激光器的特性及其研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(5): 050006.

[6] Kantola E, Leinonen T, Ranta S N, et al. High-efficiency 20 W yellow VECSEL[J]. Optics Express, 2014, 22(6): 6372-6380.

[7] 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[J]. Proceedings of SPIE, 2008, 6871: 687119.

[8] Kantola E, Leinonen T, Ranta S, et al. Pulsed high-power yellow-orange VECSEL [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9134: 91340Z.

[9] d'Orgeville C, Fetzer G J, Floyd S, et al. Semiconductor guidestar laser for astronomy, space, and laser communications: prototype design and expected performance [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10703: 107030T.

[10] 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]. Crystal Growth & Design, 2002, 2(4): 287-292.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[11] Yuan Q H, Jing H Q, Zhang Q Y, et al. Development and applications of GaAs-based near-infrared high power semiconductor lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 040003.
袁庆贺, 井红旗, 张秋月, 等. 砷化镓基近红外大功率半导体激光器的发展及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(4): 040003.

[12] Liu D M, Li W Y, Fu X H, et al. Fabrication of high-reflective cavity mirrors for 457 nm laser based on intracavity frequency doubling[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(11): 1103001.
刘冬梅, 李五一, 付秀华, 等. 基于腔内倍频的 457 nm **激光器高反射腔镜的研制[J]. 中国激光**, 2018, 45(11): 1103001.

[13] Qiu X L, Chen X H, Zhu R J, et al. Compact tunable external-cavity surface-emitting green laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(4): 0401002.
邱小浪, 陈雪花, 朱仁江, 等. 小型化可调谐外腔面发射绿光激光器[J]. 中国激光, 2019, 46(4): 0401002.

[14] Li F, Chris H, Mahmoud F, et al. Highly strained InGaAs/GaAs multiwatt vertical-external-cavity surface-emitting laser emitting around 1170 nm[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(13): 131114.

[15] Thränhardt A, Kuznetsova I, Schlichenmaier C, et al. Nitrogen incorporation effects on gain properties of GaInNAs lasers: experiment and theory[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(20): 201117.

[16] 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 2010, January 31-February 3, 2010, San Diego, California. Washington, DC: OSA, 2010: ATuA10.

[17] Kantola E, Penttinen J, Ranta S N, et al. 72-W vertical-external-cavity surface-emitting laser with 1180-nm emission for laser guide star adaptive optics [J]. Electronics Letters, 2018, 54(19): 1135-1137.

[18] Wang Q, Cao Y L, He G R, et al. Theoretical design method of strain compensated quantum well in high power VCSELs [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(3): 304-307.
王青, 曹玉莲, 何国荣, 等. 高功率 VCSEL **中应变补偿量子阱的理论设计[J]. 光电子 · 激光**, 2008, 19(3): 304-307.

[19] Liang X M, Lu J K, Cheng L W, et al. Structural design of vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor laser with 920 nm[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2010, 31(1): 79-85.
梁雪梅, 吕金锴, 程立文, 等. 920 nm **光抽运垂直外腔面发射半导体激光器结构设计[J]. 发光学报**, 2010, 31(1): 79-85.

[20] Wang F, Wang X H. Optically pumped vertical-external-cavity surface emitting semiconductor laser technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016.
王菲, 王晓华. 光泵浦垂直外腔面发射半导体激光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

[21] Tang Y, Cao C F, Zhao X Y, et al. Laser single-mode characteristics of InGaAs/GaAs/InGaP quantum well lasers [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 131402.
汤瑜, 曹春芳, 赵旭熠, 等. InGaAs/GaAs/InGaP **量子阱激光器的激光单模特性研究[J]. 激光与光电子学进展**, 2019, 56(13): 131402.

[22] Jiménez J. Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes[J]. Comptes Rendus Physique, 2003, 4(6): 663-673.

[23] Leinonen T, Korpijärvi V M, Härkönen A, et al. Recent advances in the development of yellow-orange GaInNAs-based semiconductor disk lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8242: 824208.

[24] Kantola E, Leinonen T, Ranta S, et al. High-efficiency tunable yellow-orange VECSEL with an output power of 20 W[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8966: 89660D.

[25] Yu S F. Analysis and design of vertical cavity surface emitting lasers[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003, 194-197.

[26] Brandon Morioka S. High-power optically pumped semiconductor laser apllications[J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7919: 791913.

[27] Ahirwar P, Rotter T J, Shima D, et al. Growth and optimization of 2-μm InGaSb/AlGaSb quantum-well-based VECSELs on GaAs/AlGaAs DBRs[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1700611.

[28] Yuan Q H, Jing H Q, Zhong L, et al. Thermal stress in high-power semiconductor laser packaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1001009.
袁庆贺, 井红旗, 仲莉, 等. 大功率半导体激光器封装热应力研究[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1001009.

[29] Wang T B, Hsu W C, Chen I L, et al. Single-mode InGaAs photonic crystal vertical-cavity surface-emitting lasers emitting at 1170 nm[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2007, 154(5): H351.

[30] Yang H D, Lu C, Hsiao R S, et al. Characteristics of MOCVD- and MBE-grown InGa(N)As VCSELs[J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(8): 834-839.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[31] Calvez S. GaInNAs (Sb) for solid-state laser engineering[C]// 2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks, June 26-30, 2011, Stockholm, Sweden. New York: IEEE, 2011: 1-4.

[32] Tokranov V, Yakimov M, Oktyabrsky S. QD VCSELs with InAs/InGaAs short period superlattice QW injector[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7224: 72240T.

[33] Yang Z, Albrecht A R, Cederberg J G, et al. DBR-free semiconductor disk lasers[C]// CLEO: Science and Innovations 2015, May 10-15, 2015, San Jose, California. Washington, DC: OSA, 2015: SM3F. 7.

[34] Yang Z, Albrecht A R, Cederberg J G, et al. Broadly tunable DBR-free semiconductor disk laser [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9734: 97340I.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net