

中红外量子级联激光器的光子集成 (特邀)

朱纯凡 王贤耿 汪祥 王瑞军

Photonics integration of mid-infrared quantum cascade laser (*Invited*)

Zhu Chunfan, Wang Xiangeng, Wang Xiang, Wang Ruijun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220197>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中远红外量子级联激光器研究进展(特邀)

Progress in mid- and far-infrared quantum cascade laser (*invited*)

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1003001-1003001(10) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1003001>

光子集成混沌半导体激光器研究进展 (特邀)

Progress in photonic integrated chaotic semiconductor laser (*Invited*)

红外与激光工程. 2020, 49(12): 20201066-1-20201066-14 <https://doi.org/10.3788/IRLA20201066>

3~4  $\mu\text{m}$  碲化物带间级联激光器研究进展(特邀)

Research progress of 3-4  $\mu\text{m}$  antimonide interband cascade laser (*invited*)

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1003003-1003003(7) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1003003>

中红外半导体激光器合束技术研究进展(特邀)

Development of beam combining technology in mid-infrared semiconductor lasers (*invited*)

红外与激光工程. 2018, 47(10): 1003002-1003002(8) <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1003002>

中红外超强超短激光研究进展 (特邀)

Research progress of mid-infrared ultra-intense and ultrashort laser (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(8): 20210456-1-20210456-10 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210456>

硅基光子集成宽带大色散延时芯片 (特邀)

Wideband large dispersion group delay chip based on silicon photonics integration (*Invited*)

红外与激光工程. 2021, 50(7): 20211045-1-20211045-5 <https://doi.org/10.3788/IRLA20211045>

## 中红外量子级联激光器的光子集成 (特邀)

朱纯凡, 王贤耿, 汪 祥, 王瑞军\*

(中山大学 电子与信息工程学院, 广东 广州 510000)

**摘要:** 中红外光子集成芯片在环保监测、医疗诊断和国防安全等领域具有广泛的应用前景,但激光光源与无源波导光路的片上集成仍是中红外集成光学需要攻克的关键难题之一。量子级联激光器(QCL)是中红外波段的重要半导体激光光源,文中介绍了近几年中红外 QCL 在光子集成方面的研究进展,包括 InP 基单片集成、硅基单片集成、硅基异质键合集成和 III-V/锗混合外腔激光器。

**关键词:** 量子级联激光器; 光子集成; 中红外; 硅基光子学; 光学传感

**中图分类号:** TN248;TN256 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220197

## Photonics integration of mid-infrared quantum cascade laser (*Invited*)

Zhu Chunfan, Wang Xiangeng, Wang Xiang, Wang Ruijun\*

(School of Electronic and Information Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** Mid-infrared photonic integrated circuits have been attracting a lot of interest for applications in environmental monitoring, medical diagnosis and national defense. However, the integration of laser sources with low-loss mid-infrared waveguide circuits is challenging. Quantum cascade lasers (QCLs) are important semiconductor laser sources operating in the mid-infrared spectral range. In this review paper, the research progress of the photonics integration of mid-infrared QCLs in recent years was introduced. Several different approaches were reviewed, including monolithic integration on InP, monolithic integration on silicon, heterogeneous integration on silicon and III-V/Germanium hybrid external cavity laser.

**Key words:** quantum cascade laser; photonics integration; mid-infrared; silicon photonics; optical sensing

收稿日期:2022-03-17; 修订日期:2022-03-23

基金项目:光电材料与技术国家重点实验室自主课题(OEMT-2021-PZ-01)

作者简介:朱纯凡,男,硕士生,主要从事光电集成器件与芯片方面的研究。

通讯作者:王瑞军,男,副教授,博士,主要从事光电集成器件与芯片和半导体激光器方面的研究。

## 0 引言

中红外是指波长为 2~20  $\mu\text{m}$  的电磁谱段, 由于大量分子的基频振动吸收谱线都落在该区域<sup>[1]</sup>, 而且该波段还覆盖了数个大气窗口, 因此中红外光电器件与系统在气体检测、生物医疗、国防安全等领域有许多重要的应用。光子集成技术通过将各种光电元件集成到单一基板<sup>[2]</sup>, 使得光学系统的体积、重量和功耗大大降低, 同时能显著地提高系统的稳定性和可靠性, 目前近红外波段的光子集成芯片已经广泛应用在高速光通信系统中, 而中红外光子集成芯片由于在光学传感和生物传感方面的应用前景而成为近些年集成光学的一个研究热点, 国内外的研究人员相继开发出硅、锗、磷化铟 (InP)、硫系玻璃等多个中红外集成光学平台<sup>[3-6]</sup>, 研制出大量无源和有源光子集成器件。激光器是中红外光子集成系统中的关键组成部分, 但相关研究还远远落后于无源器件, 实现片上集成的激光光源是中红外光子集成亟待解决的问题之一。

工作中红外波段的半导体激光器结构主要有量子级联激光器 (Quantum Cascade Lasers, QCLs) 和带间级联激光器 (Interband Cascade Lasers, ICLs) 两种, 前者是基于量子阱子带间的电子跃迁而产生光子的一种单极性光源, 由 Jérôme Faist 等人于 1994 年在贝尔实验室首次实现<sup>[7]</sup>, 而后者依靠电子与空穴在二类量子阱的导带和价带之间辐射复合而产生光子, 由俄克拉荷马大学的杨瑞青教授在 1994 年首次提出<sup>[8]</sup>, 两种激光器的一个共同特点就是它们都需要通过有源区级联的方式来产生较高量子效率。相较而言, 在室温下, ICL 目前主要工作 3~6  $\mu\text{m}$  的波长范围<sup>[9]</sup>, 而 QCL 在中红外谱区能覆盖 3~20  $\mu\text{m}$  的波长范围<sup>[10]</sup>, ICL 可以在较低电流阈值下实现激射, 而 QCL 可以输出较高的光功率。文中主要介绍 QCL 在光子集成方面的研究进展。

中红外波段的 QCL 主要生长在 InP 衬底上, 首先介绍了 QCL 在 InP 衬底上的单片集成, 随后介绍了 QCL 与硅基光子芯片集成的几种方式, 包括硅基单片集成、异质键合集成和混合集成外腔激光器。

## 1 InP 基单片集成

近红外波段 InP 基单片光子集成技术已经在过去 30 年里得到充分发展, 如今上万个工作在光通信波段的光子器件已经可以集成到一块 InP 基芯片

上<sup>[11]</sup>, 但中红外波段的 InP 基单片光子集成平台还有待继续开发, 其中一个难点在于 QCL 的有源区有 1.5~3  $\mu\text{m}$  厚, 远超近红外波段的量子阱二极管激光器的有源区 (~100 nm 厚), 这大大增加了 QCL 有源波导与 InGaAs 无源波导低损耗片上集成的难度, 为了解决这个问题, 国际上多个研究团队发展出几条不同的 QCL 单片集成的路线<sup>[12-14]</sup>。

2015 年, 美国麻省理工学院 (MIT) 林肯实验室的 Juan Montoya 等人通过质子注入的方式将部分 QCL 波导转化为自由载流子吸收损耗较小的无源波导<sup>[12]</sup>, 其他没有质子注入的区域成为有源波导, 如图 1(a) 所示, 有源波导与无源波导之间的光子传输通过对接耦合实现。该激光器的发射波长为 9.6  $\mu\text{m}$ , 只能在脉冲模式下激射。当有源波导和无源波导都为 3 mm 长时, 激光器的阈值电流为 3.1 A, 最大峰值输出功率约为 250 mW。通过分析不同长度的激光器的性能, 该论文的作者测到无源波导的损耗为 7 dB/cm。

2019 年, 美国德州大学奥斯汀分校 (UT-Austin) 的 Mikhail Belkin 团队通过倏逝波耦合实现了 QCL 与 InGaAs 无源波导的单片集成, 器件结构如图 1(b) 所示, 0.75  $\mu\text{m}$  厚的无掺杂 InGaAs 波导层生长在 1.66  $\mu\text{m}$  厚的 QCL 有源区的下方, 为了使有源区产生的光子能够高效低损耗地耦合进入无源波导, 有源波导的端面部分被加工成楔形状以便实现有源波导与无源波导的相位匹配。该激光器只能在脉冲模式下激射, 发射波长为 4.6  $\mu\text{m}$ , 当有源波导与无源波导的长度分别为 3.75 mm 和 6.5 mm 时, 激光器的阈值电流密度为 3.5 kA/cm<sup>2</sup>, 最大峰值输出功率为 280 mW。为了分析无源波导的传输损耗, 作者在晶圆上加工了几条长度不同的 InGaAs 无源波导, 测得的损耗为 2.2 dB/cm。

2022 年, 中山大学的王瑞军等人与瑞士苏黎世联邦理工学院的 Jérôme Faist 团队实现了能在连续波 (CW) 模式下激射的单片集成 QCL<sup>[14]</sup>, 器件结构如图 1(c) 所示。整个器件的外延层结构与传统 QCL 一样, 为了实现有源波导与无源波导的单片集成, 作者首先利用二氧化硅作为掩膜将 QCL 晶圆的大部分区域通过湿法腐蚀移除掉, 只留下一些 35  $\mu\text{m}$  宽的条纹, 然后通过金属有机物气相外延 (MOVPE) 将 InGaAs 层生长到 QCL 晶圆中没有被二氧化硅掩膜保护的区域, 为了能与有源区的厚度对齐, 再生长的 InGaAs 无

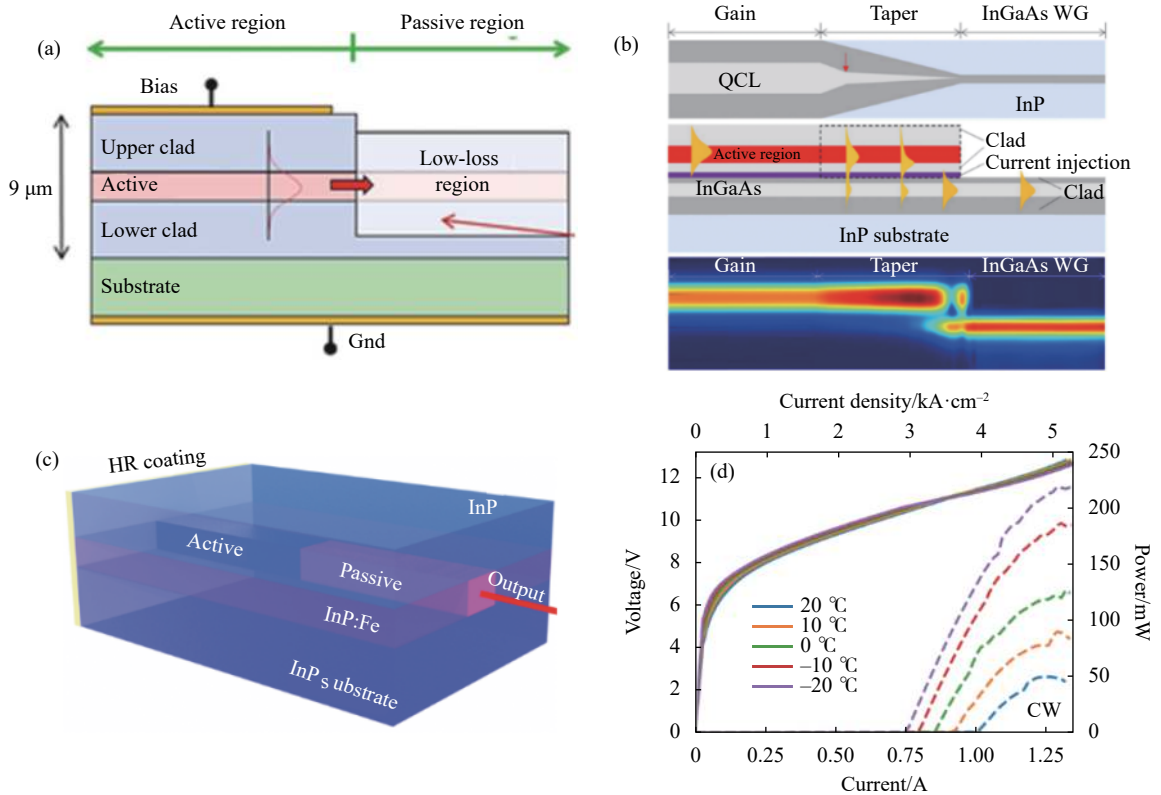


图 1 (a) MIT 林肯实验室研制的单片集成 QCL 器件的结构示意图, QCL 波导的其中一截被选择性地注入质子以减少自由载流子与子带跃迁损耗<sup>[12]</sup>; (b) 倏逝波耦合的单片集成 QCL 器件的结构示意图<sup>[13]</sup>; (c) 通过对接耦合实现中红外 QCL 与低损耗无源波导的单片集成, 在湿法蚀刻移除掉大部分区域的有源层后, InGaAs 无源波导层通过 MOVPE 生长在 QCL 晶圆上<sup>[14]</sup>; (d) 图 1(c) 所示单片集成 QCL 器件在 CW 模式下的光功率-电流-电压关系 (LIV) 曲线<sup>[14]</sup>

Fig.1 (a) Monolithically integrated QCL device developed by MIT Lincoln Laboratory, part of the QCL waveguide is proton implanted to reduce the free-carrier and intersubband transition loss<sup>[12]</sup>; (b) Schematic of the evanescently coupled monolithically integrated QCL device<sup>[13]</sup>; (c) Monolithic integration of mid-infrared QCL with low-loss passive waveguides via butt-coupling<sup>[14]</sup>, the InGaAs passive waveguide layer is grown on the sample after most area of the wafer is removed by wet etching; (d) CW mode light-current-voltage (LIV) curve of the monolithically integrated QCL device schematically shown in Fig.1(c) <sup>[14]</sup>

源波导层有 2.3  $\mu\text{m}$  厚, 然后利用标准的掩埋异质结构工艺将单片集成的 QCL 器件加工出来<sup>[15]</sup>, 有源波导与无源波导之间的光子传输通过对接耦合实现。该器件的发射波长为 8  $\mu\text{m}$ , 无源波导的传输损耗为  $(1.2 \pm 0.3)$  dB/cm, 对接耦合损耗为 0.05 dB。当有源波导与无源波导的长度分别为 3 mm 和 2 mm 时, 该单片集成的 QCL 器件在连续波 (CW) 模式下的室温阈值电流密度为 3.93  $\text{kA}/\text{cm}^2$ , 最大输出功率为 50 mW, 如图 1(d) 所示。在脉冲模式下的室温阈值电流密度为 2.72  $\text{kA}/\text{cm}^2$ , 最大输出功率达到 880 mW。作者研究发现该单片集成的 QCL 可以直接输出频率调制的光频梳。

硅基光子集成可以利用成熟的互补金属氧化物半导体 (CMOS) 工艺线在大尺寸晶圆线上加工光子

器件与芯片, 这使得大批量制造低成本光子传感芯片成为可能<sup>[16]</sup>, 为了实现中红外硅基光子集成芯片的片上光源, 研究人员开始探索 QCL 与硅基波导光子片上集成的方法, 下面介绍国内外研究团队在 QCL 的硅基单片集成、异质键合集成和混合外腔集成方面所开展的工作。

## 2 硅基单片集成

要在硅基光子芯片上集成 QCL 作为光源, 最直接的方法就是在硅衬底上生长 QCL 外延材料然后加工成激光器, 但硅与 III-V 族材料的晶格失配度较大, 直接在硅上生长高质量的外延材料难度很大, 为了解决这个问题, 法国国家科学研究中心的 Eric Tournié 团

队以及美国中佛罗里达大学的 Arkadiy Lyakh 团队在近几年进行了初步的探索<sup>[17-19]</sup>。

2018 年, Eric Tournié 团队首次报道了在硅衬底上生长 QCL 外延结构的工作<sup>[17]</sup>, 在该工作中, 发射波长为 11 μm 的 InAs/AlSb 有源区生长在 2 in(1 in=2.54 cm) 的 (100) 硅衬底上, 为了避免在非极性的硅衬底上生长 III-V 材料形成反相畴界, 他们将硅衬底朝 [110] 方向斜切了 6° 角。生长得到的有源区呈现波浪形状, 位错密度预估大约  $(1\sim3)\times 10^7\text{ cm}^{-2}$ 。3.5 mm 长的 QCL 器件在室温下的阈值电流密度为 1.35 kA/cm<sup>2</sup>, 相比 InAs 衬底上生长得到的参考器件只高了 30%, 激光器的特征温度  $T_0$  为 150 K, 与参考器件几乎一致 (145 K)。2020 年, 该团队在同样结构的硅衬底上生长出发射波长为 7.5 μm 的 InAs/AlSb 有源区<sup>[18]</sup>, 外延材料的表面形貌要好于他们两年前的样品, 但是仍然很粗糙, 如图 2(a) 所示, 通过原子力显微镜测量得到的均方根粗糙度有 9.9 nm, 但没有观察到反相畴界。该激光器在 300 K 温度下的阈值电流密度为 0.92~0.95 kA/cm<sup>2</sup>, 比 InAs 衬底上生长的参考样品高了将近 25%, 激光器最高工作温度达到 410 K, 如图 2(b) 所示, 特征温度  $T_0$  为 125 K。

相比于 Eric Tournié 团队主要研究在硅衬底上生长 InAs 基的 QCL 有源区, Arkadiy Lyakh 团队则尝试了在 6 in 的硅上锗晶圆上生长激光波长较短的 InP 基 QCL 结构<sup>[19]</sup>, 他们使用的硅衬底结构与 Tournié 团队一致。为了降低晶格失配所产生的位错密度, 他们还在衬底上生长一层 2 μm 厚的 GaAs 缓冲层和一层 1.1 μm 厚的渐变 InAlAs 层作为异变缓冲层。当器件的尺寸为 3 mm×40 μm 时, 激光器在 78 K 温度下的阈值电流为 2.2 A, 在脉冲模式下最高工作温度为 170 K, 发射波长为 4.35 μm, 在整个晶圆上, 器件激射的良率只有 10% 左右, 很多器件在工作几分钟后性能迅速下降。

如上所述, 直接在硅衬底上生长 QCL 需要克服晶格失配和热失配等诸多问题, 难度很大, 而且以上几项研究中硅晶圆只作为衬底使用, 表面没有波导结构, QCL 产生的激光也并没有耦合进入硅波导。为了实现 III-V 族化合物半导体激光器与硅基波导光路的片上集成, 硅基光子学在过去十几年探索出多条路线<sup>[20]</sup>, 包括异质键合集成、混合外腔集成、倒装焊等, 近些年, 这些技术也被应用到 QCL 与硅波导光路的集成上。

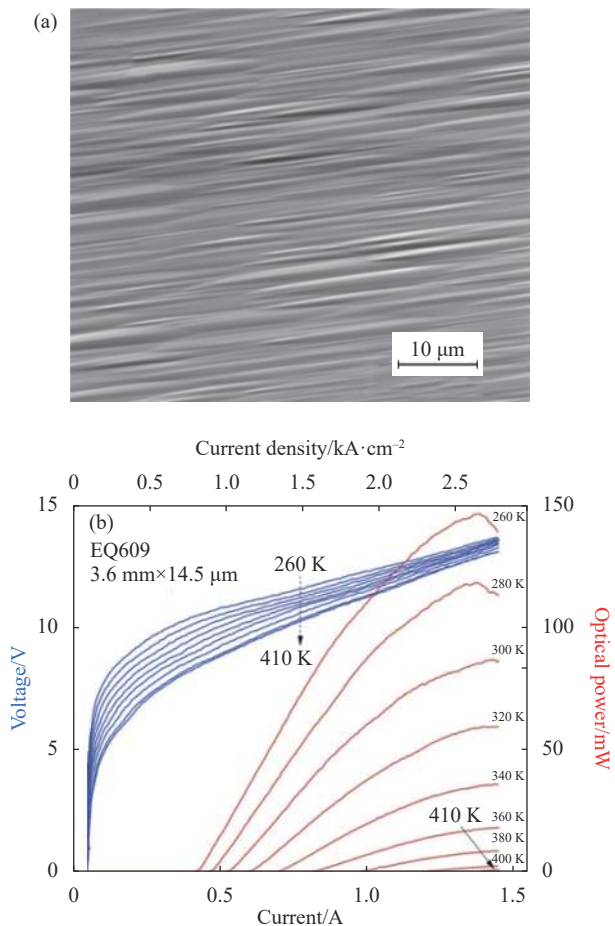


图 2 (a) 硅衬底上生长的 QCL 晶圆的表面形貌<sup>[18]</sup>; (b) 硅衬底上生长的 QCL 器件的 LIV 特性<sup>[18]</sup>

Fig.2 (a) Surface morphology of the QCL wafer grown on silicon substrate<sup>[18]</sup>; (b) LIV characteristics of a QCL device grown on silicon substrate<sup>[18]</sup>

### 3 硅基异质键合集成

异质键合是指将 QCL 外延材料键合到硅基波导光路上, 然后再加工成激光器的集成方式<sup>[21]</sup>, 波导光路作为激光谐振腔的一部分扮演光学反馈和选模的作用。2016 年, 美国加州大学圣塔芭芭拉分校 (UCSB) 的 John Bowers 团队与海军实验室和威斯康辛大学麦迪逊分校合作实现了 4.8 μm 波段的 QCL 在硅波导上的异质键合集成<sup>[22]</sup>。硅基光子器件通常加工在绝缘体上硅 (SOI) 晶圆上, 但 SOI 中的二氧化硅包层在中红外波段有强烈的光学吸收, 因此 Bowers 团队选择将 QCL 键合到绝缘体上氮化硅上硅 (SONOI) 晶圆上, 这样子光学模场与二氧化硅层的重叠大大减少, 从而减少了激光谐振腔的吸收损耗。整个器件的结构如图 3(a) 所示, 由于 QCL 产生的激光为 TM 极性,

因此整个激光器结构都按照 TM 波导结构来设计。QCL 的有源区键合在 1.5 μm 厚的硅波导层上, 为了实现较大的光学增益, 光学模场绝大部分被限制在有源区中, 光学限制因子约为 0.76, 模场只有较少的一部分被限制在硅波导中。QCL 晶圆通过直接键合转移到 SONOI 波导光路上, 在移除 InP 衬底后再利用干法刻蚀和湿法刻蚀加工出 QCL 波导, 然后将电极沉积在样品上制作出电泵浦的激光器器件, 最后通过晶圆切割制作出波导端面作为谐振腔的反射镜。该异质集成的激光器只能在脉冲模式下激励, 室温阈值电流密度约为 1.7 kA/cm<sup>2</sup>, 最大峰值输出功率为 31 mW, 如图 3(b) 所示, 特征温度 T<sub>0</sub> 为 125 K。

该团队随后通过在硅波导上加工光栅制作出硅上异质集成的分布式反馈 QCL<sup>[23]</sup>。异质集成使得

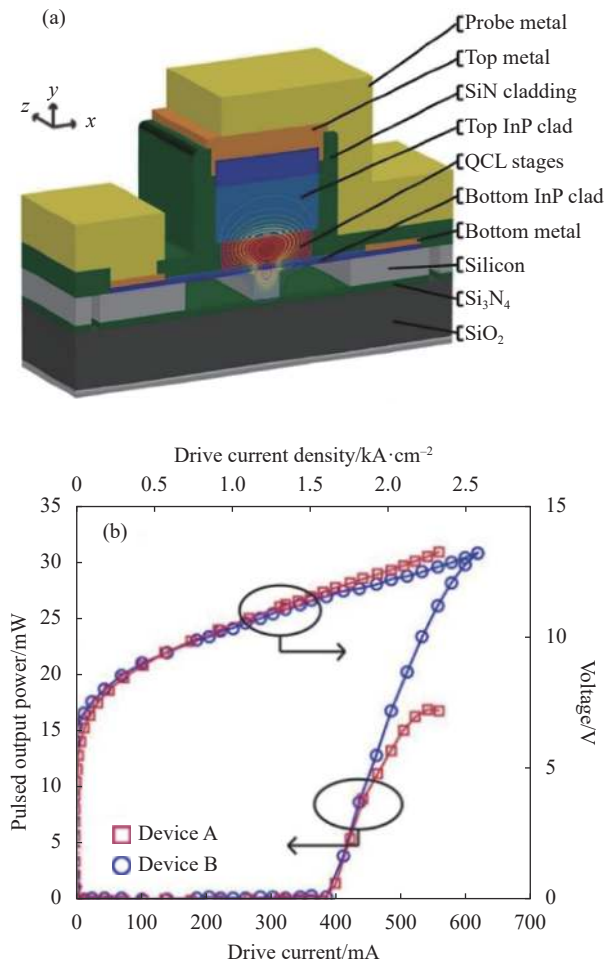


图 3 (a) 硅波导上异质键合集成的 QCL 的结构示意图<sup>[20]</sup>; (b) 脉冲工作下, 硅上异质集成 QCL 的 LIV 特性<sup>[20]</sup>

Fig.3 (a) Schematic of the QCL heterogeneously integrated on a silicon waveguide<sup>[20]</sup>; (b) LIV characteristics of the heterogeneously integrated QCL in pulsed operation<sup>[20]</sup>

QCL 能与一些高性能的硅光元件实现片上集成, 从而获得一些传统 III-V 平台无法实现的性能, 譬如, Bowers 团队的 Eric J. Stanton 等人在 2019 年研制出与硅基阵列波导光栅 (AWG) 片上异质集成的多波长 QCL 阵列<sup>[24]</sup>, 他们利用 AWG 作为合波元件实现了多波长单模激光的单波导输出。

#### 4 混合外腔集成

相比于工作在光纤通信波段的量子阱二极管激光器, QCL 器件的功耗要大一两个数量级, 而异质键合集成需要将 QCL 集成到硅波导上, 硅波导通常采用热导率较低的材料 (如氮化硅、二氧化硅等) 作为波导包层, 这给 QCL 的散热造成了非常大的麻烦, 使得器件的性能大大低于 III-V 衬底上的 QCL。国际上一些团队探索利用光子集成芯片作为激光器的反馈与选模元件研制混合集成的外腔激光器, 该方案将已加工好的 QCL 或增益芯片与光子芯片对准后集成封装在一起, 可以在获得波长宽调谐的同时实现激光器与波导光路的耦合与集成, 由于 QCL 与光子芯片在集成前已经封装好, 因此不会影响器件的散热。图 4

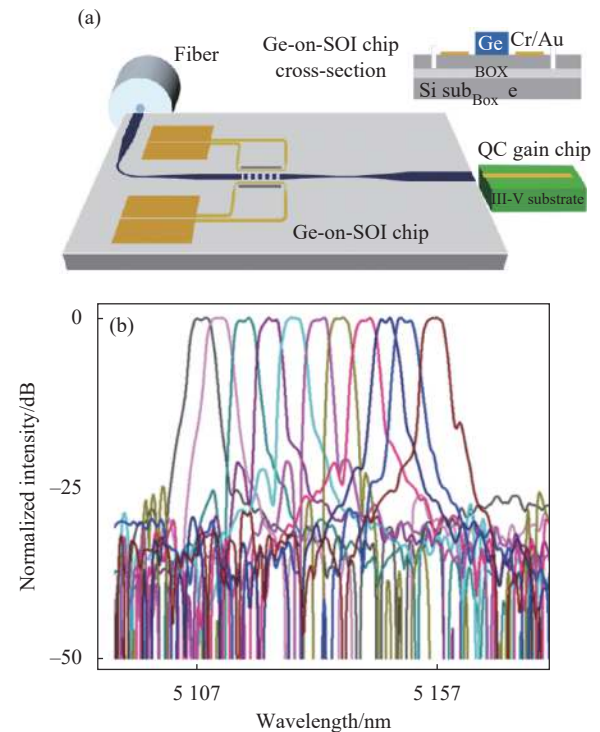


图 4 (a) III-V/锗混合集成外腔激光器的结构示意图<sup>[25]</sup>; (b) 激光器的可调谐输出光谱<sup>[25]</sup>

Fig.4 (a) Schematic of the III-V/germanium hybrid external cavity laser<sup>[25]</sup>; (b) Superimposed lasing spectra obtained by tuning the DBR<sup>[25]</sup>

所示是比利时根特大学 Gunther Roelkens 团队在 2019 年实现的 III-V/锗混合集成的外腔激光器<sup>[25]</sup>, QCL 与锗基波导光路之间通过对接耦合实现光子传输, 在 QCL 的右侧端面与锗芯片上的分布式布拉格反射镜 (DBR) 之间形成了法布里-珀罗谐振腔, 由于该 DBR 是个窄带反射镜, 因此激光波长取决于 DBR 的中心波长, 基于热光效应, 改变 DBR 上微加热电极的功率可以调谐激光波长。Roelkens 团队通过在 DBR 上施加 1 500 mW 的电功率, 使得 5.1 μm 波段的 QCL 调谐了 50 nm, 如图 4(b) 所示, 激光器在脉冲模式下的阈值为 1.6 A, 最大峰值输出功率为 20 mW。

### 5 结束语

中红外光电器件在传感与成像等领域具有重要且广泛的应用, 目前相关的光学系统往往由分立的器件组成, 将这些体积庞大的光学系统集成到一块芯片上是光子集成研究的长期目标, 近些年, 国内外许多研究团队报道了中红外片上传感和片上成像方面的

研究成果, 但是这些研究基本都通过将外置光源的输出耦合进入芯片来实现片上功能, 激光光源实际上并没有在片上集成, 实现激光器的光子集成是实现真正的片上传感和片上成像的重要一步。另外一方面, 光子集成平台可以提供低损耗的光波导、宽调谐的滤波器、高品质因子的微环谐振器, 将 III-V 族半导体激光器与这些元件集成到一起可以实现传统中红外半导体激光平台难以实现的宽调谐、窄线宽等先进功能。文中详细介绍了近些年中红外 QCL 光子集成的研究进展, 表 1 展示了不同光子集成方式之间的对比。目前片上集成的 QCL 在性能方面与传统 III-V 衬底上的器件还有较大差距, 这一方面是因为异质集成增加了器件的工艺难度, 同时 QCL 与无源波导之间的较差的耦合效率也使得器件的性能不如预期, 此外片上集成也增加了 QCL 器件的散热难度。在后续的研究中, 需要优化 QCL 与无源波导的耦合结构, 研究实现 QCL 高效片上散热的方法, 探索硅上外延生长的新途径, 实现 QCL 与光子芯片的晶圆集成, 使完全集成的中红外光子传感器成为现实。

表 1 中红外 QCL 不同光子集成方式的对比

Tab.1 Comparison of different photonic integration approaches for mid-infrared QCLs

Integration approach	Integration density	Active-passive coupling	Heat dissipation	Process yield	Current performance	Detector integration
Monolithic integration on InP	★★★	★★★	★★★	★★★	★★	★★
Monolithic integration on Silicon	★★★	-	★★	★	★	★★
Heterogeneous integration on silicon	★★★	★★	★★	★★	★	★
Hybrid external cavity	★	★	★★★	★★★	★	-

### 参考文献:

[1] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, et al. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, 130(1): 4-50.

[2] Miller S E. Integrated optics: An introduction [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, 48(7): 2059-2069.

[3] Soref R. Mid-infrared photonics in silicon and germanium [J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(8): 495-497.

[4] Lin H T, Luo Z Q, Gu T, et al. Mid-infrared integrated photonics on silicon: A perspective [J]. *Nanophotonics*, 2017, 7(2): 393-420.

[5] Han Z, Lin P, Singh V, et al. On-chip mid-infrared gas detection using chalcogenide glass waveguide [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(14): 141106.

[6] Zhang K, Böhm G, Belkin M A. Mid-infrared microring resonators and optical waveguides on an InP platform [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 120(6): 061106.

[7] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser [J]. *Science*, 1994, 264(5158): 553-556.

[8] Yang R Q. Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells [J]. *Superlattices and Microstructures*, 1995, 17(1): 77-83.

[9] Meyer J R, Bewley W W, Canedy C L, et al. The interband cascade laser [J]. *Photonics*, 2020, 7(3): 75.

- [10] Yao Y, Hoffman A J, Gmachl C F. Mid-infrared quantum cascade lasers [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 432-439.
- [11] Smit M, Williams K, Van Der Tol J. Past, present, and future of InP-based photonic integration [J]. *APL Photonics*, 2019, 4(5): 050901.
- [12] Montoya J, Wang C, Goyal A, et al. Integration of quantum cascade lasers and passive waveguides [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 107(3): 031110.
- [13] Jung S, Palaferri D, Zhang K, et al. Homogeneous photonic integration of mid-infrared quantum cascade lasers with low-loss passive waveguides on an InP platform [J]. *Optica*, 2019, 6(8): 1023-1030.
- [14] Wang R J, Taschler P, Wang Z X, et al. Monolithic integration of mid-infrared quantum cascade lasers and frequency combs with passive waveguides [J]. *ACS Photonics*, 2022, 9(2): 426-431.
- [15] Faist J. Quantum Cascade Lasers[M]. Oxford: Oxford University Press, 2013.
- [16] Giewont K, Nummy K, Anderson F A, et al. 300-mm monolithic silicon photonics foundry technology [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2019, 25(5): 18632360.
- [17] Nguyen-Van H, Baranov A N, Loghmari Z, et al. Quantum cascade lasers grown on silicon [J]. *Science Reports*, 2018, 8(1): 7206.
- [18] Loghmari Z, Rodriguez J B, Baranov A N, et al. InAs-based quantum cascade lasers grown on on-axis (001) silicon substrate [J]. *APL Photonics*, 2020, 5(4): 041302.
- [19] Go R, Krysiak H, Fethers M, et al. InP-based quantum cascade lasers monolithically integrated onto silicon [J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 22389-22393.
- [20] Wang Z, Abbasi A, Dave U, et al. Novel light source integration approaches for silicon photonics [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2017, 11(4): 1700063.
- [21] Roelkens G, Liu L, Liang D, et al. III-V/silicon photonics for on-chip and intra-chip optical interconnects [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2010, 4(6): 751-779.
- [22] Spott A, Peters J, Davenport M L, et al. Quantum cascade laser on silicon [J]. *Optica*, 2016, 3(5): 000545.
- [23] Spott A, Peters J, Davenport M L, et al. Heterogeneously integrated distributed feedback quantum cascade lasers on silicon [J]. *Photonics*, 2016, 3(2): 35.
- [24] Stanton E J, Spott A, Peters J, et al. Multi-spectral quantum cascade lasers on silicon with integrated multiplexers [J]. *Photonics*, 2019, 6(1): 6010006.
- [25] 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): 1200407.