

MOCVD 生长的瓦级中波红外高功率量子级联激光器

孙永强^{1,2}, 费腾^{1,2}, 黎昆^{1,2}, 郭凯¹, 张锦川¹, 卓宁¹, 刘俊岐^{1,2}, 王利军^{1,2}, 刘舒曼^{1,2}, 贾志伟¹, 翟慎强^{1*},
刘峰奇^{1,2**}, 王占国^{1,2}

¹中国科学院半导体研究所半导体材料科学重点实验室, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

摘要 基于金属有机物化学气相沉积(MOCVD)技术实现了室温连续(CW)输出功率达到瓦级的中波红外量子级联激光器(QCL)。通过MOCVD生长条件优化,实现了高界面质量双声子共振结构材料生长,制备出室温CW功率最高为1.21 W的4.6 μm QCL。具体研究了基于生长的30和40级有源区材料所制备器件的性能,探究了不同级数对器件性能的影响。相比于30级有源区器件,40级有源区器件单位面积等效输出功率没有明显提升,但器件性能随温度的升高迅速下降,这归因于更加显著的热积累效应和外延材料变厚导致的质量恶化。因此,在通过增加有源区级数提升器件功率时,需要充分考虑有源级数、热积累和材料生长质量等因素之间的平衡。MOCVD是半导体材料产业界普遍采用的技术,本研究工作对于提升QCL材料制备效率、推进QCL技术产业化应用具有重要意义。

关键词 激光器; 中红外; 量子级联激光器; 金属有机物化学气相沉积; 高功率; 连续输出

中图分类号 TN248.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2214002

MOCVD-Based Mid-Wave Infrared Quantum Cascade Lasers with Watt-Level Power

Sun Yongqiang^{1,2}, Fei Teng^{1,2}, Li Kun^{1,2}, Guo Kai¹, Zhang Jinchuan¹, Zhuo Ning¹,
Liu Junqi^{1,2}, Wang Lijun^{1,2}, Liu Shuman^{1,2}, Jia Zhiwei¹, Zhai Shenqiang^{1*}, Liu Fengqi^{1,2**},
Wang Zhanguo^{1,2}

¹Key Laboratory of Semiconductor Materials Science, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

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

Abstract Based on the metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) technology, we designed a mid-wave infrared quantum cascade laser (QCL) with continuous-wave (CW) and watt-level output powers at room temperature. By optimizing MOCVD growth conditions, we obtained double-phonon resonance (DPR) materials with a high-quality interface and prepared a 4.6 μm QCL with a maximum CW output power of 1.21 W at room temperature. Furthermore, we specifically studied the performance of devices made of materials grown in 30-stage and 40-stage active regions and explored the effect of different active region stages on the device performance. Compared with that of the device in the 30-stage active region, the equivalent output power per unit area of the device in the 40-stage active region is not significantly improved. Instead, the 40-stage device performance drops rapidly as temperature increases, which can be attributed to outstanding heat accumulation and quality deterioration caused by thick epitaxial materials. Therefore, it is necessary to fully consider the balance among factors such as the number of active stages, heat accumulation, and material growth quality when the output power of QCL is improved by increasing the number of active region stages. MOCVD is a technology commonly used in the semiconductor material industry. This research is of great significance for promoting

收稿日期: 2022-05-05; 修回日期: 2022-05-18; 录用日期: 2022-06-04

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB0408401)、北京市科技计划课题(Z201100004020006)

通信作者: *zsqzsmbj@semi.ac.cn; **fqliu@semi.ac.cn

efficient production of QCL materials and expanding applications of QCL technologies in industries.

Key words lasers; mid-infrared; quantum cascade laser; metal organic chemical vapor deposition; high power; continuous-wave output

1 引言

基于子带间跃迁的量子级联激光器(QCL)^[1]是中远红外波段理想的激光光源,通过精巧的能带结构设计可突破半导体材料本征带隙限制、实现波长拓展,是半导体激光器发展史上具有里程碑意义的器件,在红外光电对抗、环境检测、工业过程监测、自由空间通信等国民经济和国防安全众多领域具有迫切应用需求^[2-6]。自1994年首次实现QCL以来,研究人员提出了多种设计以提升QCL的功率,如经典的双声子共振结构(DPR)^[7]和束缚态到连续态结构(BTC)^[8]。QCL材料由上千层纳米级薄层组成,界面状态是限制材料质量和器件性能的重要因素,分子束外延(MBE)技术生长的材料具有界面陡峭特点,在制备QCL方面具有天然优势,因此自QCL发明以来,材料制备主要以MBE技术为主。2008年Bai等^[9]利用气源MBE,基于双声子共振结构设计,将激光波长为4.6 μm的QCL室温连续输出功率提高到1.3 W^[10],这是世界上第一个突破瓦级的QCL。随后Bai等^[11-12]采用浅阱有源区和高势垒弛豫/注入区设计进一步提升器件性能,制备的激光波长为4.9 μm的单管基横模QCL室温连续波输出功率达5.6 W^[13],这是迄今为止单管QCL的世界最高输出功率。MOCVD是另外一种半导体材料精确制备技术,也是目前半导体产业界普遍采用的材料制备技术,随着MOCVD设备的不断发展,基于MOCVD技术的QCL研究也逐渐发展。在长波红外方面,国际上多个研究小组报道了通过MOCVD生长的匹配InGaAs/InAlAs材料体系的室温瓦级CW输出的高性能QCL^[14-16];在中波红外方面,Botez等^[14]利用MOCVD生长的5 μm QCL室温CW输出功率达到2.6 W。在国内,中国科学院半导体研究所刘峰奇课题组^[17]使用MOCVD实现瓦级(1.04 W)室温下CW输出的8.5 μm QCL。四川大学和苏州长光华芯光电技术股份有限公司利用MOCVD对中波(4.6 μm)QCL也积极开展科研探索^[18],CW输出功率达到0.364 W。虽然MBE技术可以更好地控制界面以及层厚,从而实现高性能QCL,但是随着QCL的广泛使用,MBE技术由于超高真空操作工艺,生产效率低、成本高,限制了QCL的产业化应用推进。具有高效率特性、更适合于产业化的MOCVD技术是实现QCL材料高效制备的重要选择,基于MOCVD技术的高性能QCL研究对于推进QCL产业化发展具有重要意义。

本文报道了通过MOCVD生长的高性能中波红外QCL。通过MOCVD生长条件优化,获得了高质量应变补偿InGaAs/InAlAs/InP QCL材料,制备出室温CW功率最高为1.21 W的4.6 μm QCL。具体研究了利用生长的30和40级有源区材料所制备器件的

性能,探究了不同级数对器件性能的影响。相比于30级有源区器件,40级有源区器件单位面积等效输出功率没有明显提升,但器件性能随温度的升高迅速下降,这归因于更加显著的热积累效应和外延材料变厚导致的质量恶化。因此,在通过增加有源区周期数提升器件功率时,需要充分考虑有源级数、热积累和材料生长质量等因素之间的平衡。MOCVD是半导体材料产业界普遍采用的技术,本研究工作对于推进QCL技术发展和应用具有重要意义。

2 材料外延与器件制备

使用Aixtron CCS 3×2" MOCVD设备生长全结构,生长环境为低压(100 mbar, 1 bar=0.1 MPa)。III族前驱体是三甲基铟[TMIn, In(CH₃)₃]、三甲基镓[TMGa, Ga(CH₃)₃]、三甲基铝[TMAl, Al(CH₃)₃]和三甲基镓[TEGa, Ga(C₂H₅)₃],V族前驱体是砷烷(AsH₃)和磷化氢(PH₃)。n型掺杂剂前驱体是在氢气中平衡的稀释甲硅烷(SiH₄)(浓度为0.02%)。QCL在N型InP衬底(Si,掺杂浓度为2×10¹⁷ cm⁻³,即单位立方厘米体积内的原子数为2×10¹⁷)上生长。外延生长温度为600~700 °C。QCL有源区的生长速率在0.1~0.5 nm/s之间,波导和盖层(N型掺杂的InP)的生长速率为0.3~0.8 nm/s,生长过程中反应物质中的V族元素总物质的量与III族元素总物质的量之比约为100。本次生长QCL的有源区采用类似于双声子共振的QCL有源区结构,基于文献[1]并进行了优化设计。采用这种双声子共振结构可以产生较短的子带间电子跃迁时间,使得电子能够有效地注入到注入区中,从而增加上能级寿命,提高粒子数反转效率。同时采取双声子结构的应变材料组合用于将异质结的导带偏移增大,以防止电子从量子阱中的束缚态逃逸。

所生长材料有源区分别包括30级(样品1)和40级(样品2)应变补偿In_{0.668}Ga_{0.332}As/In_{0.361}Al_{0.639}As耦合量子阱结构。利用MOCVD生长QCL会使材料的界面不陡峭,因此为了解决这个问题,增加有源区发光区域量子垒的厚度且稍微增大材料的应变,目的是形成有效的量子垒以提升界面的陡峭程度。进一步在反应物质中V族元素总物质的量与III族元素总物质的量之比较大和高温下来生长材料,目的是减小界面的粗糙度。整个外延结构如下:3.0 μm下包层(Si,单位立方厘米体积内的原子数为2.2×10¹⁶),30级或40级有源/注入区,其中有源区结构层厚为2.76/1.67/2.46/1.77/2.17/1.87/2.07/2.07/1.97/2.07/1.77/2.66/1.77/3.74/1.22/1.32/4.37/1.32/3.86/1.42/3.66/2.24,加粗数字为In_{0.362}Al_{0.638}As的层厚,不加粗数字为In_{0.668}Ga_{0.332}As的层厚。4 μm(InP)上覆层(Si,单位立方厘米体积内的原子数为2.2×10¹⁶)和0.6 μm覆盖层

(Si, 单位立方厘米体积内的原子数为 5×10^{18})。对于材料表征, 利用 X 射线衍射 (XRD) 表征外延层的内部界面和材料整体质量。

XRD 是评估多量子阱结构内部界面和整体质量的有效实验方法。通过 XRD 对样品 1 和样品 2 进行测量研究, 图 1(a) 是样品 1 的外延材料的 $\omega/2\omega$ XRD 扫描曲线和拟合曲线, 可以看出实验测试结果与模拟结果几乎完全符合, 说明实际生长的周期数与设计的周期数几乎一致, 厚度误差在 1% 以内。图 1(a) 所示, XRD 测试结果具有高达 15 阶的高分辨率超晶格峰, 表明整个 30 级

层结构中, 层厚度、材料组分和界面切换具有良好的一致性。图 1(b) 是样品 1 的卫星衍射峰和样品 2 卫星衍射峰的放大对比图, 图中卫星峰半高全宽 (FWHM) 被标记。衍射卫星峰数量和 FWHM 是衡量整体材料质量的重要参数。从图 1(b) 观察到样品 1 卫星峰的 FWHM 为 $14'' \sim 18''$, 这表明样品 1 异质结构的界面粗糙度较小, 材料质量高, 而 40 级样品的 XRD 衍射曲线卫星峰的 FWHM 展宽到了 $44'' \sim 53''$, 表明材料整体质量变差, 这说明随着有源区周期数的增加, 材料厚度变厚对高质量材料的外延生长带来了更大挑战。

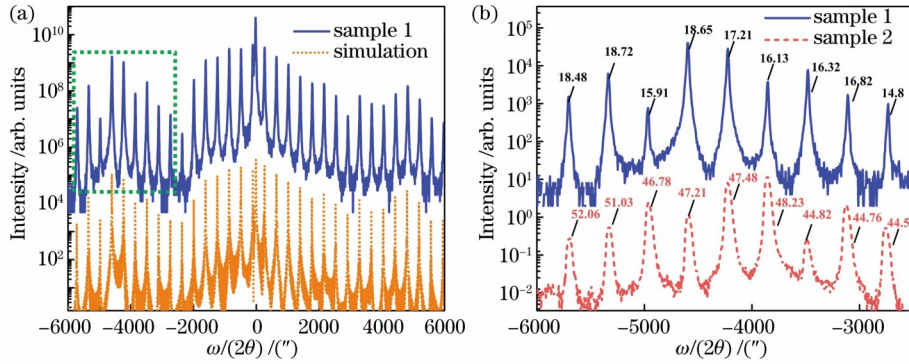


图 1 样品 1 和样品 2 的 X 射线双晶衍射 $\omega/(2\theta)$ 测试结果及样品 1 的拟合结果。(a) 样品 1 的 X 射线双晶衍射 $\omega/(2\theta)$ 扫描测试结果及拟合结果; (b) 样品 1 和样品 2 的卫星衍射峰的放大图 [卫星衍射峰的半峰全宽 (FWHM) 以角秒标记]

Fig. 1 X-ray double crystal diffraction $\omega/(2\theta)$ experimental results of samples 1 and 2 and fitting results of sample 1. (a) X-ray double-crystal diffraction $\omega/(2\theta)$ scanning experimental results and fitting results of sample 1; (b) enlarged images of satellite diffraction peaks of sample 1 and sample 2 [full width at half maximum (FWHM) of satellite diffraction peaks is marked in arc second]

为表征材料的光电特性, 外延晶片被制作成双沟波导器件, 图 2(a) 展示了所制备器件结构的二维示意图。通过等离子增强化学气相沉积 (PECVD) 生长 300 nm 厚的 SiO_2 层, 作为填充半绝缘 InP:Fe 的掩模。沉积的 450 nm 厚的 SiO_2 层起到绝缘作用, 电子束蒸发沉积的 Ti/Au 层提供电接触。额外电镀了 4 μm 厚的金层, 以进一步改善散热。在减薄后, Ge/Au/Ni/Au 金属接触层沉积在晶片的衬底侧。将样品解理成器件, 后腔面蒸镀上具有高反射率的膜 ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti/Au/Ti/Al}_2\text{O}_3$, 厚度为 200 nm/10 nm/100 nm/10 nm/120 nm), 将芯片烧结在金刚石热沉上以提高散热效率。然后将带有芯片的金刚石热沉焊接在镀钢的铜热沉表面, 最后通过引线键合完成器件工艺制备。图 2

(b) 是样品 1 的器件在高倍光学显微镜下的横截面图, 样品 2 与样品 1 的横截面图相似, 通过高倍光学显微镜测量, 得到样品 1 的脊宽 (L) 为 7.1 μm , 样品 2 的脊宽为 8.5 μm , 两个器件脊宽的差别主要来源于器件工艺的不一致性。器件制备完成后, 测试使用的样品 1 和样品 2 激光器的电阻值在 2~10 $\text{k}\Omega$ 之间, 这表明后腔面蒸镀高反射率膜含有 Ti, Au 金属材料没有使样品 1 和样品 2 激光器短路。然后在温控系统上对两个器件分别进行测试, 其中热敏电阻信号用作温控系统反馈, 以便在激光驱动电流增加的情况下将激光器保持在恒定温度。使用抛光金属管的功率计测量输出功率, 该金属管可以将来自激光器腔面的光直接引导到校准的热电堆功率计的表面上。

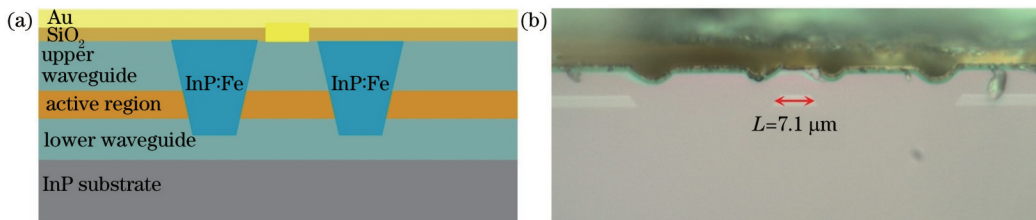


图 2 样品器件的结构模型及实际测试的结构。(a) 器件结构的二维示意图; (b) 样品 1 在高倍光学显微镜下的结构

Fig. 2 Structural model of sample device and structure of actual fabricated device. (a) 2D schematic diagram of device structure; (b) structure of sample 1 under high magnification optical microscope

3 实验结果与分析

实验结果如图 3 所示。图 3(a) 是所制备器件测得的功率 P 、电压 V 随电流 I 变化的曲线 (P - I - V 曲线), 30 和 40 级有源区材料所制备的器件的 283 K CW 的最高输出功率分别为 1.02 W 和 1.21 W, 成功实现室温连续输出功率超过瓦级。高功率是 QCL 进行实际应用的重要技术指标, 本研究工作是国内首次基于 MOCVD 技术制备出瓦级功率输出的中波红外 QCL 材料和器件, 对于推进 QCL 技术产业化应用具有重要

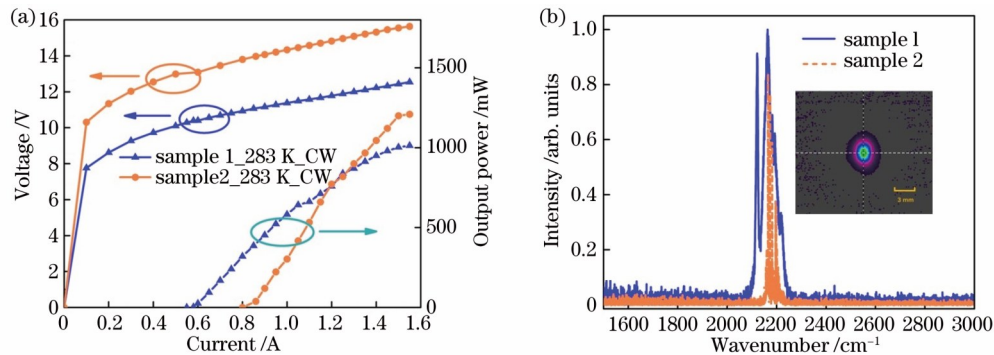


图 3 样品 1 和样品 2 在 CW 模式下的 P - I - V 曲线及略高于阈值的光谱。(a) 不同生长级数镀膜器件在 283 K CW 模式下的 P - I - V 曲线; (b) 样品 1 和样品 2 的电流略高于阈值的光谱 (插图是样品 1 在室温脉冲模式下的光束图像)

Fig. 3 P - I - V curves of sample 1 and sample 2 in CW mode and spectra higher than threshold. (a) P - I - V curves of coated devices with different growth stages at 283 K in CW mode; (b) spectra of samples 1 and 2 with currents slightly higher than threshold (inset is beam image of sample 1 in pulsed mode at room temperature)

增加有源区级数是提升 QCL 器件功率的重要途径, 但受级数增多、材料变厚导致的质量变差和器件热阻增大的影响, 级数的增加反而会导致器件性能的恶化。为探究材料周期数增加对器件性能的影响, 对所生长的 30 级和 40 级有源区材料制备器件的性能进行了具体对比分析研究。有源区 30 级材料所制备器件的腔长为 5 mm, 脊宽 (实测) 为 $7.1 \mu\text{m}$, 在 283 K 下测得 1.02 W 的 CW 输出功率, 最高电光转化效率和阈值电流密度分别为 5.65% 和 $1.62 \text{ kA}/\text{cm}^2$, 斜率效率为 $1.33 \text{ W}/\text{A}$ 。有源区 40 级材料所制备器件的腔长为 6 mm, 脊宽 (实测) 为 $8.5 \mu\text{m}$, 在 283 K 下测得 1.21 W 的 CW 输出功率下器件的最高电光转化效率和阈值电流密度分别为 5% 和 $1.53 \text{ kA}/\text{cm}^2$, 斜率效率为 $2.3 \text{ W}/\text{A}$ 。相比较来看, 40 级 QCL 器件的阈值电流密度比 30 级 QCL 器件的阈值电流密度低, 有源区级数的增加增大了限制因子, 从而降低器件的阈值电流密度。但是 40 级 QCL 比 30 级 QCL 器件的阈值电流高, 这可能是由于 40 级 QCL 器件的有源区的发光区面积较大。从两个器件功率性能的对比也可以看出: 虽然 40 级器件的 1.21 W 绝对功率要大于 30 级器件的 1.02 W 绝对功率, 但考虑器件的有源区面积大小, 40 级器件单位面积有效功率相比于 30 周期器件并没有因为周期数的增加而提升, 反而有所下降。并且 40 级结构器件的单位周期的功率值 ($30 \text{ mW}/\text{级}$) 值小于 30 级结构的器件的单位周期的功率值 ($33.3 \text{ mW}/\text{级}$)。

意义。图 3(b) 是利用傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR) 测试的样品 1 和样品 2 的激光谱, FTIR 在快速扫描模式下以 0.125 cm^{-1} 的分辨率进行测试, 样品 1 和样品 2 的激光波长均约在 $4.6 \mu\text{m}$, 说明生长中组分和层厚差异不大, 器件性能差异与设备生长参数漂移关系不大。图 3(b) 插图是利用光束分析仪测试的样品 1 脉冲模式工作下的光斑图像, 横模是影响 QCL 实际应用的另一个特性, 通过将光束分析仪放置在距离准直芯片 20 cm 处, 可以清楚地观察到基横模 (TM₀₀), 这种 TM₀₀ 光束更适用于实际应用。

这都主要可以归因于材料质量的恶化和器件热阻变大两个因素。XRD 卫星峰的半峰全宽显示出随着生长级数的增加, 材料质量变差, 这会对器件性能带来不利影响。但热积累效应是制约 40 级器件性能的更重要因素。可以看出 40 级器件的斜率效率明显变高, 但随着注入电流的增加, 由于热效应越来越显著, 40 级器件无法在更高的驱动电流下实现高效的激光输出, 这就使得器件的最高输出功率并没有明显增大。在实际器件中, 器件中心的温度随着注入电功率的增加而单调增加, 温控系统使得器件控制在 283 K, 但是在高电流下有源区的实际温度远高于 283 K, 在有源区造成大量的热量积累, 40 级有源区材料厚、界面多, 使得器件的热阻效应明显于 30 级器件, 没有发挥出周期多、限制因子大的优势, 使得输出功率、电光效率和阈值电流密度等综合性能没有得到明显改善。

为了进一步探究温度对器件的影响, 分别测试了样品 1 和样品 2 制备器件在 CW 条件下不同温度的 P - I - V 曲线。图 4(a) 显示样品 1 在 CW 模式下工作温度高达 393 K, 输出功率仍有 30 mW, WPE 为 0.3%。但是样品 2 的高温特性表现得非常差, 图 4(b) 展示当温控系统升温至 333 K 时, 器件的 CW 输出功率已经从 1.21 W (283 K) 降低到 210 mW, 而 30 级器件在 353 K 时仍具有 300 mW 的输出功率, 这说明样品 2 相比样品 1 具有更严重的热积累效应, 热反转效应非常明显, 使得器件无法实现高温工作。同时, 在高电流注入下,

40 级器件相比于 30 级器件, 散热更加困难, 使得器件的有源区温度更高, 这就限制了器件大注入电流的性能和最高输出功率。因此, 考虑到器件性能会随着器件的有源区温度的升高而下降, 同时级数增多会使得

材料的高质量生长更加困难。所以在通过增加级数提高器件输出功率时, 需要在有源级数、热积累和材料生长质量等多种因素之间进行权衡。

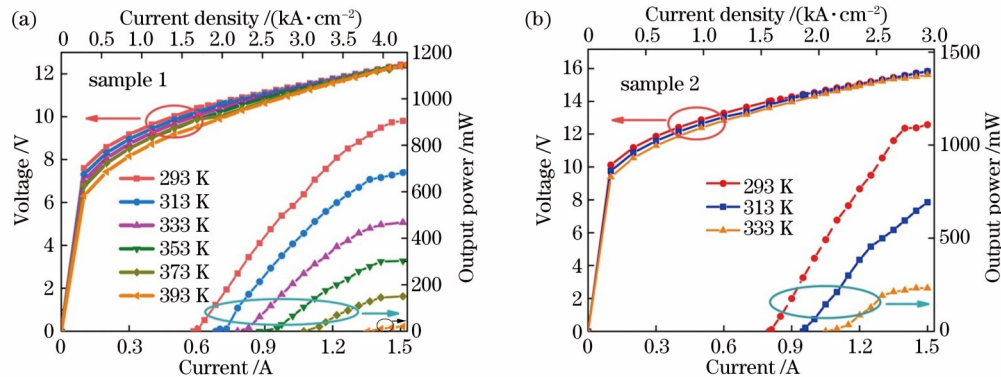


图 4 样品 1 和样品 2 制备器件在 CW 模式下不同温度的 $P-I-V$ 曲线。(a) CW 条件下样品 1 制备器件在不同温度下的 $P-I-V$ 曲线; (b) CW 条件下样品 2 制备器件在不同温度下的 $P-I-V$ 曲线

Fig. 4 $P-I-V$ curves of devices of sample 1 and sample 2 at different temperatures in CW mode. (a) $P-I-V$ curves of sample 1 at different temperatures in CW mode; (b) $P-I-V$ curves of sample 2 at different temperatures in CW mode

4 结 论

报道了通过 MOCVD 生长的高性能中波红外 QCL 材料及器件。通过优化生长条件获得了高质量应变补偿 InGaAs/InAlAs/InP QCL 结构, 制备出室温下 CW 功率最高为 1.21 W 的 $4.6 \mu\text{m}$ QCL 器件, 国内首次基于 MOCVD 技术研制出输出功率超过瓦级的中波红外 QCL。具体研究了生长的 30 和 40 级有源区材料所制备器件的性能, 探究了不同级数对器件性能的影响。相比于 30 级有源区器件, 40 级有源区器件的单位面积等效输出功率没有明显提升, 但器件性能随温度的升高迅速下降, 这归因于更加显著的热积累效应和外延材料变厚导致的质量恶化, 因此, 在通过增加有源区周期数提升器件功率时, 需要充分考虑有源级数、热积累和材料生长质量等因素之间的平衡。MOCVD 是半导体材料产业界普遍采用的技术, 本研究工作对于提升 QCL 材料的制备效率、推进 QCL 技术产业化应用具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. Science, 1994, 264(5158): 553-556.
- [2] 刘峰奇, 张锦川, 刘俊岐, 等. 量子级联激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701007.
Liu F Q, Zhang J C, Liu J Q, et al. Progress in quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701007.
- [3] 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 C, Liu C W, et al. Progress in mid-and far-infrared quantum cascade laser (invited)[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1003001.
- [4] Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F. Mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Nature Photonics, 2012, 6(7): 432-439.
- [5] Sun Y Q, Yang K, Liu J H, et al. High sensitivity and fast detection system for sensing of explosives and hazardous materials[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 360: 131640.
- [6] Guo Q Q, Zhang J C, Ning C, et al. Continuous-wave operation of microcavity quantum cascade lasers in whispering-gallery mode[J]. ACS Photonics, 2022, 9(4): 1172-1179.
- [7] 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.
- [8] Faist J, Beck M, Aellen T, et al. Quantum-cascade lasers based on a bound-to-continuum transition[J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(2): 147-149.
- [9] Bai Y, Darvish S R, Slivken S, et al. Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with watt-level optical power[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(10): 101105.
- [10] Bai Y, Slivken S, Darvish S R, et al. Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with 12.5% wall plug efficiency[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(2): 021103.
- [11] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Highly temperature insensitive quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(25): 251104.
- [12] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(18): 181102.
- [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] Botez D, Kirch J D, Boyle C, et al. High-efficiency, high-power mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Optical Materials Express, 2018, 8(5): 1378-1398.
- [15] Wang C A, Schwarz B, Siriani D F, et al. MOVPE growth of LWIR AlInAs/GaInAs/InP quantum cascade lasers: impact of growth and material quality on laser performance[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1200413.
- [16] Xie F, Caneau C, Leblanc H P, et al. Watt-level room temperature continuous-wave operation of quantum cascade lasers with $\lambda > 10 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1200407.
- [17] Fei T, Zhai S Q, Zhang J C, 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.
- [18] 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(6): 179-184.
- 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(6): 179-184.