

文章编号: 2095-4980(2024)01-0087-09

中红外可调谐量子级联激光器研究进展

刘莹, 蒋涛, 杨奇, 王雪敏*, 湛治强, 邹蕊娇, 罗佳文, 樊龙, 陈风伟, 吴卫东
(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘要: 量子级联激光器(QCL)是中红外波段重要的激光光源, 其中, 可调谐中红外量子级联激光器具有单纵模、频率可调谐的优点, 成为目前研究的热点。可调谐中红外量子级联激光器主要通过分布反馈(DFB)光栅、分布布拉格反射(DBR)光栅、外腔衍射光栅等方法实现。本文介绍了中红外量子级联激光器的基本原理, 分别归纳、总结了近年来DFB、DBR可调谐量子级联激光器以及外腔可调谐量子级联激光器的研究进展, 讨论了各种可调谐方法的优缺点。最后, 对可调谐量子级联激光器的发展趋势进行了展望。

关键词: 量子级联激光器; 可调谐; 布拉格光栅; 中红外

中图分类号: TN248.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021386

Research progress of tunable mid-infrared quantum cascade lasers

LIU Ying, JIANG Tao, YANG Qi, WANG Xuemin*, ZHAN Zhiqiang, ZOU Ruijiao, LUO Jiawen,
FAN Long, CHEN Fengwei, WU Weidong

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Quantum Cascade Lasers(QCL) are the important laser sources in mid-infrared bands. The tunable mid-infrared quantum cascade laser has been a research focus because of tunable frequency and single longitudinal mode. At present, the tunable frequency of mid-infrared quantum cascade lasers can be realized by the Distributed Feed Back(DFB) grating, the Distributed Bragg Reflect(DBR) grating, the external cavity diffraction grating, etc. The principle and applications of mid-infrared quantum cascade laser are introduced. The progresses of the DFB and DBR tunable quantum cascade lasers, of the external cavity tunable quantum cascade lasers nearly 10 years are summarized. The advantages and disadvantages of various tunable methods are discussed. Finally, the development trends of tunable quantum cascade lasers are prospected.

Keywords: Quantum Cascade Lasers; tunable; Bragg grating; mid-infrared

量子级联激光器(QCL)是基于电子在量子阱中子带间的跃迁和声子辅助隧穿原理进行工作的, 与普通的半导体激光器电子空穴复合发光的工作原理不相同, QCL的受激辐射过程只有电子参与, 并且通过调节量子阱/垒层厚度进行调节子带间距从而调节波长^[1-3]。2.5~25 μm 中红外波段对应的大气窗口, 水汽、电磁散射吸收相对较少, 因而在气体检测、医学检验、爆炸物探测、光谱学、激光制导、自由空间光通信等方面都有着重要的潜在应用价值。而3~14 μm QCL具有结构紧凑、可靠性高、连续可调等优点, 广泛用于这些领域, 并得到研究人员的持续关注。气体检测方面, 3~14 μm 波段包含了多种分子的基频特征指纹吸收谱线, 检测灵敏度较高, 基于直接吸收光谱或波长调制等技术手段可用于对多种气体浓度、成分等进行检测, 通过使用具有较高功率、较好光束质量以及窄线宽的激光, 可以增加吸收气体的光程, 从而提升检测的灵敏度。此外, 系统的分辨力与激光器的线宽息息相关, 窄线宽激光可分辨更小的光谱间隔, 从而提升系统的分辨力^[4-8]。相比于近红外激光, H_2O 、 CO_2 对中红外波段激光吸收更低, 利用中红外QCL代替近红外激光器, 可以增加光通信距离及可靠性, 所以中红外波段激光在自由空间光通信中具有更好的应用前景。在这些应用中, 基本要求QCL应具有功率高、光束质

收稿日期: 2021-10-29; 修回日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(11905199)

*通信作者: 王雪敏 email:wangxuemin75@sohu.com

量好、线宽窄、调谐范围宽、室温下工作稳定等性能。对于波长调谐，目前中红外 QCL 主要利用 3 种方法，分别为 DBR 光栅、DFB 光栅和搭建外腔结构进行调谐。其中，外腔结构调谐方法中亦可分为两种结构：一种为利用衍射光栅调谐出射波长的方法；一种为集成结构器件^[3,9-10]。

1 基于 Bragg 光栅结构的可调谐 QCL

1.1 基于 DBR 光栅结构的可调谐 QCL

2012 年美国 Corning 公司报道了一种利用取样布拉格(Sampling Grating Distributed Bragg Reflector, SG-DBR)光栅进行波长调谐的 QCL，结构如图 1 所示^[11]。该激光器波长调谐范围 100 cm^{-1} ，在调谐过程中，峰值功率从 80 mW 增加到 180 mW，该激光器结构由两端 SG-DBR 光栅区、相移区、增益区 4 部分组成。通过电流控制 DBR 光栅部分的电流注入从而调节温度，实现波长的调节，相移区的设计可以增加 3 dB 带宽内的模式数，也能够灵活实现相邻峰之间的连续可调^[11]。

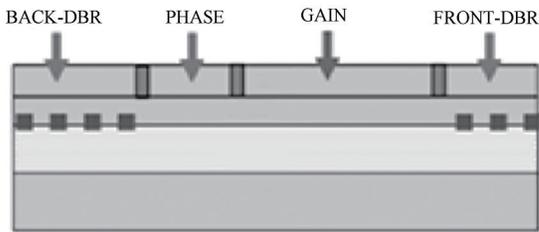


Fig.1 Schematic diagram of SG-DBR grating tunable quantum cascade laser
图 1 SG-DBR 光栅可调谐量子级联激光器结构示意图

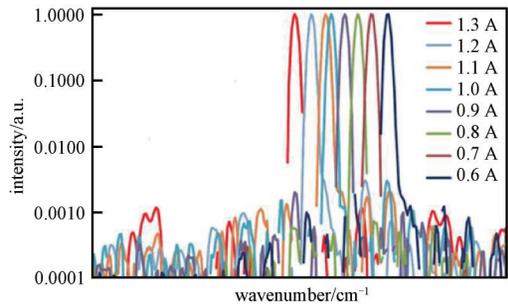


Fig.2 Laser test spectrum
图 2 测试光谱图

该公司在 2014 年再次报道 DBR 光栅可调谐 QCL，该激光器能够在高温(80 °C)下实现连续波大功率输出，脉冲功率可达 2 W，激光器可实现稳定的单纵模工作，边模抑制比 30 dB，增益波长 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ ，调谐范围 5 cm^{-1} ，如图 2 所示^[12]。2015 年该公司利用同样的器件结构，通过优化光栅结构，实现 100 cm^{-1} 的调谐范围，边模抑制比 30 dB，激光器连续功率 28.6 mW，研究人员基于该激光器对 N_2O 、CO 气体的浓度进行了测试。在此之前，因基于 DBR 可调谐的 QCL 稳定性较差，几乎没有用于气体的测试，该实验证明了脉冲的中红外 SG-DBR QCL 在气体检测方面的可重复性和高稳定性^[13]，表明这种激光器在气体检测方面的巨大潜力。

2016 年，马里兰大学报道了一种基于两侧 DBR 光栅结构热调谐的 QCL，中心波长 $4.7\text{ }\mu\text{m}$ ，调谐范围为 29.831 cm^{-1} ，研究人员将 DBR 光栅区与增益区利用 2 个散热器分别控制温度，最大连续激光功率 220 mW ^[14]。2016 年，日本 Sumitomo Electric Industries 公司首次报道了一种 InP 基 DBR 光栅的 QCL，在 20 °C 下，激光器最大功率可以达到 40 mW，中心波长 $7.46\text{ }\mu\text{m}$ 。研究人员对比了激光器两端面为自然解理面和自然解理面/DBR 2 种情况下的激光器阈值电流密度，研究表明，在短腔情况下，具有 DBR 结构的激光器具有较低的阈值电流密度^[15]。2017 年，中科院半导体所报道了一种 DBR 光栅和四分之一相移结合的可调谐 QCL，通过将 SG-DBR 光栅中心的一个采样周期延长 50% 来制作相移区，相移区与光刻区的图案采用全息光刻技术与紫外光刻相结合的方式。器件可实现稳定的单纵模输出，激射中心波长 $5.03\text{ }\mu\text{m}$ ^[16]。

通过近些年 DBR-QCL 的发展可以看出，DBR 结构在 QCL 中的应用并不广泛，因为相比于 DFB 以及外腔量子级联激光器(External Cavity Quantum Cascade Laser, EC-QCL)，DBR-QCL 一般调谐范围较小，高功率和宽调谐范围同时实现较难。单纵模稳定性还不能达到应用的需求，并且控制 DBR 激光器调谐参数实现气体检测的高分辨力和宽调谐范围更加复杂，所以此种激光器，尤其在中红外波段，在光谱气体传感中的应用并未得到有效的验证^[17-19]，基于 DBR 光栅的可调谐 QCL 有待进一步发展。

1.2 基于 DFB 光栅结构的可调谐 QCL

近年来，基于 DFB 原理的可调谐 QCL 逐渐发展。2012 年，美国西北大学量子器件研究中心采用 SG-DFB 结构对激光器进行调谐，结构如图 3 所示^[20]。该器件腔长 3 mm，将整个腔长分为 1.6 mm 和 1.4 mm，分别制作不同取样周期的光栅，以实现均匀的光频梳。每部分 30 对光栅，光栅周期 753 nm，器件脊波导宽度 $10\text{ }\mu\text{m}$ ，在脉冲条件下实现了大于 100 mW 的输出功率，稳定的单纵模调谐 50 cm^{-1} ，边模抑制比 24 dB^[20]。2013 年，该团队为增大调谐范围，将光栅对增加到 60 对，并将激光器两侧解理面镀制反射率为 10% 的增透膜，抑制 F-P 腔的振荡，

提高远离增益峰值波长的增益，分别制备了 695 nm、753 nm、825 nm 周期的光栅，总体调谐范围超过 351 cm^{-1} [21]。

该团队还探索将数字级联光栅用于 QCL 中，即由多个取样光栅组成的具有不同的 Bragg 波长和相同的取样周期，通过这种方式补偿非增益中心区，利用电调谐该器件实现了 236 cm^{-1} 的调谐范围，边模抑制比大于 20 dB，激射中心波长 $4.65 \mu\text{m}$ ，如图 4 所示 [22]。

2015 年，美国 Rice University 基于 $5.26 \mu\text{m}$ DFB 量子级联激光器搭建了一种气体传感器，用于检测 NO。该 DFB 激光器调谐范围 5.5 cm^{-1} ($1\ 899.5 \sim 1\ 905 \text{ cm}^{-1}$)，NO 吸收线在波长 $1\ 900.08 \text{ cm}^{-1}$ ，该传感器系统在 1 s 内实现了 0.7 ppb 的最小检出限 [23]。2016 年，吉林大学报道了一种基于 DFB-QCL 的 CO 检测传感器，在调谐范围 10 cm^{-1} 内，在 1 s 的采集时间内，在大气压力下达到了 $1.16 \times 10^{-6} \text{ mol/m}^3$ 的检测限 [24]。2017 年，美国 Rice University 采用连续波 DFB-QCL 和 EC-QCL 分别对 $1\ 900.075 \text{ cm}^{-1}$ 处的 NO 吸收双峰和 $1\ 630.33 \text{ cm}^{-1}$ 处的 NO_2 进行检测。2 束激光以相同的光路组合传输，随后由单个中红外探测器检测。通过对 DFB-QCL 和 EC-QCL 进行不同频率的调制，利用基于 Labview 软件的锁相放大器对检测器信号进行解调，提取相应的二次谐波分量，实现了频率调制复用方案，实验结果表明，频率调制多路复用对系统性能的影响较小，可实时、灵敏和准确地同时检测 NO 和 NO_2 [25]。2019 年，法国 University of Montpellier 报道了一种 $17 \mu\text{m}$ 的 DFB-QCL，电调谐速率 $6.8 \text{ cm}^{-1}/\text{A}$ ，最大激光连续输出功率 6 mW，这是国际上首次报道 $17 \mu\text{m}$ 波长的 DFB-QCL，为 DFB-QCL 在长波段的开发和应用提供了参考 [26]。

从 DFB-QCL 研究现状可以看出，DFB-QCL 的发展及应用都比 DBR-QCL 成熟且广泛，SG-DFB 激光器调谐范围可实现 $200 \sim 300 \text{ cm}^{-1}$ ，连续功率可以达到百毫瓦级，已经应用于气体检测中，DFB 激光器具有较好的波长及功率的稳定性，波长调谐的复杂性也较低，较 DBR 光栅结构容易控制 [27-29]。目前 DFB 及 DBR 光栅结构的 QCL 的工作波长普遍在 $4 \sim 8 \mu\text{m}$ ，对于 $8 \sim 15 \mu\text{m}$ 中红外波段的研究较少，随着波长的增加，激光器性能迅速衰减，这是由于随着波长增加，上能级寿命降低，导致粒子数反转条件很难达到，注入能级向低能级的泄漏会增加，由于载流子吸收导致波导损耗增加，散热特性较差 [30-32]。这些因素都制约着中红外 QCL 的发展，基于中红外波段良好的应用前景，对该波段可调谐 QCL 的研究具有重要意义。

2 基于外腔调谐的 QCL(EC-QCL)

2.1 基于衍射光栅的 EC-QCL

EC-QCL 相比于以上 2 种激光器的性能更加优越，可以获得更大的调谐范围、功率以及更窄的线宽，也是研究人员研究的热点。典型的 EC-QCL 结构有 Littrow 结构和 Littman 结构，Littrow 结构用衍射光栅的一级衍射进行波长选择，如图 5 所示。光栅与激光器后端面形成谐振，经过波长选择的零级衍射光通过衍射直接输出，实现压窄线宽和高的边模抑制比，通过改变光栅角度改变选择的波长。Littman 结构是在 Littrow 结构基础上增加一个反射镜，激光器输出的光入射到光栅上，经过光栅衍射的光入射到反射镜上，反射镜将光反射到衍射光栅上再次衍射返回谐振腔，这种结构可以实现更窄的线宽，但增加了损耗 [33]。

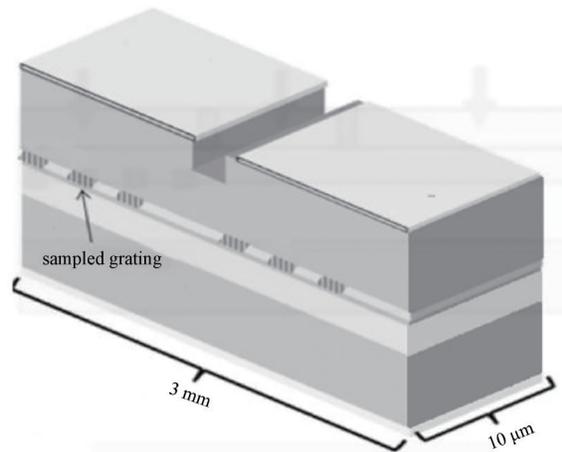


Fig.3 Tunable DFB quantum cascade laser
图3 可调谐DFB量子级联激光器

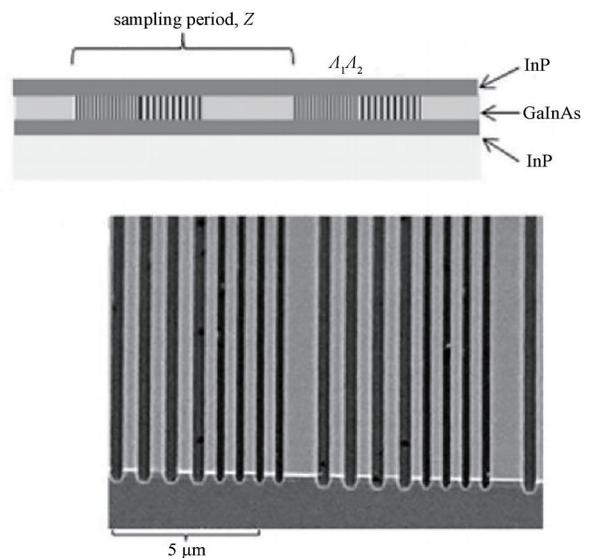


Fig.4 Schematic diagram of digital cascade grating
图4 数字级联光栅示意图

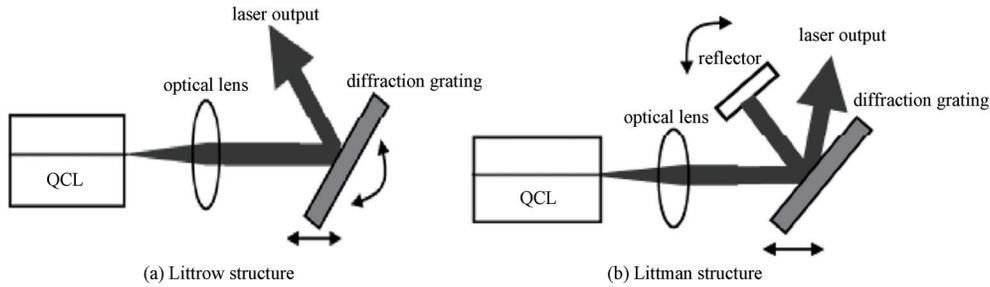


Fig.5 Schematic diagram of Littrow structure and Littman structure
图5 Littrow结构和Littman结构示意图

2016年,中科院半导体所报道了一种低阈值的EC-QCL,如图6所示^[34]。采用Littrow结构,在衍射光栅外侧增加一面反射镜,零级衍射光经反射镜反射后输出。为减弱激光器谐振腔的谐振,设计了针对波长 $7.2\ \mu\text{m}$ 的高反膜和增透膜,这样降低了EC-QCL的阈值电流密度。由于损耗增加EC-QCL的输出激光功率为 $50\ \text{mW}$,相比于FP-QCL输出激光功率 $242\ \text{mW}$ 有所下降。通过调节光栅角度实现 $128\ \text{cm}^{-1}$ 波长调谐($6.78\sim 7.43\ \mu\text{m}$)^[34]。2017年,中科院半导体所利用衍射光栅对4个QCL单管进行了合束,4个单个管芯分别封装在不同的热沉上,依次前后排列,如图7所示^[35]。因入射光的偏振方向在一定程度上影响光栅的衍射效率,所以为提高衍射效率,在光栅前适当距离处加入 $1/2$ 波片,脉冲条件下峰值功率可达到 $0.64\ \text{W}$,相比未合束的激光器总功率 $1.83\ \text{W}$ 有所下降,能够实现稳定的单纵模输出,合束效率 75% ,两个方向上光束质量因子皆小于 5.5 。这种方案避免了热串扰问题,能够实现较高功率连续波输出,并可以通过调节角度实现波长调谐^[35]。

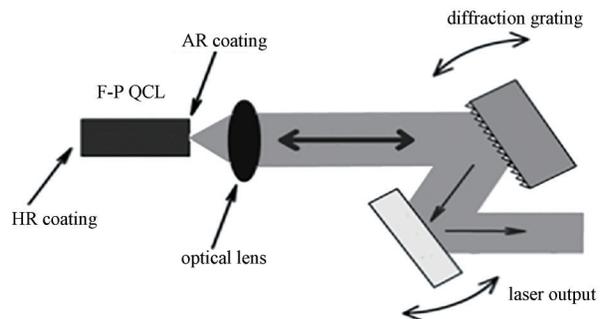


Fig.6 External cavity tunable quantum cascade laser
图6 外腔可调谐量子级联激光器

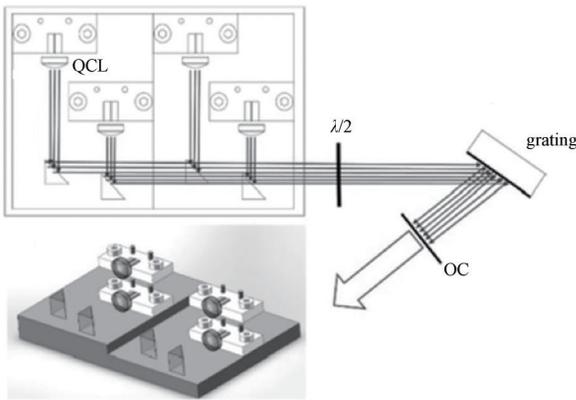


Fig.7 Schematic diagram of beam combination structure
图7 合束结构示意图

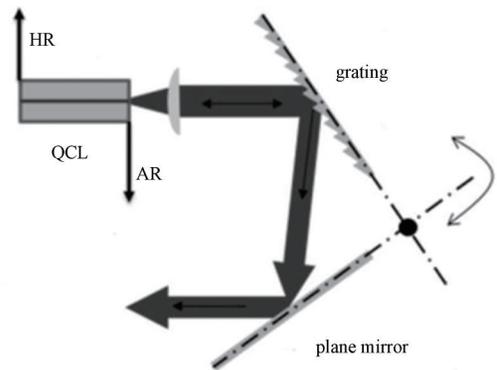


Fig.8 Structure diagram of the external cavity quantum cascade laser
图8 外腔量子级联激光器结构示意图

2018年,荷兰Radboud University报道了一种可调谐EC-QCL,以及基于此激光器对丙酮的直接吸收和二次调谐波长吸收光谱。激光器工作波长在 $8\ \mu\text{m}$ 附近,实验采用Littrow结构对QCL进行调谐,结构如图8所示^[36]。光栅和平面镜成 90° 放置,0级衍射光输出。该实验在 $-30\ ^\circ\text{C}$ 条件下获得了 $300\ \text{cm}^{-1}$ 调谐范围,大于 $250\ \text{cm}^{-1}$ 的范围内可获得单纵模,最大功率 $20\ \text{mW}$ ^[36]。

2018年美国Harvard University报道了一种基于注入锁定的可调谐EC-QCL,采用一款商用的激光器对F-P腔量子级联激光器进行光注入,如图9所示^[37]。用于注入激光的激光器波长范围 $2\ 170\sim 2\ 320\ \text{cm}^{-1}$,功率 $320\ \text{mW}$ 。研究者对激光器注入耦合效率进行大致估算,并比较了垂直注入和斜注入时F-P腔激光器产生的电压情况,推算在 34° 角注入情况下,最大耦合效率 1.24% ,能够耦合进F-P QCL激光功率 $4.4\ \text{mW}$ 。最终得到 $1\ \text{W}$ 以上的功率输出, $36\ \text{cm}^{-1}$ 的调谐范围,激光器工作中心波长 $4.5\ \mu\text{m}$ ^[37]。

2019年,德国柏林大学物理研究所报道了一种可调谐EC-QCL,结构如图10所示^[38]。由于闪耀光栅的存在,

传统 Littrow 结构输出功率是有限的，大部分光都被限制在谐振腔中，只有大约 10% 的光放大输出。研究者设计了如图 10 所示结构^[38]，在光栅与 QCL 之间增加分束器，在光栅与 QCL 之间谐振的激光通过分束器和反射镜输出，这样能够将输出功率提高到 33%，调谐范围 8~11 μm ，最大连续功率在 9 μm 附近，约为 500 mW。这种结构设计将功率提升 1 倍，并且不影响调谐范围^[38]。

EC-QCL 激光器输出功率和调谐范围以及光谱宽度在一定程度上不可同时获得，并且激光器输出功率一定程度上取决于光路的设计，即使量子级联激光器芯片的功率较高，也会有很大一部分功率保留在腔内，利用程度不高。研究人员不断从激光器外延生长、外腔结构等方面不断探索以提高性能。从外腔量子级联激光器的研究现状中可以看出，外腔量子级联激光器已逐渐发展成熟。5 μm 波段附近 EC-QCL 性能相对比较优越，与更长波长的激光器相比，5 μm 波段附近 QCL 外延生长复杂程度较低，技术相对成熟。激光功率最高能够达到 5 W 以上水平，调谐范围也比较大，能够实现 500 cm^{-1} 左右的调谐^[39-41]。而波长在 8 μm 及以上的 QCL 芯片在外延生长控制方面较为复杂，所以此波段外腔激光器输出激光功率相比 5 μm 波段略低，能够达到百毫瓦级，调谐范围大于 300 cm^{-1} 。基于该波段激光器发展水平以及重要应用，此波段激光器具有很大的研究价值，该波段激光器性能的进一步提升，将会对其在光谱检测、自由空间光通信及国防领域的应用产生推动作用。

2.2 外腔集成中红外光子器件

外腔集成器件因其结构紧凑、调谐速率快等优点也受到广泛关注，以 SOI(Silicon-On-Insulator)、Ge 基材料集成外腔结构为代表，如果能够进一步集成化将对 QCL 的应用产生巨大的促进作用。目前 SOI 是最成熟的光子器件，随着器件集成化不断向长波方向发展，而 SOI 波导中波长大于 4 μm 的光损耗较大，目前已经尝试了很多种替代方案，如蓝宝石上硅薄膜、氮化硅、多孔硅、悬空硅、绝缘体上锗硅、锗锡合金等。其中锗及锗锡合金具有更宽的透明范围(2~15 μm)，下一步将成为光子器件研究的热点，但目前面临 QCL 管芯无法与无源光子器件集成封装的问题，阻碍了无源光子器件的进一步应用，外腔集成器件具有很大的发展空间。

2013 年，比利时根特大学报道了一种 Ge-on-Si 材料平面凹光栅中红外波长复用器，分析了 2 种不同类型光栅(平面光栅和分布光栅)的横向电偏振和横向磁偏振特性，并分别测试了两种类型光栅 TE、TM 模的插入损耗和串扰，结果表明平面光栅的插入损耗和串扰较低^[42]。2018 年该研究团队报道了一种 Ge-on-SOI 热调谐跑道谐振器，自由光谱范围为 110 nm，边模抑制比 20 dB。利用 Q 因子为 20 000 的赛道谐振器可以将游标滤波器的自由光谱范围扩大到 425 nm，同时仍然保持 4 dB 的边峰抑制。热可调赛道谐振器的响应时间被测量为 125 s，允许 kHz 频率波长调谐^[43]。2019 年该团队再次利用 Ge-

on-SOI 材料制备外腔集成 DBR 结构对 5.1 μm 波长的 QCL 进行波长调谐，结构图如图 11 所示^[44]，通过电注入改变光栅两侧材料的温度，DBR 光栅的折射率发生变化从而实现波长调谐。最终实验获得了 50 nm 的调谐范围^[44]。

2016 年，英国南安普顿大学 Milos Nedeljkovic 等测量了 7.5 μm 波长的光在 Ge-on-Si 材料波导中的传播损耗，得到 3 dB/cm 的结果，相比于 3.8 μm 波长的损耗，7.5 μm 波长损耗增加，研究人员分析这是由于光学模式与位错

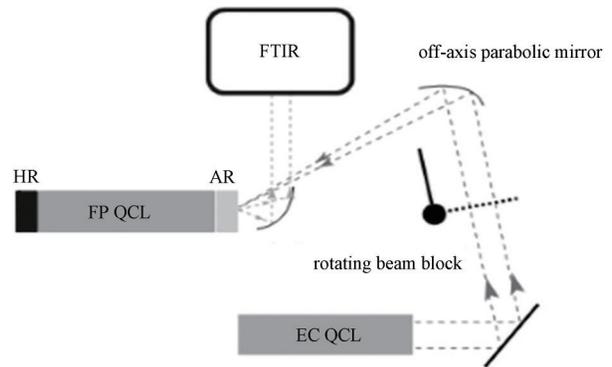


Fig.9 Schematic diagram of tunable QCL structure in optical injection cavity
图9 光注入法外腔可调谐QCL结构示意图

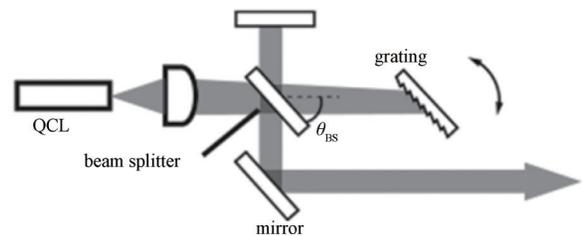


Fig.10 Littrow structure adding a beam splitter
图10 增加分束器的Littrow结构

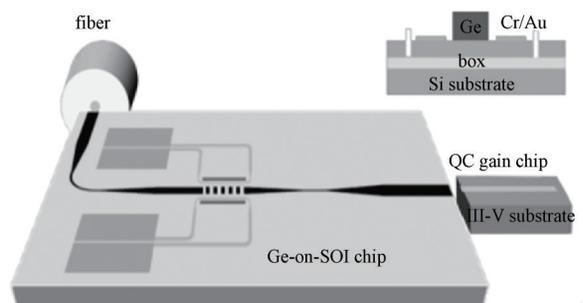


Fig.11 Structure of Ge-on-SOI DBR reflector
图11 Ge-on-SOI材料DBR反射器结构

交叠以及侧壁粗糙造成的^[45]。2017年,美国西北大学电子工程与计算机科学系量子器件中心报道了一种集成的可调谐QCL,如图12所示^[46]。该集成型可调谐激光器前部分为SG-DFB半导体激光器,后面3 mm弯曲波导为激光合束区,前端共有8个SG-DFB激光器,间隔120 μm ,近邻的2个激光器光栅具有相同的周期,4种周期光栅组合可以实现更大的调谐范围,实现6.1~9.2 μm 范围的调谐,功率65 mW,虽然单管功率可以达到百毫瓦级,但波导损耗和散射损耗过大,激光器功率过小,此报道为中红外调谐量子级联激光器提供新的思路^[46]。2018年,美国加州大学基于Ge-on-Si材料制备了7×8阵列波导光栅,操作波长4.7 μm ,如图13所示^[47]。全刻蚀波导区传播损耗3 dB/cm,插入损耗和平均串扰分别为-2.34 dB和-29.63 dB。浅刻蚀波导区传播损耗1 dB/cm,插入损耗和平均串扰分别为-1.52 dB和-28 dB^[47]。

总之,经过20多年的发展,QCL已发展为中红外波段重要的激光光源,中红外可调谐QCL必将得到更多的研究。首先,中红外可调谐QCL的波长将会向长波方向继续拓展,这也将进一步促使外延结构设计及生长技术的进一步提升,室温下操作的中红外可调谐QCL将具有更高的可靠性,功耗也将不断降低。随着中红外可调谐QCL结构研究的不断深入,DFB、DBR等集成结构将逐步替代外腔可调谐QCL,虽然外腔调谐技术可以显著扩大调谐范围,但由于光学系统对机械振动的敏感性不能满足精密光学的要求,大光栅质量、体积等因素限制了扫描速度,可挖掘的技术潜力受限。而DFB、DBR等集成器件目前面临调谐带宽窄、调谐速率慢、功率不稳定的问题,调谐带宽主要依赖于增益介质和结构设计。其次,中红外可调谐QCL下一步发展方向将在提升激光器增益带宽的同时重点研究光栅的结构设计,保证QCL增益介质的全带宽被充分利用,并且着力解决调谐过程中随着调谐波长的变化功率不稳定的问题。目前,大部分可调谐QCL主要依赖于热调谐,尽管较电调谐具有更快的调谐速率和稳定性,但仍不能满足光通信和化学传感领域的应用需求,理想情况下DFB-QCL调谐1 cm^{-1} 的时间约为140 ns,而实际操作中,由于高性能的连续可调谐DFB/DBR-QCL一般具有有效的热封装,导热性能优越,并且电流必须在器件允许的范围,导致实际调谐速度会降低10倍,所以解决这一矛盾、获得快速可调谐DFB/DBR-QCL是重要发展方向。最后,通过对新材料、新结构的不断探索,逐步实现窄线宽、宽调谐范围、快调谐速率、功率稳定、集成化是可调谐QCL的发展方向,同时激光器的斜率效率、单纵模特性以及光束质量将不断得到提升。

3 结论

通过可调谐QCL的研究进展可以看出,4~8 μm 波段的QCL技术比较成熟,激光器功率、线宽性能较为优越,基于此特点,针对该波段激光器的衍生研究也更加丰富,因此,在DBR、DFB、外腔Littrow/Littman结构以及外腔集成结构器件等方面均有进展,并且基于外腔Littrow结构的可调谐QCL更容易获得宽调谐范围和窄光谱线宽,由于外腔Littrow结构机械特性,调谐速率普遍低于DBR、DFB光栅结构^[48-50];此波段外腔集成型可调谐结构还处于实验探索阶段,损耗、调谐等特性需要进一步优化。8 μm 以上波段QCL仍需更多的基础性研究,如外延结构设计及生长技术等,以提高性能,促进应用,此波段结构探索更多研究集中于利用DBR、DFB光栅结构实现单纵模、窄线宽特性,外腔Littrow结构更多用于实现可调谐性能。近几年,美国西北大学、哈佛大学、俄罗斯圣光机大学、比利时根特大学等纷纷开展对量子级联激光器的研究,并取得很大进展^[51-54]。随着应用需求的升级,器件集成化、小型化、一体化是必然趋势,8~15 μm 量子级联激光器芯片以及其外腔集成封装将得到进一步的研究和发展。

参考文献:

- [1] 牛守柱. 高功率长波红外量子级联激光器研究[D]. 长春:长春理工大学, 2020. (NIU Shouzhu. Research on high power long-wave infrared quantum cascade lasers[D]. Changchun, China: Changchun University of Science and Technology, 2020.) doi:

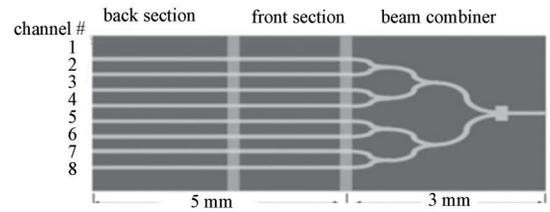


Fig.12 Schematic diagram of laser beam combination structure
图12 激光合束结构示意图

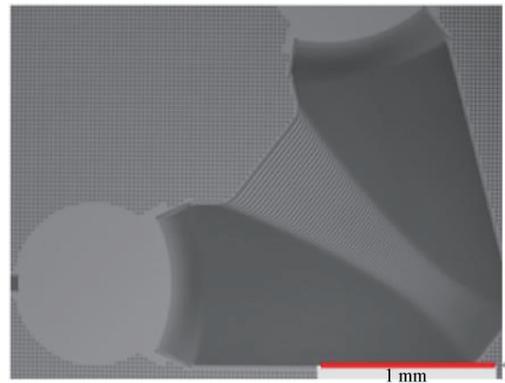


Fig.13 SEM of array waveguide grating
图13 阵列波导光栅SEM图

- 10.26977/d.cnki.gccgc.2020.000572.
- [2] 张泽涵,蒋涛,湛治强,等. 量子级联激光器的热管理研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):193–200. (ZHANG Zehan,JIANG Tao,ZHAN Zhiqiang,et al. The progress of quantum cascade lasers thermal management[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):193–200.) doi:10.11805/TKYDA2019390.
- [3] FIGUEIREDO P,SUTTINGER M,GO R,et al. Progress in high–power continuous–wave quantum cascade lasers [Invited][J]. Applied Optics, 2017,56(31):H15–H23. doi:10.1364/AO.56.000H15.
- [4] ZHOU Wenjia,LU Quanyong,WU Donghai, et al. High–power, continuous–wave, phase–locked quantum cascade laser arrays emitting at 8 μm [J]. Optics Express, 2019,27(11):15776–15785. doi:10.1364/OE.27.015776.
- [5] MASHANOVICH G Z,MITCHELL C J,PENADES J S,et al. Germanium mid–infrared photonic devices[J]. Journal of Lightwave Technology, 2017,35(4):624–630. doi:10.1109/JLT.2016.2632301.
- [6] KOOIJMANS L M J,UITSLAG N A M,ZAHNISER M S, et al. Continuous and high–precision atmospheric concentration measurements of COS, CO₂, CO and H₂O using a Quantum Cascade Laser Spectrometer(QCLS)[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2016,9(11):5293–5314. doi:10.5194/amt–9–5293–2016.
- [7] NADEEM F,MANDON J,KHODABAKHSH A,et al. Sensitive spectroscopy of acetone using a widely tunable external–cavity quantum cascade laser[J]. Sensors, 2018,18(7):2050. doi:10.3390/s18072050.
- [8] GOLYAK I S,MOROZOV A N,SVETLICHNYI S I,et al. Identification of chemical compounds by the reflected spectra in the range of 5.3~12.8 μm using a tunable quantum cascade laser[J]. Russian Journal of Physical Chemistry B, 2019,13(4):557–564. doi:10.1134/S1990793119040055.
- [9] RAZEGHI M,LU Q Y,BANDYOPADHYAY N,et al. Quantum cascade lasers: from tool to product[J]. Optics Express, 2015,23(7):8462–8475. doi:10.1364/OE.23.008462.
- [10] PANG Xiaodan,OZOLINS O,SCHATZ R,et al. Gigabit free–space multi–level signal transmission with a mid–infrared quantum cascade laser operating at room temperature[J]. Optics Letters, 2017,42(18):3646–3649. doi:10.1364/OL.42.003646.
- [11] DIBA A,XIE Feng,CANEAU C,et al. Wavelength tuning of sampled–grating DBR quantum cascade lasers[C]// Conference on Lasers and Electro–Optics 2012. San Jose, California United States: Optica Publishing Group, 2012: CF3K. 3. doi: 10.1364/CLEO_SI.2012.CF3K.3.
- [12] XIE Feng,CANEAU C G,LEBLANC H P,et al. High power and high temperature continuous–wave operation of distributed Bragg reflector quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2014,104(7):071109. doi:10.1063/1.4863233.
- [13] DIBA A S,XIE Feng,GROSS B,et al. Application of a broadly tunable SG–DBR QCL for multi–species trace gas spectroscopy[J]. Optics Express, 2015,23(21):27123–27133. doi:10.1364/oe.23.027123.
- [14] GUO Dingkai,LI Junyun,CHENG Liwei, et al. Widely tunable monolithic mid–infrared quantum cascade lasers using super–structure grating reflectors[J]. Photonics, 2016,3(2):25. doi:10.3390/photonics3020025.
- [15] YOSHINAGA H,HASHIMOTO J I,MORI H, et al. Mid–infrared quantum cascade laser integrated with distributed Bragg reflector[C]// Proc. SPIE 9755, Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIII. San Francisco, California, United States:SPIE, 2016:1–6. doi:10.1117/12.2212332.
- [16] CHENG Fengmin,JIA Zhiwei,ZHANG Jinchuan,et al. Stable single–mode operation of a distributed feedback quantum cascade laser integrated with a distributed Bragg reflector[J]. Photonics Research, 2017,5(4):320–323. doi:10.1364/PRJ.5.000320.
- [17] BARTALINI S,VITIELLO M S,DE NATALE P. Quantum cascade lasers:a versatile source for precise measurements in the mid/far–infrared range[J]. Measurement Science and Technology, 2014,25(1):012001. doi:10.1088/0957–0233/25/1/012001.
- [18] 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. doi:10.1126/science.1066408.
- [19] BOTEZ D,CHANG C C,MAWST L J. Temperature sensitivity of the electro–optical characteristics for mid–infrared($\lambda = 3\text{--}16\ \mu\text{m}$)–emitting quantum cascade lasers[J]. Journal of Physics D:Applied Physics, 2015,49(4):043001. doi:10.1088/0022–3727/49/4/043001.
- [20] SLIVKEN S,BANDYOPADHYAY N, TSAO S,et al. Sampled grating,distributed feedback quantum cascade lasers with broad tunability and continuous operation at room temperature[J]. Applied Physics Letters, 2012,100(26):261112. doi:10.1063/1.4732801.
- [21] SLIVKEN S,BANDYOPADHYAY N, TSAO S, et al. Dual section quantum cascade lasers with wide electrical tuning[C]// Quantum Sensing and Nanophotonic Devices X. San Francisco, California, United States: SPIE, 2013: 86310P. doi: 10.1117/12.2008506.
- [22] SLIVKEN S, BANDYOPADHYAY N, BAI Y, et al. Extended electrical tuning of quantum cascade lasers with digital concatenated gratings[J]. Applied Physics Letters, 2013,103(23):231110. doi:10.1063/1.4841635.

- [23] TITTEL F K, ALLRED J J, CAO Yingchun, et al. Quantum cascade laser-based sensor system for nitric oxide detection[J]. Proceedings. SPIE 9370, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices XII. San Francisco, California, United States: SPIE, 2015: 93700V. doi:10.1117/12.2083718.
- [24] DANG Jingmin, YU Haiye, SUN Yujing, et al. A CO trace gas detection system based on continuous wave DFB-QCL[J]. Infrared Physics & Technology, 2017(82):183–191. doi:10.1016/j.infrared.2016.12.012.
- [25] YU Yajun, SANCHEZ N P, LOU Minhan, et al. CW DFB-QCL and EC-QCL based sensor for simultaneous NO and NO₂ measurements via frequency modulation multiplexing using multi-pass absorption spectroscopy[C]// Quantum Sensing and Nano Electronics and Photonics XIV. San Francisco, California, United States: SPIE, 2017:1011108. doi:10.1117/12.2251228.
- [26] VAN H N, LOGHMARI Z, PHILIP H, et al. Long wavelength ($\lambda > 17 \mu\text{m}$) distributed feedback quantum cascade lasers operating in a continuous wave at room temperature[J]. Photonics, 2019,6(1):31. doi:10.3390/photonics6010031.
- [27] SHU Hong, SUTTINGER M, LYAKH A. Floquet-bloch analysis for distributed feedback quantum cascade lasers with a non-rectangular top-metal grating profile[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2019,55(1):1–7. doi:10.1109/JQE.2019.2891824.
- [28] FAIST J, GMACHL C, CAPASSO F, et al. Distributed feedback quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 1997,70(20): 2670–2672. doi:10.1063/1.119208.
- [29] ZHAO Yue, ZHANG Jinchuan, JIA Zhiwei, et al. Low power consumption distributed-feedback quantum cascade lasers operating in continuous-wave mode above 90 °C at $\lambda = 7.2 \mu\text{m}$ [J]. Chinese Physics Letters, 2016,33(12):124201. doi:10.1088/0256-307X/33/12/124201.
- [30] MAULINI R, LYAKH A, TSEKOUN A, et al. $\lambda \sim 7.1 \mu\text{m}$ quantum cascade lasers with 19% wall-plug efficiency at room temperature[J]. Optics Express, 2011,19(18):17203–17211. doi:10.1364/OE.19.017203.
- [31] MENG Bo, WANG Qijie. Broadly tunable single-mode mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Journal of Optics, 2015,17(2): 023001. doi:10.1088/2040-8978/17/2/023001.
- [32] BABICHEV A V, DUDELEV V V, GLADYSHEV A G, et al. High-power quantum-cascade lasers emitting in the 8 μm wavelength range[J]. Technical Physics Letters, 2019,45(7):735–738. doi:10.1134/S1063785019070174.
- [33] 张宇露, 黄彦, 高志强, 等. 11.4 μm 外腔宽调谐量子级联激光器研究[J]. 遥测遥控, 2020,41(4):34–39,61. (ZHANG Yulu, HUANG Yan, GAO Zhiqiang, et al. Research on broadly tuning external cavity quantum cascade laser of 11.4 μm [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020,41(4):34–39,61.) doi:10.13435/j.cnki.ttc.003081.
- [34] ZHAO Zhibin, WANG Lijun, JIA Zhiwei, et al. Low-threshold external-cavity quantum cascade laser around 7.2 μm [J]. Optical Engineering, 2016,55(4):046116. doi:10.1117/1.OE.55.4.046116.
- [35] ZHAO Yue, ZHANG Jinchuan, ZHOU Yuhong, et al. External-cavity beam combining of 4-channel quantum cascade lasers[J]. Infrared Physics & Technology, 2017(85):52–55. doi:10.1016/j.infrared.2017.05.012.
- [36] NADEEM F, MANDON J, KHODABAKHSH A, et al. Sensitive spectroscopy of acetone using a widely tunable external-cavity quantum cascade laser[J]. Sensors, 2018,18(7):2050. doi:10.3390/s18072050.
- [37] CHEVALIER P, PICCARDO M, ANAND S, et al. Watt-level widely tunable single-mode emission by injection-locking of a multimode Fabry-Perot quantum cascade laser[J]. Applied Physics Letters, 2018,112(6):061109. doi:10.1063/1.5018616.
- [38] MATSUOKA Y, PETERS S, SEMTSIV M P, et al. Tunable external cavity quantum cascade laser using intra-cavity out-coupling[C]// 2018 Conference on Lasers and Electro-Optics(CLEO). San Jose, CA, USA: IEEE, 2018: 1–2. doi: 10.1364/CLEO_AT.2018.JTu2A.18.
- [39] SERGACHEV I, MAULINI R, BISMUTO A, et al. Gain-guided broad area quantum cascade lasers emitting 23.5 W peak power at room temperature[J]. Optics Express, 2016,24(17):19063–19071. doi:10.1364/OE.24.019063.
- [40] JOUY P, WOLF J M, BIDAUX Y, et al. Dual comb operation of $\lambda \sim 8.2 \mu\text{m}$ quantum cascade laser frequency comb with 1 W optical power[J]. Applied Physics Letters, 2017,111(14):141102. doi:10.1063/1.4985102.
- [41] ZHAO Yue, ZHANG Jinchuan, CHENG Fengmin, et al. Tapered quantum cascade laser arrays integrated with talbot cavities[J]. Nanoscale Research Letters, 2018,13(1):205. doi:10.1186/s11671-018-2617-z.
- [42] MALIK A, MUNEEB M, SHIMURA Y, et al. Germanium-on-silicon planar concave grating wavelength (de)multiplexers in the mid-infrared[J]. Applied Physics Letters, 2013,103(16):161119. doi:10.1063/1.4826114.
- [43] RADOSAVLJEVIC S, BENEITEZ N T, KATUMBA A, et al. Mid-infrared vernier racetrack resonator tunable filter implemented on a Germanium on SOI waveguide platform [Invited][J]. Optical Materials Express, 2018,8(4):824–835. doi:10.1364/OME.8.000824.
- [44] RADOSAVLJEVIC S, RADOSAVLJEVIC A, SCHILLING C, et al. Thermally tunable quantum cascade laser with an external germanium-on-SOI distributed Bragg reflector[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019,25(6):1–7. doi:10.1109/JSTQE.2019.2933784.

- [45] NEDELJKOVIC M, VELASCO A V, KHOKHAR A Z, et al. Mid-infrared silicon-on-insulator Fourier-transform spectrometer chip[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016,28(4):528–531. doi:10.1109/LPT.2015.2496729.
- [46] ZHOU Wenjia, WU Donghai, MCCLINTOCK R, et al. High performance monolithic, broadly tunable mid-infrared quantum cascade lasers[J]. Optica, 2017,4(10):1228–1231. doi:10.1364/OPTICA.4.001228.
- [47] MALIK A, STANTON E J, LIU Junqian, et al. High performance 7×8 Ge-on-Si arrayed waveguide gratings for the midinfrared[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018,24(6):1–8. doi:10.1109/JSTQE.2018.2819889.
- [48] PIERŚCIŃSKI K, KUŹMICH A, PIERŚCIŃSKA D, et al. Optimization of cavity designs of tapered AlInAs/InGaAs/InP quantum cascade lasers emitting at $4.5 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019,25(6):1–9. doi:10.1109/JSTQE.2019.2948500.
- [49] BABICHEV A V, GLADYSHEV A G, KUROCHKIN A S, et al. Room temperature lasing of multi-stage quantum-cascade lasers at $8 \mu\text{m}$ wavelength[J]. Semiconductors, 2018,52(8):1082–1085. doi:10.1134/S1063782618080031.
- [50] DUDELEV V V, LOSEV S N, MYLNIKOV V Y, et al. High temperature laser generation of quantum-cascade lasers in the spectral region of $8 \mu\text{m}$ [J]. Physics of the Solid State, 2018,60(11):2291–2294. doi:10.1134/S1063783418110057.
- [51] RADOSAVLJEVIC S, KUYKEN B, ROELKENS G. Efficient $5.2 \mu\text{m}$ wavelength fiber-to-chip grating couplers for the Ge-on-Si and Ge-on-SOI mid-infrared waveguide platform[J]. Optics Express, 2017,25(16):19034–19042. doi:10.1364/OE.25.019034.
- [52] MALIK A, MUNEEB M, PATHAK S, et al. Germanium-on-silicon mid-infrared arrayed waveguide grating multiplexers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013,25(18):1805–1808. doi:10.1109/LPT.2013.2276479.
- [53] LYAKH A, SUTTINGER M, GO R, et al. $5.6 \mu\text{m}$ quantum cascade lasers based on a two-material active region composition with a room temperature wall-plug efficiency exceeding 28%[J]. Applied Physics Letters, 2016,109(12):121109. doi:10.1063/1.4963233.
- [54] RADOSAVLJEVIC S, RADOSAVLJEVIĆ A, SCHILLING C, et al. Thermally tunable quantum cascade laser with an external germanium-on-SOI distributed Bragg reflector[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2019,25(6):1–7. doi:10.1109/JSTQE.2019.2933784.

作者简介：

刘莹(1996-), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为中红外量子级联激光器领域. email:1016819837@qq.com.

蒋涛(1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹科学与量子器件.

杨奇(1987-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为微纳材料制备与性能.

王雪敏(1975-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为中红外及太赫兹量子级联器件.

湛治强(1990-), 男, 大专, 初级技工, 主要从事半导体微纳器件加工.

邹蕊娇(1991-), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为光学系统设计.

罗佳文(1995-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹量子级联器件.

樊龙(1985-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为功能薄膜与器件.

陈风伟(1986-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为量子级联器件、红外物理仿真.

吴卫东(1967-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为多功能薄膜、半导体激光器、气体传感器.