

中国激光
Chinese Journal of Lasers
ISSN 0258-7025, CN 31-1339/TN

《中国激光》网络首发论文

题目: 1160nm 光泵外腔面发射激光器设计及制备
作者: 张卓, 宁永强, 张建伟, 张继业, 曾玉刚, 张俊, 张星, 周寅利, 黄佑文, 秦莉, 刘云, 王立军
收稿日期: 2020-03-03
网络首发日期: 2020-06-02
引用格式: 张卓, 宁永强, 张建伟, 张继业, 曾玉刚, 张俊, 张星, 周寅利, 黄佑文, 秦莉, 刘云, 王立军. 1160nm 光泵外腔面发射激光器设计及制备[J/OL]. 中国激光. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1339.TN.20200601.1507.052.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

1160nm 光泵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 垂直外腔面发射半导体激光器 (Vertical-External-Cavity Surface Emitting Lasers -VECSEL) 兼具高功率、高光束质量以及波长可调谐等独特优势。1160nm 波段 VECSEL 是医用橙黄激光的基频光源, 但是其发光区的高应变 InGaAs 量子阱带来了严重的应变积累效应, 限制了这类激光器的高功率输出。本文提出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 吸收层结构降低 GaAsP 势垒带来的能带阻挡效应, 提高了发光区光生载流子注入效率。所制备的 VECSEL 器件激光波长在 1160nm, 输出功率达到 1.02W, 并获得圆形对称的输出光斑形貌, 光斑正交方向上的发散角分别为 10.5°和 11.9° (FWHM)。

关键词 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

Design and fabrication of 1160nm optically-pumped vertical external cavity surface-emitting laser

Zhang Zhuo^{1,2}, Ning Yongqiang¹, Zhang Jianwei^{1*}, Zhang Jiye^{1,2}, Zeng Yugang¹, Zhang Jun¹,
Zhang Xing¹, Zhou Yinli¹, Huang Youwen¹, Qin Li¹, Liu Yun¹, Wang Lijun¹

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

²Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese
Academy of Sciences, Beijing, 100049, China

Abstract The vertical external cavity surface-emitting semiconductor laser has the unique advantages of high power, high beam quality and wavelength tunability. As the fundamental frequency lasing source, the 1160nm-VECSEL is widely needed in the medical field. However, the high In content of quantum wells causes the strain accumulation within the active region, which affects the material quality seriously. And this limits the output power of VECSEL. In this paper, the secondary compensation of the strain InGaAs quantum well by the GaAsP layers is proposed. The quality of the optical absorption layers is thus promised. The Al-content material is used as the absorption layers to reduce the photogenic carrier blocking effect. VECSEL devices are prepared, and its lasing wavelength is at 1160 nm. The

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

output power of 1.02 W is gained, and the lasing spot shows the symmetrical morphology. The divergence angles at orthogonal directions are 10.5° and 11.9° (FWHM), respectively.

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

OCIS codes 140.5960; 140.7260; 230.5590

1 引言

光泵浦 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]，极大的丰富了半导体激光器的波长覆盖范围。半导体激光器本来就具有体积小、质量轻、光电转化率高等优点^[2]，VECSEL 技术又兼具高光束质量、高功率、波长变换等多种优势。

560nm-600nm 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 560nm-600nm 波段的激光吸收率很高，在治疗皮肤和视网膜病变^[5]中应用前景广阔；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，目前尚无可以实现 560nm-600nm 波段直接激光输出的高性能半导体材料，因此，采用长波长 1120nm-1200nm 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^[7-9]。VECSEL 分为电泵浦与光泵浦两种工作方式。目前尚未见有报道瓦级功率输出的电泵浦 1160nm VECSEL 结构，这是因为电泵浦 VECSEL 的输出功率非常依赖于发光区量子阱的材料性能。电泵浦 VECSEL 激光器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导致输运到各个量子阱的载流子数量差距很大，影响复合效率。1160nm 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 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，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 1160nm VCSEL 结构中，不需要考虑电注入带来的量子阱数量限制，可以通过周期性的排布近 10 个量子阱，数量是电泵浦 VECSEL 的 3 倍，可以保证腔内振荡的激光获得足够高的增益水平，比较容易实现瓦级高功率输出。

560nm-600nm 波段激光对应的基频光波长在 1120nm-1200nm，获得高性能的基频光 VECSEL 的关键在于其增益芯片的设计和制备。1120nm-1200nm 发光波段位于 GaAs 基材料发光波长的长波临界波长，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 1120nm-1200nm 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，严重的甚至无法正常激射。基于 GaAs 衬底的近红外波段(760~1060nm)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]。然而当其出光波长大于 1100nm 时，InGaAs 的材料应变已经接近临界厚度^[14]。最初，德国马尔堡大学的 A. Thränhardt 等人采用应变较小的 InGaAs 作为发光层来缓解高应变效应引起的内部材料缺陷^[15]，然而掺 N 的 InGaAs 量子阱生长过程非常难于控制^[16]，仅有少数几家单位有相关报道。德国 ULM 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 及 GaAsP 的制备工艺均较为成熟，该方案也成为近年来 1120nm-1200nm VECSEL 发光区普遍采用的材料结构方案。

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，直接放置于 InGaAs 量子阱两侧将会阻碍吸收区产生的光生载流子向 InGaAs 量子阱的注入效率，因此文献报道一般将 GaAsP 应变补偿层与 InGaAs 量子阱之间间隔一个光吸收层^[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。

本文报道了 1160nm 波段 VECSEL 的研制结果，提出先在 InGaAs 两侧采用仅有 5nm 的薄层 GaAsP 进行量子阱应变初步补偿的方案，再在光吸收层之间插入另一层 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 5nm 的 GaAsP 材料层注入 InGaAs 量子阱，因此该结构不会引起 InGaAs 中光生载流子注入效率的下降。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材料质量也将会得到有效提升。文章首先对我们采用的器件结构及制备工艺进行介绍，然后重点介绍了 1160nm 波段发光区的理论设计过程，最后对制备的器件性能参数进行介绍。

2 VECSEL器件结构

图1(a)是本文所用VECSEL系统结构示意图。VECSEL系统由热沉及其背部控温TEC、增益芯片、输出耦合镜和泵浦激光组成。其中VECSEL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。

本文中1160nm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应变很大，为避免InGaAs应变效应影响其上下部分的光吸收层材料质量，我们在InGaAs两侧采用5nm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，量子阱位置位于振荡光场的波峰位置以提供有效的高光学增益。多次的GaAsP应变补偿层位置如图1(b)中的插图所示。采用MOCVD外延技术在GaAs衬底上制备1160nm 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反射镜结构。然后将外延生长完的晶圆切割成3mm×3mm的方块焊接到铜热沉上，并采用衬底剥离工艺去除衬底后进行VECSEL光学调试。

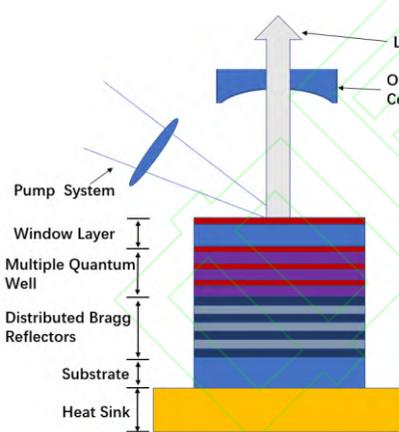
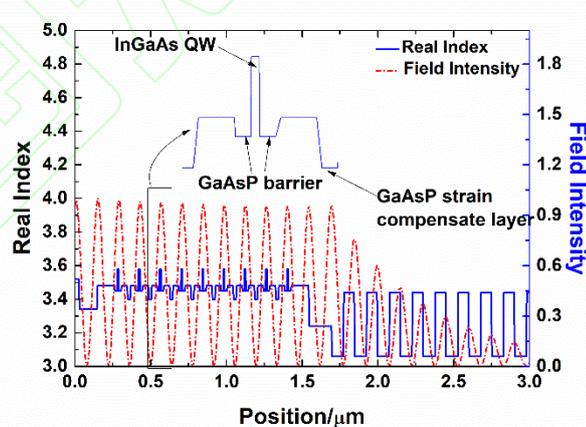


图1(a) VECSEL系统工作示意图

Fig. 1(a) VECSEL system working diagram;



(b)增益芯片内层光场分布

(b)Optical field distribution in the inner layer of gain chip

3 理论设计

InGaAs量子阱带来的应变效应可以使价带的轻重空穴带有效分离,实现低的透明载流子密度和高的材料增益^[19],在920-1100nm波段获得广泛应用,并被证实具有优越的材料性能。在InGaAs材料中,In组分越高,则材料对应的激射波长越长^[20]。输出1160nm波段的

$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 量子阱需要 $x>35\%$ 的 In 含量, 才能将带隙降低至所需能量。InGaAs 中少量的 In 由于其原子体积较大, 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, 能够帮助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使用寿命^[22]。而且具有如此高的镓含量的 InGaAs 的生长很容易由于应变积累效应产生位错等晶格缺陷^[23]。本文使用含有适量的 P 组分 GaAsP 作为势垒层, 可以对高 In 含量 InGaAs 量子阱造成的压应变进行初步补偿, 提高晶格质量^[24], 获得具有高增益低缺陷的发光区材料结构。

增益芯片的核心材料层为内部发光层量子阱结构, 首先需要分析采用 GaAsP 势垒的发光区量子阱能带分立情况及其增益特性。采用 k-p 能带理论计算了量子阱的空穴能级分立情况, 如图 2 所示。计算得到 7nm 厚度的 InGaAs 量子阱/5nm 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, 可以有效避免多能级同时激射问题, 说明这种发光结构适合作为 VECSEL 的发光层。

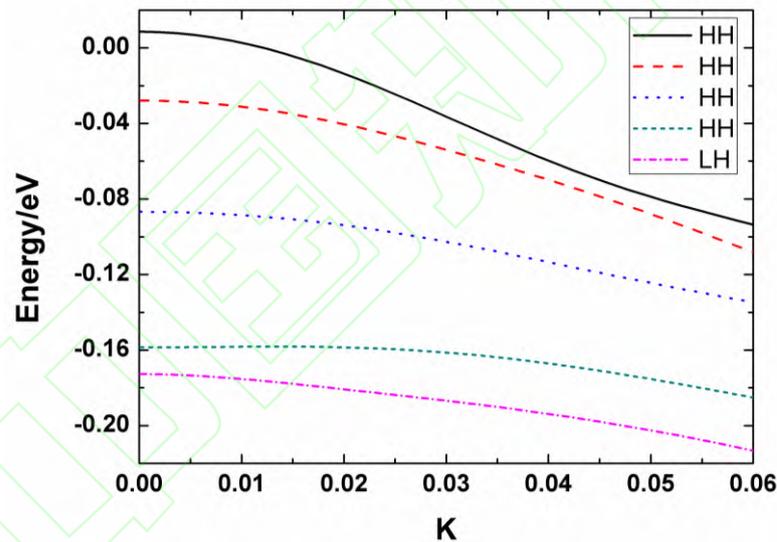


图 2 InGaAs 量子阱的子能级分立情况

Fig. 2 The state of the separation of energy levels in InGaAs quantum wells

发光区量子阱的增益参数是决定 VECSEL 阈值, 输出功率及效率特性的关键参数。随着量子阱内部注入载流子浓度的增加, 即光泵浦能量的不断增大, 需要量子阱具备稳定的增益增长速度, 这样的话 VECSEL 的输出功率才不会容易出现饱和。图 3 是计算的 InGaAs 量子阱在不同光生载流子浓度下的增益谱变化情况, 随着载流子浓度的增加, 量子阱的增益谱峰值持续增长; 并且由于高浓度下光生载流子填充效应, 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。

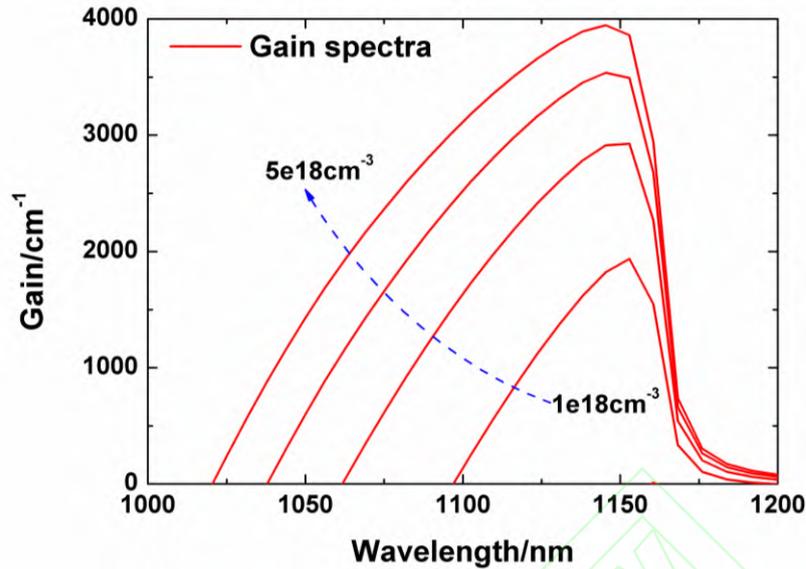


图 3 不同光生载流子浓度下 InGaAs 量子阱的增益光谱

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 量子阱的增益峰值波长红移速度为 $0.3\text{nm}/^\circ\text{C}$ ，因此，为保证 1160nm 的 VECSEL 可以在工作时获得足够高的光增益，在图 3 中，InGaAs 的量子阱增益峰值波长需要设计在比 VECSEL 的实际发光波长偏短的位置。由于激光泵浦的热效应，发光区与环境温度的温升大约为 30°C 左右^[25]，所对应的波长偏差为 10nm 。因此，在我们的研究中，量子阱增益峰值波长的位置设置在 1150nm 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发光区的量子阱导带与价带能级，然后复合发光。目前常见的报道中， 1160nm 波段多采用 GaAs 材料作为吸收层材料^[26]。在本研究中，由于采用了 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，我们采用了 AlGaAs 材料作为增益芯片内部的光吸收层。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，我们分析了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的消除 GaAsP 势垒带来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。

图 4 中电子 (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 交界处并未出现能带带阶, 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, 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部得到了很好的限制, 并没有溢出到势垒层。

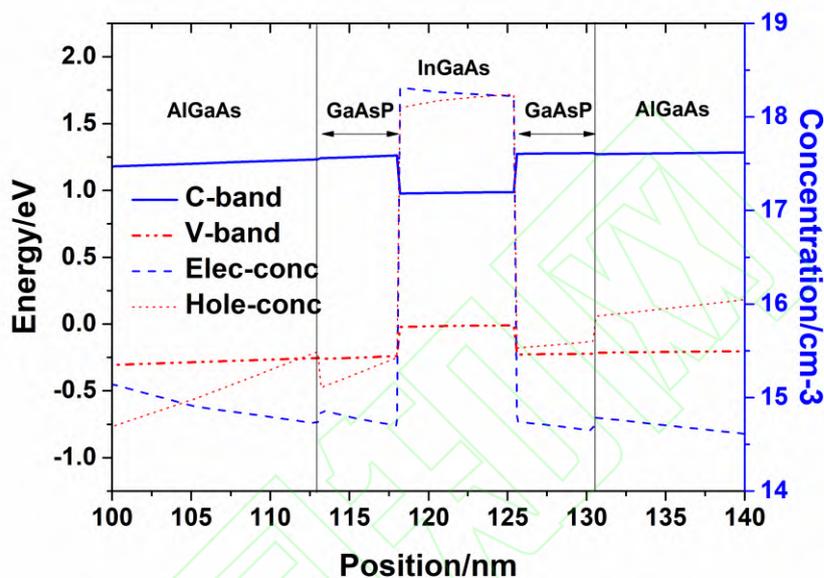


图 4 增益峰值在 1160nm 时, InGaAs 量子阱增益光谱对比

Fig. 4 Gain spectrum comparison of InGaAs quantum well at 1160nm

4 实验结果

采用 MOCVD 设备对设计的 VECSEL 增益芯片结构进行了外延生长, 生长顺序依次为刻蚀阻挡层, 窗口层, 增益芯片发光区, DBR 反射镜。其中 DBR 反射镜采用 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, 主要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 3mm×3mm 大小的芯片, 并在芯片的 DBR 反射镜上蒸镀 Ti-Pt-Au 金属合金层。随后通过钎焊料, 焊接到铜热沉上。采用机械减薄的方式去除大部分的衬底后, 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半导体制冷器 (Thermoelectric cooler, 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反射谱特性, 如图 5 所示。图 5 中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, 该位置称为增益芯片的腔模位置。腔模位置代表着 VECSEL 的出光波长^[27], 所制备增益芯片的腔模位置在 1160nm 附近。这说明采用 MOCVD 制备的 VECSEL 增益芯片可以满足对出光波长的控制要求。图 5 中插图为生长的增益芯片 InGaAs 发光层的 PL 光谱图, PL 光谱的发光峰位于 1150nm 附近。

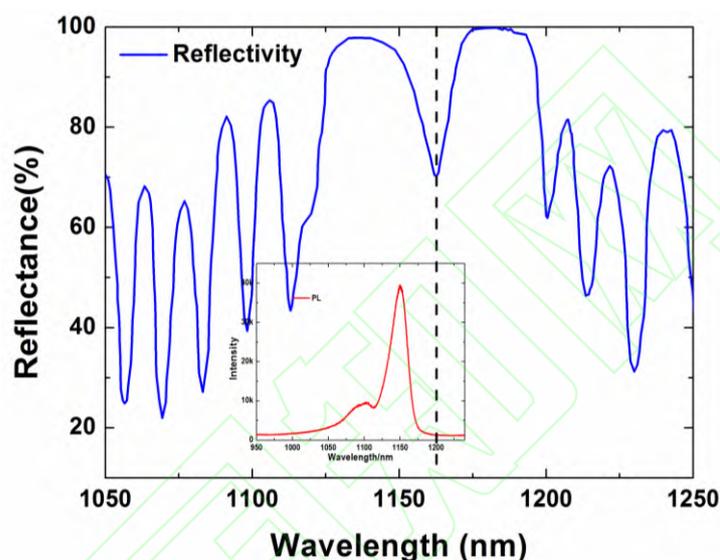


图 5 VECSEL 增益芯片反射谱

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 808nm200 μ m 光纤输出的半导体激光模块作为泵浦源, 以大约 45°角照射到增益芯片的表面, 通过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 μ m。

图 6 为采用曲率半径为 10cm 输出耦合镜时, 增益芯片在不同工作温度下的输出功率曲线。可以看出, 随着工作温度的降低, VECSEL 的阈值光功率随之降低, 最大输出功率随之增加。在 0°C、-10°C 与 -20°C 下, VECSEL 的阈值光功率分别为 4.6W、4.3W 与 3.8W, 这是因为虽然低温下 VECSEL 增益芯片的增益谱峰值波长与腔模偏差更大, 然而其光增益区数值比较高, 在阈值附近获得的增益更高, 因此也更容易产生激射。

图 6 中, VECSEL 在 0°C、-10°C 与 -20°C 下的输出功率水平得到有效提升, 分别为 0.2W, 0.6W, 1.02W, 并且温度降低后, 功率曲线的斜率也有明显增加。这是因为随着泵浦功率的

增加, VECSEL 泵浦区的工作温度急剧增加, 增益峰值波长与腔模最终到达匹配数值, 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, 导致发光区温度升高, 热应力增加, 输出功率降低^[28]。而工作温度越低, 则增益芯片表面的热扩散速度越快, 因此图 6 中低温下功率曲线的斜率更高; 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, 最大激光功率就可以得到提升。

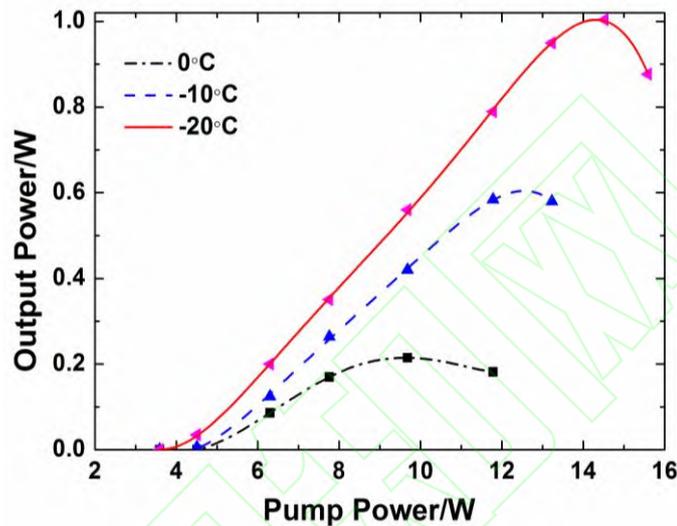


图 6 不同增益芯片温度下, VECSEL 输出功率随泵浦功率的变化曲线

Fig. 6 output power curve of VECSEL with pump power at different gain chip temperature

表 1 为 VCSEL 在 1160nm 波段附近激射的参数对比^[29-34]。从表 1 可以看出, 在 1160nm 波段附近电泵浦 VCSEL 很难做到高功率单模输出, 而我们设计制造的 VECSEL 在 1160nm 波段达到了瓦级输出功率。无 DBR 的 VECSEL 也能达到瓦级功率输出, 但是其制造工艺要求比较高。

表 1 不同种类 VCSEL 相近波长参数对比

Table 1 Comparison of similar wavelength parameters of different VCSELs

Reporting unit	Types of semiconductor laser	Peak power /mW	Lasing wavelength /nm
National Cheng-Kung University	Electrically pumped	0.18	1170
Research Institute, Chutung 310	Electrically pumped	1.53	1180
University of Strathclyde	Optically pumped	1000	1160
University at Albany	Optically pumped (QDs gain region)	2.45	1148
University of New Mexico	Optically pumped (DBR-free)	2000	1150
University of New Mexico	Optically pumped (DBR-free)	2500(Two VECSEL)	1160

VECSEL 激光器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 VECSEL 增益芯片控温 -20°C , 激光输出功率为 1.02W 时在两个正交方向上的远场光场发散角测量结果。插图 of 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° (FWHM), 具有良好的光斑对称性, 并且光斑的强度分布呈现近高斯分布形貌。图 7 插图可以看出, 捕获的激光光斑轮廓为圆形结构并且光场分布均匀性较好。

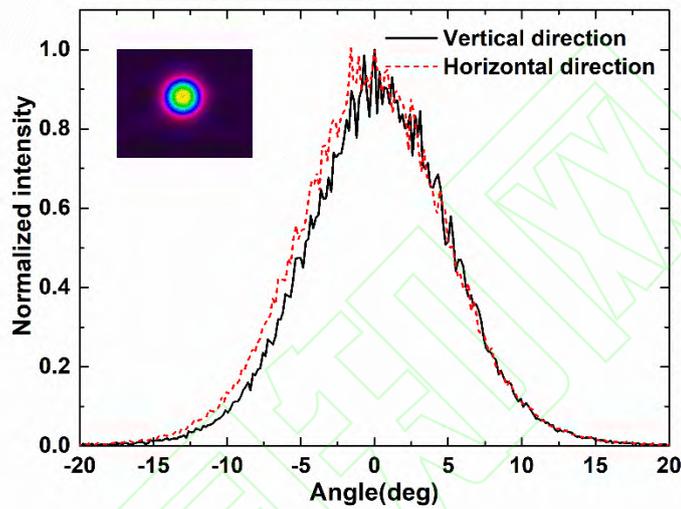


图 7 VECSEL 系统输出光束强度的远场分布, 插图为输出光斑二维彩图

Fig. 7 Far field distribution of output beam intensity of VECSEL system, and the illustrations are 2d color maps of the output spot

5 结论

本文设计和制备了一种输出波长在 1160nm 波段的光泵浦垂直腔面发射半导体激光器。为缓解高应变 InGaAs 带来的材料生长应力, 提出了二次应变补偿的设计方案, 即先用较低应变量的 GaAsP 势垒进行应力初步补偿, 再采用吸收层中的高应变 GaAsP 应变补偿层进行全应变补偿, 这种方案可以提升吸收层材料生长质量。从理论上证实这种结构的能带, 增益特性以及光生载流子注入情况均可以满足应用需求。采用 MOCVD 制备了设计的增益芯片结构并完成增益芯片制备。在增益芯片控温 -20°C 时, 实现 VECSEL 系统最大激光功率 1.02W ;

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° (FWHM), 光斑形貌为圆形对称结构, 均匀性较好。

参考文献

- [1] Wang L J, Ning Y Q, Qin L, et al. Research progress of high power semiconductor 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 technology of 980 nm high power DBR semiconductor laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 0701002.
乔闯, 苏瑞巩, 李翔, 房丹, 方铨, 唐吉龙, 张宝顺, 魏志鹏. 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, 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 Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 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[C]//Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) VI. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9734: 97340Y.
- [5] Li Y J, Zong N, Peng Q J. Characteristics and research status 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, 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[C]//Solid State Lasers XVII: Technology and Devices. International Society for Optics and Photonics, 2008, 6871: 687119.
- [8] Kantola E, Leinonen T, Ranta S, et al. Pulsed high-power yellow-orange VECSEL[C]//Semiconductor Lasers and Laser Dynamics VI. International Society for Optics and Photonics, 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[C]//Adaptive Optics Systems VI. International Society for Optics and Photonics, 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.
- [11] Yuan Q H, Jing H Q, Zhang Q Y, et al. Development and application of GaAs based near infrared high power semiconductor laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(4): 040003.

- 袁庆贺,井红旗,张秋月,仲莉,刘素平,马骁宇.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,张静,张功.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,张鹏,郭于鹤洋,宋晏蓉.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] Fan L, Hessenius C, Fallahi M, et al. Highly Strained InGaAs/GaAs Multiwatt Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser Emitting Around 1170 nm (Postprint)[R]. AIR FORCE RESEARCH LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH SENSORS DIRECTORATE, 2007.
- [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, Korpjärvi V M, et al. 589 nm multi-watt narrow linewidth optically pumped semiconductor laser for laser guide stars[C]//Advanced Solid-State Photonics. Optical Society of America, 2010: ATuA10.
- [17] Kantola E, Penttinen J P, Ranta S, 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 of strain compensated quantum wells in high power VCSEL[J].Journal of Optoelectronics . Laser, 2008(3):304-307.
王青,曹玉莲,何国荣,韦欣,渠红伟,宋国峰,陈良惠.高功率VCSEL中应变补偿量子阱的理论设计[J].光电子.激光,2008(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]. 发光学报, 2010, 31(1).
- [20] Wang F, Wang X H. Optical pumped vertical external cavity surface emitting semiconductor laser technology[M].Beijing: National Defense Industry Press,2016.1.
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, 2016.1.
- [21] Tang Y, Cao C F, Zhao X Y, et al. 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,杨锦,李金友,龚谦,王海龙.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, Korpjärvi V M, Härkönen A, et al. Recent advances in the development of yellow-orange GaInNAs-based semiconductor disk lasers[C]//Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) II. International Society for Optics and Photonics, 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[C]//Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELS) IV. International Society for Optics and Photonics, 2014, 8966: 89660D.
- [25] Yu S F. Analysis and Design of Vertical Cavity Surface Emitting Lasers [M]. New York: Wiley, 2003: 194-197
- [26] Morioka S B. High-power optically pumped semiconductor laser applications[C]//Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELS). International Society for Optics and Photonics, 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): 1700611-1700611.
- [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,刘素平,马骁宇.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-H353.
- [30] Yang H P D, Lu C, Hsiao R, et al. Characteristics of MOCVD-and MBE-grown InGa (N) As VCSELS[J]. Semiconductor science and technology, 2005, 20(8): 834.
- [31] Calvez S. GaInNAs (Sb) for solid-state laser engineering[C]//2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks. IEEE, 2011: 1-4.
- [32] Tokranov V, Yakimov M, Oktyabrsky S. QD VCSELS with InAs/InGaAs short period superlattice QW injector[C]//Quantum Dots, Particles, and Nanoclusters VI. International Society for Optics and Photonics, 2009, 7224: 72240T.
- [33] Yang Z, Albrecht A R, Cederberg J G, et al. DBR-free semiconductor disk lasers[C]//CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2015: SM3F. 7.
- [34] Yang Z, Albrecht A R, Cederberg J G, et al. Broadly Tunable DBR-Free semiconductor disk laser[C]//Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELS) VI. International Society for Optics and Photonics, 2016, 9734: 97340I.

网络首发:

标题: 1160nm光泵外腔面发射激光器设计及制备

作者: 张卓, 宁永强, 张建伟, 张继业, 曾玉刚, 张俊, 张星, 周寅利, 黄佑文, 秦莉, 刘云, 王立军

收稿日期: 2020-03-03

录用日期: 2020-04-01

DOI: 10.3788/cjl202047.0701011

引用格式:

张卓, 宁永强, 张建伟, 张继业, 曾玉刚, 张俊, 张星, 周寅利, 黄佑文, 秦莉, 刘云, 王立军. 1160nm光泵外腔面发射激光器设计及制备[J]. 中国激光, 2020, 47(7):0701011.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

您感兴趣的其他相关论文:

调制光栅Y分支可调谐激光器高精度波长调谐特性

郑胜亨 杨远洪

北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

中国激光, 2019, 46(2):0201001

高性能976 nm宽条半导体激光芯片

胡海 仇伯仓 何晋国 汪卫敏 赵楚中 刘文斌 邝朗醒 白雪

深圳清华大学研究院, 广东 深圳 518057

中国激光, 2018, 45(8):0801006

基于复振幅调制的半导体激光光束整形方法

陈本永 徐哲毅 张世华 陈瑞品 严利平

浙江理工大学纳米测量技术实验室, 浙江 杭州 310018

中国激光, 2018, 45(6):0605005

马赫-曾德尔干涉仪对抑制延时特征的作用机理研究

吴天安 张晓旭 张胜海 兰淑静

中国人民解放军信息工程大学理学院, 河南 郑州 450001

中国激光, 2018, 45(5):0501003

高可靠性瓦级660 nm半导体激光器研制

朱振 张新 肖成峰 李沛旭 孙素娟 夏伟 徐现刚

山东华光光电子股份有限公司, 山东 济南 250100

中国激光, 2018, 45(5):0501002