

## 双有源区结构4.7 μm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

#### 4.7 µm mid-wave infrared quantum cascade laser with double active region structure

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 μm中波红外量子级 联激光器[J]. 中国光学, 2024, 17(5): 1-8. 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. 4.7 m mid-wave infrared quantum cascade laser with double active region structure[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1-8. doi: 10.37188/CO.2023-0239

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/C0.2023-0239

#### 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 0.9~1.0 µm近红外连续光纤激光器的研究进展

Research progress of 0.9 ~ 1.0  $\mu$  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As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>光子晶体光纤中受激布里渊散射的研究

Investigation of stimulated Brillouin scattering in As<sub>2</sub>S<sub>2</sub> 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 μm MgO:PPLN光参量振荡器

High efficiency mid-infrared 3.8 μ 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-μm 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-μm MOPA structure 中国光学(中英文). 2023, 16(2): 399 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0191

## 中红外Fe<sup>2+</sup>:ZnSe激光器研究进展

Development progress of Fe<sup>2+</sup>: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(2024)05-0001-08

# 双有源区结构 4.7 μm 中波红外量子级联激光器

王渝沛1,章宇航3,罗晓玥1,钱晨灏4,程 洋2,赵 武2,

魏志祥2,韩迪仪2,孙方圆2,王 俊1.2\*,周大勇5

(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:**本文报道了一种基于双有源区的 4.7 μm 中波红外量子级联激光器, 脊宽为 9.5 μm, 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 μm 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 kA/cm<sup>2</sup>, 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

# 4.7 μm mid-wave infrared quantum cascade laser with double active region structure

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: This paper reports a 4.7-µm mid-wave infrared quantum cascade laser based on double active regions, with a ridge width of 9.5 µm. It can achieve continuous single transverse mode operation at room tem-

收稿日期:2024-01-03;修订日期:xxxx-xx-xx

基金项目:国家重点研发计划(No. 2018YFB1107300)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB1107300)

perature. By inserting 0.8-µm InP, the original single active region is transformed into a double active region structure, which 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 kA/cm<sup>2</sup>, a continuous output power of 0.706 W, a fast axis divergence angle of 27.3°, and a slow axis divergence angle of 18.1°. The devices with a double active region structure have no degradation in their maximum optical output power and show a significant improvement in the beam quality in the slow axis direction of the device when compared with conventional devices with a single active region structure. These results provide a solution to the problem of 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[1-2],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[3-5]。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[6-8]。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 µm,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 µm 的 QCL 室温连续输 出,其最大输出功率可达3W<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 W, 其激射波长在 4.9 µm<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 µm QCL 连续 1.2 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, MO-CVD)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 µm,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 µm, 可在室温下连续输出的中 红外 QCL, 其最大输出功率为 2.6 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 µm)与长波(8.5 µm)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3W<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 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 µm, 最大输出功率为 1.02 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 µm)QCL 进行了初步探索, 其室温连 续输出功率达到了 0.36 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 μm 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 出性能不会出现大幅下降。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 μm InP 下限制层, 0.04 μm 的下 InGaAs 波导层, 有源区, 0.02 μm 的 上 InGaAs 波导层, 4 μm 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 μm。同采用晶格匹配 的 InGaAs/InAlAs 材料相比, 采用应变平衡的 In-GaAs/InAlAs 材料相比, 采用应变平衡的 In-GaAs/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, 以减小热回填的影响, 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<sub>54</sub> 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 μm QCL 为实现基横模输出,器件的脊宽通常需要控 制在 7 μm 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。本文通过使用 有限元分析进行光学仿真,将脊宽控制在 10 μm 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 [25],参数如 表 1 所示。通过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 $\alpha$  =  $(4\pi/\lambda)Im(n_{eff})$ 计算基横模与一阶侧模的模态 损耗。光限制因子可由公式 $\Gamma = \iint_{core} |E|^2 dxdy/$  $\iint_{al} |E|^2 dxdy$ 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 [23] 中 定义了品质因子 Q,如公式 (1) 所示,其与光限制 因子成正比,与损耗之和成反比。

$$Q = \frac{\Gamma}{\sum \alpha} \quad , \tag{1}$$

其中损耗主要包括镜面损耗α<sub>m</sub>和模态损耗α<sub>w</sub>, Γ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 (彩图见期刊电子版)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。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 可以实现模式优化。文献 [23] 中,其一阶 侧模的相对值为 0.982,基横模为主导激射模式。 当插入 InP 的厚度大于 0.8 μm 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 不同材料不同掺杂浓度的有效折射率<sup>[25]</sup> Tab. 1 Effective refractive indexes of different materials different doping conditions

Materials	doping density	Refractive index
InP substrate	2×10 <sup>17</sup>	3.084+2.00000E-4i
InP	2×10 <sup>16</sup>	3.091+2.00000E-5i
InGaAs	2×10 <sup>16</sup>	3.393+7.88405E-5i
Active	2×10 <sup>17</sup>	3.245+4.01336E-5i
InP	2×10 <sup>17</sup>	3.084+2.00000E-4i
InP	1×10 <sup>17</sup>	3.088+1.00000E-4i
InP	5×10 <sup>18</sup>	2.893+5.00000E-3i
InP	2×10 <sup>19</sup>	2.188+2.70000E-2i
Au	/	3.319+1.84110E+1i
$Si_3N_4$	/	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) 在有源区插入不同 InP 厚度的横向模态的相对品质因子图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of the finite element simulation structure; (b) relative figure of merit for transverse modes when inserting different InP thicknesses in active region

300 K 温度下材料的热导率如表 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。由表 1 可知 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. 2Thermal conductivities of different materials at<br/>300 K temperature

Materials	thermal conductivity/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )
InP	72.18
InGaAs	4.64
Active(longitudinal)	0.76
Active(lateral)	4.48
$Si_3N_4$	13.9
AuSn	57
Cu	398.03
AIN	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(彩图见期刊电子版)所示,插入 InP 的厚度 为 0.8 μm。经仿真知,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。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) 单有源区器件及 (b) 双有源区器件热学仿真结果 Fig. 2 Thermal simulation results of (a) single active region device and (b) 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,双有源区结构中插入的 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,利用 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(彩图见期刊电子版)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 的衍射曲线卫星峰半 高宽出现展宽表明插入 InP 层后材料界面质量会 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 Sample 1 和 Sample 2 的 (a)X 射线双晶衍射及其 (b) 放大图

Fig. 3 (a) X-ray double diffraction and their (b) enlarged images of Sample 1 and Sample 2

两个外延样品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 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 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 (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti/Au),其中 Au 起到反射作 用,Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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)(彩图见期 刊电子版) 分别为 Device 1 和 Device 2 的结构示 意图。

图 4(b) 与图 4(d)(彩图见期刊电子版)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 μm, Device 2 脊宽为 7.67 μm, 下有源区脊宽为 10.34 μm, InP 插入层的 厚度为 0.75 μm。器件脊宽差别主要来自后端工 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 I-V 可得到器件的电阻值大约在 10 kΩ 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 和 Device 2 的结构示意图; (b) Device 1 和 (d) Device 2 前腔面在电镜下的横截面图
- Fig. 4 Schematic diagram of (a) Device 1 and Device 2; cross-sectional SEM images of the front cavity of (b) Device 1 and (d) 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 温度下进行连续输出特性分析。使 用半导体制冷板 (ThermoelectricCooler, 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 (制作商 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)(彩图见期刊电子版) 所示。可见, 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 Ω。 Device 2 的阈值 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 Ω。 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 对 器件散热效果有一定改善,器件发生热反转所对 应的电流值增加,这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)(彩图见期刊电子版)所示,光谱由傅立 叶红外光谱仪 (FTIR)进行测试,采用快速扫描模 式,分辨率为 1 cm<sup>-1</sup>,两个样品光谱均在阈值电流 下测量获得,两个样品的波长均在 4.7 μm 附近。 结果表明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,对器件的远场进行测试。由于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测试。图 6(彩图见期刊电子版)分别展示了Device 1 和 Device 2 的远场慢轴与快轴,均在1.6*I*th 的条件下进行测试。由图 6 可知: 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

#### 参考文献:

显的高斯分布,其半高宽为 19.6°,符合基横模情况。在快轴方向上, Device 1 的发散角为 30.9°, Device 2 的发散角为 28.3°, Device 2 并未出现明 显退化,并且 Device 2 实现了基模激射,同模拟情 况相符合。



图 6 Device 1 和 Device 2 在 (a) 慢轴方向及 (b) 快轴方 向的远场

# 4 结 论

本文使用 MOCVD 生长了双有源区中红外 基横模量子级联激光器,器件脊宽控制在 9.5 µm 左右,双有源区器件在室温连续模式下的阈值电 流密度为 1.14 kA/cm<sup>2</sup>,最大输出功率为 0.706 W, 慢轴方向发散角 (慢轴远场半高宽) 为 19.6°,快轴 方向发散角 (快轴远场半高宽) 为 28.3°。本文还 具体研究了插入 InP 对器件功率与远场的影响, 发现:在 9.5 µm 脊宽下常规 QCL 器件会出现多 模在插入 0.8 µm 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改善,在快轴方向上 未出现明显退化。

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

- [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 μm 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 ~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 λ ~8.9 μm[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 λ~ 8.5 µm 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 λ ~9 µm grown by MOCVD[J]. Optics Express, 2022, 30(21): 37272-37280.
- [21] 成磊,程洋,赵武,等.基于 MOCVD 生长的 4.6 µm 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 µm[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 Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>As/Al<sub>y</sub>In<sub>1-y</sub> 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  $\lambda \sim 4.6 \mu m$  under pulsed and continuous-wave modes [J]. *Applied Physics B*, 2012, 106(3): 619-627.

#### 作者简介:



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