

文章编号: 1000-7032(2026)05-0776-06

基于双上能级-对角跃迁设计的甚长波量子级联激光器

陈加刚^{1,2}, 牛 山², 孙永强², 姚金麟², 张懿婧^{1,2}, 马源浩²,
程凤敏², 翟慎强², 贾志伟^{1,2*}, 张锦川^{2*}

(1. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 晋中 030600;
2. 中国科学院半导体研究所 固态光电信息技术实验室, 北京 100083)

摘要: 报道了一种基于双上能级-对角跃迁有源区设计的晶格匹配 InAlAs/InGaAs/InP 量子级联激光器。该器件工作在甚长波波段 ($\geq 14 \mu\text{m}$), 不仅实现了高输出功率, 同时可以在高占空比条件下稳定工作。在脉冲工作模式下, 该器件的最大峰值功率达到 1.5 W, 单面平均功率为 90 mW。此外, 为进一步拓展其光谱性能, 本文还探索了基于外腔结构的调谐机制, 实现了 13.18~14.03 μm 的连续调谐输出, 在该范围内最大平均功率为 3.43 mW。这些性能表明, 该激光器在甚长波红外波段的多组分气体传感领域具有显著应用潜力。

关键词: 量子级联激光器; 甚长波; 双上能级; 对角跃迁; 宽调谐; 高功率

中图分类号: TN248.4

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20260007

CSTR: 32170.14.CJL.20260007

Quantum Cascade Lasers in Very-long-wave Infrared Based on A Dual-upper-state Diagonal Transition Design

CHEN Jiagang^{1,2}, NIU Shan², SUN Yongqiang², YAO Jinlin², ZHANG Yijing^{1,2}, MA Yuanhao²,
CHENG Fengmin², ZHAI Shenqiang², JIA Zhiwei^{1,2*}, ZHANG Jinchuan^{2*}

(1. Key Laboratory of New Sensors and Intelligent Control of Ministry of Education,
Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

2. Solid State Optoelectronic Information Technology Laboratory, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

* Corresponding Authors, E-mail: jiazhiwei@tyut.edu.cn; zhangjinchuan@semi.ac.cn

Abstract: This paper reports a lattice-matched InAlAs/InGaAs/InP quantum cascade laser based on a dual-upper-state diagonal transition active region design. The device operates in the very-long-wave infrared band ($\lambda \geq 14 \mu\text{m}$), achieving not only high output power but also stable performance under high-duty-cycle conditions. In pulsed mode, the device delivers a maximum peak power of 1.5 W and a single-facet average power of 90 mW. Furthermore, to extend its spectral performance, an external-cavity tuning configuration was implemented, enabling continuous wavelength tuning from 13.18 μm to 14.03 μm with a maximum average power of 3.43 mW across this range. These results demonstrate that the laser exhibits significant potential for multi-component gas sensing applications within the very-long-wave infrared spectral region.

Keywords: quantum cascade lasers; very-long-wave infrared; dual-upper-state; diagonal transition; wide tuning; high-power

收稿日期: 2026-01-07; 修订日期: 2026-01-24

基金项目: 国家自然科学基金(62504219, 62235016); 北京市自然科学基金(4254115)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62504219, 62235016); Beijing Natural Science Foundation (4254115)

1 引言

量子级联激光器(Quantum cascade laser, QCL)自1994年问世以来,在功率、效率与调谐范围等方面取得了显著进展,已成为大气探测、医学诊断和红外光谱等领域的重要中红外光源^[1]。基于近红外波段(SWIR)InP基二极管激光器在外延生长、晶圆工艺与芯片封装等领域积累的成熟技术,中红外波段(MWIR)InP基QCL的研究获得了快速发展^[2]。在3~11 μm 的发射波长范围内,不同结构设计的QCL在脉冲工作模式下,其电光转换效率已普遍突破10%^[3-7],其中最高效率记录分别于4.9 μm 和5.6 μm 波长处实现,分别达到27%^[5]和28%^[6]。同一波长范围内,连续波工作模式下的电光转换效率也普遍超过5%^[3-7],并在4.9 μm 处取得21%的最高报道值^[4]。高电光转换效率直接推动了高连续波光功率的实现,在该波段范围内已普遍达到瓦级输出功率,尤其在4.7 μm 处实现4.6 W,在4.9 μm 处创下5 W的最高记录^[4]。

与MWIR的设计相比,甚长波波段基于InP的InGaAs/InAlAs材料体系QCL难以获得同等性能优势。首先,热泄漏效应在甚长波波段变得极为突出。由于激光波长 λ 与子带间跃迁能 ΔE 满足 $\lambda \propto 1/\Delta E$,甚长波对应着极小的子带能级间隔(通常仅为50~70 meV)。该能量已与材料中纵向光学(LO)声子能量(在InGaAs/InAlAs体系中约为30~36 meV)相当甚至更低。因此,电子在热扰动下极易通过吸收单个声子就从上激光能级直接跃迁至更高能级或连续态,造成严重的载流子热泄漏。这直接导致粒子数反转难以维持,表现为器件的特征温度急剧降低、阈值电流随温度飙升,以及WPE在高工作温度下迅速恶化,严重制约了器件的室温及高温工作性能。其次,波导损耗是限制QCL性能的另一关键因素。自由载流子吸收损耗与波长的平方成正比,这意味着当波长从10 μm 增至15 μm 时,仅由此项引入的损耗便可能增加至原先的2~4倍。极高的损耗不仅直接降低了芯片的净增益和输出功率,还使产生的废热大幅增加,进而与前述的“热泄漏效应”形成热-损耗正反馈循环,使得器件更易发生热饱和,难以实现高功率、高效率运行。综上所述,热泄漏效应导致的粒子数反转难以维持和剧增的自由载流子吸收损耗共同构成了甚长波QCL性能提升的根本性物理瓶颈。

为了克服上述问题,采用对角跃迁的有源区设计是获得较长上能级寿命、实现显著粒子数反转的典型技术途径。其核心目的是通过对角跃迁,确保载流子从下激光能级高效提取,进而优化器件整体性能。例如,2011年美国普林斯顿大学有研究报道了一种基于间接泵浦的InP基InGaAs/InAlAs-QCL,该器件在320 K下工作于14 μm 波长,获得了336 mW的峰值功率并表现出450 K的特征温度^[8]。其优异的热稳定性主要归因于在注入能级与上激光能级间引入的中间态。该中间态可随温度和电流升高,有效抑制注入区内的电子布居,从而降低非共振子带间吸收。然而,该结构的注入势垒及其后续势垒厚度大于常规有源区设计,导致注入能级与上激光能级的耦合强度较弱。2021年,新加坡南洋理工大学一研究表明^[9],基于三声子共振设计的QCL在13.6 μm 的长波红外波段已实现了954 mW的室温峰值输出功率。这一结果充分证实三声子共振设计在提升长波红外QCL性能中的有效性。值得注意的是,该设计的关键在于下能级的寿命极短(0.17 ps),这对载流子提取效率提出了更高要求。为此,通常在微带内较低激光能级之下引入多级耦合设计,以提升载流子提取效率。此外,增大增益区量子阱宽度也易于构建耦合的上层能级。

与上述间接泵浦方案不同,双上能级(DAU)设计通过高注入效率实现高性能,已在14 μm 和10 μm 波长处实现高输出功率^[10]。在DAU结构中,注入势垒之后的势垒经过优化设计,以耦合两个上激光能级。其注入机制不依赖共振隧穿,但注入能级与上激光能级间仍存在一定耦合。由于该结构热性能相对有限,其更适用于有源区较厚的高温工作场景。

本文报道了一种基于对角跃迁的双上能级有源区设计的高功率QCL,该器件工作在甚长波波段。性能测试结果表明,在15 $^{\circ}\text{C}$ 工作温度下,该器件双面最大平均输出功率达到180 mW;在室温条件下,其峰值输出功率高达1.5 W。当采用Littrow外腔配置,该器件实现了712~758 cm^{-1} 的连续波长调谐。

2 有源区设计与器件制备

有源区基于晶格匹配 $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}/\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 结构,图1展示了所设计的14 μm 量子级联激光

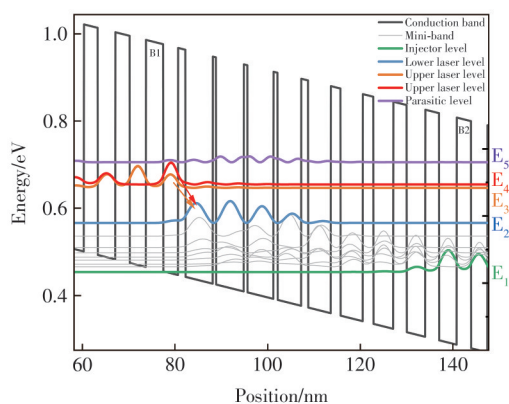


图1 双上能级对角跃迁能带示意图

Fig.1 Band diagram of a diagonal transition dual-upper-state active region

器的有源区能带结构示意图。导带从 B1 到 B2 之间构成一个完整周期。图中标注的 E_3 与 E_4 为激光跃迁的双上能级, E_5 为激光寄生能级, E_2 为激光下能级, E_1 则是电子向下一周期有源区注入的起始能级, 并且外加 48 kV/cm 的电场实现了能级结构的对齐, 该能级构型是本职工作实现对角跃迁与高效载流子运输的设计基础。跃迁发生在编号为 E_4 、 E_3 的两个上能级和编号为 E_2 的激光下能级之间, 这样有助于获得宽增益的光谱。将能级 E_4 、 E_3 之间的能量间隔优化为 18 meV, 同时使得激光上能级的波函数局域在单个量子阱中, 这样有效抑制电子的双向扩散运输, 从而增强了从注入态到上激光能级的耦合效率, 实现更高的粒子数反转效率。两个激光上能级 E_4 、 E_3 在工作偏置的电压下可以实现强耦合, 两个激光双上能级 E_4 、 E_3 到下能级 E_2 的跃迁矩阵元 $|z_{42}|$ 与 $|z_{32}|$ 分别达 1.9 nm 与 1.4 nm。两者相差较大, 避免了较强的竞争。 E_2 与下方微带之间的能量间隔设置为接近一个纵向光学声子能量 (约 36 meV), 其核心目的是通过极快的声子散射过程促使电子从 E_2 能级快速排空进入微带, 从而大幅缩短下能级寿命。此外, 上激光能级与相邻上能级的能量间隔 E_5 为 52 meV, 进一步抑制了载流子泄漏。本设计采用窄带宽耦合能级结构, 保障了载流子从下激光能级的高效提取^[11], 使该能级寿命 τ_1 低至 0.18 ps (该计算值仅计入 298 K 下纵向光学声子的吸收与发射过程)。

器件的外延结构通过混合外延技术在 n 型 InP 衬底上制备, 具体流程与各层参数如下: 首

先, 采用金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 生长 InP 缓冲层 (Si 掺杂, 浓度 $\sim 3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 4 μm)。随后, 利用分子束外延 (MBE) 依次生长 50 周期的有源区 (Si 掺杂, 浓度 $\sim 2.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 与 InGaAs 层 (Si 掺杂, 浓度 $\sim 4.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 0.3 μm)。之后, 切换回 MOCVD 技术, 继续生长 InP 包覆层 (Si 掺杂, 浓度 $\sim 3.0 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 5 μm)、梯度掺杂 InP 层 (Si 掺杂, 浓度从 $\sim 2.0 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 渐变, 厚度 0.2 μm) 以及高掺杂 InP 接触层 (Si 掺杂, 浓度 $\sim 5.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 厚度 0.8 μm)。外延顺序、厚度及掺杂浓度如图 2 所示。该完整的包层结构旨在增强有源区的光场限制, 并使光学模式与高损耗的顶部金属接触解耦合^[12-13]。

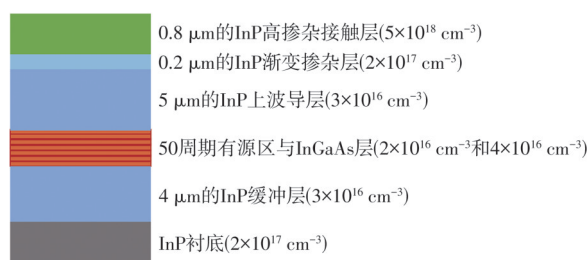


图2 外延顺序、各层厚度及掺杂浓度

Fig.2 Layers sequence, thickness and doping concentration

为解决高功率 QCL 面临的散热瓶颈, 本职工作在器件制备工艺中采用 MOCVD 技术, 于脊条两侧选择性再生长了半绝缘 Fe 掺杂 InP (InP: Fe), 并且采用倒焊封装, 以同步提升器件的横向与纵向散热能力^[14-15]。具体工艺流程如下: 首先对外延片进行清洁处理, 随后在其表面淀积 SiO_2 绝缘层; 通过光刻工艺定义双沟道区域并保留脊区 SiO_2 图形; 依次完成 SiO_2 腐蚀与去胶后, 以 SiO_2 为掩膜刻蚀双沟道至下波导层, 继而采用 MOCVD 选区外延半绝缘 InP: Fe; 去除残余 SiO_2 后重新淀积 SiO_2 层, 再次刻蚀脊区 SiO_2 以形成电注入窗口; 蒸发 Ti/Au (40/1 000 nm) 作为正面电极, 随后电镀金层至 5 μm 以提升导电性与机械强度; 腐蚀解理沟后, 对衬底进行减薄与抛光, 衬底厚度控制至约 200 μm ; 在背面蒸发 Ge/Au/Ni/Au (40/250/10/250 nm) 电极, 并通过退火处理形成欧姆接触; 最后, 将外延片分别解理为腔长 2 mm、4 mm 和 6 mm 的器件, 采用倒装焊工艺将器件烧结于金属化金刚石热沉上完成封装。图 3 为高掺杂浓度有源区器件在金相显微镜下的腔面形貌图, 器件的平均脊宽约为 20 μm 。

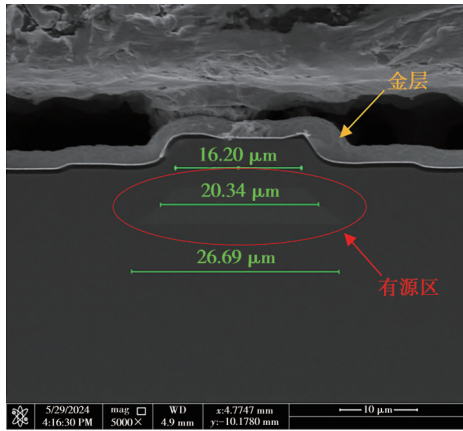


图 3 金相显微镜下有源区腔面图

Fig.3 Active region cavity surface image under metallographic microscope

3 器件性能表征与结果分析

图4(a)显示了腔长分别为2 mm、4 mm和6 mm的QCL在脉冲模式(500 ns, 40 kHz)下的功率-电流-电压(PIV)特性。在室温下,4 mm和6 mm激光器的最大双面峰值功率分别为1 W和1.5 W。功率-电流曲线中明显的斜率变化代表了14 μm波长的出现。图4(b)展示了安装于金刚石热沉(占空比25%)20 μm脊宽、4 mm长的埋脊激光器的功率特性。在15 °C的温控工作条件下,该器件实现了最高90 mW的平均输出功率,该功率值由热释电功率计测得,在该条件下器件的墙插效率(WPE)为0.97%。

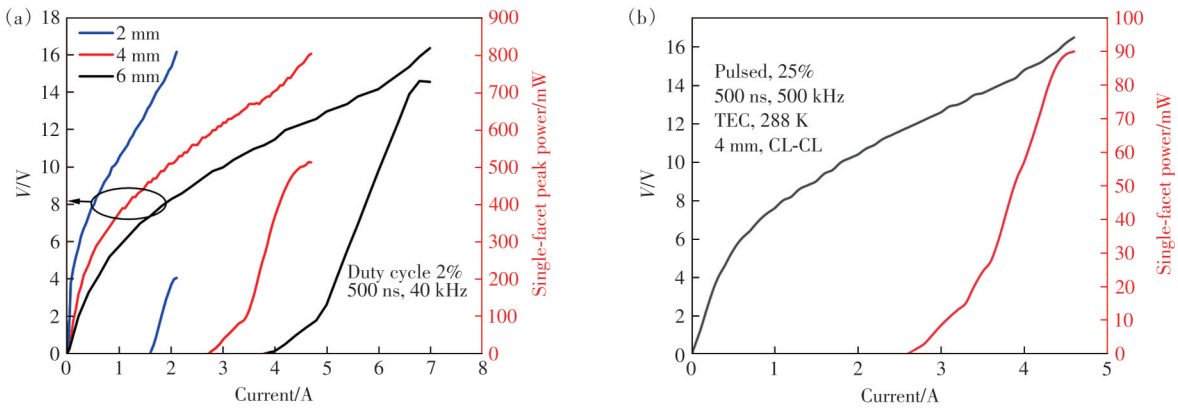


图 4 (a)腔长分别为2 mm、4 mm、6 mm的QCL脉冲模式PIV;(b)腔长为4 mm双面自然解理(CL-CL)的QCL在高占空比下的PIV特性

Fig.4 (a)PIV performance under laser pulses with cavity lengths of 2, 4, 6 mm respectively. (b)PIV characteristics at a cavity length of 4 mm(CL-CL) and a high duty cycle

不同注入电流下的光谱特性如图5(a)所示。对于腔长为4 mm的激光器,室温条件在脉冲工作

模式下(1 μs, 20 kHz, 2% 占空比),可观察到其分别在14 μm与15.5 μm处实现了激射。

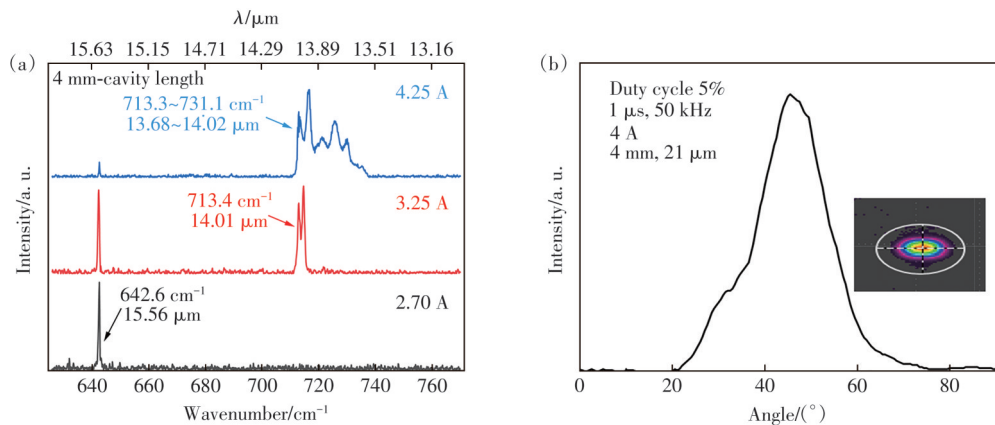


图 5 (a)不同注入电流下的光谱特性;(b)室温4 A电流下,占空比为5%的脉冲模式下的远场慢轴图像,插图为光束质量分析仪测得的光斑

Fig.5 (a)Spectral characteristics at different injection currents. (b)Far-field slow-axis image at room temperature with 4 A current and 5% duty cycle in pulse mode. The inset shows the spot measured by the beam quality analyzer

脉冲模式下的远场光束分布如图 5(b) 所示。该图像由一台热释电相机采集, 相机置于距激光器 25 cm 处, 并经由红外透镜 (Lightpath, 390037IR1) 进行准直。对于所研制的 20 μm 宽激光器, 即使驱动电流增加至 4.25 A, 其远场光斑仍始终保持为基横模。这一结果明确证实, 当前所选的脊形波导宽度能够有效抑制高阶横模。

Littrow 型光栅 QCL 是一种典型的外腔激光器结构, 其结构原理示意图如图 6 所示。Littrow 结构外腔量子级联激光器以 FP-QCL 作为增益介质, 其核心工作原理在于利用闪耀光栅的色散特性实现波长选择与光学反馈。FP-QCL 前腔面发出的宽带光束经透镜准直后, 以特定角度入射至闪耀光栅; 光栅将不同频率的光衍射至不同方向, 其中满足 Littrow 角条件的一级衍射光将沿原路精确返回并反馈至激光谐振腔。通过旋转光栅改变入射角, 即可连续调控反馈回腔内的波长, 从而在选定波长处建立起稳定的外腔振荡模式^[16]。该构型不仅结构简洁、调谐便利, 能够实现宽范围的波长连续扫描^[17], 还凭借光栅优异的光谱分辨能力, 有效抑制边模振荡, 显著提升边模抑制比, 并利用外腔延长有效腔长的作用, 大幅压缩激光线宽, 最终获得窄线宽、高光谱纯度的可调谐单模激光输出^[18]。通过 Littrow 标准具配置并选取不同闪耀光栅角度 (Thorlabs-GR1325-10106-12.5 mm \times 25.0 mm \times 9.5 mm, 光栅刻线数: 150/mm, 闪耀角: 35 $^\circ$) 下的单模光谱, 该器件、实现了宽范围的波长调谐, 结果如图 7 所示。其调谐范围覆盖 758.61~712.81 cm^{-1} (对应波长 13.18~14.03 μm), 该测量在室温脉冲条件下 (1 μs 脉宽, 20 kHz 重复频率) 进行。此外, 在驱动电流增至 4.5 A 时, 从 4 mm 长激光器后端 (经透镜准直后) 收集到的最大平均功率达到 3.43 mW。

参 考 文 献:

- [1] FIGUEIREDO P, SUTTINGER M, GO R, *et al.* Progress in high-power continuous-wave quantum cascade lasers [Invited] [J]. *Appl. Opt.*, 2017, 56(31): H15-H23.
- [2] 杨鹏昌, 李曼, 孙永强, 等. MOCVD 生长的中红外高功率量子级联激光器 [J]. *发光学报*, 2024, 45(5): 794-799. YANG P C, LI M, SUN Y Q, *et al.* Mid-infrared high-power quantum cascade laser grown by MOCVD [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(5): 794-799. (in Chinese)
- [3] BANDYOPADHYAY N, SLIVKEN S, BAI Y, *et al.* High power, continuous wave, room temperature operation of λ -3.4 μm

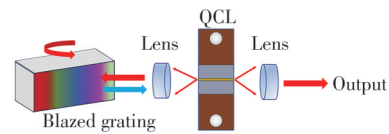


图 6 Littrow 型光栅量子级联激光器结构

Fig.6 The structure of Littrow-type grating quantum cascade lasers

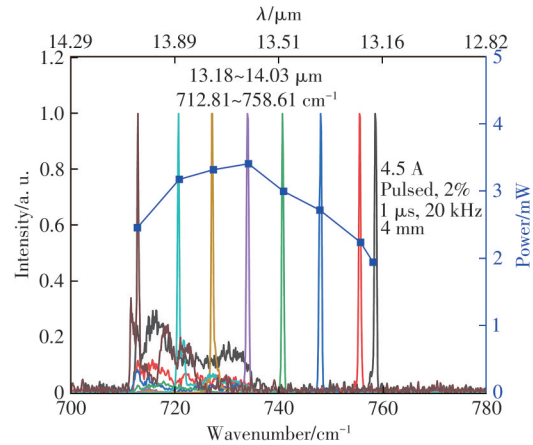


图 7 外腔调谐光谱范围

Fig.7 External cavity tuning spectral range

4 结 论

本研究成功展示了一款基于对角跃迁双上能级有源区设计的 QCL, 该设计能够确保载流子从下激光能级高效提取, 进而优化器件整体性能。其激光波长在甚长波波段。测试结果表明, 6 mm 腔长器件在室温下实现了 1.5 W 的最大峰值功率, 且远场呈现稳定的基横模输出; 在外腔配置下, 其调谐范围覆盖 13.18~14.03 μm 。上述结果表明, 本工作提出的有源区结构能有效兼顾功率、稳定性和调谐能力, 验证了该有源区设计在高性能长波红外光源方面的巨大潜力, 未来有望在多组分气体传感领域获得广泛应用。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址: <http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260007>

- and λ -3.55 μm InP-based quantum cascade lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, 100(21): 212104.
- [4] BAI Y, BANDYOPADHYAY N, TSAO S, *et al.* Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 98(18): 181102.
- [5] LYAKH A, SUTTINGER M, GO R, *et al.* 5.6 μm quantum cascade lasers based on a two-material active region composition with a room temperature wall-plug efficiency exceeding 28% [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(12): 121109.
- [6] MAULINI R, LYAKH A, TSEKOUN A, *et al.* Patel. λ -7.1 μm quantum cascade lasers with 19% wall-plug efficiency at room temperature [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(18): 17203-17211.
- [7] LYAKH A, MAULINI R, TSEKOUN A, *et al.* High-performance continuous-wave room temperature 4.0- μm quantum cascade lasers with single-facet optical emission exceeding 2 W [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2010, 107(44): 18799-18802.
- [8] HUANG X, CHARLES W O, GMACHL C. Temperature-insensitive long-wavelength ($\lambda \approx 14 \mu\text{m}$) quantum cascade lasers with low threshold [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(9): 8297-8302.
- [9] JIN Y H, LI J H, CHUA Y D, *et al.* Long wavelength ($\lambda > 13 \mu\text{m}$) quantum cascade laser based on diagonal transition and three-phonon-resonance design [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 119(13): 131105.
- [10] NIU S Z, LIU J Q, CHENG F M, *et al.* 14 μm quantum cascade lasers based on diagonal transition and nonresonant extraction [J]. *Photon. Res.*, 2019, 7(11): 1244-1248.
- [11] SUN Y Q, YIN R, ZHANG J C, *et al.* High-performance quantum cascade lasers at λ -9 μm grown by MOCVD [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(21): 37272-37280.
- [12] KIRCH J D, KIM H, BOYLE C, *et al.* Proton implantation for electrical insulation of the InGaAs/InAlAs superlattice material used in 8-15 μm -emitting quantum cascade lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 110(8): 082102.
- [13] 王渝沛, 章宇航, 罗晓玥, 等. 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(中英文)*, 2024, 17(5): 1042-1049.
- WANG Y P, ZHANG Y H, LUO X Y, *et al.* 4.7 μm mid-wave infrared quantum cascade laser with double active region structure [J]. *Chin. Opt.*, 2024, 17(5): 1042-1049. (in Chinese)
- [14] HUANG X, CHIU Y, CHARLES W O, *et al.* Ridge-width dependence of the threshold of long wavelength ($\lambda \approx 14 \mu\text{m}$) quantum cascade lasers with sloped and vertical sidewalls [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(3): 2539-2547.
- [15] FEI T, ZHAI S Q, ZHANG J C, *et al.* 3 W continuous-wave room temperature quantum cascade laser grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Photonics*, 2023, 10(1): 47.
- [16] WANG H, ZHANG J C, CHENG F M, *et al.* Watt-level, high wall plug efficiency, continuous-wave room temperature quantum cascade laser emitting at 7.7 μm [J]. *Opt. Express*, 2020, 28(26): 40155-40163.
- [17] LIU J H, WANG H, ZHANG J C, *et al.* Broad tuning range, high power quantum cascade laser at λ -7.4 μm [J]. *Opt. Express*, 2022, 30(22): 40704-40711.
- [18] OSTENDORF R, BUTSCHEK L, HUGGER S, *et al.* Recent advances and applications of external cavity-QCLs towards hyperspectral imaging for standoff detection and real-time spectroscopic sensing of chemicals [J]. *Photonics*, 2016, 3(2): 28.



陈加刚(2000-),男,山东潍坊人,硕士研究生,2023年于山东理工大学获得学士学位,主要从事量子级联激光器窄线宽、宽调谐研究。
E-mail: 15614607178@163.com



张锦川(1982-),男,河北唐山人,博士,研究员,博士生导师,2012年于清华大学获得博士学位,主要从事中远红外量子级联激光器器件物理研究。
E-mail: zhangjinchuan@semi.ac.cn



贾志伟(1990-),男,山西太原人,博士,副教授,硕士生导师,2017年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事半导体激光器及光电子集成研究。
E-mail: jiazhiwei@tyut.edu.cn