

引用格式: LIU Shuman, ZHANG Jinchuan, YE Xiaoling, et al. Single-mode Interband Cascade Lasers (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(10):1052403

刘舒曼,张锦川,叶小玲,等.单模带间级联激光器(特邀)[J].光子学报,2023,52(10):1052403

## 单模带间级联激光器(特邀)

刘舒曼<sup>1,2</sup>,张锦川<sup>1,2</sup>,叶小玲<sup>1,2</sup>,刘俊岐<sup>1,2</sup>,王利军<sup>1,2</sup>,卓宁<sup>1,2</sup>,翟慎强<sup>1,2</sup>,  
李远<sup>1</sup>,刘峰奇<sup>1,2</sup>

(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 材料与光电研究中心,北京 100049)

**摘要:**基于铋化物的带间级联激光器同时具有带间跃迁的高增益和级联结构的高量子效率,是中红外波段重要的相干光源,其功耗低于其它中红外半导体激光器,因而单模带间级联激光器在基于激光吸收光谱技术的高分辨气体检测和化学传感等领域具有很大的优势。目前利用 Bragg 光栅实现波长选择的单模分布反馈带间级联激光器已经实现商品化,但是,与同样有源区结构的 Fabry-Pérot 腔带间级联激光器最高 600 mW 的出光功率相比,单模功率最高 55 mW,损耗较大。对几种不同结构的分布反馈带间级联激光器的性能进行对比分析,探讨这类单模中红外激光器损耗的主要来源以及改进思路。此外,介绍了垂直腔面发射和光子晶体带间级联激光器的进展,并与分布反馈带间级联激光器的性能进行比较,讨论其优缺点及适用的场景。

**关键词:**中红外;单模;带间级联激光器;分布反馈;面发射激光器

中图分类号:TN248.4

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20235210.1052403

## 0 引言

带间级联激光器(Interband Cascade Laser, ICL)<sup>[1]</sup>与量子级联激光器(Quantum Cascade Laser, QCL)<sup>[2]</sup>是目前主流的中红外半导体相干光源,其中 QCL 以瓦级大功率见长,优势波段在 4  $\mu\text{m}$  以上,同时功耗较大,而 ICL 以低功耗为最大特色,在 3~5  $\mu\text{m}$  波段室温连续波(Continuous Wave, CW)工作,该波段包含了丰富的分子基模吸收峰,包括石化工业中重要的烷烃分子,与环境污染密切相关的  $\text{SO}_2$ 、甲醛等,以及医疗和健康领域中的作为生物标志的  $\text{NO}$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等。目前基于激光吸收谱技术的 ppm( $10^{-6}$ )到 ppb( $10^{-9}$ )量级的高灵敏光学传感系统中大多使用低功耗的单模 ICL 作为相干光源<sup>[3-6]</sup>。

ICL 有源区中光跃迁发生在 InAs/GaInSb/InAs W 型二类量子阱构成的增益区中,是带间跃迁,光学增益系数高于 QCL 中的子带间跃迁,  $N$  个这样的增益区通过 GaSb/AlSb 量子阱构成的空穴注入区和 InAs/AlSb 啁啾超晶格构成的电子注入区串联在一起,形成级联结构。近红外和可见波段的多量子阱激光器有源区为并联方式,粒子数反转所需的注入电流密度与总载流子密度相关,而级联结构所需的注入电流密度与每周期的载流子面密度成正比,因而器件的阈值电流更低;其次,级联激光器每注入一个电子理论上能发射  $N$  个光子,因而斜率效率也高于传统的量子阱激光器;最后,中红外波段器件的有效压降低的多,级联结构能有效降低激光器整体的寄生压降,从而实现中红外半导体激光器的室温连续波工作<sup>[7]</sup>。另一方面,级联激光器的开启电压正比于周期数  $N$ ,因此,同样电流密度下,有源区产生的热量更多,具体地,对于 QCL,  $N$  通常为 30~40,以保证有源区足够的增益,对于 ICL,鉴于带间跃迁的增益系数更高,只需 3~10 个级联单元就能达到阈值增益,因此,ICL 器件的阈值功耗比 QCL 低。关于 ICL 的工作原理以及研究进展已经有多篇综述

基金项目:国家自然科学基金(No. 62235016),北京市科技计划(No. Z221100002722018),中国科学院战略性先导专项(No. XDB43000000)

第一作者(通讯作者):刘舒曼,liusm@semi.ac.cn

收稿日期:2023-06-19;录用日期:2023-07-18

<http://www.photon.ac.cn>

文章,包括ICL的发明人杨瑞青教授的系列综述<sup>[8-10]</sup>、美国海军实验室(Naval Research Laboratory, NRL)的中红外激光器研究组发表的系列综述<sup>[11-13]</sup>,以及中科院半导体所牛智川组发表的综述文章<sup>[14-15]</sup>,这里不再赘述,本文重点关注单模ICL,对其现状、面临的问题以及性能的优化方案进行探讨。这里的单模指单纵模,半导体激光器实现单模的方式主要有一维分布反馈光栅(Distributed Feedback, DFB)选模、短腔长的垂直腔面发射、2D光子晶体DFB选模以及外腔中光栅选模,此外,也可以用另一个模式匹配的Fabry-Perot(FP)腔激光注入实现单纵模激射,其中外腔选模的质量更多依赖机械或微机械传动装置的稳定性以及闪耀光栅的衍射效率,FP互注入选模目前只报导了低温工作<sup>[16]</sup>,本文不再详述。本文主要介绍了在ICL有源区附近引入DFB光栅的各种方式以及相应的器件性能,给出垂直腔面发射ICL的结构和性能,介绍2D光子晶体ICL的设计和性能,最后给出总结和展望。

## 1 分布反馈带间级联激光器(DFB ICL)

DFB半导体激光器常用耦合波理论进行设计和模拟<sup>[17]</sup>,基本原理是DFB光栅对折射率或/及增益产生周期调制,光栅起到带通滤波的作用,只有Bragg波长附近的模式能够激射,Bragg波长和光栅周期 $\Lambda$ 满足条件 $\Lambda = m\lambda_b/2n_g$ , $m$ 是衍射级数, $\lambda_b$ 是Bragg波长, $n_g$ 是群折射率。DFB腔中的光反馈强度用耦合系数 $\kappa$ 和腔长 $L$ 的乘积表示,即耦合强度 $\kappa L$ ,最佳值在1附近。均匀DFB光栅的Bragg波长位于禁带中,引入 $\lambda/4$ 相移能够获得Bragg波长处的单模激射。

### 1.1 边发射DFB ICL

近红外和中红外波段的边发射DFB激光器是商品化程度最高的单模半导体激光器,广泛用于光通讯和红外气体检测等领域。InP量子阱和QCL的DFB光栅通常置于有源区上面的InGaAs分别限制层(Separate Confinement Layer, SCL),完成光栅工艺后,二次外延上包层,形成掩埋光栅结构,后续采用常规的窄脊波导工艺,能够降低波导损耗,再配合半绝缘InP的三次外延,能够实现有效的热管理。

GaSb基ICL的基本外延结构如图1所示,以3.5  $\mu\text{m}$ 波长5周期有源区的器件为例,上下GaSb SCL的厚度为200~500 nm,上InAs/AlSb超晶格包层的厚度为1.5  $\mu\text{m}$ 左右,表面InAs接触层与GaSb衬底有0.6%的晶格失配,为了避免产生位错,厚度不超过20 nm。理论上,可以在上SCL中刻蚀DFB光栅后二次外延上包层,然而,InAs/AlSb超晶格的无位错生长本身就是ICL全结构外延的难点,即使直接在平整的GaSb缓冲层上生长1~2  $\mu\text{m}$ 厚度的InAs/AlSb超晶格,也要精确控制InAs和AlSb层的厚度、界面处的V族源交换顺序以及生长停顿时间,以确保整个超晶格实现应变平衡,因此,没有可能在GaSb上SCL的光栅上生长出无缺陷的InAs/AlSb超晶格上包层,即无法制作掩埋光栅结构,只能另寻出路。最容易想到的是在表面制作光栅,表面距有源区较远,为了提高光栅与有源区光学模式的耦合效率,将InAs/AlSb上包层的厚度减薄。即使这样,InAs表面接触层10~20 nm的厚度远小于光栅深度的要求。为了解决这些问题,出现了7种不同的光栅制备方案,各有优缺点。

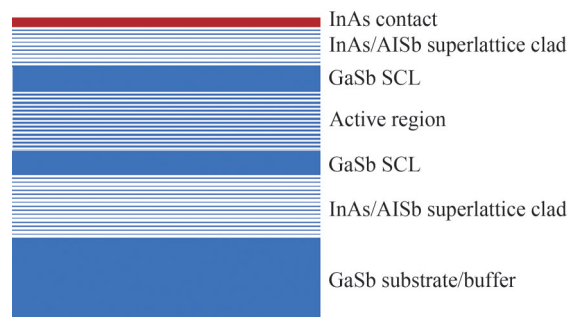
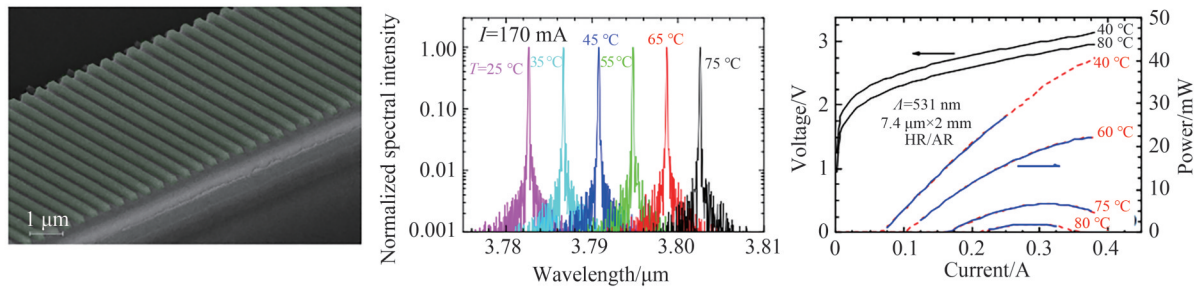


图1 GaSb基ICL外延结构示意图

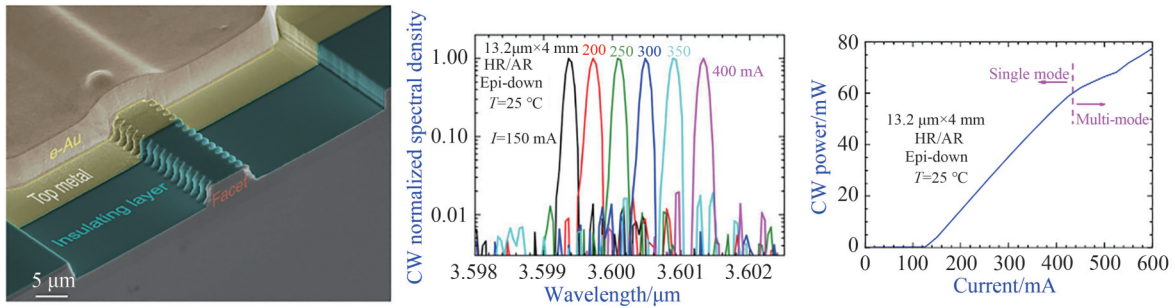
Fig. 1 Schematic diagram of GaSb-based ICL epilayers

首先介绍NRL的三种光栅方案,即表面Ge光栅、侧壁高阶光栅和表面InAs/SiN光栅,图2汇总了各种结构示意图和主要的器件性能表征结果。Ge表面光栅DFB ICL最早在2006年报导<sup>[18]</sup>,当时ICL还未实现

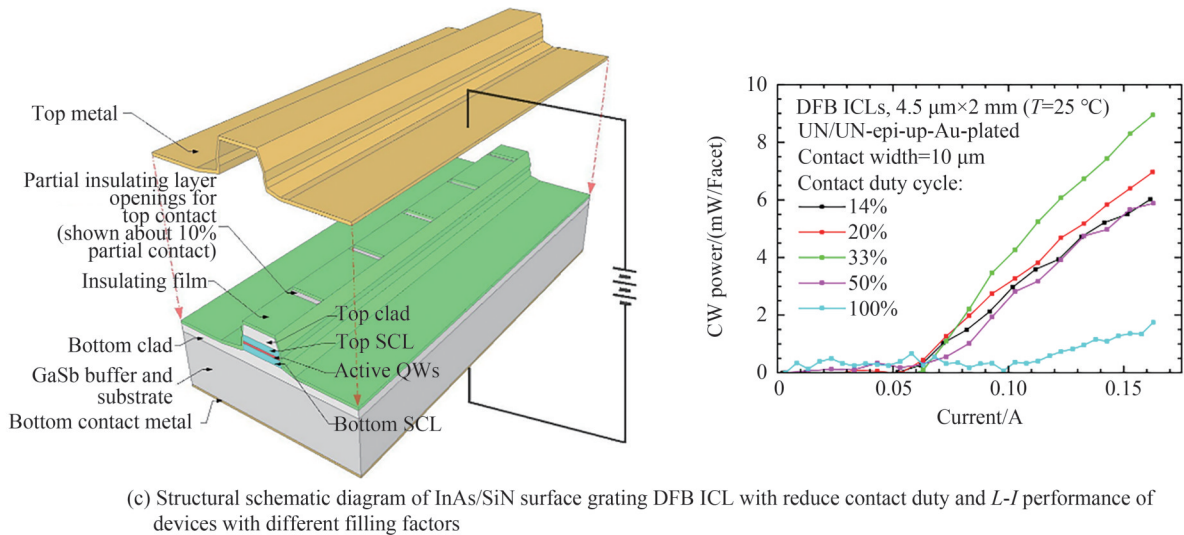
室温 CW 工作。在 ICL 全结外延层上用湿法刻蚀  $1.6\ \mu\text{m}$  深的脊型波导,脊顶宽度为  $15\ \mu\text{m}$ ,用电子束曝光在脊顶定义光栅图形,沉积  $100\ \text{nm}$  厚高折射率( $n=4.0$ )的 Ge 层,剥离,形成周期为  $505\ \text{nm}$ 、占空比为  $50\%$  的 Ge 光栅,计算出有源区光学模式的耦合强度  $\kappa L=3.0$ ,有少许过耦合。这个样品的脊太宽,出现了高阶横模,只能在阈值附近获得单纵模激射谱,此时高阶横模的横向限制因子小于基横模,因此模式增益达不到阈值条件。当注入电流增大,远高于阈值电流时,非均匀电流注入、热积累和空间烧孔等效应相结合,导致高阶横模的激射,这些效应用极窄的脊才能抑制,对于  $3.5\ \mu\text{m}$  附近的波长,脊宽不能超过  $5\ \mu\text{m}$ 。



(a) SEM image, single-mode spectra and  $L$ - $I$ - $V$  of Ge surface grating DFB ICL



(b) SEM image of sidewall fourth-order grating DFB ICL, single-mode spectra and  $L$ - $I$ - $V$



(c) Structural schematic diagram of InAs/SiN surface grating DFB ICL with reduce contact duty and  $L$ - $I$  performance of devices with different filling factors

图2 分布反馈带间级联激光器的形貌及性能表征<sup>[20,22,24-25]</sup>  
Fig. 2 Morphology and characteristics of DFB ICLs<sup>[20,22,24-25]</sup>

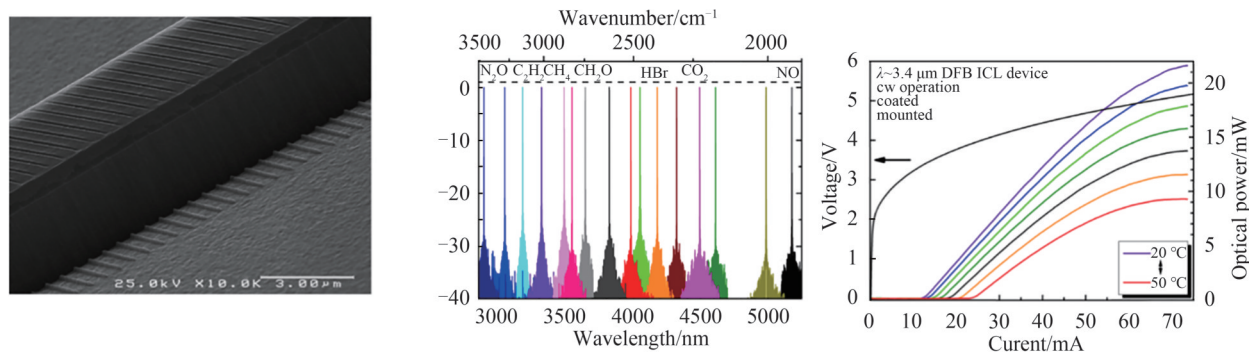
次年,他们减小脊宽到  $13\ \mu\text{m}$ ,并在侧壁沉积 Si,以提高高阶横模的损耗,增加基横模工作的电流范围,器件性能有一定的提升<sup>[19]</sup>,但是仍然是低温工作,单模的动态范围仍然较小。直到 2012 年,他们报导了室温 CW 工作超过  $27\ \text{mW}$  的单模功率,该样品的脊宽进一步减少到  $7.4\ \mu\text{m}$ ,在脊顶部窗口内用电子束曝光和剥离工艺制作  $200\ \text{nm}$  厚的一阶 Ge DFB 光栅,沉积上电极后再电镀  $6\ \mu\text{m}$  的 Au 以提高散热效率,腔面采用

HR/AR镀膜<sup>[20]</sup>,图2(a)分别给出Ge表面光栅的扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM)图、单模的温度调谐特性和器件光-电流-电压( $L-I-V$ )特性,光谱的边模抑制比(Side Mode Suppression Ratio, SMSR)达到30 dB,  $L-I-V$ 曲线上的虚线部分代表出现多模激射,表明光栅周期对应的Bragg波长与室温增益峰值偏差较大,因此,器件25 °C附近的室温是多模工作,调节光栅周期,使Bragg波长对准室温增益峰,应该能够获得更大的单模工作动态范围。在制作类似Ge光栅的过程中,很容易出现Ge层脱落的问题,工艺的成品率不高。

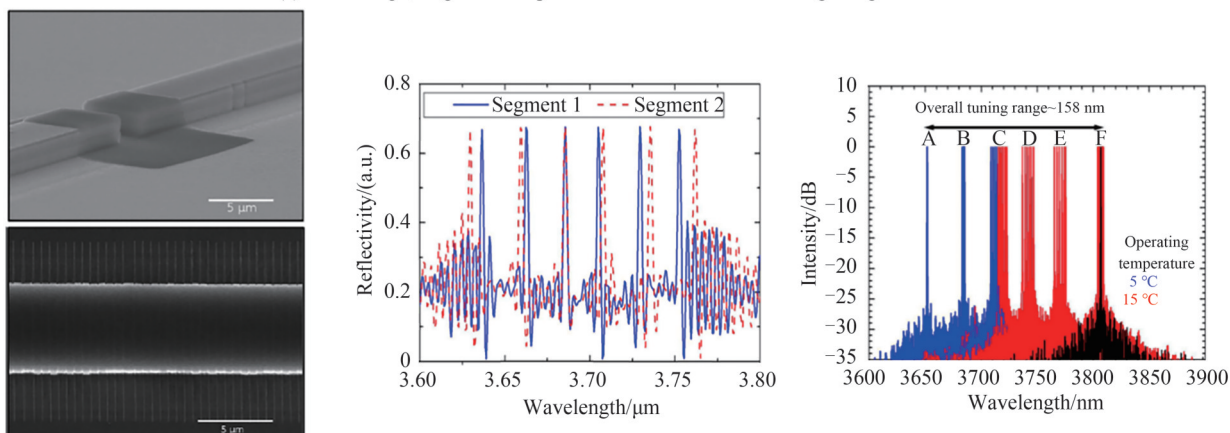
针对5  $\mu\text{m}$ 以下脊工艺难度大的问题,2009年,NRL报导了侧壁四阶DFB光栅单模ICL的实验结果<sup>[21]</sup>,这里四阶光栅同时起到两个作用,一是增加更高阶横模的损耗,二是对基模提供4阶DFB衍射。脊两侧光栅形貌如图2(b)左边的SEM图<sup>[22]</sup>所示,光栅周期 $\Lambda=2\ \mu\text{m}$ ,槽深约1  $\mu\text{m}$ ,耦合强度 $\kappa L$ 与脊宽有很大的关系,9.4  $\mu\text{m}$ 脊宽、2 mm腔长的器件室温最大单模功率为12 mW,2013年发表的文献中<sup>[23-24]</sup>,脊宽增加到13.2  $\mu\text{m}$ ,腔长增加到4 mm,且采用HR/AR腔面镀膜,图2(b)中间给出该器件的变电流单模光谱,SMSR为17~20 dB,器件在25 °C的最大CW单模输出功率达到55 mW,如图2(b)右侧 $L-I$ 曲线所示,由此可见,侧壁四阶DFB的设计允许较大的脊宽获得单横模和单纵模激射,脊宽增加有助于提高最大输出功率,但是高阶光栅的耦合强度较低,光谱的SMSR有所降低,从成品率的角度看,用ICP干刻一次性形成脊和侧壁光栅,刻蚀到有源区下面的GaSb SCL层,超过2  $\mu\text{m}$ 的深度,很难保证光栅整体的周期和槽深完全一致,单模成品率较低。

单模激光器的应用场合通常更关注SMSR,表面一阶DFB光栅的器件表现更突出,光学模式与表面光栅耦合,势必受到光栅表面金属电极层的损耗,NRL指出该损耗为2~3  $\text{cm}^{-1}$ ,与高性能FP腔ICL的内部损耗相当,因此,DFB ICL的斜率效率较FP腔器件低得多。2016年,他们提出减少表面金属占空比的方案<sup>[25]</sup>,以减少金属层造成的损耗,如图2(c)左侧示意图所示,表面光栅刻蚀在250 nm厚的InAs上接触层中。光栅上面的金属接触也采用周期结构,宽度为10  $\mu\text{m}$ ,占空比从14%到100%,器件的脊宽为4.5  $\mu\text{m}$ ,腔长为2 mm。图2(c)右边的 $L-I$ 特性以及斜率效率的比较表明,金属电极占空比为33%时,斜率效率明显高于传统的100%占空比的器件,最高单模功率为6.8 mW。尽管证实了低占空比电极对斜率效率的提升,该器件最大的问题是与衬底晶格失配的InAs接触层的层厚远远超过了临界厚度,会产生大量位错线,这样的高缺陷密度光栅层对光学模式的损耗应该高于金属界面的损耗,但是文中没有给予任何评价。

德国Nanoplus公司及其合作的维尔茨堡大学技术物理系研究组(Nanoplus)是近十多年发表ICL论文最多的研究组,更为重要的是,Nanoplus公司最先提供商用单模ICL器件,从目前发表的应用商品单模ICL进行各种传感实验的文献可以看出,Nanoplus目前市场占有率最高。从2011年至2018年,Nanoplus发表了十多篇单模DFB ICL的文献<sup>[26-40]</sup>,主要采用脊两侧金属DFB光栅进行选模,在此基础上进行各种组合。侧向金属光栅结构的最大优势在于工艺简单,成品率高,尽管单模功率比较低,并未妨碍其市场占有率。他们最早的室温CW工作单模ICL发表于2014年<sup>[26]</sup>,采用侧向金属DFB光栅的方案,这是他们在短波长二极管单模激光器中进行了充分验证的方案。具体地,如图3(a)左侧的SEM图所示,金属光栅置于脊两侧GaSb下SCL上,FP腔中的光学模式向脊两侧以倏逝波的方式与金属光栅耦合,从而对谐振腔中的损耗进行周期调制,波长由光栅周期和光波导的有效折射率决定,耦合强度主要取决于光栅的深度和脊宽,脊宽大于7  $\mu\text{m}$ ,则耦合系数小于5  $\text{cm}^{-1}$ ,约为NRL的Ge表面光栅的四分之一。9.8  $\mu\text{m}$ 脊宽、2.4 mm腔长的器件,用不同光栅周期的同一个外延片实现了3.8  $\mu\text{m}$ 附近104 nm的单模调谐范围,SMSR大于30 dB,20 °C单面功率超过6 mW,他们单模ICL商品的功率基本上在这个量级。同年,将波长拓展到5.2  $\mu\text{m}$ <sup>[27]</sup>,采用了四阶侧壁光栅,器件只能工作于0 °C以下。2015年,进一步拓展波长到6  $\mu\text{m}$ <sup>[28]</sup>,改为在InAs衬底上外延ICL结构,仍采用侧向金属光栅的方案,器件工作在-20 °C到0 °C,同年杨瑞青组报导的4.5  $\mu\text{m}$ 波长的InAs基表面光栅DFB ICL的最高工作温度是180 K<sup>[41]</sup>,低工作温度主要与InAs基ICL的效率低有关。2015年,Nanoplus用GaSb基ICL将波长向短波拓展到2.8  $\mu\text{m}$ <sup>[29]</sup>,用不同周期的侧向金属光栅能实现150 nm的波长调谐范围,20 °C的单模功率不到1 mW。在2014-2017年的SPIE会议上,Nanoplus报导了他们用上述侧向金属DFB ICL实现了3~6  $\mu\text{m}$ 的宽光谱范围单模室温CW工作进展<sup>[30-35]</sup>,代表性的光谱示于图3(a)中间,右边的 $L-I-V$ 性能表明腔面镀膜的3.4  $\mu\text{m}$ 波长在20 °C的CW功能超过了20 mW,这是目前Nanoplus报导的侧向金属光栅ICL的最高功率。



(a) SEM image, single-mode spectra and  $L-I-V$  of lateral metal grating DFB ICLs



(b) SEM images, calculation results of reflection spectra of two DSGs and tuning characteristics of single-mode spectra of DFB ICLs with two-segment DSG

图3 侧向金属光栅DFB ICL<sup>[26,31-32,37]</sup>

Fig. 3 Lateral metal grating DFB ICLs<sup>[26,31-32,37]</sup>

为了进一步拓宽单模调谐范围, Nanoplus使用二元叠加光栅(Binary Superimposed Gratings, BSG)和两段游标调谐的概念实现了多个波长通道中的稳定单模发射<sup>[36-37]</sup>, 图3(b)左侧的SEM图显示器件形貌, 包含两段脊, 中间电隔离实现独立的电注入, 每个脊的两侧制作BSG, 即将不同周期的光栅叠加在一起, 形成非周期结构, 让两段BSG有微小位移, 则通过独立的温度和电流调谐, 让两段的单模谱像游标一样对准不同的Bragg波长, 图3(b)中间示意图给出工作原理, 蓝色和红色分别属于两段脊, 在3.6 μm到3.8 μm之间各有6个Bragg波长通道, 相互错开, 两段脊独立进行电流调谐, 当两段的BSG模式重叠时激射, 其它模式被抑制, 图3(b)右边的光谱是5 °C和15 °C两个温度下调谐获得的宽调谐单模谱, 达到了158 nm, 接近外腔调谐的范围, 尽管调谐的连续性还不理想, 这是目前报导的片上集成光栅在3~4 μm波段最大的调谐范围。

美国喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)是最早开展ICL实验研究的单位之一, 他们用热电致冷封装的单模ICL于2012年安装在好奇号火星车的气体检测系统中<sup>[8-9]</sup>, 检测到火星上的甲烷。JPL在2004年报导<sup>[42]</sup>的DFB ICL是在35 nm的InAs接触层和上InAs/AlSb超晶格包层中刻蚀一阶光栅, 深度为100~120 nm, 脊宽为50 μm、腔长为1.5 mm的器件CW工作的最高温度是175 K, 在阈值附近获得单模, 电流增加出现高阶横模。2007年, 他们将脊宽降至~10 μm, CW工作温度提高到261 K, 可以用热电制冷<sup>[43]</sup>。2014年JPL和NRL合作, 用NRL的7周期外延片制作了双脊侧向二阶光栅DFB ICL, 器件形貌如图4(c)的SEM图片所示, 46 °C的单模特性最好, 表明室温增益峰与光栅的Bragg波长偏差较大<sup>[44]</sup>。2015年, JPL优化了光栅工艺, 还是用双脊侧向二阶光栅, 实现了室温20mW的单模功率<sup>[45]</sup>。双脊的工艺比较复杂, 先把InAs/AlSb上包层刻蚀成3 μm宽的窄脊, 在两侧暴露出的GaSb上SCL中刻蚀二阶侧向光栅, 再穿过有源区刻蚀出宽9 μm的脊, 然后在暴露出的GaSb下SCL中刻蚀二阶侧向光栅, 他们认为DFB光学模式主要限制在3 μm的脊中, 这么窄的脊上面开电极窗口比较难, 下面9 μm宽的脊主要是用来限制有源区中电流的横向

扩散,对于  $9\ \mu\text{m}$  宽的增益区,  $20\ \text{mW}$  量级的最大室温输出功率并不理想,同样是在脊两侧做 DFB 光栅, Nanoplus 的侧向金属光栅工艺简单得多,且单模器件的阈值、调谐范围等性能更优异。

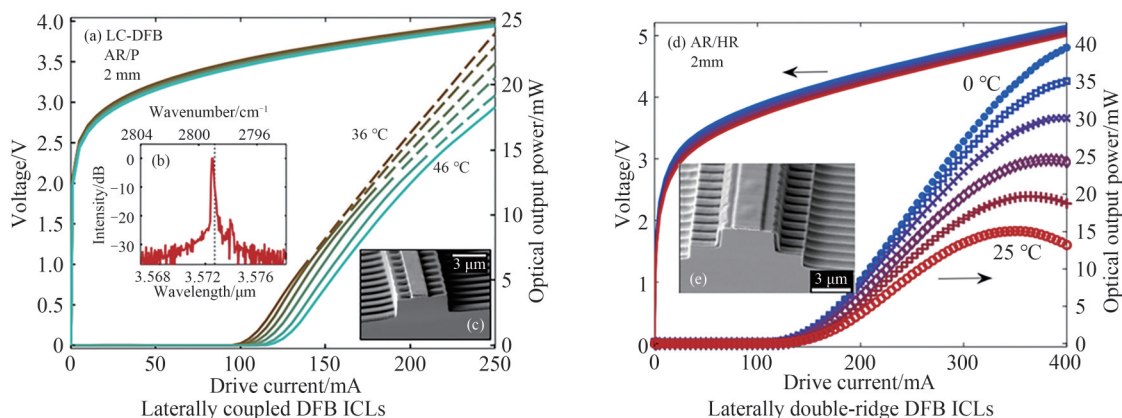


图4 侧向光栅 DFB ICL<sup>[44-45]</sup>  
Fig. 4 Lateral grating DFB ICLs<sup>[44-45]</sup>

2018年,美国 Thorlab Quantum Electronics 公司和 Argonne 国家实验室合作报导了一种同时具有顶部一阶 DFB 采样光栅和选区刻蚀的侧壁光栅的 DFB ICL<sup>[46]</sup>,顶部采样光栅实现  $3.3\ \mu\text{m}$  的 Bragg 波长的单模激励,周期为  $460\ \text{nm}$ ,采样周期  $P_s$  为  $8\ \mu\text{m}$ ,侧壁光栅用来抑制高阶横模,周期  $P_c$  为  $4\ \mu\text{m}$ ,对纵模的选模不起作用,且与表面一阶 DFB 光栅在空间上错开,如图 5(a)、(b) 的俯视图及示意图所示,避免二者互相影响。图 5(c) 是从腔面拍摄的 SEM 图。侧壁光栅有效地抑制高阶横模,使得  $4.5\ \mu\text{m}$  脊宽的器件单模工作的动态范围较大,  $25\ ^\circ\text{C}$  的最大单模功率达到  $42\ \text{mW}$ 。该器件的有源区设计采用 2012 年 Maxion 公司发表的结构<sup>[47]</sup>,其效率与 NRL 的最高效率相比有较大差距,因此,采用更高效的有源区设计,有望进一步提高单模性能,但是两套光栅的工艺比较复杂,目前 Thorlabs 的官网上 DFB ICL 商品的波长在  $3.25\ \mu\text{m}$  附近,最大功率  $12.5\ \text{mW}$ ,价格高于 Nanoplus 公司。

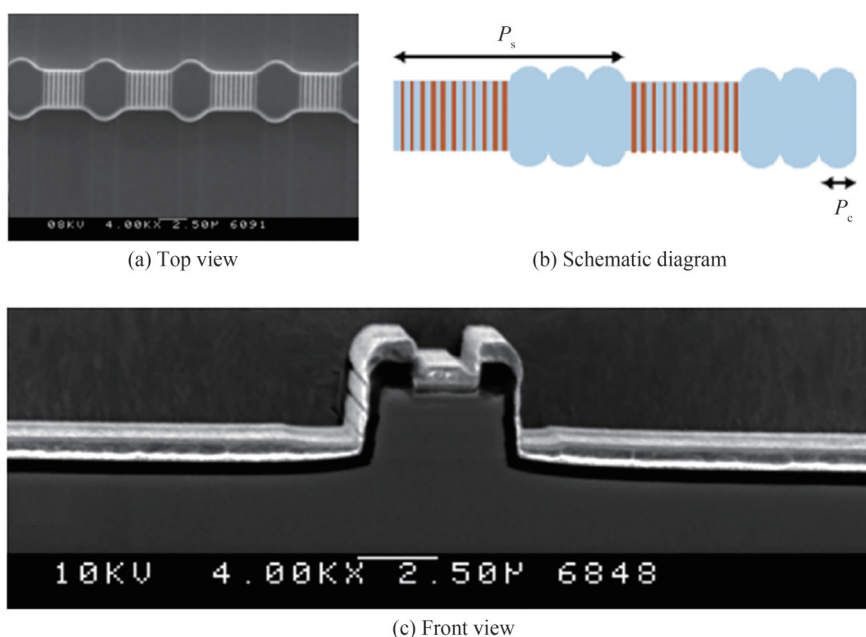


图5 组合光栅 DFB ICL<sup>[46]</sup>  
Fig. 5 Combined grating DFB ICL<sup>[46]</sup>

2022年,中科院半导体所刘峰奇组(本组)报道了具有表面 GaSb 光栅的 DFB ICL 器件<sup>[48]</sup>。在这之前报导的表面光栅都存在一些问题,比如刻蚀在 Ge 层中,多晶 Ge 中光学模式的损耗大,且工艺中 Ge 层易脱落;刻蚀在 250 nm 厚的晶格失配的 InAs 中,大量位错线也会造成大的损耗;刻蚀在 InAs/AlSb 超晶格上包层,由于 InAs 和 AlSb 的刻蚀速率不同,光栅的侧壁很难平整,也会造成额外的损耗。针对这些问题,本组提出在减薄的超晶格上包层之上外延 250 nm 与衬底晶格匹配的 GaSb 盖层,解决了 InAs 材料失配位错的问题,也避免了在超晶格中刻蚀的光栅,同时, GaSb 的折射率大于 InAs 和 InAs/AlSb 超晶格,能够保证表面光栅的耦合强度。此外,采用二阶表面光栅,高频的反对称模式和低频的对称模式损耗差更大,如图 6(a)所示,刻蚀深度为 180 nm 时,损耗差达到  $2\text{ cm}^{-1}$ ,如图 6(b),有助于获得稳定的单模,提高 SMSR。4.5  $\mu\text{m}$  脊宽、2 mm 腔长器件在 20 °C 的 CW 功率达到 24 mW,斜率效率为 0.17 W/A,由于所用的 ICL 结构尚未进行电压效率的优化,器件性能还有较大的提升空间。图 6(c)给出器件整体结构的示意图,插图是光栅附近的截面 SEM 图。在晶格匹配的 GaSb 盖层刻蚀二阶光栅的工艺难度与 Nanoplus 的侧向金属光栅相当,低于 NRL、JPL 和 Thorlabs 在超晶格中刻蚀光栅的工艺难度,图 6(d)是不同温度下电流调谐范围,总调谐范围达到  $20\text{ cm}^{-1}$ ,完全满足气体传感应用的需要。

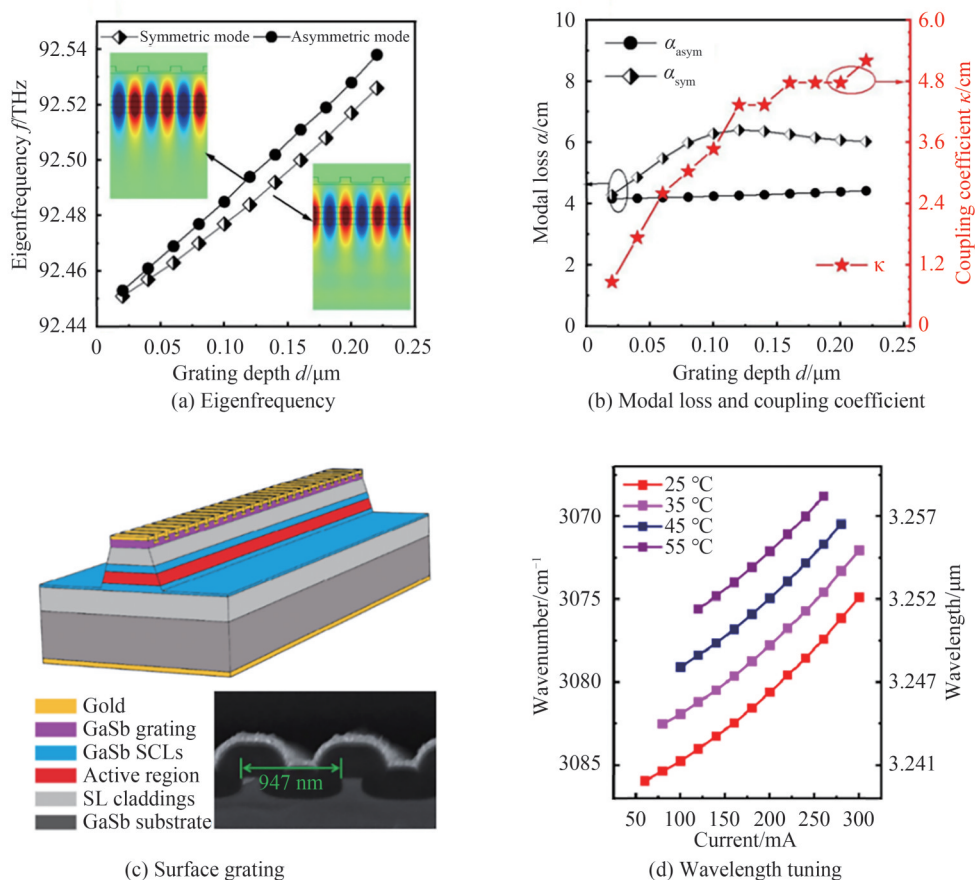


图 6 二阶 GaSb 表面光栅 DFB ICL<sup>[48]</sup>  
Fig.6 Second-order GaSb surface grating DFB ICLs<sup>[48]</sup>

为了更全面地比较上述 DFB ICL 的性能,表 1 列出了各种光栅结构 DFB ICL 器件的最高性能,所有器件均采用 HR/AR 腔面镀膜,可以看到 Nanoplus 在阈值电流和斜率效率两个指标上遥遥领先,这批最高性能的结果发表在 SPIE 上,没有具体的器件尺寸、材料和工艺参数,其他组的报导 DFB 器件实际上都没有采用最佳性能的 ICL 有源区和波导结构,因此,单模性能仍有提升空间。

表1 各种光栅结构DFB ICL器件性能比较  
Table1 Performance comparison of DFB ICL devices with various grating structures

Group	Size	Temperature	Wavelength	Threshold current	SMRS	Maximum power	Efficiency	Far field
Thorlabs <sup>[45]</sup>	4.5 $\mu\text{m}$ $\times$ 4 mm	25 $^{\circ}\text{C}$	3.3 $\mu\text{m}$	190 mA	30 dB	42 mW	0.13 W/A	39 $^{\circ}$ $\times$ 72 $^{\circ}$
Our group <sup>[48]</sup>	4.5 $\mu\text{m}$ $\times$ 2 mm	20 $^{\circ}\text{C}$	3.25 $\mu\text{m}$	60 mA	25 dB	24 mW	0.17 W/A	46 $^{\circ}$ $\times$ 57 $^{\circ}$
JPL <sup>[44]</sup>	9 $\mu\text{m}$ $\times$ 2 mm	20 $^{\circ}\text{C}$	3.38 $\mu\text{m}$	150 mA	25 dB	20 mW	0.12 W/A	N/A
Nanoplus <sup>[31]</sup>	N/A	20 $^{\circ}\text{C}$	3.4 $\mu\text{m}$	15 mA	30 dB	21 mW	0.45 W/A	N/A
NRL (Ge) <sup>[19]</sup>	7.4 $\mu\text{m}$ $\times$ 2 mm	40 $^{\circ}\text{C}$	3.79 $\mu\text{m}$	70 mA	30 dB	27 mW	0.15 W/A	N/A
NRL (Sidewall) <sup>[23]</sup>	13.2 $\mu\text{m}$ $\times$ 4 mm	25 $^{\circ}\text{C}$	3.6 $\mu\text{m}$	80 mA	20 dB	55 mW	0.23 W/A	N/A

## 1.2 二阶DFB面发射ICL

1.1节中JPL和本组的光栅都采用了二阶DFB光栅,比常规的一阶光栅周期大,放松了对光刻工艺分辨率的要求,虽然都表征的是边发射器件性能,二阶DFB光栅还能提供垂直方向波导模式的一级衍射<sup>[49-50]</sup>,实现面发射激光器,与边发射DFB激光器相比,单模性能不会受到解理腔面与DFB光栅相对位置的影响。2017年瑞士维也纳工业大学Strasser组与德国维尔茨堡大学和Nanoplus等合作报导了衬底发射的环形ICL<sup>[51]</sup>,即在环形波导的InAs/AlSb上包层中刻蚀二阶DFB光栅,调制环形波导中两个相向传播的回音壁模式<sup>[52]</sup>,光栅上沉积金属,光从衬底出射,只能脉冲工作。2020年,他们将10  $\mu\text{m}$ 的脊宽减至4  $\mu\text{m}$ ,以抑制高阶横模,如图7(a)的SEM图所示,且采用倒焊工艺,以提高散热效率<sup>[53]</sup>。器件能够CW工作至38  $^{\circ}\text{C}$ ,20  $^{\circ}\text{C}$ 的

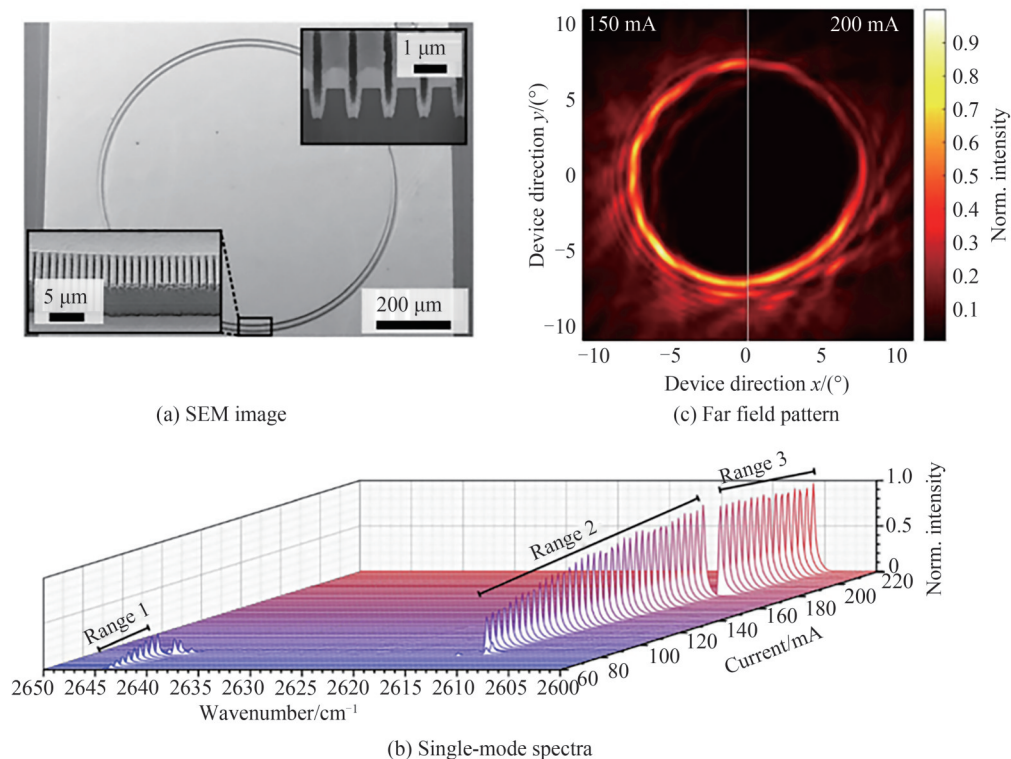


图7 二阶DFB环形面发射ICL<sup>[53]</sup>  
Fig. 7 2nd DFB ring ICL<sup>[53]</sup>



最大功率为6.4 mW,斜率效率为73 mW/A,均低于边发射DFB器件。图7(b)为该环形DFB ICL在20 °C的单模发射谱,模式随电流的调谐发生了跳变,从阈值电流60 mA到81 mA,波长在3.78 μm附近调谐,90 mA到180 mA,波长在3.83 μm附近调谐,电流进一步增加到220 mA,波长在3.84 μm附近调谐,发生模式跳变的物理机制还不清楚。图7(c)是分别注入150 mA和200 mA的电流从衬底侧观察到的环形对称的远场,可以看出强度分布不均匀,更低电流下3.78 μm附近发射的远场是两个环形,对应的具体模式未知。尽管面发射环形ICL的输出功率、单模稳定性等方面还需要进一步优化,但是其对称的圆形远场强度分布对于光束准直和管芯集成具有潜在优势,且进一步优化性能的空间很大,比如,通过增加环形的周长增加增益区体积,提高输出功率;采用二阶采样光栅的设计,提高单模稳定性;用环形中心的区域作为探测器,制作激光器探测器片上集成的传感系统<sup>[54]</sup>等。

## 2 带间级联垂直腔面发射激光器(ICVCSEL)

VCSEL<sup>[55]</sup>是在有源区上下用1/4波长厚度、分别具有高低折射率的两种材料交替形成分布布拉格反射器(Distributed Bragg Reflectors, DBR),即DBR镜面,镜面的反射率通过两种材料的折射率差和厚度调节,在激射波长附近形成最大反射率平台。两组DBR镜面置于增益区两侧,形成垂直方向的谐振腔,因为腔长短,为波长量级,所以纵模间距大,激光器可输出为单纵模。有源区体积小可降低阈值,此外,出光面的几何形状通过工艺控制,可获得圆对称的单横模,光束质量高,便于制作成激光器阵列,与DFB单模边发射激光器相比,电流调谐范围更宽,调谐响应更快<sup>[56]</sup>。

VCSEL的这些优势已经在可见和近红外波段半导体激光器中得以充分体现,但是在中红外波段面临着几个挑战:首先,DBR反射镜每层的厚度与发射波长成正比,中红外波段DBR镜面的两种材料的厚度大,需要寻找折射率差尽可能大的一对材料,同时与衬底材料尽可能晶格匹配,以便在外延允许的总厚度内达到足够的反射率。对于电注入VCSEL,要求DBR材料的电阻率不要太高。此外,针对中红外波段热积累严重的问题,还需要DBR材料的热导率尽可能高。

QCL子带间跃迁选择定则造成垂直方向出射光的增益非常弱,所以很难实现VCSEL器件,而ICL增益区为带间跃迁,非常适合制作中红外VCSEL器件。早在1998年ICL尚未CW工作时NRL就提出了用ICL作为VCSEL有源区的方案,即带间级联垂直腔面发射激光器(Interband Cascade Vertical Cavity Surface Emitting Lasers, ICVCSEL),并根据当时的ICL性能模拟出ICVCSEL的性能指标<sup>[57]</sup>,直到2016年该研究组才报导了电注入GaSb基ICVCSEL<sup>[58]</sup>,单模激射波长 $\lambda \approx 3.4 \mu\text{m}$ ,下DBR采用22.5周期的n-GaSb/n-AlAs<sub>0.08</sub>Sb<sub>0.92</sub>,其中GaSb为高折射率组分,折射率 $n_H$ 约为3.8,厚度为 $\lambda/4n_H = 220 \text{ nm}$ ,AlAs<sub>0.08</sub>Sb<sub>0.92</sub>为低折射率组分,折射率 $n_L$ 约为3.1,采用数字合金方式生长,与GaSb衬底晶格匹配,层厚为270 nm,各层中心的掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ,边界的20 nm的掺杂浓度提高到 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ,且GaSb和AlAsSb层之间插入20周期GaSb/AlSb(1nm/1nm)高掺杂的过渡区,以减小GaSb和AlAsSb层之间的寄生压降,该DBR对3.4 μm正入射光的反射率高达99.5%;有源区共15周期,分成3组,置于3.4 μm谐振腔的波腹处,相邻有源区用低掺杂的GaSb层隔离,有源区之上为100 nm n<sup>+</sup>掺杂的InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub>盖层。整个结构的厚度接近13 μm,对分子束外延生长稳定性的要求非常高。将外延层干刻成圆柱形台面,深度到有源区以下,直径在20 μm到60 μm之间,侧壁钝化后,在顶部沉积环形Ti/Pt/Au电极,中心为出光窗口,在窗口中沉积4组Ge/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> λ/4的介质层,形成上DBR,反射率达到99.3%。图8(a)为该器件截面示意图。

该ICVCSEL能够在室温下脉冲工作,具有50 μm直径台面和40 μm直径光阑的器件最高工作温度达到70 °C,15 °C时的阈值为9 mA,25 mA电流下得到的最高脉冲输出功率为0.54 mW,最大外微分量子效率为0.9%,均为多模发射。当台面直径缩小到30 μm,对应光阑直径为20 μm的器件得到单纵模发射,SMSR大于20 dB,如图8(b)所示,但是阈值电流密度较高,为920 A/cm<sup>2</sup>,而边发射ICL一般为100~200 A/cm<sup>2</sup>;更大的50 μm直径(40 μm光阑)的器件阈值电流密度降到390 A/cm<sup>2</sup>,阈值电流为10 mA,但是发射谱为多横模。与边发射器件相比,ICVCSEL的远场光斑近似为圆形,远场发散角在8°到11°的范围,在制作面发射阵列及实际应用中具有明显优势。尽管目前器件的斜率效率、出光功率远低于边发射的ICL,在中红外波段,GaSb量子阱激光器作为有源区制作的波长为3 μm的VCSEL<sup>[59]</sup>,同样采用GaSb/AlAsSb下DBR镜面,上DBR

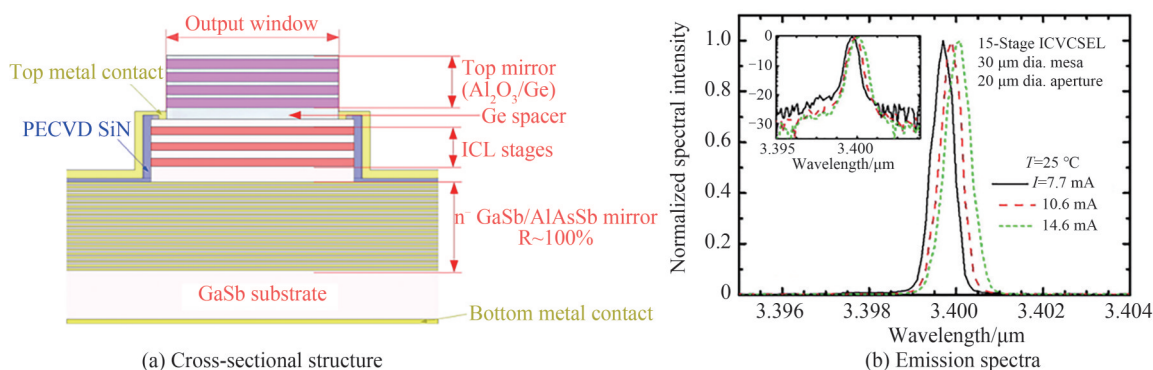


图8 带间级联垂直腔面发射激光器<sup>[58]</sup>  
Fig.8 Interband cascade vertical cavity surface emission laser<sup>[58]</sup>

镜面为 Ge/ZnS 介质层,该器件只详细报导了 -40 °C 到 5 °C 之间的性能,最大功率为 -40 °C 时测量的 70 μW,因此,从斜率效率和出光功率看,ICL 有源区的 VCSEL 表现出级联结构在中红外波段的优势,目前器件性能主要受到 DBR 镜面中较高的寄生损耗和热阻的限制,需要进一步的工艺和结构优化,最直接的优化是采用倒焊的方式提高有源区的散热,有可能实现室温连续波工作。

2020 年美国 Praevium Research 公司及合作者<sup>[60]</sup>报导了 10 周期 ICL 有源区作为增益核的 ICVCSEL,下 DBR 镜面采用晶圆键合的 GaAs/AlGaAs,上 DBR 镜面为 ZnSe/ThF<sub>4</sub> 介质层,电流通过上下 InAsSb 接触层注入有源区,如图 9(a) 的截面示意图所示。GaAs/AlGaAs 材料是目前大规模商用的 780 nm、850 nm、980 nm 等波段的 VCSEL 所采用的 DBR 材料,取代 GaSb/AlAsSb 材料作为下 DBR 镜面,具有生长技术成熟、热导率高且损耗低的优点,对于异质键合业界共识的难点是键合界面的质量。图 9(a) 中用 GaAs/AlGaAs 作为下 DBR 镜面,电注入采用共面电极,避免了在 DBR 镜面中掺杂,可以使自由载流子吸收损耗降到最低,20 μm 直径台面的器件实现了室温 CW 电注入激励,16 °C 的阈值为 4.5 mA,7.8 mA 时得到的最大功率为 75 μW,26 °C 时的阈值为 6 mA,最大功率为 14 μW,表现出较好的单模特性,如图 9(b) 的光谱所示,与 NRL 用 GaSb/AlAsSb 做下 DBR 镜面且从衬底注入电流的器件相比,性能有了一定的提升,但是 GaAs/AlGaAs 下 DBR 的优势尚未充分发挥出来,一方面文章中对晶圆键合界面的质量未加说明,另一方面,文章第一单位前期没有发表过 ICL 边发射器件的结果,只有第三单位发表过 5 周期 DFB ICL 的结果,无法判断该工作采用的 5×2 ICL 增益区的效率,尽管如此,GaAs/AlGaAs 仍不失为 ICVCSEL 优选的 DBR 材料,值得进一步研究。

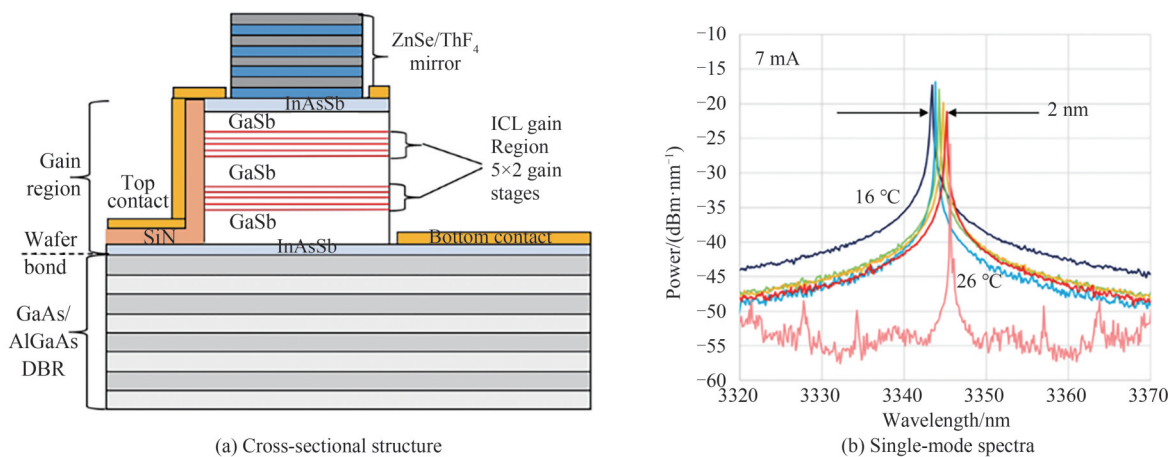


图9 采用键合的 GaAs/AlGaAs 下 DBR 镜面的 ICVCSEL<sup>[60]</sup>  
Fig.9 ICVCSEL with wafer-bonded GaAs/AlGaAs bottom DBR<sup>[60]</sup>

### 3 光子晶体分布反馈 ICL

传统的DFB激光器为了实现稳定的单模工作,除了用光栅进行纵模选模,还要保证横向只有基横模激励,一般采用与波长相当的脊宽确保基横模工作,因而增益区体积很小,限制了激光器的最大功率。为此,1998年,LANG R等<sup>[61]</sup>从理论上给出在偏角的宽脊上引入DFB( $\alpha$ -DFB)光栅,光栅衍射的光束沿锯齿形路径传播,向前和向后传播的光束之间的反馈发生在整个传播路径上,而不是像传统FP腔那样发生在腔面上,从而选择出具有最高腔面反馈的模式,实现横模的选模,解决宽脊多横模的问题。2000年,NRL<sup>[62-63]</sup>用 $16^\circ$ 偏角、 $50\ \mu\text{m}$ 脊宽的 $\alpha$ -DFB结构,如图10(a)和(b)所示,实现了78 K中红外 $3.4\ \mu\text{m}$ 波长的光泵浦单横模工作,增益区为InAs/GaInSb/InAs二类W型量子阱,远场为近衍射极限的单瓣,发散角仅为 $1.4^\circ$ ,如图10(c)所示,图中同时给出同样脊宽FP腔器件的双瓣远场作为对比。

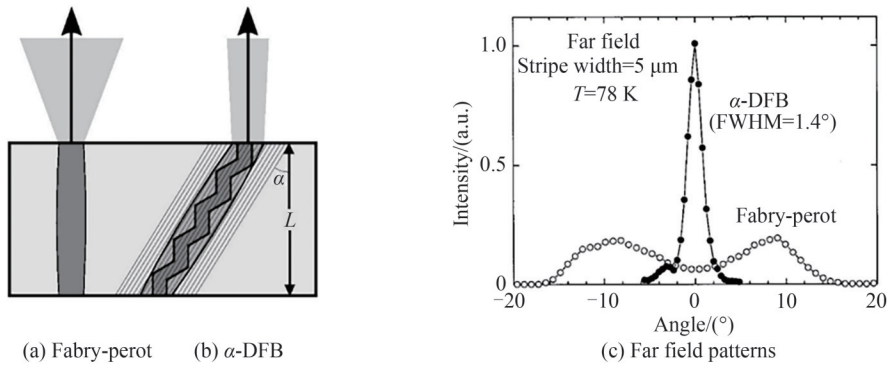


图10 偏角 $\alpha$ -DFB激光器<sup>[62]</sup>  
Fig.10  $\alpha$ -DFB lasers<sup>[62]</sup>

2001到2002年,NRL提出将光谱选模的DFB和空间选模的 $\alpha$ -DFB组合成为2D矩形光子晶体(Photonic Crystal, PC)DFB结构<sup>[64-65]</sup>,即PCDFB,图11(a)给出PCDFB结构的示意图,光子晶体的格点是浅刻蚀半径为 $r$ 的圆柱,晶格常数为 $\Lambda_1$ 和 $\Lambda_2$ 。光在其中传播时,可以认为受到周期分别为 $\Lambda_1$ 和 $\Lambda_2$ 的两组光栅的衍射,对于波长 $\lambda$ ,两个光栅的周期需要满足 $\Lambda_1=\lambda N/(2n_m \sin\theta)$ 和 $\Lambda_2=\lambda N/(2n_m \cos\theta)$ ,其中 $N$ 是耦合级数, $n_m$ 是模式折射率。有两个等价的传播方向 $P_1$ 和 $P_2$ ,相对于两套晶格的对称轴夹角分别为 $\theta$ 和 $90^\circ-\theta$ , $\theta$ 的选取要综合考虑两个方向DFB光栅的效率,一般为 $20^\circ$ 左右。

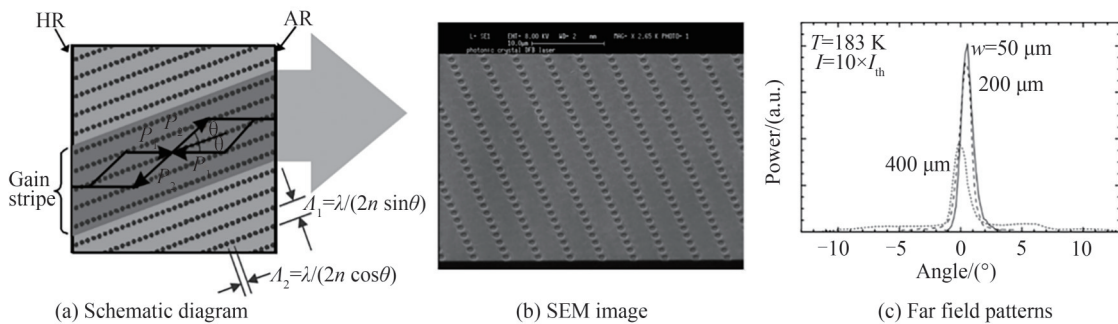


图11 2D光栅PCDFB激光器<sup>[65,67]</sup>  
Fig.11 2D PCDFB laser<sup>[65,67]</sup>

一束光在传播过程中受到三个非共线的耦合作用:一是与沿同一轴传播的反向波的耦合,例如 $P_1$ 和 $-P_1$ ,这也存在于1D(DFB激光器)中,耦合系数为 $\kappa_1$ ;二是与沿另一个轴同向传播的分量的耦合,例如 $P_1$ 与 $P_2$ 或者 $-P_1$ 与 $-P_2$ ;三是与另一轴以相反方向传播的分量的耦合,例如 $P_1$ 与 $-P_2$ 或 $-P_1$ 与 $P_2$ ,耦合系数为 $\kappa_3$ 。如不考虑光栅造成的腔损,则纯实数的耦合系数 $\kappa_i$ 为

$$\kappa_i = \frac{2\pi\Delta n}{\lambda} \frac{\pi r^2}{\Lambda_1 \Lambda_2} \frac{2J_1(G_{\kappa_i} r)}{G_{\kappa_i} r} \quad i = 1, 2, 3$$

式中,  $\Delta n$  是折射率调制幅度,  $G_{\kappa_1} = 2|P_1| = 2|P_2|$ ,  $G_{\kappa_2} = |P_1 - P_2|$ ,  $G_{\kappa_3} = |P_1 + P_2|$ , 布里渊区边界 ( $G/2$ ) 给出矢量  $P_1$  和  $P_2$  的幅度。

以  $4.6 \mu\text{m}$  波长的应变补偿 InGaAs/InAlAs QCL 为例<sup>[65]</sup>, 假设内部损耗  $\alpha_i$  为  $20 \text{ cm}^{-1}$ , 其中包括掺杂的包层中自由载流子吸收损耗和光栅造成的损耗, 由于折射率调制波导的脊侧壁衍射损耗太大, NRL 的文章中建议采用增益波导, 通过时域傅里叶变换算法从理论上给出了优化的 PCDFB QCL 的偏角、耦合系数、脊宽以及腔长等参数, 计算结果表明  $1.5 \text{ mm}$  的脊宽能达到 FP 腔器件效率的  $85\%$ , 且远场发散角能控制在衍射极限的 2 倍。此外, 模拟脊宽为  $400 \mu\text{m}$  的器件的激射谱, 得到与标准窄脊 DFB 器件相当的单模特性。同时期, NRL 根据上述 PCDFB 的设计, 在二类 W 型量子阱中红外激光器结构顶部 GaSb 层中刻蚀出矩形 2D 光子晶体, 包含  $20^\circ$  偏角的 2 阶光栅, 解理成  $200 \mu\text{m}$  脊宽、 $2.5 \text{ mm}$  腔长的激光芯片, 在  $200 \text{ K}$  附近的低温下用光泵浦测量到远场发散角只有衍射极限的 4 倍, 但是斜率效率比 1D 偏角  $\alpha$ -DFB 光栅器件降低了 2 倍<sup>[66-70]</sup>。

上述边发射偏角矩形 PCDFB 激光器尽管实现了宽脊单横模激射, 但是快轴和慢轴方向的发散角差距大, 远场光斑是细长条, 且为了保证宽脊单横模, 对光栅和脊偏角的精度要求高, 偏差不能超过  $1^\circ$ , 工艺难度较大。2003 年, NRL 报导了能提供圆形对称光斑的正方和六方面发射 PCDFB 激光器的设计<sup>[71-72]</sup>, 他们用新的时域 Fourier-Galerkin 理论对约化的波动方程进行了求解, 引入增益区的线宽增强因子的影响, 代表有源区注入载流子密度波动对增益的影响。模拟结果指出 2D 正方或六方晶格光栅足以获得宽脊相干对称模式激射, 不需要 1D DFB 激光器中的相移和偏角光栅设计, 能够从宽至  $1 \text{ mm}$  量级的表面出光孔获得圆形近衍射极限的光斑。图 12(a) 是六方晶格面发射 PCDFB 激光器结构示意图, 在平面内有 6 个等价的传播方向, 可计算出 3 个不同的耦合系数:  $\kappa_1$  对应分布反馈  $180^\circ$  衍射, 如  $P_1$  到  $-P_1$ ;  $\kappa_2$  对应  $60^\circ$  衍射, 如  $P_1$  到  $P_2$  或  $P_3$ , 或者  $-P_2$  到  $P_3$ ;  $\kappa_3$  对应  $120^\circ$  衍射, 如  $P_1$  到  $-P_2$  或  $-P_3$ , 或者  $P_2$  到  $-P_1$ ; 此外, 还有一个与面发射耦合的系数  $\kappa_0$ 。他们模拟了光泵的面发射 PCDFB, 针对 TE 模式, 构造了一个 40 周期的二类 W 量子阱有源区, 目标波长  $4.6 \mu\text{m}$ , 如图 12(b) 所示, 代表微分增益在  $10^{-15} \text{ cm}^{-2}$  量级、每周期光学限制因子在  $1\%$  左右的中红外激光器结构。当上述 6 个分量的相位不相同, 得到六瓣或双瓣近场, 如图 12(c) 和 (d) 所示, 优化  $\kappa_1$ 、 $\kappa_2$ 、 $\kappa_3$  和  $\kappa_0$  以及增益区线宽增强因子和内部损耗等参数使其具有相同相位时, 可获得对称的单瓣面发射模式, 如图 12(e) 所示的近场光斑, 同相位模式对应的远场分布为对称单瓣, 且发散角最小, 是衍射极限的  $1.2 \sim 1.3$  倍, 微分子效率能达到  $30\%$ , 进一步在波导中引入相长干涉反射器, 可提高到  $60\%$ 。

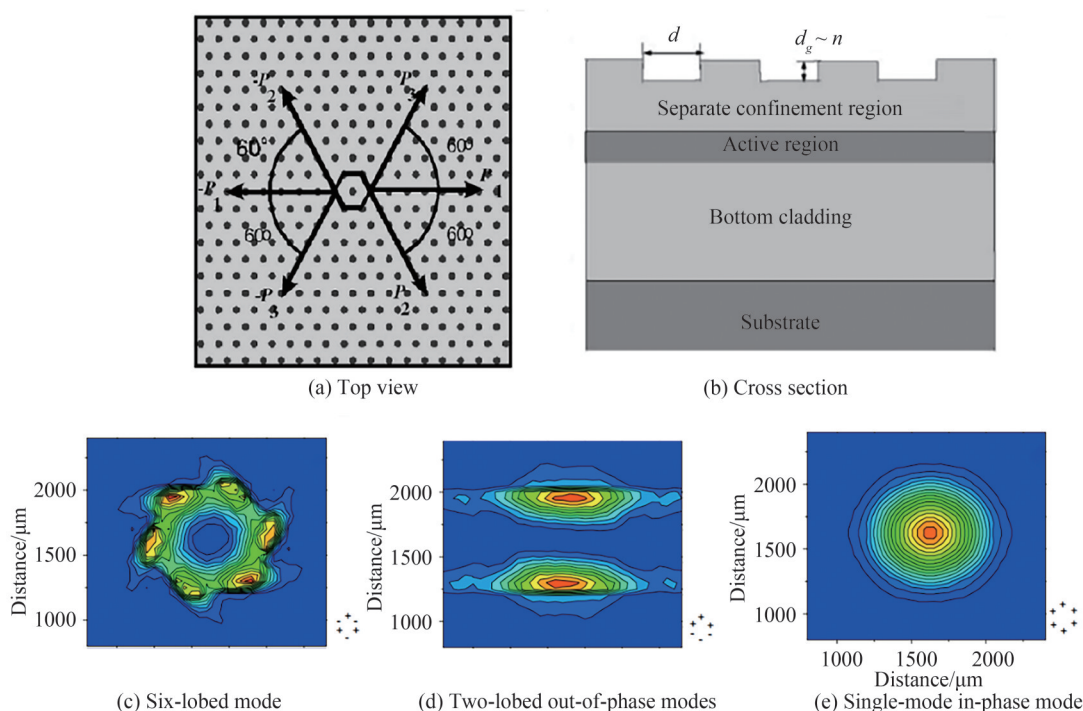


图 12 六方晶格面发射 PCDFB 激光器的设计<sup>[71-72]</sup>

Fig. 12 Design of surface emitting PCDFB laser with a hexagonal lattice<sup>[71-72]</sup>

2006年,NRL发表了面发射PCDFB的实验结果<sup>[73]</sup>,有源区采用10周期的二类W阱,激光波长为 $3.7\ \mu\text{m}$ ,在有源区上方的GaSb层中制作三角对称的PCDFB结构,图13(a)为刻蚀深度60 nm的2D PCDFB光栅的SEM照片。低温光泵条件下,得到光谱的半高宽为 $0.13\ \text{nm}$ ,如图13(b)所示,还不是纯的单模激光,最大的脉冲光-光转换效率为 $1.1\%$ ,超过了同样外延片FP腔 $1.0\%$ 的效率,器件性能并未达到理论预期<sup>[71]</sup>,表明面发射PCDFB结构、中红外有源区以及器件工艺仍有较大的优化空间。

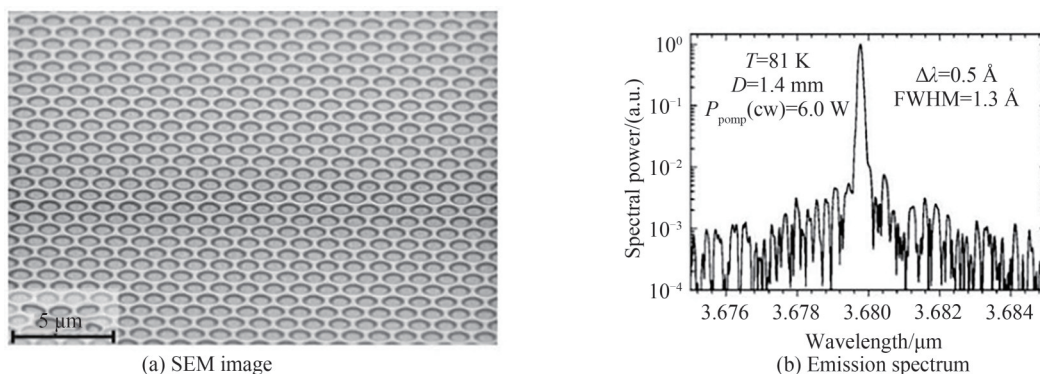


图13 六方晶格面发射PCDFB激光器<sup>[73]</sup>  
Fig.13 SE PCDFB laser with a hexagonal lattice<sup>[73]</sup>

PCDFB级联激光器的实验结果最早是2007年美国西北大学的量子器件研究组(Center for Quantum Devices, CQD)报导的<sup>[74]</sup>,他们在有源区上的 $100\ \text{nm}$ 厚的InGaAs光栅层上刻蚀出 $18^\circ$ 偏角的矩形光子晶体,两套光栅的周期满足 $\Lambda_1=3\Lambda_2$ 的关系, $\Lambda_2$ 分别为 $0.77$ 、 $0.78$ 和 $0.79\ \mu\text{m}$ ,然后二次外延InP上波导,如图14(a)所示,按照常规的工艺制作 $100\ \mu\text{m}$ 宽的脊。图14(b)给出光子晶体俯视和截面的SEM图。器件在脉冲工作下获得了室温单横模的远场,如图14(c)所示,远场发散角为 $2.4^\circ$ ,在 $9\ \text{A}$ 的注入电流下光谱为单纵模,如图14(d)所示,单腔面输出功率接近 $300\ \text{mW}$ ,斜率效率只有窄脊FP腔的 $17\%$ ,原因是2D光栅层就在有源区上面,损耗太大。2009年,他们在有源区和InGaAs光栅层之间加了 $100\ \text{nm}$ 的InP间隔层<sup>[75]</sup>,如图14(g)所示,以获得纯的折射率耦合机制,避免了光栅刻蚀对有源区的影响,同时优化了PC晶格结构,如图14(e)所示,图14(f)是PC格点的SEM图片,图14(h)给出三个不同PC晶格常数QCL布局的SEM图片。同样用 $100\ \mu\text{m}$ 宽的脊,单面输出功率在 $20\ \text{A}$ 的注入电流下达到 $6\ \text{W}$ ,斜率效率达到FP器件的 $50\%$ ,如图14(i)所示,这是中红外PCDFB激光器报导的最高值,三个PC结构的QCL均实现了窄发散角的单横模,如图14(j),但是光谱为双模激光,间隔为 $6.2\ \text{nm}$ ,这是光子晶体能带结构中两个带边耦合造成的。因此,还需要进一步优化光子晶体结构的设计,以实现单纵模激光。

2008年2月,NRL报导了 $3.4\ \mu\text{m}$ 波长的偏角矩形PCDFB ICL<sup>[76-77]</sup>边发射的实验结果,根据他们2002年的设计方案<sup>[65]</sup>,用10周期的ICL有源区,InAs/AlSb超晶格上包层的厚度从标准FP腔激光器的 $1.5\ \mu\text{m}$ 减薄到 $400\ \text{nm}$ ,在脊表面沉积 $200\ \text{nm}$ 的高折射率( $n=4.0$ )Ge,通过电子束曝光和剥离工艺制作的一阶矩形2D光栅,上面沉积 $\text{SiO}_2$ ,脊与解理腔面垂直方向的夹角为 $20^\circ$ ,在脊顶部金属接触层的两侧及后腔面侧用离子轰击的方式限制电流,形成 $400\ \mu\text{m}$ 宽的脊,腔长为 $1.5\ \text{mm}$ ,避免刻蚀脊侧壁造成的模式损耗。图15(a)是显微镜下的俯视图,图15(b)及插图是PCDFB光栅的SEM图。PCDFB中三个主要衍射过程的耦合系数分别为 $|\kappa_1|=7\ \text{cm}^{-1}$ , $|\kappa_2|=29\ \text{cm}^{-1}$ , $|\kappa_3|=7\ \text{cm}^{-1}$ , $78\ \text{K}$ 的低温下获得近衍射极限的单横模激光,远场发散角为 $0.52^\circ$ ,如图15(c)所示。图15(d)是不同注入电流下的单模激光谱,SMSR达到 $27\ \text{dB}$ ,图15(e)是器件的 $L-I-V$ 性能,最高输出功率为 $67\ \text{mW}$ ,与之相比,用常规方式刻蚀出 $270\ \mu\text{m}$ 的脊宽, $0.75\ \text{mm}$ 腔长的器件的单纵模性能和横向远场性能都比较差,原因归结为刻蚀的脊侧壁造成非光栅模式被激发。

需要指出,NRL在2008年5月才发表了首个室温CW激光ICL的结果<sup>[78]</sup>,2014年发表了最高电光效率以及最高室温连续波输出功率的结果<sup>[79]</sup>,因此,上述PCDFB ICL中激光器结构尚未优化,至今尚未有面发射PCDFB ICL的报导。采用高电光转换效率的ICL器件结构,将图15中非晶态高损耗的Ge光栅层换成外延GaSb光栅层<sup>[48]</sup>,可有效降低光栅层和外延层界面的缺陷和光栅层的损耗,针对目标波长,设计出六方晶

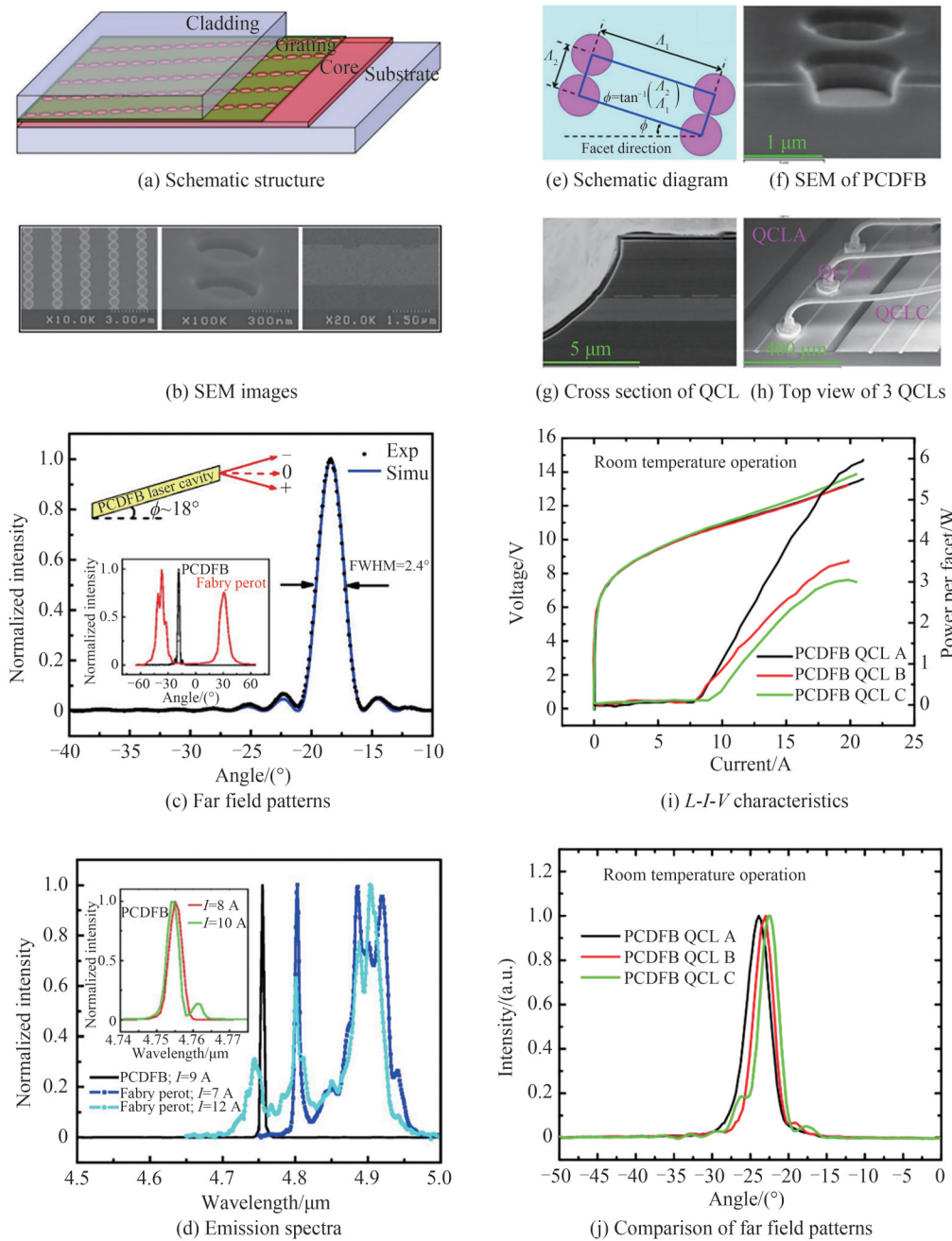


图 14 不同 2D 光栅位置的 PCDFB QCL<sup>[74-75]</sup>  
 Fig. 14 PCDFB QCLs with different grating locations

格的面发射 PCDFB 结构,采用当前先进的微纳刻蚀工艺制作光栅,同时用湿法腐蚀脊,预计能够实现室温激射。

进一步,引入 NODA S 等在 2019 年报导<sup>[80]</sup>的“双晶格”光子晶体,即叠加两套光子晶格,平面内  $x$  和  $y$  方向相距  $\lambda/4$ ,如图 16(a)所示,双晶格结构能够使  $180^\circ$  衍射和  $90^\circ$  衍射的光波发生相消作用,放松光在平面内的限制,抑制高阶模式的振荡,他们用这个方案从  $500 \mu\text{m}$  直径的圆形出光孔获得了  $940 \text{ nm}$  附近脉冲  $10 \text{ W}$ 、发散角小于  $0.3^\circ$ 、CW 约  $7 \text{ W}$  的单模输出功率,并从理论上预测,在 PC 层下方引入 DBR<sup>[81]</sup>,如图 16(b)所示,从  $3\sim 10 \text{ mm}$  的超大出光孔能获得  $100 \text{ W}$  到  $1 \text{ kW}$  的单模输出功率,仅从加工尺寸的角度来看,中红外波段器件具有较高的可行性,目前尚需解决的问题是如何在有源区附近实现包含空气孔的 2D PC 层,从而获得高的折射率调制。

1.1 节已经说明, GaSb 基的 ICL 结构中,无法在图形化的光栅层上实现 InAs/AlSb 超晶格上包层的高质

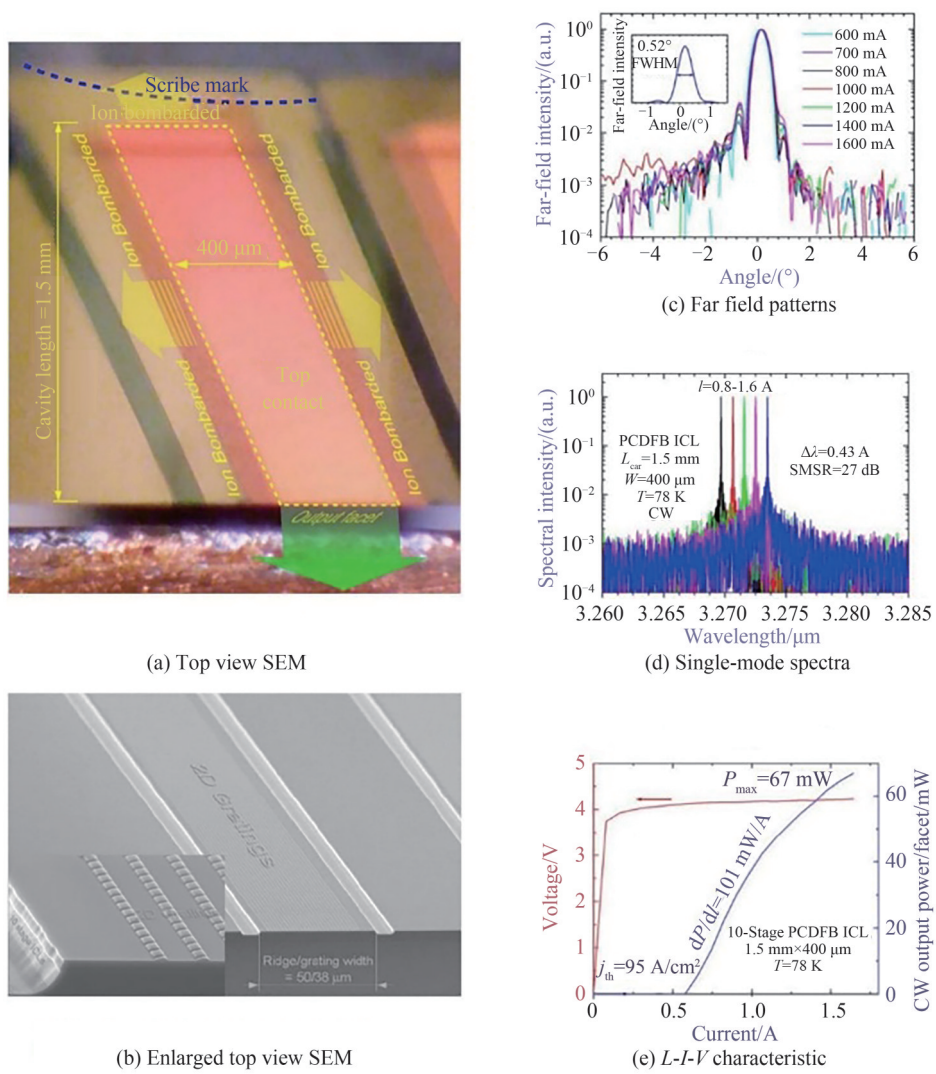


图 15 边发射 PCDFB ICL<sup>[76]</sup>  
Fig.15 Edge emitting PCDFB ICLs<sup>[76]</sup>

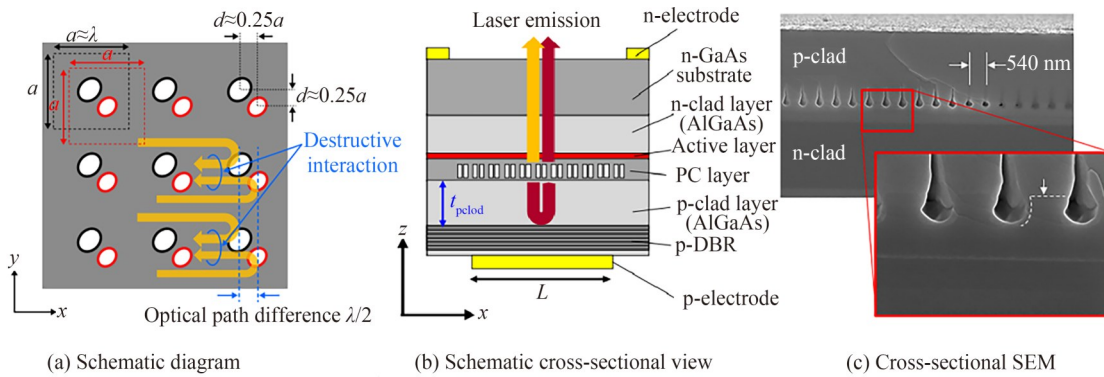


图 16 双晶格光子晶体谐振腔<sup>[80-81,83]</sup>  
Fig.16 Double-lattice photonic-crystal resonator<sup>[80-81,83]</sup>

量二次外延,比较可行的方案是用四元合金代替超晶格作为上包层<sup>[82]</sup>,在有源区上面的 GaSb 分别限制层中刻蚀光子晶体结构,充分处理表面,然后进行四元合金上包层的二次外延,如文献[83]中 2 μm 波长 GaSb 基量子阱激光器的制作方法,图 16(c)的 SEM 图片显示该光子晶体中形成的空气孔,从边长 200 μm 的出光孔测量到 10 mW 室温 CW 功率,光谱纯度和光束质量还有提升的空间,将该方案用于 GaSb 基的 ICL,有望实

现低阈值面发射单模激射。实际上, QCL发明人之一的Faist研究组的LIANG Y等在2019年报导了室温面发射光子晶体QCL<sup>[84]</sup>, 采用正方形晶格, 利用InP(3.06)和InGaAs(3.32)的折射率差实现对红外光学模式的限制, 波长为8.5  $\mu\text{m}$ , 室温下只能脉冲工作, 最高峰值功率为176 mW, 面发射光束的发散角小于1°, 光束质量好于CQD报导的边发射PC QCL<sup>[74]</sup>, 但是功率小得多。

由于光子晶体激光器设计自由度高, 有望成为大面积、超低阈值、单纵模和单横模高性能半导体激光器的优选方案, 已经引起了各个波段半导体激光器研究者的密切关注, 中科院长春光机所的李颂儒等对光子晶体面发射激光器最新研究进展进行了综述<sup>[85-86]</sup>。

## 4 结论

用于高灵敏化学传感的单模中红外半导体激光器中, ICL的最大优势是阈值功耗低, 已广泛应用于甲烷、HCl、SO<sub>2</sub>等多种气体的高分辨痕量检测系统, 以Nanoplus为代表的公司已提供单模ICL产品, 然而, 与相应的FP腔ICL的最大输出功率相比, 单模ICL的最大输出功率不到十分之一, 主要原因在于, 目前无论是实验室研发的器件还是商品所采用的单模光栅设计和制备技术都存在各自的缺陷, 例如, Nanoplus的侧向金属光栅方案的成品率较高, 但是需要极窄的脊, 以获得脊中心光学模式与两侧光栅足够的耦合强度, 对刻蚀精确度的要求很高, 且较难获得大功率的输出。目前报导的ICL最高电光转换效率来自NRL, 单管FP腔功率达到600 mW, 他们高阶侧壁光栅单模ICL可以用稍宽的脊, 最大功率也只有55 mW, 损耗仍然很大, 考虑到NRL单模器件的报导时间早于最高效率的报导时间, 单模ICL性能的提升空间仍然很大。一方面, 提高DFB ICL的成品率, 降低成本, 使得甲烷、甲醛、氧化氮等高灵敏激光器检测系统的价格降低到家用可承受的范围, 推动ICL技术的市场化; 另一方面, 关注器件功率的提升, 需要对目前ICL有源区设计进行改造, 突破功率的瓶颈, 本组正在进行这方面的工作; 更进一步, 将性能优化已达到单模7 W的可见光双晶格光子晶体结构引入ICL, 有望获得ICL单模性能质的飞跃, 从而大大拓展单模ICL的应用领域, 比如从目前的气体分子激光光谱检测应用, 拓展到对功率要求更高的自由空间通讯、远程红外传感、激光雷达以及红外对抗等领域。

## 参考文献

- [1] YANG R. Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells[J]. *Superlattices and Microstructures*, 1995, 17(1): 77-83.
- [2] FAIST J, CAPASSO F, SIVCO D, et al. Quantum cascade laser[J]. *Science*, 1994, 264: 553-556.
- [3] YE Weilin, HE Xun, MENG Yongxian, et al. Highly-accuract mid-infrared atmospheric methane sensor system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(11): 1128003.  
叶玮琳, 何迅, 孟永贤, 等. 一种高精度中红外大气甲烷传感系统的研制[J]. *光子学报*, 2017, 46(11): 1128003.
- [4] LIU Zhiwei, LI Ziwen, LI Yafei, et al. Pressure measurement and compensation for mid-infrared methane detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0230002.  
刘志伟, 李梓文, 李亚飞, 等. 用于中红外甲烷检测的压强测量与补偿[J]. *光子学报*, 2018, 47(2): 0230002.
- [5] TÜTÜNCÜ E, NÄGELE M, BECKER S, et al. Advanced photonic sensors based on interband cascade lasers for real-time mouse breath analysis[J]. *ACS Sensors*, 2018, 3: 1743-1749.
- [6] SCHEUERMANN J, KLUCZYNSKI P, SIEMBAB K, et al. Interband cascade laser arrays for simultaneous and selective analysis of C1-C5 hydrocarbons in petrochemical industry[J]. *Applied Spectroscopy*, 2021, 75(3): 336-342.
- [7] VURGAFTMAN I, BEWLEY W, CANEDY C, et al. Rebalancing of internally generated carriers for mid-infrared interband cascade lasers with very low power consumption[J]. *Nature Communications*, 2011, 2:585.
- [8] YANG Ruiqing, LI Lu, JIANG Yuchao. Interband cascade lasers: from original concept to practical devices[J]. *Progress in Physics*, 2014, 34(4): 169-190.  
杨瑞青, 李璐, 江宇超. 带间级联激光器: 从原始概念到实际器件[J]. *物理学进展*, 2014, 34(4): 169-190.
- [9] 杨瑞青. 带间级联激光器的发明——我的经历与物理[J]. *物理*, 2016, 45(1): 46-51.
- [10] 杨瑞青. 带间级联器件的发展与感悟[J]. *物理*, 2023, 52(1): 57-64.
- [11] VURGAFTMAN I, BEWLEY W, CANEDY C, et al. Interband cascade lasers with low threshold powers and high output powers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2013, 19(4): 1200210.
- [12] VURGAFTMAN I, WEIH R, KAMP M, et al. Interband cascade lasers[J]. *Journal of physics D: Applied Physics*, 2015, 48:123001.
- [13] MEYER J, BEWLEY W, CANEY C, et al. The interband cascade laser[J]. *Photonics*, 2020, 7:75.



- [14] ZHANG Yi, YANG Cheng'ao, SHANG Jinming, et al. Research progress of semiconductor interband cascade lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0114004.  
张一, 杨成奥, 尚金铭, 等. 半导体带间级联激光器研究进展[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0114004.
- [15] ZHANG Yi, ZHANG Yu, YANG Cheng'ao, et al. Research progress of 3~4  $\mu\text{m}$  antimonide interband cascade laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1003003.  
张一, 张宇, 杨成奥, 等. 3~4  $\mu\text{m}$  锑化物带间级联激光器研究进展[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1003003.
- [16] YANG H, YANG R, GONG J, et al. Mid-infrared widely tunable single-mode interband cascade lasers based on V-coupled cavities[J]. Optics Letters, 2020, 45(10): 2700-2703.
- [17] KOGELNIK H, SHANK C. Coupled-wave theory of distributed feedback lasers[J]. Journal of Applied Physics, 1972, 43(5): 2327-2335.
- [18] KIM C, KIM K, BEWLEY W, et al. Single-mode distributed-feedback interband cascade laser for the midwave infrared[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(19): 191103.
- [19] KIM C, KIM M, BEWLEY W, et al. High-power single-mode distributed-feedback interband cascade lasers for the midwave-infrared[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(3): 158-160.
- [20] KIM C, KIM M, ABELL J, et al. Mid-infrared distributed-feedback interband cascade lasers with continuous-wave single-mode emission to 80  $^{\circ}\text{C}$ [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(6): 061104.
- [21] KIM C, KIM M, BEWLEY W, et al. Corrugated-sidewall interband cascade lasers with single-mode midwave-infrared emission at room temperature[J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(23): 231103.
- [22] BEWLEY W, KIM C, KIM M, et al. High-performance interband cascade lasers for  $\lambda = 3\text{-}4.5 \mu\text{m}$ [J]. International Journal of High Speed Electronics and Systems, 2012, 21(1): 1250014.
- [23] VURGAFMAN I, BEWLEY W, CANEDY C, et al. Interband cascade lasers with low threshold powers and high output powers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013, 19(4): 1200210.
- [24] KIM C, KIM M, ABELL J, et al. Mid-infrared distributed-feedback interband cascade lasers[C]. SPIE, 2013, 8631: 86311O.
- [25] MERRITT C, BEWLEY W, CANEY C, et al. Distributed-feedback interband cascade lasers with reduced contact duty cycles[C]. SPIE, 2016, 9855: 98550C.
- [26] WEIH R, NÄHLE L, HÖFLING S, et al. Single mode interband cascade lasers based on lateral metal gratings[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(7): 071111.
- [27] von EDLINGER M, SCHEUERMANN J, WEIH R, et al. Monomode interband cascade lasers at 5.2  $\mu\text{m}$  for nitric oxide sensing[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(5): 480-482.
- [28] DALLNER M, SCHEUERMANN J, NÄHLE L, et al. InAs-based distributed feedback interband cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(18): 181105.
- [29] SCHEUERMANN J, WEIH R, von EDLINGER M, et al. Single-mode interband cascade lasers emitting below 2.8  $\mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(16): 161103.
- [30] von EDLINGER M, SCHEUERMANN J, NÄHLE L, et al. DFB interband cascade lasers for tunable laser absorption spectroscopy from 3 to 6  $\mu\text{m}$ [C]. SPIE, 2014, 8993: 899318.
- [31] KOETH J, von EDLINGER M, SCHEUERMANN J, et al. Distributed feedback interband cascade lasers for applications in research and industry[C]. SPIE, 2015, 9382: 93820V.
- [32] HÖFLING S, WEIH R, DALLNER M, et al. Mid-Infrared ( $\sim 2.8 \mu\text{m}$  to  $\sim 7.1 \mu\text{m}$ ) interband cascade lasers[C]. SPIE 2015, 9550: 95500F.
- [33] KOETH J, von EDLINGER M, SCHEUERMANN J, et al. Interband cascade laser sources in the mid-infrared for green photonics[C]. SPIE, 2016, 9767: 976712.
- [34] SCHEUERMANN J, von EDLINGER M, WEIH R, et al. Single-mode interband cascade laser sources for mid-infrared spectroscopic applications[C]. SPIE, 2016, 9855: 98550G.
- [35] KOETH J, WEIH R, SCHEUERMANN J, et al. Mid infrared DFB interband cascade lasers[C]. SPIE, 2017, 10403: 1040308.
- [36] von EDLINGER M, SCHEUERMANN J, WEIH R, et al. Widely-tunable interband cascade lasers for the mid-infrared[C]. SPIE, 2015, 9370: 93702A.
- [37] WEIH R, SCHEUERMANN J. Monolithic single mode interband cascade lasers with wide wavelength tunability[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(20): 201109.
- [38] FISCHER M, von EDLINGER M, NÄHLE L, et al. DFB lasers for sensing applications in the 3.0-3.5  $\mu\text{m}$  wavelength range[C]. SPIE, 2011, 7945: 79450E.
- [39] BECKER S, SCHEUERMANN J, WEIH R, et al. Laterally coupled DFB interband cascade laser with tapered ridge[J]. Electronics Letters, 2017, 53(11): 743-744.
- [40] SCHEUERMANN J, WEIH R, BECKER S, et al. Single-mode interband cascade laser multiemitter structure for two-

- wavelength absorption spectroscopy[J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(1): 011008.
- [41] JIANG Y, LI L, YE H, et al. InAs-based single-mode distributed feedback interband cascade lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2015, 51(9): 2300307.
- [42] YANG R, HILL J, YANG B, et al. Continuous-wave operation of distributed feedback interband cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(18): 3699-3701.
- [43] YANG R, HILL J, MANSOUR K, et al. Distributed feedback mid-IR interband cascade lasers at thermoelectric cooler temperatures[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13(5): 1074-1078.
- [44] FOROUHAR S, BORGENTUN C, FREZ C, et al. Reliable mid-infrared laterally-coupled distributed-feedback interband cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(5): 051110.
- [45] BORGENTUN C, FREZ C, BRIGGS R, et al. Single-mode high-power interband cascade lasers for mid-infrared absorption spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 2446-2450.
- [46] XIE F, STOCKER M, PHAM J, et al. Distributed feedback interband cascade lasers with top grating and corrugated sidewalls[J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(13): 131102.
- [47] LEAVITT R, BRUNOA J, BRADSHAW J, et al. High performance interband cascade lasers at 3.8 microns[C]. *SPIE*, 2012, 8277:82771E.
- [48] NING C, SUN R, LIU S, et al. GaSb surface grating distributed feedback interband cascade laser emitting at 3.25  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2022, 30(16): 29007-29014.
- [49] KAZARINOV R, HENRY C. Second-order distributed feedback lasers with mode selection provided by first-order radiation losses[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1985, 21(2): 144-150.
- [50] MAKINO T, GLINSKI J. Effects of radiation loss on the performance of second-order DFB semiconductor lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1988, 24(1): 73-82.
- [51] HOLZBAUER M, SZEDLAK R, DETZ H, et al. Substrate-emitting ring interband cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 111(17): 171101.
- [52] LIU Jiachen, HUANG Yongzhen, HAO Youzeng, et al. Numerical simulation of noise characteristics for WGM microcavity lasers(invited)[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51(2): 0251205.  
刘家辰, 黄永箴, 郝友增, 等. 回音壁微腔激光器噪声特性数值模拟研究(特邀)[J]. *光子学报*, 2022, 51(2): 0251205.
- [53] KNOTIG H, HINKOV B, WEIH R, et al. Continuous-wave operation of vertically emitting ring interband cascade lasers at room temperature[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(13): 131101.
- [54] SZEDLAK R, HARRER A, HOLZBAUER M, et al. Remote sensing with commutable monolithic laser and detector[J]. *ACS Photonics*, 2016, 3: 1794-1798.
- [55] IGA K. Vertical-cavity surface-emitting laser: Its conception and evolution[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(1): 1-10.
- [56] WITZEL O, KLEIN A, MEFFERT C, et al. VCSEL-based, high-speed, in situ TDLAS for in-cylinder water vapor measurements in IC engines[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19951-19965.
- [57] VURGAFTMAN I, MEYER J. Mid-IR Vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(1): 147-156.
- [58] BEWLEY W, CANEDY C, KIM C, et al. Room-temperature mid-infrared interband cascade vertical-cavity surface-emitting lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(15): 151108.
- [59] ANDREJEW A, SPRENGEL S, AMANN M. GaSb-based vertical-cavity surface-emitting lasers with an emission wavelength at 3  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Letters*[J]. 2016, 41(12): 2799-2802.
- [60] JAYARAMAN V, KOLASA B, LINDBLAD C, et al. Tunable room-temperature continuous-wave mid-infrared VCSELs[C]. *SPIE*, 2020, 11300: 113000M.
- [61] LANG R, DZURKO K, HARDY A, et al. Theory of grating-confined broad-area lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(11): 2196-2209.
- [62] BARTOLO R, BEWLEY W, VURGAFTMAN I, et al. Mid-infrared angled-grating distributed feedback laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2000, 76(22): 3164-3166.
- [63] VURGAFTMAN I, BEWLEY W, BARTOLO R, et al. Far-field characteristics of mid-infrared angled-grating distributed feedback lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2000, 88(12): 6997-7005.
- [64] VURGAFTMAN I, MEYER J. Photonic-crystal distributed-feedback lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2001,

- 78(11): 1475-1477.
- [65] VURGAFTMAN I, MEYER J. Photonic-crystal distributed-feedback quantum cascade lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(6): 592-602.
- [66] BEWLEY W, FELIX C, VURGAFTMAN I, et al. Mid-infrared photonic-crystal distributed-feedback laser with enhanced spectral purity and beam quality[J]. Applied Physics Letters, 2001, 79(20): 3221-3223.
- [67] FELIX C, VURGAFTMAN I, BEWLEY W, et al. High-brightness mid-infrared photonic-crystal distributed-feedback lasers[J]. Journal of Modern Optics, 2002, 49(5-6):801-810.
- [68] BEWLEY W, FELIX C, VURGAFTMAN I, et al. Mid-infrared photonic-crystal distributed-feedback lasers[J]. Solid-State Electronics, 2002, 46: 1557-1566.
- [69] BEWLEY W, KIM C, KIM M, et al. Broad-stripe midinfrared photonic-crystal distributed-feedback lasers with laser-ablation confinement[J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(26): 5383-5385.
- [70] KIM C, BEWLEY W, CANEDY C, et al. Broad-stripe near-diffraction-limited mid-infrared laser with a second-order photonic-crystal distributed feedback grating[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(5): 1250-1252.
- [71] VURGAFTMAN I, MEYER J. Design optimization for high-brightness surface-emitting photonic-crystal distributed-feedback lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2003, 39(6): 689-700.
- [72] VURGAFTMAN I, BEWLEY W, CANEDY C, et al. Broad-area optical coherence in photonic-crystal distributed-feedback lasers[C]. SPIE, 2003, 4992: 118-129.
- [73] KIM M, KIM C, BEWLEY W, et al. Surface-emitting photonic-crystal distributed-feedback laser for the midinfrared [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(19): 191105.
- [74] BAI Y, DARVISH S, SLIVKEN S, et al. Electrically pumped photonic crystal distributed feedback quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(14): 141123.
- [75] LIANG Y, WANG Z, WOLF J, et al. Room temperature surface emission on large-area photonic crystal quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(3): 031102.
- [76] KIM C, KIM M, BEWLEY W, et al. Broad-stripe, single-mode, mid-IR interband cascade laser with photonic-crystal distributed-feedback grating[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(7): 071110.
- [77] KIM C, BEWLEY W, CANEDY C, et al. Robust single-mode emission from mid-IR photonic crystal interband cascade lasers[C]. SPIE, 2008, 6900: 690003.
- [78] KIM M, CANEDY C, BEWLEY W, et al. Interband cascade laser emitting at  $\lambda=3.75\ \mu\text{m}$  in continuous wave above room temperature[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(19): 191110.
- [79] CANEDY C, ABELL J, MERRITT C, et al. Pulsed and CW performance of 7-stage interband cascade lasers[J]. Optics Express, 2014, 22(7): 7702-7710.
- [80] YOSHIDA M, ZOYSA M, ISHIZAKI K, et al. Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams[J]. Nature Materials, 2019, 18: 121-128.
- [81] INOUE T, YOSHIDA M, GELLETA J, et al. General recipe to realize photonic-crystal surface emitting lasers with 100-W-to-1-kW single-mode operation[J]. Nature Communications, 2022, 13:3262.
- [82] ZHAO X, CAO C, DU A, et al. High performance interband cascade lasers with AlGaAsSb cladding layers[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2022, 34(5): 291-294.
- [83] SHTERENGAS L, LIU R, STEIN A, et al. Continuous wave room temperature operation of the 2  $\mu\text{m}$  GaSb-based photonic crystal surface emitting diode lasers[J]. Applied Physics Letters, 2023, 122(13): 131102.
- [84] LIANG Y, WANG Z, WOLF J, et al. Room temperature surface emission on large-area photonic crystal quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(3): 031102.
- [85] LI Songru, TIAN Sicong. Dirac photonic crystal application in surface emitting lasers [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2022, 33(3):230-240.  
李颂儒,田思聪.狄拉克光子晶体在面发射激光器中的应用[J].光电子·激光, 2022, 33(3):230-240.
- [86] LI Rusong, LU Huanyu. Research on threshold gain and output optical power of photonic crystal surface emitting lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0314004.  
李颂儒,陆寰宇.光子晶体面发射激光器阈值增益与输出光功率的研究[J].激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0314004.

## Single-mode Interband Cascade Lasers (Invited)

LIU Shuman<sup>1,2</sup>, ZHANG Jinchuan<sup>1,2</sup>, YE Xiaoling<sup>1,2</sup>, LIU Junqi<sup>1,2</sup>, WANG Lijun<sup>1,2</sup>,  
ZHUO Ning<sup>1,2</sup>, ZHAI Shenqiang<sup>1,2</sup>, LI Yuan<sup>1</sup>, LIU Fengqi<sup>1,2</sup>

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

(2 Center of Materials Science and Opto-Electronic Engineering, University of Chinese Academy of Sciences,  
Beijing 100049, China)

**Abstract:** Interband Cascade Laser (ICL) and Quantum Cascade Laser (QCL) are currently the mainstream mid-infrared semiconductor coherent light sources. Among them, QCL has the advantage of watt-level high power in the spectral band above 4  $\mu\text{m}$ , and the power consumption is usually high. ICLs are characterized by low power consumption and operate in the 3~5  $\mu\text{m}$  spectral band. This band contains a wealth of molecular fundamental modes, such as alkane molecules, which are important in the petrochemical industry,  $\text{SO}_2$  and formaldehyde, which are closely related to environmental pollution, as well as NO and  $\text{H}_2\text{S}$ , which are biomarkers in the medical and health fields. At present, most of the high-sensitivity optical sensing systems based on mid-infrared laser absorption spectroscopy technology ranging from  $10^{-6}$  to  $10^{-9}$  use single-mode ICLs with low power consumption as the coherent light sources.

It is known that one-dimensional Distributed Feedback (DFB) gratings buried near the active region are most commonly used in mode selection for InP-based semiconductor lasers thanks to the mature InP regrowth technology. However, it is hard to regrow the antimonide superlattice waveguide structure of an ICL on a grating layer, which makes the buried grating structure impossible for a DFB ICL. Even for the simplest surface gratings, since an ICL epitaxial structure is usually capped with a thin lattice mismatched InAs layer, the surface grating can only be etched in the InAs/AlSb superlattice waveguide layer. The etching rate of InAs and AlSb is different, resulting in non-smooth grating side walls. As a result, several grating schemes have been reported so far. For example, a high refractive index Ge layer was deposited on the surface of the ICL structure to avoid etching the grating in the superlattice waveguide, where a 1<sup>st</sup> DFB grating was fabricated by electron-beam lithography and lift-off. In such a process, it should be noted that the Ge layer is relatively easy to fall off. In contrast to the non-crystalline Ge layer, another surface DFB grating ICL was reported recently, in which a 200-nm-thick epitaxial GaSb top layer was used as the grating layer. Etching the grating in the GaSb layer avoids the problem of non-uniform etching rates of InAs and AlSb, which can improve the grating quality.

So far, the highest room temperature continuous wave power of 55 mW was achieved by the fourth-order DFB ICLs, in which the gratings were fabricated by dry etch on both side walls of the laser ridge. The process of etching the grating with a high aspect ratio is a great challenge. In addition, the Side-Mode Suppression Ratios (SMSRs) of single-mode emission are low. Recently, DFB ICLs with two sets of gratings were reported, in which a top 1<sup>st</sup> sampling grating realized single-mode emission and high-order side-wall gratings suppressed the high-order horizontal mode. The laser exhibited a high output power and high SMSRs. From the point of view of processing, the yield of lateral metal gratings placed on both sides of the laser ridge is relatively high. Nanoplus offers lateral metal grating DFB ICLs emitting at a wide wavelength range with low threshold currents and low output power of several milliwatts.

In this review we compare and analyze the performance of several DFB ICLs with different grating configurations, and discuss the dominant loss mechanisms and the improvement routes. In addition, vertical cavity surface emission and photonic crystal ICLs are also introduced. Their performances are compared to the DFB ICLs. Although the performance of these two kinds of single-mode ICLs is not satisfactory and cannot be used as a practical single-mode light source at present, their research is still in its infancy, and it is expected that more in-depth research can improve the device's performance in the future.

**Key words:** Mid-infrared; Single-mode; Interband cascade lasers; Distributed feedback; Vertical emitting lasers

**OCIS Codes:** 140.3070; 140.3490; 140.5965; 140.7270