

### 双有源区结构4.7 $\mu\text{m}$ 中波红外量子级联激光器

王渝沛 章宇航 罗晓玥 钱晨灏 程洋 赵武 魏志祥 韩迪仪 孙方圆 王俊 周大勇

### Double active region structure 4.7 $\mu\text{m}$ medium wave infrared quantum cascade laser

WANG Yu-pei, ZHANG Yu-hang, LUO Xiao-yue, QIAN Chen-hao, CHENG Yang, ZHAO Wu, WEI Zhi-xiang, HAN Di-yi, SUN Fang-yuan, WANG Jun, ZHOU Da-yong

引用本文:

王渝沛, 章宇航, 罗晓玥, 钱晨灏, 程洋, 赵武, 魏志祥, 韩迪仪, 孙方圆, 王俊, 周大勇. 双有源区结构4.7  $\mu\text{m}$ 中波红外量子级联激光器[J]. *中国光学*, 优先发表. doi: 10.37188/CO.2023-0239

WANG Yu-pei, ZHANG Yu-hang, LUO Xiao-yue, QIAN Chen-hao, CHENG Yang, ZHAO Wu, WEI Zhi-xiang, HAN Di-yi, SUN Fang-yuan, WANG Jun, ZHOU Da-yong. Double active region structure 4.7  $\mu\text{m}$  medium wave infrared quantum cascade laser[J]. *Chinese Optics*, In press. doi: 10.37188/CO.2023-0239

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0239>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 0.9~1.0 $\mu\text{m}$ 近红外连续光纤激光器的研究进展

Research progress of 0.9 ~ 1.0  $\mu\text{m}$  near-infrared continuous-wave fiber lasers

*中国光学* (中英文). 2021, 14(2): 264 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0193>

#### 中红外波段 $\text{As}_2\text{S}_3$ 光子晶体光纤中受激布里渊散射的研究

Investigation of stimulated Brillouin scattering in  $\text{As}_2\text{S}_3$  photonic crystal fibers at the mid-infrared waveband

*中国光学* (中英文). 2022, 15(4): 835 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0003>

#### 窄线宽1064 nm光纤激光泵浦高效率中红外3.8 $\mu\text{m}$ MgO:PPLN光参量振荡器

High efficiency mid-infrared 3.8  $\mu\text{m}$  MgO:PPLN optical parametric oscillator pumped by narrow linewidth 1064 nm fiber laser

*中国光学* (中英文). 2021, 14(2): 361 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0169>

#### 2- $\mu\text{m}$ MOPA结构全光纤激光器输出特性研究

Output characteristics of an all-fiber laser with a 2- $\mu\text{m}$  MOPA structure

*中国光学* (中英文). 2023, 16(2): 399 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0191>

#### 中红外 $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ 激光器研究进展

Development progress of  $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$  lasers

*中国光学* (中英文). 2021, 14(3): 458 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0180>

#### 中波红外成像系统冷反射抑制

Narcissus suppression of medium-wave infrared imaging system

*中国光学* (中英文). 2023, 16(6): 1414 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0008>

文章编号 2097-1842(xxxx)x-0001-08

## 双有源区结构 4.7 $\mu\text{m}$ 中波红外量子级联激光器

王渝沛<sup>1</sup>, 章宇航<sup>3</sup>, 罗晓玥<sup>1</sup>, 钱晨灏<sup>4</sup>, 程洋<sup>2</sup>, 赵武<sup>2</sup>,

魏志祥<sup>2</sup>, 韩迪仪<sup>2</sup>, 孙方圆<sup>2</sup>, 王俊<sup>1,2\*</sup>, 周大勇<sup>5</sup>

(1. 四川大学电子信息学院, 四川成都 610065;

2. 苏州长光华芯光电技术股份有限公司, 江苏苏州 215163;

3. 东南大学苏州联合研究生院, 江苏苏州 215163;

4. 淮阴工学院化学工程学院, 江苏淮安 223003;

5. 材料科学姑苏实验室, 江苏苏州 215123)

**摘要:**本文报道了基于双有源区的 4.7  $\mu\text{m}$  中波红外量子级联激光器, 脊宽 9.5  $\mu\text{m}$ , 可实现室温连续基横模工作。通过在单有源区中心插入 0.8  $\mu\text{m}$  InP 间隔层, 将原有的单有源区转变成双有源区结构, 可显著降低器件有源区的峰值温度, 同时抑制高阶横模的产生。在 288 K 温度下, 腔长为 5 mm 的双有源区器件阈值电流密度为 1.14  $\text{kA}/\text{cm}^2$ , 连续输出功率为 0.71 W, 快轴发散角为 27.3°, 慢轴发散角为 18.1°。同常规单有源区结构的器件相比, 采用双有源区结构的器件, 其最大光输出功率未出现退化, 同时器件慢轴方向由多模变化为基横模, 光束质量得到了显著改善。本工作为改善高功率中波量子级联激光器的慢轴光束质量提供了一种解决思路。

**关键词:** 中红外; 量子级联激光器; 双有源区; 金属有机物化学气相沉积; 连续输出

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0239

## Double active region structure 4.7 $\mu\text{m}$ medium wave infrared quantum cascade laser

WANG Yu-pei<sup>1</sup>, ZHANG Yu-hang<sup>3</sup>, LUO Xiao-yue<sup>1</sup>, QIAN Chen-hao<sup>4</sup>, CHENG Yang<sup>2</sup>, ZHAO Wu<sup>2</sup>,

WEI Zhi-xiang<sup>2</sup>, HAN Di-yi<sup>2</sup>, SUN Fang-yuan<sup>2</sup>, WANG Jun<sup>1,2\*</sup>, ZHOU Da-yong<sup>5</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Suzhou Everbright Photonics Co., Ltd., Suzhou 215163, China;

3. Southeast University - Monash University Joint Graduate School (Suzhou), Suzhou 215163, China;

4. School of Chemical Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223003, China;

5. Gusu Laboratory of Materials, Suzhou 215123, China)

\* Corresponding author, E-mail: wjdz@scu.edu.cn

**Abstract:** In the article, we report a 4.7  $\mu\text{m}$  mid wave infrared quantum cascade laser based on double active regions, with a ridge width of 9.5  $\mu\text{m}$ . It can achieve continuous single transverse mode operation at room

收稿日期: 2024-01-03; 修订日期: xxxx-xx-xx

基金项目: 中文基金

Supported by

temperature. By inserting  $0.8 \mu\text{m}$  InP, the original single active region is transformed into a double active region structure, it can significantly reduce the peak temperature of the device's active region and suppress the generation of higher-order transverse modes. At a temperature of 288 K, the device with a double active region structure with a cavity length of 5 mm has a threshold current density of  $1.14 \text{ kA/cm}^2$ , the continuous output power of 0.706 W, the fast axis divergence angle of  $27.3^\circ$ , and the slow axis divergence angle of  $18.1^\circ$ . Compared with conventional devices with a single active region structure, the devices with a double active region structure have no degradation in their maximum optical output power, and the beam quality in the slow axis direction of the device has been significantly improved. This work provides another solution for improving the slow axis beam quality of high-power medium wave quantum cascade lasers.

**Key words:** mid-infrared; quantum cascade laser; double active region; MOCVD; continuous-wave output

## 1 引言

基于子带间跃迁的量子级联激光器已经成为中红外波段理想的光源之一<sup>[1-2]</sup>,其在痕量气体检测、空间光通信和红外对抗方面有广阔的前景应用<sup>[3-5]</sup>。由于子带间跃迁的特点,量子级联激光器波长可以覆盖中红外至太赫兹波段<sup>[6-8]</sup>。早期,量子级联激光器 (quantum cascade laser, QCL) 通常采用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 技术进行生长,这是由于 MBE 在生长厚度和界面控制方面更加精准,这样可以减小量子阱界面散射,所以在制备 QCL 方面具有天然的优势。1994 年, Faist 等人利用 MBE 研制出世界上第一个量子级联激光器<sup>[1]</sup>,其波长为  $4.2 \mu\text{m}$ ,只能在低温下工作。2001 年, Beck 等人首次实现了 QCL 室温下激射<sup>[9]</sup>。2012 年, Pranalytica 公司采用非共振抽取结构实现了  $4.6 \mu\text{m}$  的 QCL 室温连续输出,其最大输出功率可达  $3 \text{ W}$ <sup>[10]</sup>。2020 年,美国西北大学 Razeghi 课题组通过优化结构与工艺成功实现了单管 QCL 室温连续输出,最大输出功率为  $5.6 \text{ W}$ ,其激射波长在  $4.9 \mu\text{m}$ <sup>[11-13]</sup>,这也是迄今为止报导的中红外单管 QCL 最高功率。在国内,中国科学院半导体研究所刘峰奇课题组实现了室温  $9 \mu\text{m}$  QCL 连续  $1.2 \text{ W}$  输出<sup>[14]</sup>。MBE 虽然可以更好地控制界面的陡峭度和外延层的生长厚度,但其生长效率较低、设备维护昂贵,并不适合大批量生产,导致器件成本昂贵,限制了 QCL 应用的推进。与之相比,金属有机物化学气相沉积 (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 方法,虽然其固有的生长切换延迟效应会

导致界面陡峭度变差,但其生长效率高,重复性好,设备维护简单,适合大批量的生产,因此基于 MOCVD 生长高功率量子级联激光器更有利于实现 QCL 的产业化。随着 MOCVD 技术的发展,一些课题组开始利用 MOCVD 技术进行 QCL 器件的研制<sup>[15]</sup>。Roberts 等人首次利用 MOCVD 技术制备出 QCL 器件,其波长为  $9 \mu\text{m}$ ,只能在低温下工作<sup>[16]</sup>。2018 年,美国威斯康星大学 Botez 课题组提出多组分有源区结构并利用 MOCVD 技术生长了波长为  $5 \mu\text{m}$ ,可在室温下连续输出的中红外 QCL,其最大输出功率为  $2.6 \text{ W}$ <sup>[17]</sup>。在国内,中国科学院半导体研究所刘峰奇课题组利用 MOCVD 对中波 ( $4.6 \mu\text{m}$ ) 与长波 ( $8.5 \mu\text{m}$ ) QCL 进行了富有创新性的探索。在中波红外方面,其研制的器件连续输出功率达到了  $3 \text{ W}$ <sup>[18]</sup>。在长波红外方面,其研制的器件在室温下实现了连续输出  $1.04 \text{ W}$ <sup>[19]</sup>。2022 年,该课题组制备了室温连续瓦级激射 QCL,其波长为  $9 \mu\text{m}$ ,最大输出功率为  $1.02 \text{ W}$ <sup>[20]</sup>。同时,四川大学和苏州长光华芯光电技术股份有限公司的联合团队也利用 MOCVD 对中波 ( $4.6 \mu\text{m}$ ) QCL 进行了初步探索,其室温连续输出功率达到了  $0.36 \text{ W}$ <sup>[21]</sup>。

在量子级联激光器中,功率会随有源区级数变化进行缩放已经得到了证实<sup>[22]</sup>,2019 年 Arkadiy Lyakh 等人报道了 20 级有源区在脊宽  $20 \mu\text{m}$  的情况下仍然保持良好的光束质量<sup>[23]</sup>。但随着级数的减少器件的输出功率会不可避免地出现功率下降的情况。2008 年, A. Bismuto 等人通过在有源区插入四层 InP 的方式实现了 QCL 的基横模输出<sup>[24]</sup>,在本论文的工作中,我们优化了外延层设计,通过在有源区中心插入 InP 间隔层,制备了不

影响最大输出功率的宽脊宽基横模 QCL。本文通过 MOCVD 生长了高性能的中波红外 QCL, 具体探讨了有源区插入的 InP 间隔层对器件性能的影响。这种双有源区的器件的设计, 会导致高阶模式阈值增益变大, 从而使器件可以实现基横模输出。此外, 插入 InP 后, 器件的散热效果得到了显著提升, 补偿了插入 InP 间隔层所造成的材料质量下降而带来的负面影响, 因此器件的连续输出功率不会出现大幅下降。在 288 K 温度下, 该器件连续输出功率为 0.706 W, 阈值电流密度为 1.14 kA/cm<sup>2</sup>, 快轴发散角 (快轴远场半高宽) 为 27.3°, 慢轴发散角 (慢轴远场半高宽) 为 18.1°, 实现了基横模输出。同时, 相比未插入间隔层的器件, 这种双有源区器件的最大输出功率与斜率效率未出现明显下降。

## 2 结构分析与器件制备

### 2.1 结构分析

本工作设计的单有源区 QCL 外延结构如下: 衬底为掺杂 Si 的三英寸 N 型 InP 衬底, 从衬底开始, 外延层结构依次为: 3.5  $\mu\text{m}$  InP 下限制层, 0.04  $\mu\text{m}$  的下 InGaAs 波导层, 有源区, 0.02  $\mu\text{m}$  的上 InGaAs 波导层, 4  $\mu\text{m}$  上 InP 限制层。其中, 有源区材料为交替生长的 40 周期应变补偿 InGaAs/InAlAs 超晶格, 厚度为 1.8  $\mu\text{m}$ 。同采用晶格匹配的 InGaAs/InAlAs 材料相比, 采用应变平衡的 InGaAs/InAlAs 材料可以抑制高能级载流子的泄漏, 低能级载流子通过非共振抽取的方式快速抽运, 减小热回填的影响, 从而提高粒子数反转效率<sup>[12]</sup>。通过能带计算可以得出能量差  $E_{54}$  为 80 meV, 这远高于传统晶格匹配 QCL 的 50 meV, 可以进一步提升有源区的载流子注入效率。

通过在单有源区中间插入 InP 层的方式, 原本的 40 周期有源区被分成了两个 20 周期有源区, 即构成了本文工作涉及的双有源区外延结构。

在传统掩埋异质结结构中, 中红外 4.6  $\mu\text{m}$  QCL 为实现基横模输出, 器件的脊宽通常需要控制在 7  $\mu\text{m}$  以下<sup>[26]</sup>, 过小的脊宽限制了增益体积, 阻碍了光输出功率的进一步提升。我们通过使用有限元分析进行光学仿真, 将脊宽控制在 10  $\mu\text{m}$  的情况下对比了插入不同厚度 InP 对基模和一阶

侧模的影响, 模拟有效折射率参数参考文献<sup>[25]</sup>, 参数如表 1 所示。仿真可以得出器件基横模与一阶侧模的有效折射率。由损耗计算公式  $\alpha = (4\pi/\lambda)\text{Im}(n_{\text{eff}})$  计算基横模与一阶侧模的模态损耗, 光限制因子可由公式  $\Gamma = \iint_{\text{core}} |E|^2 dx dy / \iint_{\text{all}} |E|^2 dx dy$  给出。经计算, 基横模的光限制因子要高于一阶侧模的光限制因子。通过模态损耗、镜面损耗以及光学限制因子可以对器件在阈值附近激射的主导模式进行判断<sup>[23, 25, 27]</sup>, 文献<sup>[23]</sup>中定义了品质因子, 如公式 (1) 所示, 其与光限制因子成正比, 与损耗之和成反比。

$$\frac{\Gamma}{\sum \alpha}, \quad (1)$$

其中损耗主要包括镜面损耗  $\alpha_m$  和模态损耗  $\alpha_w$ ,  $\Gamma$  为光限制因子。计算出基横模与一阶侧模的品质因子后, 以基横模为基准作归一化处理。图 1 为插入不同 InP 厚度后基横模与一阶侧模的品质因子相对值 (Relative merit) 图, 我们可以看到当未插入 InP 时, 一阶侧模和基模相近, 此时一阶侧模占激射主导位置。当插入 InP 后, 一阶侧模的相对值在逐渐变小, 这证明插入 InP 可以实现对模式优化。文献<sup>[23]</sup>中, 其一阶侧模的相对值为 0.982, 基横模占主导激射模式。当插入 InP 的厚度大于 0.8  $\mu\text{m}$  时, 一阶侧模的相对值达到 0.967, 此时基横模占主导激射模式。

表 1 不同材料的有效折射率<sup>[25]</sup>

Tab. 1 Effective refractive index of different materials

Materials	doping(cm <sup>-3</sup> )	Refractive index
InP substrate	$2 \times 10^{17}$	3.084+2.00000E-4i
InP	$2 \times 10^{16}$	3.091+2.00000E-5i
InGaAs	$2 \times 10^{16}$	3.393+7.88405E-5i
Active	$2 \times 10^{17}$	3.245+4.01336E-5i
InP	$2 \times 10^{17}$	3.084+2.00000E-4i
InP	$1 \times 10^{17}$	3.088+1.00000E-4i
InP	$5 \times 10^{18}$	2.893+5.00000E-3i
InP	$2 \times 10^{19}$	2.188+2.70000E-2i
Au	/	3.319+1.84110E+1i
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	/	1.358+6.50000E-4i
Fe:InP	/	3.099+6.34895E-8i



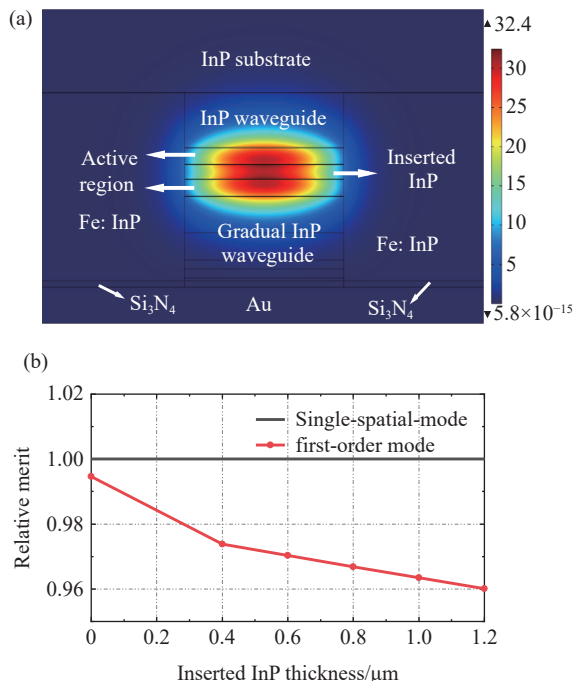


图1 (a)有限元仿真结构示意图;(b)插入不同InP厚度的横向模态的相对品质因子图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of finite element simulation structure; (b) Relative figure of merit for transverse modes of inserting different InP thicknesses

300 K 温度下材料热导率如表 2 所示<sup>[28]</sup>。QCL 的有源区通常为上百层的超晶格结构,其散热效果较差。Active(longitudinal)为外延方向有源区热导率, Active(lateral)为垂直于外延方向的热导率, InP 的热导率要远远高于有源区超晶格的热导率。因此,在注入相同热源密度的情况下,有源区的最高温度会出现大幅下降。

表 2 300 K 温度下不同材料的热导率<sup>[28]</sup>

Tab. 2 Thermal conductivity of different materials at 300 K

Materials	300 K thermal conductivity[W/(m·K)]
InP	72.18
InGaAs	4.64
Active(longitudinal)	0.76
Active(lateral)	4.48
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	13.9
AuSn	57
Cu	398.03
AlN	257.5

通过有限元分析进行热学仿真,对比了传统

QCL 与有源区中间插入 QCL 的散热效果,如图 2 所示,插入 InP 的厚度为 0.8 μm。通过仿真,在相同的热源密度下,常规 QCL 器件有源区最高温度为 443 K,双有源区结构 QCL 器件有源区最高温度为 363 K,我们可以发现当有源区中间插入 InP 后器件的散热效果会更好,从而保证了器件的输出性能。

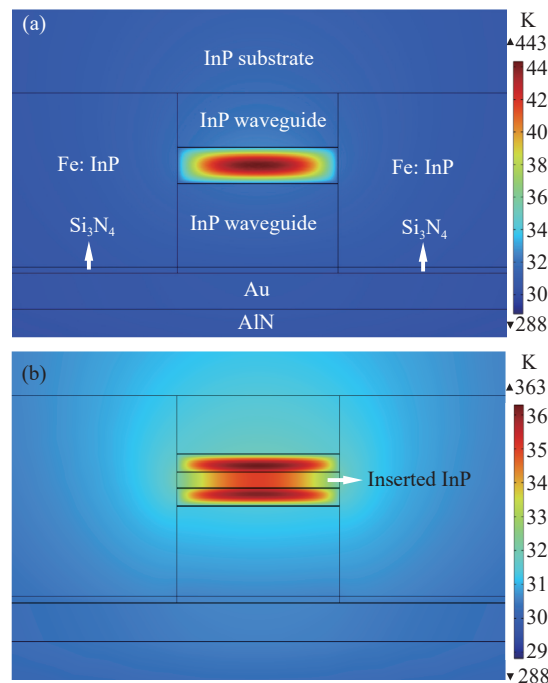


图 2 (a)单有源区器件热学仿真;(b)双有源区器件热学仿真

Fig. 2 (a) Thermal simulation of single active region device; (b) Hot blooded simulation of double active region device.

## 2.2 材料生长及表征

基于上述仿真结果,本工作生长了单有源区 (Sample 1) 和双有源区 (Sample 2) QCL 外延结构。其中,双有源区结构中的插入 InP 厚度为 0.8 μm。两个样品全结构均采用 MOCVD 设备进行生长。

在全结构生长完成后,通过 X 射线衍射 (XRD) 对材料质量进行表征。XRD 是评估多量子阱材料质量的有效方法,衍射曲线卫星峰半高宽越小,材料的生长质量越好<sup>[18]</sup>。Sample 1 和 Sample 2 的 XRD 如图 3 所示。Sample 1 XRD 衍射曲线卫星峰半高宽为 14"~16", Sample 2 XRD 衍射曲线卫星峰半高宽为 21"~23",同时 Sample 2 的衍射曲线卫星峰强度出现下降。Sample 2 的

衍射曲线卫星峰半高宽出现展宽表明插入 InP 层后材料界面质量会出现下降, 而 Sample 2 的衍射强度变低是由于插入 InP 后下方有源区衍射减弱造成的。但整体来说 Sample 1 与 Sample 2 的 XRD 衍射曲线卫星峰的半高宽都比较小<sup>[22]</sup>, 这表明样品的界面粗糙度较小, 具有良好的周期性。

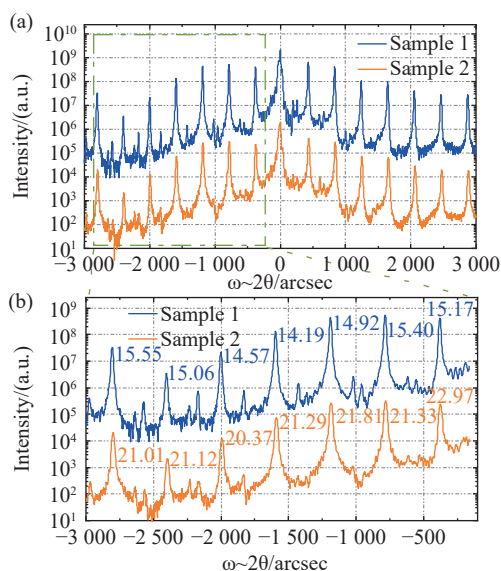


图 3 (a) Sample 1 和 Sample 2 的 X 射线双晶衍射; (b) Sample 1 和 Sample 2 的 X 射线双晶衍射放大图

Fig. 3 (a) X-ray double diffraction of Sample 1 and Sample 2; (b) enlarged images of satellite diffraction peaks of sample 1 and sample 2

两个外延样品随后被加工成双沟结构后进行再生长。使用掺 Fe 的 InP 材料填充双沟, 这是一种绝缘材料, 其目的是为了增强器件的横向散热能力。通过等离子体增强化学气相沉积 (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PEVCD) 生长 300 nm 的  $\text{Si}_3\text{N}_4$  作为电绝缘层, 表面镀上 Ti/Au 形成欧姆接触, 减薄后在衬底镀上 Ge/Au/Ni/Au 形成欧姆接触。在芯片后腔面镀上具有高反射率的金属介质膜 ( $\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Ti}/\text{Au}$ ), 其中 Au 起到反射作用,  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的作用是防止器件短路, 芯片前腔面则为自然解理面。随后将芯片封装在 AlN 热沉上进行测试。Sample 1 和 Sample 2 分别被制作成 Device 1 和 Device 2。图 4(a) 与图 4(c) 分别为 Device 1 和 Device 2 的结构示意图。

图 4(b) 与图 4(d) 分别为 Device 1 前腔面和 Device 2 前腔面在电镜下的横截面图, 黄色框线为 InGaAs/InAlAs 有源区。Device 1 脊宽为 9.43  $\mu\text{m}$ , Device 2 脊宽为 7.67  $\mu\text{m}$ , 下有源区脊宽

为 10.34  $\mu\text{m}$ , InP 插入层的厚度为 0.75  $\mu\text{m}$ 。器件脊宽差别的来源主要来自后端工艺。在芯片后腔镀上高反射率的金属膜后通过测试器件的反向 IV 得到器件的电阻值大约在 10 k $\Omega$  左右, 这表明器件后腔面在镀上 Ti/Au 后不存在短路情况。

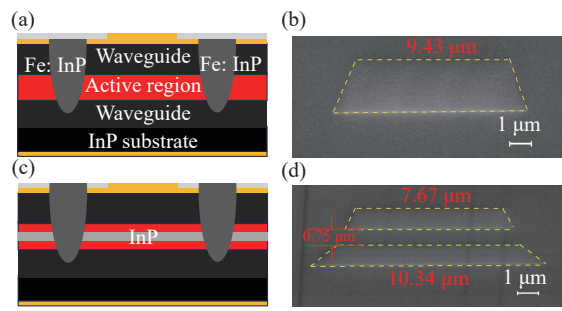


图 4 (a) Device 1 结构示意图; (b) Device 1 前腔面在电镜下的横截面图; (c) Device 2 结构示意图; (d) Device 2 在电镜下的横截面图

Fig. 4 (a) Schematic diagram of Device 1; (b) SEM of Device 1 (c) Schematic diagram of Device 2; (d) SEM of Device 2

### 3 器件性能与表征

在外延生长及流片后, 对器件进行了封装测试。在 288 K 的温度下进行连续输出特性分析, 使用半导体制冷板 (Thermoelectric Cooler, TEC) 进行温度控制, 采用热敏电阻监测温度, 功率采集使用热堆 (制造商 Coherent, 型号 PM-USB PM10), 芯片腔长固定为 5 mm。Device 1 和 Device 2 的功率-电流-电压 (PIV) 如图 5(a) 所示。Device 1 的阈值电流为 0.44 A, 阈值电流密度为 0.95 kA/cm<sup>2</sup>, 斜率效率为 1.12 W/A, 最大输出功率为 0.728 W, 最大光电转化效率为 4.4%, 器件串联电阻为 2.05  $\Omega$ 。Device 2 阈值电流为 0.54 A, 阈值电流密度为 1.14 kA/cm<sup>2</sup>, 斜率效率为 1.11 W/A, 最大输出功率为 0.706 W, 最大光电转化效率为 3.6%, 器件串联电阻为 2.66  $\Omega$ 。可以发现 Device 2 阈值电流上升, 串联电阻和工作电压变大, 而斜率效率和最大输出功率基本保持不变。

插入 InP 后会引入额外的寄生电阻, 导致器件的工作电压上升。通过有限元分析仿真光场计算可得 Device 1 和 Device 2 的基横模光限制因子分别为 0.69 和 0.48, 同时器件的 XRD 表明插入 InP 后器件的材料质量下降, 这两点是造成阈

值电流上升的主要原因。同时,由于插入 InP 后对器件的散热有一定的改善,器件发生热反转电流值增加,补偿了阈值电流上升带来的负面影响,因此器件的最大输出功率和斜率效率未发现明显的退化。Device 1 和 Device 2 的光谱如图 5(b) 所示,光谱由傅里叶红外光谱仪 (FTIR) 进行测试,采用快速扫描模式,分辨率为  $1\text{ cm}^{-1}$ ,两个样品光谱均在阈值电流下进行测量,两个样品的波长均在  $4.7\text{ }\mu\text{m}$  附近,这表明了两个样品的生长质量具有高度的一致性。

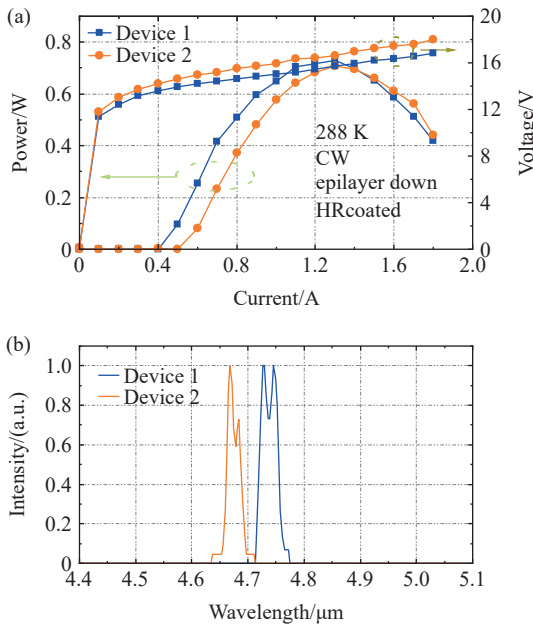


图 5 (a) Device 1 和 Device 2 在连续模式下的 PIV 曲线; (b) Device 1 和 Device 2 在阈值电流下的光谱

Fig. 5 (a) PIV curves of Device 1 and Device 2 in continuous wave; (b) Spectra of Device 1 and Device 2 at Threshold Current

最后,为了探究器件的光场特性,我们对器件的远场进行了测试,量子级联激光器的光场会随着功率的增加出现恶化,因此远场一般在工作电流下进行测试。图 6 分别展示了 Device 1 和 Device 2 的远场慢轴与快轴,均在  $1.6I_{th}$  的条件下进行测试。Device 1 在慢轴方向上出现了明显的双瓣,这是显著的高阶模式现象; Device 2 在慢轴方向上则出现了明显的高斯分布,其半高宽为  $19.6^\circ$ ,符合基横模情况。在快轴方向上, Device

#### 参考文献:

[1] FAIST J, CAPASSO F, SIVCO D L, *et al.* Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.

1 的发散角为  $30.9^\circ$ , Device 2 的发散角为  $28.3^\circ$ , Device 2 并未出现明显的退化,并且 Device 2 实现了基模激射,同模拟情况相符合。

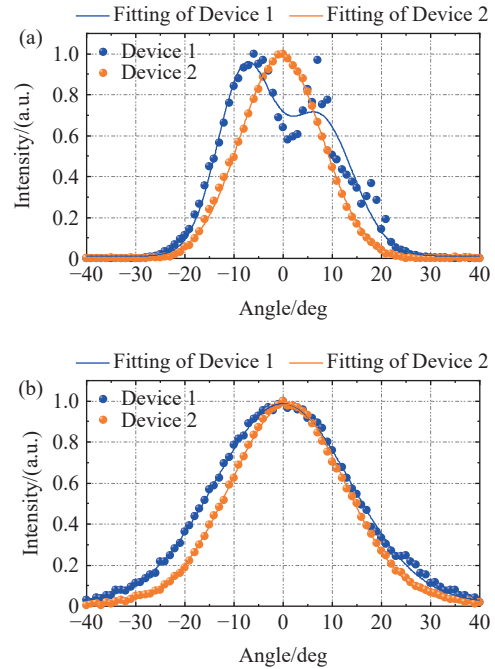


图 6 (a) Device 1 和 Device 2 在慢轴方向的远场; (b) Device 1 和 Device 2 在快轴方向的远场

Fig. 6 (a) Far field of Device 1 and Device 2 in the slow axis direction; (b) Far field of Device 1 and Device 2 in the fast axis direction

## 4 结 论

本文报道了使用 MOCVD 生长的双有源区中红外基横模量子级联激光器,器件脊宽控制在  $9.5\text{ }\mu\text{m}$  左右,双有源区器件在室温连续模式下阈值电流密度为  $1.14\text{ kA/cm}^2$ ,最大输出功率为  $0.706\text{ W}$ ,慢轴方向发散角(慢轴远场半高宽)为  $19.6^\circ$ ,快轴方向(快轴远场半高宽)为  $28.3^\circ$ 。本文还具体研究了插入 InP 后对器件功率与远场的影响,在  $9.5\text{ }\mu\text{m}$  脊宽下常规 QCL 器件会出现多模,在插入  $0.8\text{ }\mu\text{m}$  InP 后,在器件的最大输出功率和斜率效率没有出现明显退化的同时,器件的远场在慢轴方向上得到了明显的改善,在快轴方向上未出现明显退化。

- [2] 赵越, 张锦川, 刘传威, 等. 中远红外量子级联激光器研究进展 (特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(10): 1003001. ZHAO Y, ZHANG J CH, LIU CH W, *et al.*. Progress in mid-and far-infrared quantum cascade laser (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 1003001. (in Chinese).
- [3] DELY H, BONAZZI T, SPITZ O, *et al.*. 10 Gbit s<sup>-1</sup> free space data transmission at 9  $\mu\text{m}$  wavelength with unipolar quantum optoelectronics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(2): 2100414.
- [4] SPITZ O, DIDIER P, DURUPT L, *et al.*. Free-space communication with directly modulated mid-infrared quantum cascade devices[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(1): 1200109.
- [5] 温志渝, 王玲芳, 陈刚. 基于量子级联激光器的气体检测系统的发展与应用[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(8): 2043-2048. WEN ZH Y, WANG L F, CHEN G. Development and application of quantum cascade laser based gas sensing system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(8): 2043-2048. (in Chinese).
- [6] FATHOLOLOUMI S, DUPONT E, CHAN C W I, *et al.*. Terahertz quantum cascade lasers operating up to  $\sim 200$  K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling[J]. *Optics Express*, 2012, 20(4): 3866-3876.
- [7] LI L H, CHEN L, ZHU J X, *et al.*. Terahertz quantum cascade lasers with  $> 1$  W output powers[J]. *Electronics Letters*, 2014, 50(4): 309-311.
- [8] VITIELLO M S, SCALARI G, WILLIAMS B, *et al.*. Quantum cascade lasers: 20 years of challenges[J]. *Optics Express*, 2015, 23(4): 5167-5182.
- [9] BECK M, HOFSTETTER D, AELLEN T, *et al.*. Continuous wave operation of a mid-infrared semiconductor laser at room temperature[J]. *Science*, 2002, 295(5553): 301-305.
- [10] LYAKH A, MAULINI R, TSEKOUN A, *et al.*. 3 W continuous-wave room temperature single-facet emission from quantum cascade lasers based on nonresonant extraction design approach[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(14): 141113.
- [11] BAI Y B. *High wall plug efficiency quantum cascade lasers* [D]. Xi'an: Northwestern University, 2011.
- [12] BAI Y, BANDYOPADHYAY N, TSAO S, *et al.*. Highly temperature insensitive quantum cascade lasers[J]. *Applied Physics Letter*, 2010, 97(25): 251104.
- [13] WANG F, SLIVKEN S, WU D H, *et al.*. Continuous wave quantum cascade lasers with 5.6 W output power at room temperature and 41% wall-plug efficiency in cryogenic operation[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(5): 055120.
- [14] NIU SH, YANG P CH, HUANG R X, *et al.*. High power, broad tuning quantum cascade laser at  $\lambda \sim 8.9$   $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2023, 31(25): 41252-41258.
- [15] WANG C A, HUANG R K, GOYAL A, *et al.*. OMVPE growth of highly strain-balanced GaInAs/AlInAs/InP for quantum cascade lasers[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2008, 310(23): 5191-5197.
- [16] ROBERTS J S, GREEN R P, WILSON L R, *et al.*. Quantum cascade lasers grown by metalorganic vapor phase epitaxy[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(24): 4221-4223.
- [17] BOTEZ D, KIRCH J D, BOYLE C, *et al.*. High-efficiency, high-power mid-infrared quantum cascade lasers [Invited] [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(5): 1378-1398.
- [18] FEI T, ZHAI SH Q, ZHANG J CH, *et al.*. 3 W continuous-wave room temperature quantum cascade laser grown by metal-organic chemical vapor deposition[J]. *Photonics*, 2023, 10(1): 47.
- [19] FEI T, ZHAI SH Q, ZHANG J CH, *et al.*. High power  $\lambda \sim 8.5$   $\mu\text{m}$  quantum cascade laser grown by MOCVD operating continuous-wave up to 408 K[J]. *Journal of Semiconductors*, 2021, 42(11): 112301.
- [20] SUN Y Q, YIN R, ZHANG J CH, *et al.*. High-performance quantum cascade lasers at  $\lambda \sim 9$   $\mu\text{m}$  grown by MOCVD[J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 37272-37280.
- [21] 庞磊, 程洋, 赵武, 等. 基于 MOCVD 生长的 4.6  $\mu\text{m}$  中红外量子级联激光器[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(6): 20210980. PANG L, CHENG Y, ZHAO W, *et al.*. Mid-infrared quantum cascade laser grown by MOCVD at 4.6  $\mu\text{m}$ [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(6): 20210980. (in Chinese).
- [22] 孙永强, 费腾, 黎昆, 等. MOCVD 生长的瓦级中波红外高功率量子级联激光器[J]. *光学学报*, 2022, 42(22): 2214002. SUN Y Q, FEI T, LI K, *et al.*. MOCVD-based mid-wave infrared quantum cascade lasers with watt-level power[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(22): 2214002. (in Chinese).



- [23] SUTTINGER M, GO R, AZIM A, *et al.*. High brightness operation in broad area quantum cascade lasers with reduced number of stages[C]. *Proceedings of 2019 Conference on Lasers and Electro-Optics*, IEEE, 2019: 1-2.
- [24] BISMUTO A, GRESCH T, BÄCHLE A, *et al.*. Large cavity quantum cascade lasers with InP interstacks[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(23): 231104.
- [25] RYU J H, KIRCH J D, KNIPFER B, *et al.*. Beam stability of buried-heterostructure quantum cascade lasers employing HVPE regrowth[J]. *Optics Express*, 2021, 29(2): 2819-2826.
- [26] XIE F, CANEAU C, LEBLANC H P, *et al.*. Room temperature CW operation of short wavelength quantum cascade lasers made of strain balanced  $\text{Ga}_x\text{In}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{In}_{1-y}$  as material on InP substrates[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(5): 1445-1452.
- [27] YU N F, DIEHL L, CUBUKCU E, *et al.*. Near-field imaging of quantum cascade laser transverse modes[J]. *Optics Express*, 2007, 15(20): 13227-13235.
- [28] LEE H K, YU J S. Thermal effects in quantum cascade lasers at  $\lambda \sim 4.6 \mu\text{m}$  under pulsed and continuous-wave modes[J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(3): 619-627.

#### 作者简介:



王渝沛(1998—),男,山西临汾人,硕士研究生主要从事中波量子级联激光器方面的研究。E-mail: [17843082512@163.com](mailto:17843082512@163.com)



王 俊(1965—),男,湖北人,博士,教授,博士生导师,1997年于加拿大McMaster大学取得博士学位,主要从事半导体激光器方面的研究。E-mail: [wjdz@scu.edu.cn](mailto:wjdz@scu.edu.cn)