

光学学报

半导体带间级联激光器研究进展

张一^{1,2}, 杨成奥^{1,2}, 尚金铭^{1,2}, 陈益航^{1,2}, 王天放^{1,2}, 张宇^{1,2*}, 徐应强^{1,2}, 刘冰^{3**}, 牛智川^{1,2,3***}

¹中国科学院半导体研究所半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083;

²中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

³北京量子信息科学研究院, 北京 100193

摘要 半导体带间级联量子阱是实现 3~5 μm 波段中红外激光器的重要前沿,其在半导体光电器件技术、气体检测、医学医疗以及自由空间光通信等诸多领域具有重要科学意义和应用价值。半导体带间级联量子阱发光机理是以二类量子阱中的电子与空穴的带间辐射复合发光为主导,再通过电子注入区与空穴注入区形成级联放大,实现多个量子阱周期内电子与空穴的重复利用。本文综述了半导体带间级联激光器从提出能带结构、外延材料到器件制备技术的发展历程,剖析了器件结构各功能区基本概念和工作原理,介绍了器件结构与制备工艺技术难点的里程碑突破,详细解释了载流子再平衡、分别限制层等设计,最后展望了半导体带间级联激光器的发展方向和趋势。

关键词 激光器; 半导体; 量子阱; 激光理论

中图分类号 O472

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0114004

Research Progress of Semiconductor Interband Cascade Lasers

Zhang Yi^{1,2}, Yang Cheng'ao^{1,2}, Shang Jinming^{1,2}, Chen Yihang^{1,2}, Wang Tianfang^{1,2},
Zhang Yu^{1,2*}, Xu Yingqiang^{1,2}, Liu Bing^{3**}, Niu Zhichuan^{1,2,3***}

¹ State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductor,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

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

³ Beijing Academy of Quantum Information Sciences, Beijing 100193, China

Abstract As an important frontier in the 3–5 μm mid-infrared lasers, semiconductor interband cascade quantum well laser has important scientific significance and application value in many fields, such as semiconductor optoelectronic device technology, gas detection, medical science, and free space optical communications. The emission mechanism of semiconductor interband cascade quantum well is dominated by the interband emission combination of electrons and holes in the Type-II quantum wells, and then cascade amplification is formed in the electron injection region and the hole injection region, so as to realize the reuse of electrons and holes in multiple quantum well periods. In this paper, the development history of semiconductor interband cascade lasers, from the proposed band structure, epitaxial materials to device fabrication technology, was reviewed, and the basic concepts and working principles of each functional area in a device structure were analyzed. Furthermore, the milestone breakthroughs in the design of device structures and the technical difficulties of fabrication process were introduced, and the designs such as rebalancing of carriers and separate confinement layer were explained in detail. Finally, the development direction and trend of semiconductor interband cascade lasers were forecast.

Key words lasers; semiconductor; quantum well; laser theory

OCIS codes 140.5960; 230.5590; 270.3430; 250.5960

收稿日期: 2020-09-02; 修回日期: 2020-11-04; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(61790583, 61435012)、广东省重点领域研发计划(2020B0303020001)

* E-mail: zhangyu@semi.ac.cn; ** E-mail: liubing@baqis.ac.cn; *** E-mail: zcnium@semi.ac.cn

1 引言

带间级联激光器(ICL)是实现 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段中红外激光器的重要前沿,其在半导体光电器件技术、气体检测、医学医疗以及自由空间光通信等领域具有重要科学意义和应用价值,近年来,半导体带间级联激光器的量子阱能带理论设计方法和激光器制备核心技术得到迅速提升。半导体带间级联量子阱发光机理是以二类量子阱中的电子与空穴的带间辐射复合发光为主导,再通过电子注入区与空穴注入区形成级联放大,实现多个量子阱周期内电子与空穴的重复利用。

带间级联激光器是一种以 $6.1\ \text{\AA}$ 族体系[主要材料为砷化铟(InAs)、锑化镓(GaSb)、锑化铝(AlSb)等二元合金及其三元合金]为主,通过量子工程的能带设计及其材料外延、工艺制作而成的可以工作于中红外波段的激光器。带间级联激光器由于结合了传统的量子阱激光器较长的上能级载流子复合寿命以及量子级联激光器(QCL)通过级联结构实现较高内量子效率的优点,在中红外波段具有较大的优势。

2 带间级联激光器研究背景

2.1 带间级联激光器的意义

中红外波段包含了许多气体分子的吸收峰,对于气体分子而言,在中红外波段的中心吸收截面一般比其在近红外区的中心吸收截面高几个数量级,因此为了获得更高的灵敏度和更低的检测限,利用中红外的可调谐半导体激光器吸收光谱技术(TDLAS)可以实现对特殊或有毒气体的检测^[1-7]。常见的位于中红外波段的气体分子如图 1 所示^[8],诸如矿井气体甲烷(CH_4)分子吸收峰位于 $3260\ \text{nm}$,一氧化碳(CO)分子吸收峰位于 $4610\ \text{nm}$,二氧化碳(CO_2)分子吸收峰位于 $4230\ \text{nm}$,氯化氢(HCl)分子吸收峰位于 $3395\ \text{nm}$,溴化氢(HBr)分子吸收峰位于 $4020\ \text{nm}$,氮氧化物(NO_x)分子吸收峰位于 $2860\ \text{nm}$ 和 $3420\ \text{nm}$,二氧化硫(SO_2)分子吸收峰位于 $4020\ \text{nm}$,乙烷(C_2H_6)分子吸收峰位于 $3360\ \text{nm}$ 等。工作于中红外波段的带间级联激光器可以广泛地应用于气体检测中。

除了气体检测外,带间级联激光器也可用于军事领域中。红外半导体激光器由于体积小、效率高、易调制、环境适应性强等优点在军事领域得到了广泛应用。红外制导导弹已经从第一代红外寻的制导向

第四代 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 中红外波段凝视成像制导发展,该技术大大提高了红外制导导弹的灵敏度和抗干扰能力,使其获得了更远的攻击距离。更为重要的是,其在一定程度上使得传统的红外对抗手段诸如闪光灯、红外干扰弹等效能大大减小。此外,在海湾战争被击落的直升机中,被红外制导导弹击中的占到 80% ,相对应的对抗手段主要是红外光电对抗(IRCM),早期的 IRCM 系统使用的热转全向源由于能量分散、干扰效果差,在科索沃战争中一直没起到作用,新一代定向红外对抗(DIRCM)系统使用干扰能量更集中的激光照射导弹的导引头,大大提高了对抗成功率和安全距离。其根本方法就是基于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中红外半导体激光对抗武器系统,使得焦平面阵列探测器致盲失效甚至完全物理摧毁。原因除了 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 是一个大气窗口外,还有红外制导的原理是识别飞机的尾喷,典型的尾喷及其探测器是工作于 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的 InSb 或 PbSe 探测器,因此理想的 DIRCM 激光源也是输出波长在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中红外激光源。

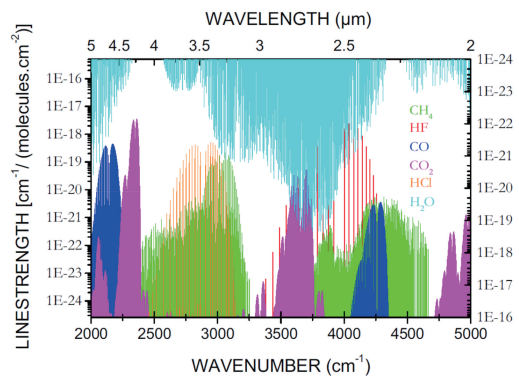


图 1 各种气体的吸收峰^[8]

Fig. 1 Absorption peaks of various gases^[8]

自由空间光通信(FSO)中的激光传输介质主要是大气,而大气中的气体分子和气溶胶颗粒对激光的吸收和散射会使相应波长的光的强度衰减。由此可知,自由空间光通信要合适的大气窗口即光在大气中传输几乎透明的波段,而 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的中红外波段刚好处于大气窗口内,因此带间级联激光器可以作为光发射机进行通信^[9],实现自由空间内的信息传输。

此外,中红外波段还可以应用于工业过程控制、临床呼吸诊断、红外景象投影、医学医疗和化学生物威胁探测等领域中。随着对中红外波段关注的增加,可以工作于中红外波段的激光光源越来越受到人们的重视,因而可以覆盖整个 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的带

间级联激光器也受到越来越多的关注。

2.2 带间级联激光器的技术优势

目前,可以实现中红外波段激光器的主要技术手段包括一类 (type-I) 量子阱 (QW) 砷化镓 (GaSb) 基的激光器及其形成的一类级联量子阱激光器,此外还有目前在长波红外和太赫兹波段非常热门的量子级联激光器。经过多年的研究和发展,一类量子阱砷化物激光器的主要优势波段在 $2\ \mu\text{m}$ 波段附近^[10-22],其在 $2\ \mu\text{m}$ 已经达到目前最高接近 $2\ \text{W}$ 的大功率输出,采用数字合金结构的光电转换效率可达 27.5% ^[23]。然而,对于砷化物量子阱激光器来说,由于俄歇复合以及价带限制不足等问题,导致其在 $2\ \mu\text{m}$ 波段向长波长扩展的过程中遇到很多的问题。为了获得较长波长 $3\ \mu\text{m}$ 以上的量子阱激光器,需要将量子阱从三元合金 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{Sb}$ 增加为四元合金 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$,然而在这种情况下引入 As 会导致量子阱材料的能级整体下移,进而导致空穴的限制不足,为了解决这个问题,需要进一步在势垒层中引入 In 组分,使得原本的四元合金势垒 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 改变为五元合金势垒 $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}_z\text{Sb}_{1-z}$,无论是从量子阱还是从势垒的角度来讲,这无疑增加了材料生长的难度。目前可以工作于 $3\ \mu\text{m}$ 附近的量子阱砷化物激光器仍处在研究当中,虽然取得了一些进展,但是仅波长从 $3\ \mu\text{m}$ 向 $3.5\ \mu\text{m}$ 扩展的过程就已经困难重重,功率也仅有百毫瓦量级^[24-32]。目前逐渐兴起的砷化物一类量子阱级联激光器也在这个波段取得了一些进展,其在 $2\ \mu\text{m}$ 波段经过短暂的发展研究就已经可以实现接近 $2\ \text{W}$ 的大功率输出^[33],而在 $3\ \mu\text{m}$ 波段也已经可以达到 $960\ \text{mW}$ 的大功率输出,其能带图如图 2 所示,然而随着波长增加,其输出功率衰减仍然很快,同传统的量子阱激光器一样,基本只能工作在 $3\sim 3.5\ \mu\text{m}$ 波段^[34-41]。

对于量子级联激光器来说,其主要的优势波段在 $4.5\ \mu\text{m}$ 以上及太赫兹波段^[42-55],其在这些波段已经取得了很多非常突出的成果,无论是双声子共振、非共振抽取还是浅阱设计,无论是单纵模还是大功率。然而其在波长向短波长扩展时也会遇到问题,由于量子级联激光器本身为子带间跃迁,为了获得更小的波长需要导带中的能级间距更大,这要求势垒材料的导带带阶更大,而且需要更大的应变来增强载流子的限制。但是更大的应变会导致材料弛豫,并且随着波长的减小,非直接谷间载流子泄露变得更加显著,导致量子级联激光器在 $4\ \mu\text{m}$ 波段以

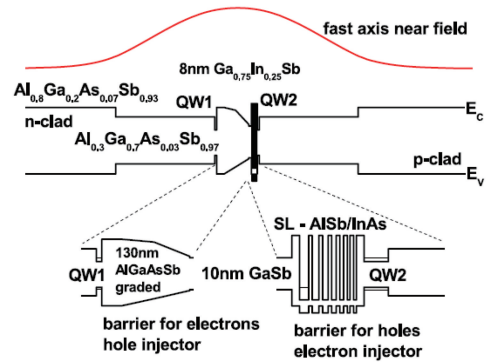


图 2 量子阱级联激光器能带图^[39]

Fig. 2 Energy band diagram of quantum well cascade laser^[39]

下的材料选择、能带设计以及材料生长都遇到了严峻的挑战。目前美国西北大学在 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段的量子级联激光器已经取得了一些进展^[56-59],但是产品稳定性明显比不上原本 $4.6\ \mu\text{m}$ 及以上的优势波段,因此其 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段仍处在研发阶段。图 3 为工作在 $3\ \mu\text{m}$ 的量子级联激光器的能带图。

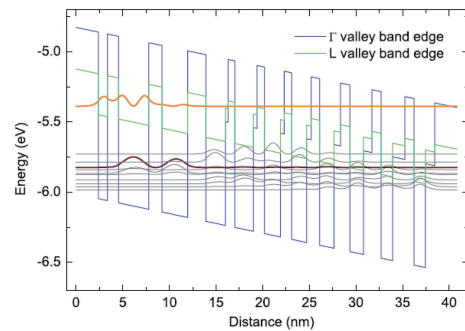


图 3 波长为 $3\ \mu\text{m}$ 量子级联激光器的导带及其能级^[59]

Fig. 3 Conduction band and energy level of $3\ \mu\text{m}$ QCL^[59]

如上所述,对于一类量子阱激光器及其级联激光器,波长很难做到 $3.5\ \mu\text{m}$ 波段以上,而对于量子级联激光器来说,其波长做到 $4\ \mu\text{m}$ 以下又有很多技术瓶颈,因此市场急需一种可以覆盖整个 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段的激光器,而带间级联激光器所采用的二类 (type-II) 量子阱 $\text{AlSb/InAs/InGaSb/InAs/AlSb}$ 刚好可以完整地覆盖整个 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 甚至 $5\ \mu\text{m}$ 以上波段,进一步推动了带间级联激光器的研究。从 2008 年美国海军实验室 (NRL) 成功研制出第一台室温连续激射的带间级联激光器之后,更是取得了迅猛的发展。在此之后,包括德国夫琅禾费研究所和中国科学院半导体研究所都接连报道了室温连续激射的带间级联激光器的成功研制^[60-61],进一步推动了带间级联激光器的发展。

2.3 带间级联激光器的发展历史

带间级联激光器的概念是杨瑞青首次在 1994

年 8 月召开的第七届国际超晶格微结构器件会议的张贴报告中提出的^[62]。图 4 为早期设计的带间级联激光器的能带图。其中值得注意的是,1994 年 4 月贝尔实验室在《科学》上报道了第一个子带间量子级联激光器^[63]。带间级联和量子级联激光器的研究都源于早期对于半导体超晶格的研究以及通过子带间跃迁实现激光器的探索^[64-65]。然而在带间级联激光器提出的 2~3 年内,空穴注入区就已经提出并加入到了带间级联激光器的结构中^[66]。同时,W 型二类量子阱的概念也被提出,其通过两个量子阱形成对称结构以增加波函数交叠,并取代了原先的单边型的二类量子阱^[67]。空穴注入区和 W 型有源区的设计直到今天也一直采用。

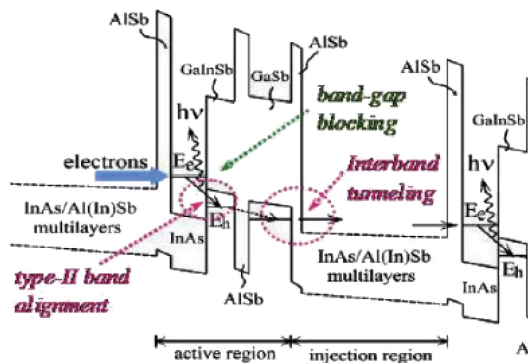


图 4 早期的带间级联激光器有源区能带图^[64]

Fig. 4 Energy band diagram of active region of early time ICL^[64]

直到 1997 年,第一台可达 170 K 低温工作的带间级联激光器报道出来,由休斯顿大学和桑迪亚国家实验室合作完成^[68],设计上采用了 20 个级联周期,当时采用的结构现在看来明显不是最优,因此表现出了较高的阈值电流(80 K 时为 4.17 kA/cm²)以及较低的外微分量子效率。此后对于二类量子阱的研究取得了一定的发展^[69-72],而带间级联激光器也在 1998~2000 年工作温度逐渐提升至 250~286 K^[73-75],微分量子效率超过了传统极限的 100%,从而证实了级联过程。

1999 年,美国陆军实验室(ARL)也加入了带间级联激光器的研发,随着对材料质量和器件理解的提高,该研究取得了显著的进展,其量子效率可达 600%,峰值功率可达每个端面 6 W,功率转化效率可达 14%,并具有较好的重复性^[76-77]。经过进一步的发展,里程碑式的突破是在 2002 年,Yang 等^[78]实现了第一台室温脉冲激射的带间级联激光器,由 18 个周期构成,阈值电流大于 6 kA/cm²。

2002 年之后,带间级联激光器在美国喷气推进实验室(JPL)取得了更加快速的发展^[79-82],在低阈值电流、高工作温度以及长波长等方向上都取得了瞩目的成果。其中最重要的是 2005 年,研究人员在减小其脉冲工作的阈值电流密度到 630 A/cm²,级联数为 12 个周期,连续波工作温度达 264 K 后,制作出的单纵模分布反馈式激光器(DFB)可以实现甲烷气体的检测,并最终于 2007 年交付美国国家航空航天局(NASA)的好奇号进行火星的甲烷探测^[83]。

2008 年,美国海军实验室(NRL)也经过多年的优化和发展^[84-94],终于实现了里程碑式的第一台室温连续激射的带间级联激光器^[95]。其连续波最高工作温度可达 319 K,激射波长为 3.7 μm。该激光器具有 5 个级联周期以及 200 nm 的分别限制层(SCL),图 5 为其有源级联区的能带图。在此之后,美国海军实验室又进行了一些研究,包括长波长、材料生长质量、载流子寿命和俄歇复合等方面^[96-101]。

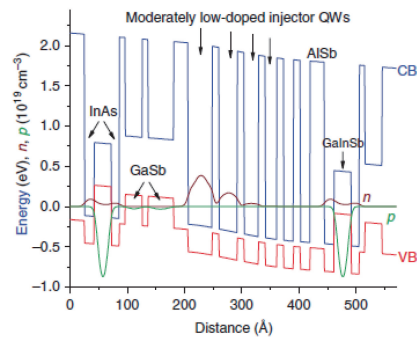


图 5 带间级联激光器有源区能带图^[102]

Fig. 5 Energy band diagram of active region of ICL^[102]

2011 年,美国海军实验室在材料设计的基础上,又进一步提出了“载流子再平衡”的概念^[102],这一新概念的提出解决了有源区中电子和空穴的数量不均等问题,通过改变电子注入区中的掺杂浓度,平衡有源区中过高的空穴浓度。这个新概念使得带间级联激光器连续波工作温度高达 109 °C,激射波长约为 3.9 μm,并且阈值电流密度降为原来的一半,在 300 K 下仅为 170 A/cm²,在 25 °C 时,其 5 个级联周期的窄脊器件连续波输出功率高达 158 mW,是之前的三倍,功率转换效率也提高到了 13.5%,与当时已报道的最好的量子级联激光器功耗相比小了两个数量级(在 25 °C 下其最低功耗仅有 30 mW)。在载流子再平衡的基础上,美国海军实验室在接下来一段时间又取得进一步成果^[103-108]。

之后,德国的伍兹堡大学在载流子再平衡的基础上,经过一段时间的发展,提出了短注入区的设

计^[109-112]。在 2013 年,对带间级联激光器的过渡区进行了特殊的设计,使得具有 10 个周期的带间级联激光器的室温连续阈值电流密度低至 98 A/cm²,这一数据比当时最好的量子级联激光器要低一个数量级^[113]。同年,伍兹堡大学提出了使用 AlGaAsSb 四元合金替代 InAs/AlSb 超晶格的方案,也取得了带间级联激光器的室温连续激射^[114]。

2014 年,美国海军实验室经过多年的优化和发展,并通过增加有源级联区的周期数及分别限制层的厚度进一步提高了带间级联激光器的器件指标,其室温连续输出功率达到 592 mW,其输出特性以及输出波长如图 6 和 7 所示。这也是目前带间级联激光器输出功率的最高指标^[115]。并在 2015 年,成功制作级联数为 10 的带间级联激光器^[116]。

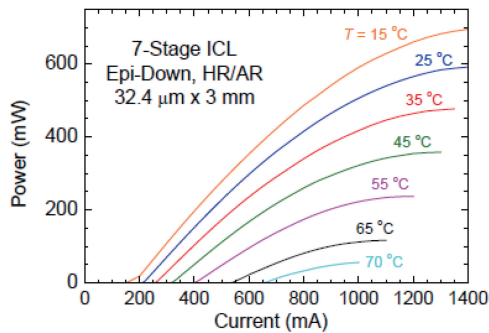


图 6 NRL 带间级联激光器电流-输出功率曲线^[115]

Fig. 6 Current-output power curves for the ICL of NRL^[115]

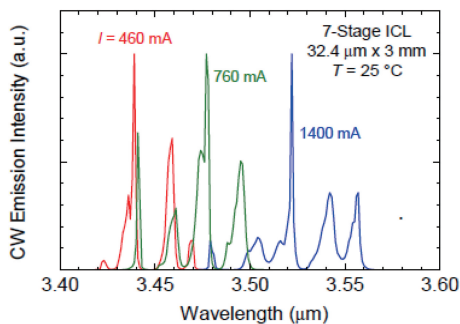


图 7 NRL 带间级联激光器的激射光谱^[115]

Fig. 7 Emission spectra for the ICL of NRL^[115]

3 带间级联激光器的工作原理

对于传统的二极管激光器,电子和空穴是从 p-n 结的相反方向注入的。在理想的情况下,对于一个多量子阱(MQW)而言,载流子的注入是均匀的,也就是说,其实际上是并联到一起的,注入的所有载流子将会均等地分布在不同的量子阱当中,因此一对电子和空穴只能产生一个光子,理论上,其内量子效率永远不会大于 100%。而对于级联结构来

讲,通过串联多个量子阱,相同的电流将会流过每一个量子阱,当每一个电子空穴对通过一个量子阱时,都可以发出一个光子。当有 N 个量子阱串联到一起时,理论上一对电子和空穴对可以循环利用并产生 N 个光子,使其理论上的内量子效率最大可以达到 $N \times 100\%$ 。除此之外,由于串联结构会导致较低的工作电流,从而引入较高的阈值电压,相当于利用较高的阈值电压来换取较低的阈值电流。实际上根据焦耳定律,来自于寄生电阻的电功耗小于传统的多量子阱,因此级联结构激光器的运行效率更高。而且对于多量子阱激光器而言,尤其是当量子阱数量逐渐增多时,电子和空穴在多量子阱中的注入会发生明显的不均匀,电子更倾向于分布在靠近 n 面的量子阱中,而空穴更倾向于分布在靠近 p 面的量子阱中,这种不均匀分布尤其以空穴为重,主要是材料中电子和空穴的迁移率不同导致的^[117-119],这种载流子的不均匀分布将会导致一个量子阱中过多的电子或者空穴的浪费,进而影响器件的性能。对于一个级联结构的激光器来说,串联的连接方式确保了相同数量的载流子可以注入到每一个有源区中,使得阈值载流子浓度低于常规并联二极管激光器的需求。因此,能带填充效应和损耗在级联激光器中得以减少。综上,从理论上讲,级联结构相比于传统的多量子阱激光器具有一定的优势。

对于同样采用了级联结构的量子级联激光器,由于量子级联激光器本身是通过子带间复合发光,其电子的跃迁和输运都在导带中完成,所以对于 QCL 来讲,快速声子散射在其中占据了主导的作用。而对于带间级联激光器来说,由于采用和传统的量子阱激光器相似的基于电子和空穴的辐射复合发光,所以其电子的带间跃迁不需要快速声子散射的参与,而且粒子数反转也可以在带间级联激光器中形成,不需要像量子级联激光器一样采用特殊的结构去输运较低能级上的载流子来实现粒子数反转。

综上所述,带间级联激光器本质上结合了传统的量子阱激光器的电子和空穴辐射复合的优势以及量子级联激光器的采用级联结构提高内量子效率的优势,因此在理论上,其中红外波段更具优势。图 8 为带间级联激光器完整的器件结构示意图。采用的材料体系主要为以 InAs、AlSb、GaSb 为主的 6.1 Å 族体系,由于该材料体系本身与 GaSb 衬底近晶格匹配,而且在材料上 InAs 相对于 GaSb 可以提供一定的张应变,AlSb 相对于 GaSb 可以提供一

定的压应变,因此 InAs 与 AlSb 在一定程度上可以进行应变补偿,而带间级联激光器更是利用了这个特点。如图 8 所示,其完整的器件结构主要由分子束外延(MBE)生长于 GaSb 衬底上,之后依次制备 n 型的 InAs/AlSb 超晶格下波导包层、n 型的 GaSb 下分别限制层、有源级联区、n 型的 GaSb 上分别限制层、n 型的 InAs/AlSb 上波导包层,以及最后的重掺杂 n 型 InAs 盖层。其中,在不同的大区域之间需要插入一层渐变 InAs/AlSb 超晶格的过渡层来降低不同区域之间的异质结电压降。图 9 为插入过渡层后带间级联激光器全器件结构的能带示意图。

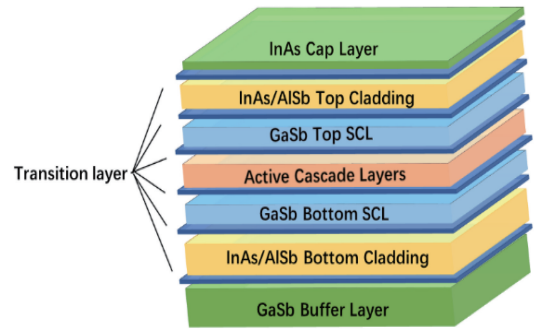


图 8 带间级联激光器的全结构示意图^[61]

Fig. 8 Full structure diagram of the interband cascade laser^[61]

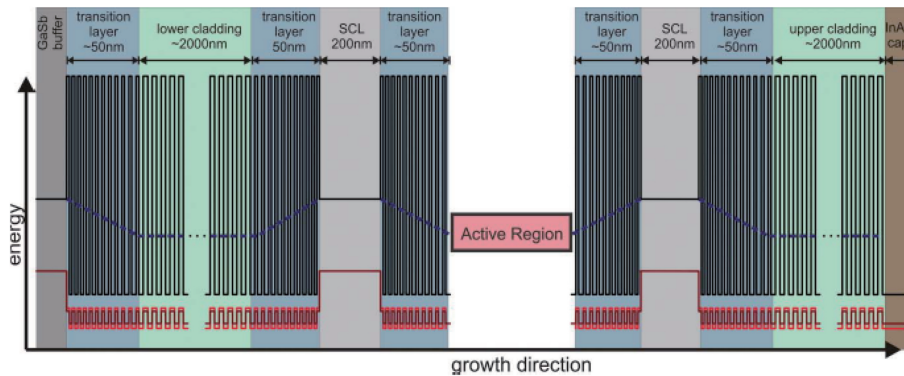


图 9 带有过渡层的带间级联激光器的能带示意图^[109]

Fig. 9 Energy band diagram of interband cascade laser with transition layer^[109]

对于带间级联激光器来讲,其最关键的设计莫过于有源级联区的设计,如图 10 所示,为 1.5 个周期的带间级联激光器有源级联区的能带图。其一个周期的级联区包括 AlSb/InAs/InGaSb/InAs W 型量子阱, GaSb/AlSb 空穴注入区以及 InAs/AlSb 电子注入区。其中电子和空穴的复合发光是在二类的 W 型量子阱中进行的,从图中可以看到,电子的波

函数主要分布于 InAs 电子阱中,而空穴的波函数主要分布于 InGaSb 空穴阱中,电子与空穴的复合是一种斜跃迁的带间辐射复合,其复合几率与电子和空穴的波函数交叠成正比,所以其量子阱设计成 W 型而不是单边的二类量子阱的主要目的是增加电子和空穴的波函数交叠^[67],这种 W 型量子阱的设计使得电子和波函数的交叠从原来的 17% 提高到了 42%,进而提高了电子和空穴的复合几率。此外,通过调整 W 型量子阱中的 InAs 电子阱的厚度或 InGaSb 空穴阱的厚度可以有效地调节其发光波长,从远红外覆盖到整个中红外波段。通常在实际器件中,W 型量子阱中两个 InAs 电子阱的厚度也不完全相同,以此保证在正向电压下不同量子阱中能级位置相一致。

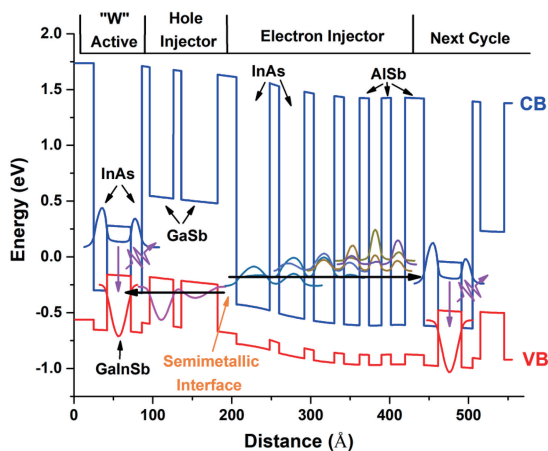


图 10 ICL 的有源级联区的能带图^[61]

Fig. 10 Energy band diagram of cascade region of ICL^[61]

在带间级联激光器有源级联区的设计中,另一个值得注意的地方是半金属界面(SMIF)。在半金属界面的两端是电子注入区的 InAs 电子阱以及空穴注入区的 GaSb 空穴阱,在常温下,InAs 体材料的导带边比 GaSb 体材料的价带边还低 0.2 eV,如图 11 所示^[120],如果对半金属界面施加一个电场,则 InAs 导带边中的电子子带比 GaSb 价带边中的空

穴子带还高,使得 InAs 和 GaSb 中分别产生大量的电子和空穴。产生的电子将会通过 InAs/AlSb 电子注入区注入到下一个周期的 W 型有源区的 InAs 电子阱中,产生的空穴将会通过 GaSb/AlSb 空穴注入区注入到 InGaSb 空穴阱中,而注入的电子和空穴将会进一步在 W 型量子阱中进行带间辐射复合发光,并通过下一级的半金属界面注入到下一级的量子阱中。当然,也可以认为 InAs/GaSb 是一个带间隧穿结^[121-122],量子阱中电子辐射跃迁到价带之后,通过 InAs/GaSb 二类破缺带隙的能带排列促成了带间隧穿并隧穿到下一个周期的有源级联区中,实现电子空穴对的循环过程。

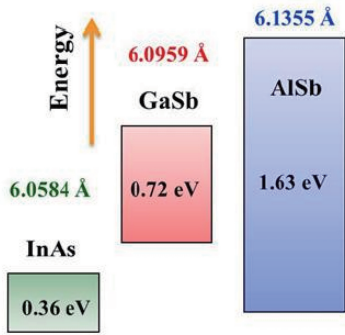


图 11 InAs、GaSb 和 AlSb 的能隙、能带边和晶格常数示意图^[120]

Fig. 11 Energy gap, energy band edge, and lattice constant of InAs, GaSb, and AlSb^[120]

4 带间级联激光器的关键设计

4.1 “短注入区”的设计

带间级联激光器的有源级联区作为核心发光区域,其设计尤其是级联结构的设计显得尤其重要。在 2010 年,德国的伍兹堡大学课题组提出了缩短注入区的设计^[109],通过将注入区的第一个 InAs 阱的厚度缩短为 6.2 nm,使得后续的 InAs 厚度都逐渐减少,最后一个 InAs 阱的厚度仅有 2.5 nm,而且这种缩短注入区的设计使得 InAs/AlSb 的对数减少了一对,最终注入区总厚度缩短为 63 nm,比原先厚度为 75 nm 的注入区减小了 16%。此外,由于注入区厚度的减小,使得整个有源级联区的厚度也整体缩小,进一步提高了有源区中的光学限制因子,有源级联区中的光学限制因子提高了 10%~15%,增加了器件的增益。除此之外,缩短注入区的设计也使材料生长变得更为简单,对于较短的 InAs 厚度,可以通过调整界面的成分方便地补偿 InAs 带来的张应变,而不需要在 AlSb 势垒中增加 In 组分以平衡

应变,这进一步增加了 AlSb 势垒的限制作用。最终的结果显示,器件的阈值电流相比于原先的设计减小了一半,图 12 为伍兹堡大学通过缩短注入区设计后的器件结果。

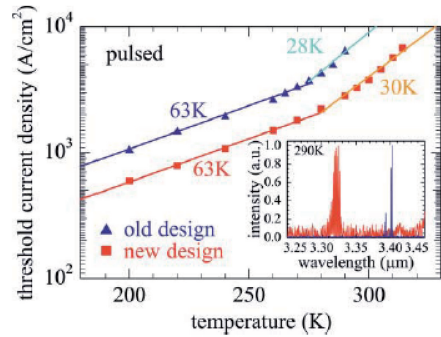


图 12 短注入区设计的阈值电流与温度关系图^[109]

Fig. 12 Relationship between threshold current and temperature for short injection zone design^[109]

4.2 载流子再平衡的设计

在 2011 年,美国海军实验室提出了载流子再平衡的设计^[102]。在先前的带间级联激光器的设计中,电子注入区几乎都是中等掺杂的,掺杂浓度大概在 10^{17} cm^{-3} 量级,而美国海军实验室通过自洽的准平衡模型可知,注入的电子更倾向于分布在电子注入区而不是 W 型量子阱的 InAs 电子阱中,注入的空穴却更倾向于 W 型量子阱的 InGaSb 空穴阱中,使得 W 型有源区的空穴数量要远远大于电子的数量。除非俄歇复合过程在载流子寿命中占据主要地位,否则较大的空穴/电子比一定会减小增益,而且不可忽略的自由空穴吸收也会增加器件的内部损耗。如图 13(a)所示,可以明显看到,W 型量子阱中空穴的分布要大于电子的分布。而解决这个问题的办法就是在 InAs/AlSb 电子注入区中进行重掺杂,如图 13(b)所示,掺杂浓度大概在 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 量级,从而使电子分布向 W 型量子阱转移,其结果使得电子和空穴的阈值载流子浓度更加对称,内部损耗也由 12 cm^{-1} 缩小为 8 cm^{-1} ,阈值电流密度降低为原来的 50%,在室温下仅为 170 A/cm^2 ,同时输出功率也得到了明显的提升,具有 5 个级联周期的窄脊型带间级联激光器输出功率达到之前的 3 倍,为 158 mW,功率转换效率也得到提升,达到 13.5%,是当时的最高水平。这种载流子再平衡的设计使得器件的功耗进一步下降,其室温下最低功耗仅有 30 mW,功耗密度比当时最好的量子级联激光器小两个数量级,因此 ICL 可以在一些便携场合或是电池供电设备中得以使用。

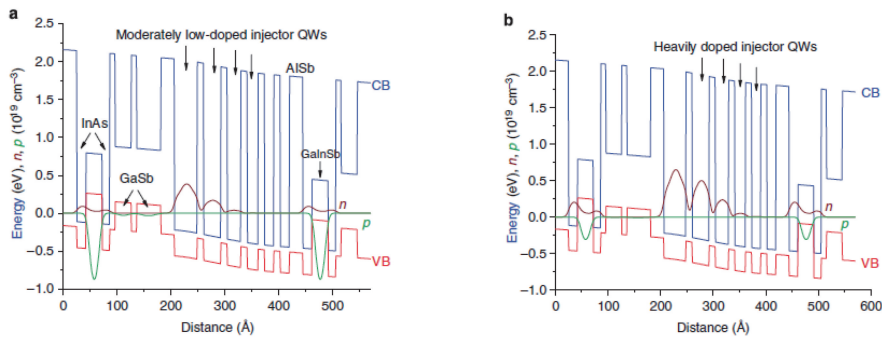


图 13 载流子再平衡设计的能带和载流子分布图^[102]。(a)电子注入区中等掺杂浓度为 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ；
(b)电子注入重掺杂浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Fig. 13 Energy band and carrier distributions of rebalancing of carriers^[102]. (a) Electron injection zone with medium doping concentration of $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$; (b) electron injection zone with heavy doping concentration of $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

自载流子再平衡的设计提出以来,带间级联激光器在此基础上取得了较快的发展,在 2012 年,美国海军实验室就将带间级联激光器的波长拓展到了 $4.2 \mu\text{m}$ 波段,并于 2014 年在载流子再平衡的基础上得到最大功率为 592 mW 的室温连续大功率输出。

4.3 分别限制层的设计

带间级联激光器的器件是制备于 GaSb 衬底之上的,由于 GaSb 衬底的折射率很高 ($n_s = 3.78$),为了防止光学模式泄漏到衬底内,需要提供较厚的下波导包层。其波导包层结构大多是由 InAs/AlSb 超晶格组成的,其折射率 $n_c = 3.30$,然而,对于带间级联激光器的有源级联区,其材料也大多由 InAs/AlSb 组成,并含有少部分的 GaSb 材料,使得有源级联区的折射率 ($n_a = 3.45$) 高于波导包层,但是折射率差距不是很大。如果不采取特殊手段,光学模式将会在波导包层中扩散,导致有源区的光学限制不足。为了解决这个问题,带间级联激光器引入了分别限制层,分别限制层的材料为 n 型掺杂的 GaSb 材料,由于 GaSb 本身的折射率(约为 3.8)要高于有源级联区,所以对于器件的中心区域其平均折射率被拉高,进而导致泄漏到包层中的光学模式衰减很快。

图 14 为 7 个级联区分别限制层厚度为 800 nm 的带间级联激光器的折射率分布以及横电波 (TE) 基模分布图。其中,分别限制层中的光学限制接近 77%,中心区域为 n 型掺杂,其掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,而边缘区域掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,以此降低界面处的异质结电压降并减小自由载流子引起的内部损耗。

同样地,波导包层也是非均匀掺杂,在靠近分别限制层的区域,掺杂浓度约为 10^{16} cm^{-3} 量级,而更外侧的波导包层掺杂浓度通常为 10^{17} cm^{-3} 量级。

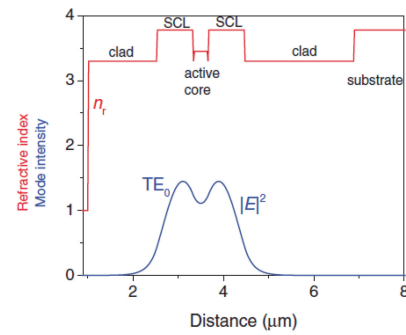


图 14 7 个级联区 800 nm 的 SCL 的折射率以及光 TE 模式分布图^[115]

Fig. 14 Refractive index and optical TE mode distribution of SCL at 800 nm in 7 cascade regions^[115]

其目的是使用最小的串联电阻来交换自由载流子吸收损耗。波导包层中的光学模式通常约为 6%,其外部的重掺杂区域引起的损耗几乎可以忽略。有源区内的光学限制通常接近 14%,大部分通过分别限制层可以将光学模式较好地限制在波导层以内。

图 15 为不同分别限制层厚度的情况下,有源

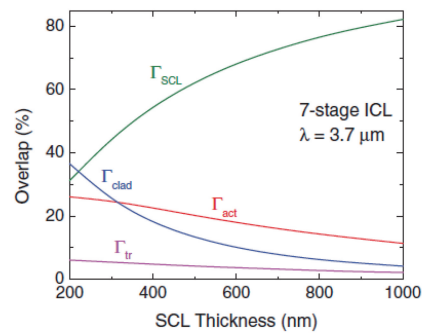


图 15 有源区、波导包层、分别限制层、过渡层的光限制因子^[115]

Fig. 15 Optical confinement factor for active region, waveguide cladding, separate confinement layers, and transition layer^[115]

区、波导包层、分别限制层以及过渡层中光限制因子的变化。可以看到,有源区和波导包层中的限制因子随着分别限制层厚度的增加而减小,而分别限制层中的光学限制明显增多。根据美国海军实验室的研究,目前较好的分别限制层厚度接近 800 nm,可以提供足够的光限制因子。2014 年,美国海军实验室报道的输出功率最大的带间级联激光器也是采用 800 nm 的分别限制层,可见光学限制对于带间级联激光器的影响很大。

5 带间级联激光器的技术难点

5.1 带间级联激光器的结构和能带设计

带间级联激光器虽然早在 1994 年就被提出,但是直到 2008 年才实现室温连续激射。然而几乎在同一时期出现的量子级联激光器已经取得飞速的发展,并在长波红外以及太赫兹波段占据了主要优势。一方面是由于现在对带间级联激光器的研究较少,只有少数几个研究单位在进行这方面的研究,诸如美国海军实验室、德国伍兹堡大学以及俄赫拉荷马大学的研究组等;另一方面是由于带间级联本身设计十分复杂,其内部的原理有些还没有统一的解释,直接导致了带间级联激光器在研究进展上十分缓慢。然而,每一次对带间级联激光器的更深理解都能带动带间级联激光器本身取得一些显著的进展,比如“载流子再平衡”的设计,以及增加分别限制层的厚度来提高光学限制因子等,这些设计促使带间级联激光器在发展过程中向前迈了一大步。

然而实际上,带间级联激光器本身一定还有较多需要仔细考虑和优化的地方,还需要进行能带设计和材料设计,因此要求我们对带间级联激光器本身的理解达到更高的层次。目前来看,带间级联激光器在能带设计上的难点首先是级联结构的设计,为了实现电子和空穴的重复利用,需要对电子注入区和空穴注入区进行设计,尤其是在更长波长或更短波长下,其电子注入区和空穴注入区的能带结构也需要跟随波长进行一定的微调。这在一定程度上增加了设计的复杂度。

此外,为了降低异质结的电压降,需要在各个不同的区域之间(比如衬底与波导包层之间、波导包层和分别限制层之间、分别限制层和有源级联区之间、上波导包层和上 InAs 盖层之间)插入总共 7 组过渡层,这些过渡层需要进行特殊的设计来实现不同区域之间的过渡,而且这些过渡层的设计将会对最终的器件结果产生很大影响。2013 年,德国伍兹堡大

学通过对过渡层的精确设计,实现了低阈值电流密度达到 98 A/cm^2 ^[113]。

在设计上还需要进一步考虑的是各个区域的掺杂浓度,目前来看,虽然美国海军实验室已经在掺杂浓度方面进行了很多研究,比如在分别限制层两端和中间其掺杂浓度不同,在波导包层上具有较高光学模式的地方进行轻掺杂而具有较低光学模式的地方掺杂浓度较高等,以此来降低内部损耗和异质结电压降。但是这些掺杂浓度的设计也同样还有可以调节的余地,通过对不同区域尤其是中心处、界面处和过渡层处的掺杂浓度进行改变,将会对器件的性能产生影响。

5.2 带间级联激光器的材料生长

由于带间级联激光器的结构特殊,整个器件结构的波导包层、过渡层以及有源级联区大多是由 InAs/AlSb 超晶格组成,其超晶格的对数高达上千对,短周期超晶格的高频次生长给分子束外延技术带来了严峻的挑战。一方面,高频次的高精细超晶格对 MBE 设备的要求较高,需要快速、无错误的高频重复开合;另一方面,长时间的超晶格材料生长必然导致源炉的温度和 MBE 腔室内发生抖动,需要对 MBE 设备情况进行一定的监控。

此外,在具体器件的生长过程中,InAs 的生长窗口较窄,最优生长温度较低,而 AlSb 的高质量生长需要较高的温度,这要求对 InAs/AlSb 超晶格的生长条件进行折中考虑。此外,由于 InAs/AlSb 超晶格材料之间没有共同的原子,其超晶格界面处有可能出现诸如 InSb、AlAs 等界面,不同的界面类型将会对超晶格的表面形貌、电学和光学性质产生不同的影响^[123-125]。通过五族元素浸润法或表面迁移率增强法可以直接对超晶格的界面类型进行控制,然而这种控制又会进一步增加材料生长的复杂度,并对生长时间产生较大的影响。而且,InAs、AlSb 均不与 GaSb 衬底晶格匹配,需要调整 InAs 和 AlSb 的比率来补偿每层的应变,生长过程中即使很小的应变也会导致较厚的波导包层发生弛豫。同时,界面的控制也会对应变产生一定的影响,在具体的生长过程中需要对这些情况进行考虑。

为了增加光学限制,器件中需要生长较厚的 GaSb 体材料分别限制层,然而 GaSb 本身的最优生长温度较高,而 InAs/AlSb 超晶格以及有源级联区的最优生长温度较低,为了给最重要的有源级联区提供一个平整的表面,需要在生长过程中对各个区域的生长温度进行控制,以达到最优的效果。此外,

在有源级联区以及超晶格的生长过程中,As 束流将会导致腔室内的背景变差,进一步将会影响超晶格和有源区及其界面的材料生长质量。因此在材料生长过程中,对 As 束流的控制也是一个关键。

所以,带间级联激光器对材料生长要求极高,需要综合考虑各个方面,可以利用光学显微镜、原子力显微镜(AFM)、双晶 X 射线衍射(XRD)来对材料的生长质量进行表征。图 16 为带间级联激光器 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 原子力显微镜照片,其表面均方根(RMS)粗糙度仅为 1.33×10^{-10} 。图 17 为完整带间级联激光器的 X 射线衍射图,InAs/AlSb 超晶格对应于图中的尖峰,较小的峰为有源级联区,右侧的宽峰对应于 $20\ \text{nm}$ 的 InAs 盖层。可以看到,InAs/AlSb 超晶格与 GaSb 衬底晶格匹配,有源级联区卫星峰明显,代表较好的材料生长质量。

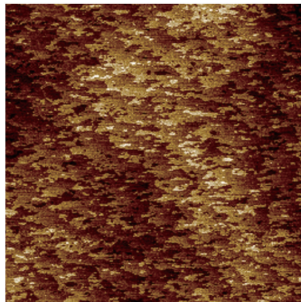


图 16 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 带间级联激光器的原子力显微镜照片^[61]

Fig. 16 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ atomic force microscope photo of interband cascade laser^[61]

5.3 带间级联激光器的工艺制作

带间级联激光器的制作工艺与常用的边发射激

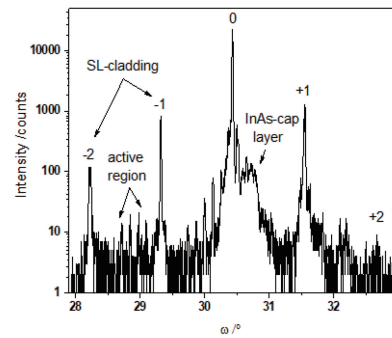


图 17 带间级联激光器的 HR-XRD[004]衍射曲线^[61]

Fig. 17 HR-XRD[004] diffraction curve of ICL^[61]

光器制作工艺基本相同,然而由于带间级联激光器的组成大部分为 InAs/AlSb 超晶格,因此电流在穿过超晶格的波导包层和有源级联区时,在材料的生长方向上会遇到较大的电阻,这种各向异性导致电流非常容易在超晶格中横向扩散。为了防止电流的横向扩散,通常带间级联激光器的脊条刻蚀深度大于传统的量子阱激光器,需要刻蚀到下分别限制层,也就是刻蚀的位置要超过有源级联区。这种深刻蚀最终会导致器件具有更低的阈值电流密度,从而提高器件的性能。此外,超晶格的干法刻蚀也对刻蚀条件提出一定的要求,为了获得较好的侧壁,需要调整材料的刻蚀条件,并且通常还要附加一段时间的化学湿法刻蚀来平滑侧壁并去除污染物。图 18 为不同刻蚀条件下带间级联激光器的侧壁形貌的扫描电子显微镜(SEM)图,插图是低倍下侧壁全形貌。可以看到,在不同的刻蚀条件下,不同材料的选择比不同,因此侧壁形貌不同,这种不同最终影响器件性能和光束质量,进而影响器件亮度^[126]。

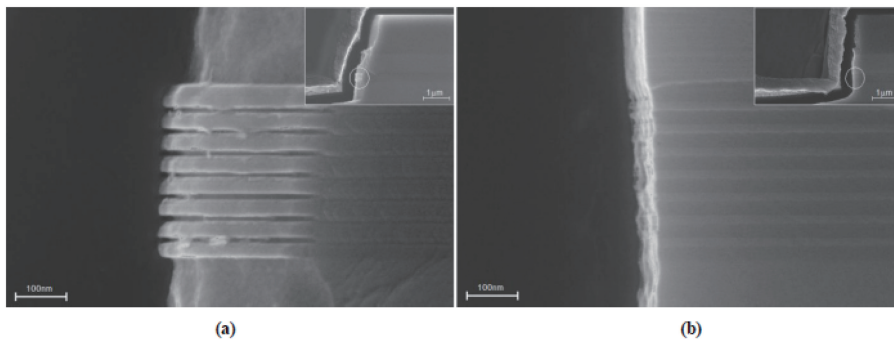


图 18 七个级联周期的带间级联激光器的 SEM 侧壁形貌图。(a) 甲烷基刻蚀;(b) BCl_3 基刻蚀^[126]

Fig. 18 SEM sidewall topography of an interband cascade laser with seven cascade cycles.

(a) Methane-based etching;(b) BCl_3 -based etching^[126]

此外,与量子级联激光器一样,带间级联激光器的散热也是影响器件性能的一个关键因素。通常,在沉积外延面一侧的金属后,还需要电镀 $5\ \mu\text{m}$ 厚

的金层,加强器件的散热。对于绝缘层也会采用具有较高热导率的 Si_3N_4 来代替热导率相对较低的 SiO_2 ,并将厚金面采用倒焊工艺,缩短级联区与高热

导系数的热沉之间的距离,显著提升器件的散热能力,进一步降低连续波模式下的器件阈值电流,提升工作温度,从而增加出光功率。

6 结束语

随着带间级联激光器输出功率的增加,考虑到激光器的实用性,光束质量因子以及亮度开始受到研究者的关注。具有 5 个级联区、腔长为 4 mm、后腔面脊宽为 $5.5\ \mu\text{m}$ 、前腔面为 $63\ \mu\text{m}$ 、taper 角度为 0.42° 的带间级联激光器锥形器件的光束质量因子 $M^2=2.3$,亮度 $B=175\ \text{mW}^{[107]}$ 。此外,为了提高光束质量,也会将带间级联激光器的脊条做成波纹侧壁来抑制高阶模式,美国海军实验室通过峰谷差别为 $1\ \mu\text{m}$ 、周期为 $2\ \mu\text{m}$ 的波纹侧壁来提高光学限制因子^[115]。

此外,单纵模的 DFB ICL 也得到了广泛的研究。2009 年,第一台室温连续激光的 DFB ICL 通过 4 阶光栅被制作出来,最高单模工作温度达 $40\ ^\circ\text{C}^{[127]}$ 。2014 年,实现了 $5.2\ \mu\text{m}$ 的 DFB ICL,用来实现氮氧化物的气体检测,其驱动功率仅为 $138\ \text{mW}^{[128]}$ 。此外,通过电子束曝光(EBL)制作的一阶 Ge 光栅也被报道出来,其在 $40\ ^\circ\text{C}$ 下最大单模功率可以达到 $27\ \text{mW}$,调谐范围大于 $25\ \text{nm}^{[129]}$ 。目前 Nanoplus 已经可以提供 $3\sim 6\ \mu\text{m}$ 的 DFBICL 产品,在 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段已经可以实现超过 $10\ \text{mW}$ 的输出^[130-132]。

同时,带间级联激光器的波长也在向着小于 $3\ \mu\text{m}$ 、大于 $4\ \mu\text{m}$ 的方向发展。在此波段,仍需要进行更多的研究来扩展 ICL 的工作波长。目前带间级联激光器已经基本可以实现 $2.7\sim 5.9\ \mu\text{m}$ 的室温及室温以上的连续波模式工作^[133-134]。同时,俄赫拉荷马大学在 InAs 等离子波导上的研究使带间级联激光器的工作波长进一步扩展,在低温下已经可以实现接近 $10\ \mu\text{m}$ 的激光输出^[135-137]。

此外,带间级联激光器的设计理念也被多种器件所采用。采用类似结构的垂直腔面发射激光器(VCSEL)也已经实现 $2.6\ \mu\text{m}$ 的激光波长^[138],而激光波长在 $3\ \mu\text{m}$ 的带间级联 LED(ICLED)也已经实现室温工作,且输出功率大于 $1\ \text{mW}^{[139-140]}$ 。同样,基于量子工程的带间级联结构红外探测器(ICIP)的光电器件可以克服载流子扩散长度的限制,高温、高速工作,而且具有低噪声的优点,初步的研究结果表明,带间级联红外探测器可以在 $400\ \text{K}$ 以上温度环境中工作^[141-144]。另外,有关带间级联结构的具体

物理机制,如费米能级定扎、V 耦合腔带间级联激光器也得到了进一步的研究^[145-146]。

2018 年,JPL 和 NRL 报道了第一台电泵浦的、工作在 $3\sim 4\ \mu\text{m}$ 波段的 ICL 频率梳,并在最近两年取得了一定的成果^[147-153]。

最后,有关带间级联的相关器件还有很多可以进行的相关研究,将在物理原理、概念以及相关器件上取得越来越多的进展。

参 考 文 献

- [1] Christensen L E, Mansour K, Yang R Q. Thermoelectrically cooled interband cascade laser for field measurements[J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(11): 111119.
- [2] Christensen L E, Webster C R, Yang R Q. Aircraft and balloon *in situ* measurements of methane and hydrochloric acid using interband cascade lasers[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(7): 1132-1138.
- [3] Wysocki G, Bakhirkin Y, So S, et al. Dual interband cascade laser based trace-gas sensor for environmental monitoring [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(33): 8202-8210.
- [4] Parameswaran K R, Rosen D I, Allen M G, et al. Off-axis integrated cavity output spectroscopy with a mid-infrared interband cascade laser for real-time breath ethane measurements [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(4): B73-B79.
- [5] Bauer A, Rößner K, Lehnhardt T, et al. Mid-infrared semiconductor heterostructure lasers for gas sensing applications[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2010, 26(1): 014032.
- [6] Horstjann M, Bakhirkin Y A, Kosterev A A, et al. Formaldehyde sensor using interband cascade laser based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Applied Physics B*, 2004, 79(7): 799-803.
- [7] Dong L, Yu Y, Li C, et al. Ppb-level formaldehyde detection using a CW room-temperature interband cascade laser and a miniature dense pattern multipass gas cell [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19821-19830.
- [8] Joullie A, Christol P, Baranov A N, et al. Mid-infrared 2-5 μm heterojunction laser diodes [M]. *Solid-State Mid-Infrared Laser Source*, Heidelberg: Springer, 2003, 89, 1-61.
- [9] Soibel A, Wright M W, Farr W H, et al. Midinfrared interband cascade laser for free space optical communication [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(2): 121-123.
- [10] Garbuzov D Z, Martinelli R U, Lee H, et al.

- Ultralow-loss broadened-waveguide high-power 2 μm AlGaAsSb/InGaAsSb/GaSb separate-confinement quantum-well lasers [J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(14): 2006-2008.
- [11] Turner G W, Choi H K, Manfra M J. Ultralow-threshold (50 A/cm²) strained single-quantum-well GaInAsSb/AlGaAsSb lasers emitting at 2.05 μm [J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(8): 876-878.
- [12] Mermelstein C, Simanowski S, Mayer M, et al. Room-temperature low-threshold low-loss continuous-wave operation of 2.26 μm GaInAsSb/AlGaAsSb quantum-well laser diodes [J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(11): 1581-1583.
- [13] Zhang Y G, Li A Z, Zheng Y L, et al. MBE grown 2.0 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW ridge waveguide laser diodes [J]. Journal of Crystal Growth, 2001, 227/228:582-585.
- [14] Rattunde M, Mermelstein C, Schmitz J, et al. Comprehensive modeling of the electro-optical-thermal behavior of (AlGaIn)(AsSb)-based 2.0 μm diode lasers [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(22): 4085-4087.
- [15] Kim J G, Shterengas L, Martinelli R U, et al. Room-temperature 2.5 μm InGaAsSb/AlGaAsSb diode lasers emitting 1 W continuous waves [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(17): 3146-3148.
- [16] Budni P A, Ibach C R, Setzler S D, et al. 50-mJ, Q-switched, 2.09- μm holmium laser resonantly pumped by a diode-pumped 1.9- μm thulium laser [J]. Optics Letters, 2003, 28(12): 1016-1018.
- [17] Zhang Y G, Zheng Y L, Lin C, et al. Continuous Wave Performance and Tunability of MBE Grown 2.1 μm InGaAsSb/AlGaAsSb MQW lasers [J]. Chinese Physics Letters, 2006(8): 2262-2265.
- [18] Rattunde M, Schmitz J, Kaufel G, et al. GaSb-based 2.X μm quantum-well diode lasers with low beam divergence and high output power [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(8): 081115.
- [19] Chen J F, Kipshidze G, Shterengas L. High-power 2 diode lasers with asymmetric waveguide [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2010, 46(10): 1464-1469.
- [20] Garbuzov D Z, Martinelli R U, Lee H, et al. 4 W quasi-continuous-wave output power from 2 μm AlGaAsSb/InGaAsSb single-quantum-well broadened waveguide laser diodes [J]. Applied Physics Letters, 1997, 70(22): 2931-2933.
- [21] Donetsky D, Kipshidze G, Shterengas L, et al. 2.3 μm type-I quantum well GaInAsSb/AlGaAsSb/GaSb laser diodes with quasi-CW output power of 1.4 W [J]. Electronics Letters, 2007, 43(15): 810-811.
- [22] Shterengas L, Belenky G, Kisin M V, et al. High power 2.4 μm heavily strained type-I quantum well GaSb-based diode lasers with more than 1 W of continuous wave output power and a maximum power-conversion efficiency of 17.5% [J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(1): 011119.
- [23] Xie S W, Yang C G, Huang S S, et al. 2.1 μm InGaSb quantum well lasers exhibiting the maximum conversion efficiency of 27.5% with digitally grown AlGaAsSb barriers and gradient layers [J]. Superlattices and Microstructures, 2019, 130: 339-345.
- [24] Kim J G, Shterengas L, Martinelli R U, et al. High-power room-temperature continuous wave operation of type-I In(Al)GaAsSb/GaSb diode lasers at wavelengths greater than 2.5 μm [C] // Novel In-Plane Semiconductor Lasers III. Sarnoff Corporation, CN5300, Princeton, NJ 08543-5300, 2004.
- [25] Grau M, Lin C, Dier O, et al. Room-temperature operation of 3.26 μm GaSb-based type-I lasers with quinary AlGaInAsSb barriers [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(24): 241104.
- [26] Hosoda T, Belenky G, Shterengas L, et al. Continuous-wave room temperature operated 3.0 μm type I GaSb-based lasers with quinary AlInGaAsSb barriers [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(9): 091106.
- [27] Shterengas L, Belenky G, Kipshidze G, et al. Room temperature operated 3.1- μm type-I GaSb-based diode lasers with 80 mW continuous wave output power [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(17): 171111.
- [28] Hosoda T, Kipshidze G, Shterengas L, et al. 200 mW type I GaSb-based laser diodes operating at 3 μm : role of waveguide width [J]. Applied Physics Letters, 2009, 94(26): 261104.
- [29] Belenky G, Shterengas L, Wang D, et al. Continuous wave operated 3.2 μm type-I quantum-well diode lasers with the quinary waveguide layer [J]. Semiconductor Science and Technology, 2009, 24(11): 115013.
- [30] Hosoda T, Kipshidze G, Shterengas L, et al. Diode lasers emitting near 3.44 μm in continuous-wave regime at 300 K [J]. Electronics Letters, 2010, 46(21): 1455-1457.
- [31] Hosoda T, Kipshidze G, Tsvit G, et al. Type-I GaSb-based laser diodes operating in 3.1- to 3.3- μm wavelength range [J]. IEEE Photonics Technology

- Letters, 2010, 22(10): 718-720.
- [32] Belenky G, Shterengas L, Kipshidze G, et al. Type-I diode lasers for spectral region above $3 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(5): 1426-1434.
- [33] Hosoda T, Feng T, Shterengas L, et al. High power cascade diode lasers emitting near $2 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(13): 131109.
- [34] Shterengas L, Lang R, Kipshidze G, et al. Cascade type-I quantum well diode lasers emitting 960 mW near $3 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(16): 161112.
- [35] Shterengas L, Liang R, Kipshidze G, et al. Type-I quantum well cascade diode lasers emitting near $3 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(12): 121108.
- [36] Hosoda T, Wang M, Shterengas L, et al. Three stage cascade diode lasers generating 500 mW near $3.2 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(11): 111106.
- [37] Belyanin A A, Snowton P M, Shterengas L, et al. Type-I QW cascade diode lasers with 830 mW of CW power at $3 \mu\text{m}$ [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9382: 93820X.
- [38] Shterengas L, Kipshidze G, Hosoda T, et al. Cascade type-I quantum well GaSb-based diode lasers [J]. Photonics, 2016, 3(2): 27.
- [39] Shterengas L, Kipshidze G, Hosoda T, et al. Cascade pumping of $1.9\text{-}3.3 \mu\text{m}$ type-I quantum well GaSb-based diode lasers [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(6): 1-8.
- [40] Feng T, Hosoda T, Shterengas L, et al. Two-step narrow ridge cascade diode lasers emitting near $2 \mu\text{m}$ [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 485-488.
- [41] Ermolaev M, Lin Y X, Shterengas L, et al. GaSb-based type-I quantum well $3\text{-}3.5 \mu\text{m}$ cascade light emitting diodes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(9): 869-872.
- [42] Hofstetter D, Beck M, Aellen T, et al. Continuous wave operation of a $9.3 \mu\text{m}$ quantum cascade laser on a Peltier cooler [J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(14): 1964-1966.
- [43] Tahraoui A, Matlis A, Slivken S, et al. High-performance quantum cascade lasers ($\lambda \sim 11 \mu\text{m}$) operating at high temperature ($T \geq 425 \text{ K}$) [J]. Applied Physics Letters, 2001, 78(4): 416-418.
- [44] Yu J S, Slivken S, Evans A, et al. High-power continuous-wave operation of a $6 \mu\text{m}$ quantum-cascade laser at room temperature [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(13): 2503-2505.
- [45] Maulini R, Mohan, Giovannini M, et al. External cavity quantum-cascade laser tunable from 8.2 to $10.4 \mu\text{m}$ using a gain element with a heterogeneous cascade [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88: 201113.
- [46] Evans A, Nguyen J, Slivken S, et al. Quantum-cascade lasers operating in continuous-wave mode above $90 \text{ }^\circ\text{C}$ at $\lambda \sim 5.25 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(5): 051105.
- [47] Darvish S R, Zhang W, Evans A, et al. High-power, continuous-wave operation of distributed-feedback quantum-cascade lasers at $\lambda \sim 7.8 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(25): 251119.
- [48] Lyakh A, Pflugl C, Diehl L, et al. 1.6 W high wall plug efficiency, continuous-wave room temperature quantum cascade laser emitting at $4.6 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(11): 111110.
- [49] Bai Y, Slivken S, Darvish S R, et al. Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with 12.5% wall plug efficiency [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(2): 021103.
- [50] Bai Y, Darvish S R, Slivken S, et al. Room temperature continuous wave operation of quantum cascade lasers with watt-level optical power [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(10): 101105.
- [51] Lyakh A, Maulini R, Tsekoun A, et al. 3 W continuous-wave room temperature single-facet emission from quantum cascade lasers based on nonresonant extraction design approach [J]. Applied Physics Letters, 2009, 95(14): 141113.
- [52] Zhang J C, Wang L J, Zhang W, et al. Holographic fabricated continuous wave operation of distributed feedback quantum cascade lasers at $\lambda \approx 8.5 \mu\text{m}$ [J]. Journal of Semiconductors, 2011, 32(4): 044008.
- [53] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, et al. Room temperature quantum cascade lasers with 27% wall plug efficiency [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(18): 181102.
- [54] Zhang J C, Liu F Q, Tan S, et al. High-performance uncooled distributed-feedback quantum cascade laser without lateral regrowth [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(11): 112105.
- [55] 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.
- [56] Yu J S, Darvish S R, Evans A, et al. Room-temperature continuous-wave operation of quantum-cascade lasers at $\lambda \sim 4 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics

- Letters, 2006, 88(4): 041111.
- [57] Bandyopadhyay N, Bai Y, Gokden B, et al. Watt level performance of quantum cascade lasers in room temperature continuous wave operation at $\lambda \sim 3.76 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2010, 97(13): 131117.
- [58] Bandyopadhyay N, Slivken S, Bai Y, et al. High power, continuous wave, room temperature operation of $\lambda \sim 3.4 \mu\text{m}$ and $\lambda \sim 3.55 \mu\text{m}$ InP-based quantum cascade lasers [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(21): 212104.
- [59] Bandyopadhyay N, Bai Y, Tsao S, et al. Room temperature continuous wave operation of $\lambda \sim 3-3.2 \mu\text{m}$ quantum cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(24): 241110.
- [60] Motyka M, Ryczko K, Dyksik M, et al. On the modified active region design of interband cascade lasers[J]. Journal of Applied Physics, 2015, 117(8): 084312.
- [61] Zhang Y, Shao F H, Yang C A, et al. Room-temperature continuous-wave interband cascade laser emitting at $3.45 \mu\text{m}$ [J]. Chinese Physics B, 2018, 27(12): 124207.
- [62] Yang R Q. Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells[J]. Superlattices and Microstructures, 1995, 17(1):77-77.
- [63] Faist J, Capasso F, Sivco D L, et al. Quantum cascade laser[J]. Science, 1994, 264(5158): 553-556.
- [64] Esaki L, Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors[J]. IBM Journal of Research and Development, 1970, 14(1): 61-65.
- [65] Kazarinov R F, Suris R A. Electric and electromagnetic properties of semiconductors with a superlattice [J]. Soviet Physics-Semiconductors, 1972, 6(1): 120-131.
- [66] Meyer J R, Vurgaftman I, Yang R Q, et al. Type-II and type-I interband cascade lasers [J]. Electronics Letters, 1996, 32(1): 45-46.
- [67] Vurgaftman I, Bewley W W, Felix C L, et al. MID-IR vertical cavity surface-emitting lasers [J]. MRS Proceedings, 1997, 484: 95.
- [68] Lin C H, Yang R Q, Zhang D, et al. Type-II interband quantum cascade laser at $3.8 \mu\text{m}$ [J]. Electronics Letters, 1997, 33(7): 598-599.
- [69] Yang R Q, Yang B H, Zhang D, et al. High power mid-infrared interband cascade lasers based on type-II quantum wells [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(17): 2409-2411.
- [70] Yang B H, Zhang D, Yang R Q, et al. Mid-infrared interband cascade lasers with quantum efficiencies $> 200\%$ [J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(18): 2220-2222.
- [71] Felix C L, Bewley W W, Vurgaftman I, et al. Interband cascade laser emitting > 1 photon per injected electron [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(11): 1433-1435.
- [72] Bewley W W, Aifer E H, Felix C L, et al. High-temperature type-II superlattice diode laser at $\lambda = 2.9 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 1997, 71(25): 3607-3609.
- [73] Olafsen L J, Aifer E H, Vurgaftman I, et al. Near-room-temperature mid-infrared interband cascade laser[J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(19): 2370-2372.
- [74] Bruno J D, Bradshaw J L, Yang R Q, et al. Low-threshold interband cascade lasers with power efficiency exceeding 9% [J]. Applied Physics Letters, 2000, 76(22): 3167-3169.
- [75] Yang R Q, Bradshaw J L, Bruno J D, et al. Power, efficiency, and thermal characteristics of type-II interband cascade lasers [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(2): 282-289.
- [76] Bradshaw J L, Yang R Q, Bruno J D, et al. High-efficiency interband cascade lasers with peak power exceeding 4 W/facet [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(16): 2362-2364.
- [77] Bradshaw J L, Bruno J D, Pham J T, et al. Continuous wave operation of type-II interband cascade lasers [J]. IEE Proceedings-Optoelectronics, 2000, 147(3): 177-180.
- [78] Yang R Q, Bradshaw J L, Bruno J D, et al. Mid-infrared type-II interband cascade lasers[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2002, 38(6): 559-568.
- [79] Yang R Q, Hill C J, Yang B H, et al. Room-temperature type-II interband cascade lasers near $4.1 \mu\text{m}$ [J]. Applied Physics Letters, 2003, 83(11): 2109-2111.
- [80] Yang R Q, Hill C J, Yang B H, et al. Continuous-wave operation of distributed feedback interband cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(18): 3699-3701.
- [81] Hill C J, Yang R Q. MBE growth optimization of Sb-based interband cascade lasers [J]. Journal of Crystal Growth, 2005, 278(1/2/3/4):167-172.
- [82] Yang R Q, Hill C J, Yang B H. High-temperature and low-threshold midinfrared interband cascade lasers[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(15): 151109.
- [83] Mansour K, Qiu Y, Hill C J, et al. Mid-infrared

- interband cascade lasers at thermoelectric cooler temperatures [J]. *Electronics Letters*, 2006, 42 (18): 1034-1035.
- [84] Meyer J R, Zhang D, Bewley W W, et al. Type II W, interband cascade and vertical-cavity surface-emitting mid-IR lasers [J]. *IEEE Proceedings-Optoelectronics*, 1998, 145(5): 275-280.
- [85] Yang M J, Moore W J, Bennett B R, et al. Optimum growth parameters for type-II infrared lasers [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 86 (4): 1796-1799.
- [86] Noshov B Z, Barvosa-Carter W, Yang M J, et al. Interpreting interfacial structure in cross-sectional STM images of III-V semiconductor heterostructures [J]. *Surface Science*, 2000, 465 (3): 361-371.
- [87] Yang M J, Moore W J, Yang C H, et al. Determination of temperature dependence of GaSb absorption edge and its application for transmission thermometry [J]. *Journal of Applied Physics*, 1999, 85(9): 6632-6635.
- [88] Yang M J, Meyer J R, Bewley W W, et al. Type-II antimonide quantum wells for mid-infrared lasers [J]. *Optical Materials*, 2001, 17(1/2): 179-183.
- [89] Canedy C L, Bewley W W, Kim C S, et al. Dependence of type II "W" mid-infrared photoluminescence and lasing properties on growth conditions [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94 (3): 1347-1355.
- [90] Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, et al. Antimonide type-II "W" lasers: growth studies and guided-mode leakage into substrate [J]. *Physica E Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2004, 20(3): 466-470.
- [91] Canedy C L, Bewley W W, Lindle J R, et al. High-power and high-efficiency midwave-infrared interband cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(16): 161103.
- [92] Canedy C L, Bewley W W, Lindle J R, et al. Investigation of mid-infrared type-II "W" diode lasers [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35 (3): 453-461.
- [93] Kim C S, Canedy C L, Aifer E H, et al. Molecular beam epitaxy growth of antimonide type-II "W" high-power interband cascade lasers and long-wavelength infrared photodiodes [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2007, 25(3): 991.
- [94] Canedy C L, Kim C S, Kim M, et al. High-power, narrow-ridge, mid-infrared interband cascade lasers [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2007, 26(3): 931-934.
- [95] Kim M, Canedy C L, Bewley W 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.
- [96] Canedy C L, Bewley W W, Lindle J R, et al. Interband cascade lasers with wavelengths spanning $2.9 \mu\text{m}$ to $5.2 \mu\text{m}$ [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(12): 1780-1785.
- [97] Bewley W W, Lindle J R, Kim C S, et al. Lifetimes and Auger coefficients in type-II W interband cascade lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(4): 041118.
- [98] Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, et al. Advances in the growth and performance of antimonide-based mid-infrared interband cascade lasers [C] // 2010 22nd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM), May 31-June 4, 2010, Kagawa, Japan. New York: IEEE Press, 2010: 1-4.
- [99] Canedy C L, Abell J, Bewley W W, et al. Molecular beam epitaxial growth effects on type-II antimonide lasers and photodiodes [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2010, 28 (3): C3G8-C3G12.
- [100] Kim M, Canedy C L, Kim C S, et al. Room temperature interband cascade lasers [J]. *Physics Procedia*, 2010, 3(2): 1195-1200.
- [101] Ikyo B A, Marko I P, Adams A R, et al. Temperature sensitivity of mid-infrared type II "W" interband cascade lasers (ICL) emitting at $4.1 \mu\text{m}$ at room temperature [J]. *Conference Digest-IEEE International Semiconductor Laser Conference*, 2010: 41-42.
- [102] Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, et al. Rebalancing of internally generated carriers for mid-infrared interband cascade lasers with very low power consumption [J]. *Nature Communications*, 2011, 2(1): 585.
- [103] Bewley W W, Kim C S, Kim M, et al. A new generation of interband cascade lasers [C] // 15th International Conference on Narrow Gap Systems (NGS15). AIP Conference Proceedings, Volume 1416. AIP Conference Proceedings, 2011, 1416(1): 46-48.
- [104] Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, et al. Mid-IR type-II interband cascade lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*,

- 2011, 17(5): 1435-1444.
- [105] Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, et al. High-power room-temperature continuous-wave mid-infrared interband cascade lasers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 20894-20901.
- [106] Vurgaftman I, Bewley W W, Merritt C D, et al. Physics of interband cascade lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8268: 82681F.
- [107] Kim C S, Bewley W W, Kim C S, et al. High-power, high-brightness continuous-wave interband cascade lasers with tapered ridges [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(11): 111111.
- [108] Abell J, Weih R, Canedy C L, et al. Interband cascade lasers with external differential quantum efficiency $> 50\%$ at room temperature [C] // *Mid-infrared Coherent Sources*, 2013: MTh4B.1.
- [109] Bauer A, Dallner M, Kamp M, et al. Shortened injector interband cascade lasers for 3.3- to 3.6 μm emission [J]. *Optical Engineering*, 2010, 49(11): 111117.
- [110] Janiak F, Sek G, Motyka M, et al. Increasing the optical transition oscillator strength in GaSb-based type II quantum wells [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100: 231908.
- [111] Janiak F, Motyka M, Sek G, et al. Effect of arsenic on the optical properties of GaSb-based type II quantum wells with quaternary GaInAsSb layers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114 (22): 223510.
- [112] Ryczko K, Sęk G, Misiewicz J. Eight-band $k \cdot p$ modeling of InAs/InGaAsSb type-II W-design quantum well structures for interband cascade lasers emitting in a broad range of mid infrared [J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114 (22): 223519.
- [113] Weih R, Kamp M, Höfling S. Interband cascade lasers with room temperature threshold current densities below 100 A/cm^2 [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(23): 231123.
- [114] Weih R, Bauer A, Kamp M, et al. Interband cascade lasers with AlGaAsSb bulk cladding layers [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3 (10): 1624-1631.
- [115] Canedy C L, Abell J, Merritt C D, et al. Pulsed and CW performance of 7-stage interband cascade lasers [J]. *Optics Express*, 2014, 22 (7): 7702-7710.
- [116] Kim M, Bewley W W, Canedy C L, et al. High-power continuous-wave interband cascade lasers with 10 active stages [J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 9664-9672.
- [117] Hamp M J, Cassidy D T, Robinson B J, et al. Effect of barrier height on the uneven carrier distribution in asymmetric multiple-quantum-well InGaAsP lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(10): 1380-1382.
- [118] Hamp M J, Cassidy D T, Robinson B J, et al. Nonuniform carrier distribution in asymmetric multiple-quantum-well InGaAsP laser structures with different numbers of quantum wells [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, 74(5): 744-746.
- [119] Lee B L, Lin C F, Lai J W, et al. Experimental evidence of nonuniform carrier distribution in multiple-quantum-well laser diodes [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(12): 1230-1231.
- [120] Yang R Q, Li L, Jiang Y C. Interband cascade lasers: from original concept to practical devices [J]. *Progress in Physics*, 2014, 34(4): 169-190.
杨瑞青, 李路, 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.
- [121] Yang R Q, Xu J M. Population inversion through resonant interband tunneling [J]. *Applied Physics Letters*, 1991, 59(2): 181-182.
- [122] Yang R Q, Lu J, Xu J M, et al. Experimental investigation of the influence of the barrier thickness in double-quantum-well resonant interband tunnel diodes [J]. *Canadian Journal of Physics*, 1992, 70 (10/11): 1013-1016.
- [123] Tuttle G, Kroemer H, English J H. Effects of interface layer sequencing on the transport properties of InAs/AlSb quantum wells: Evidence for antisite donors at the InAs/AlSb interface [J]. *Journal of Applied Physics*, 1990, 67 (6): 3032-3037.
- [124] Spitzer J, Hopner A, Kuball M, et al. Influence of the interface composition of InAs/AlSb superlattices on their optical and structural properties [J]. *Journal of Applied Physics*, 1995, 77(2): 811-820.
- [125] Jenichen B, Stepanov S, Brar B, et al. Interface roughness of InAs/AlSb superlattices investigated by X-ray scattering [J]. *Journal of Applied Physics*, 1996, 79(1): 120-124.
- [126] Kim M, Kim C S, Bewley W W, et al. Interband cascade lasers with high CW power and brightness [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9370: 937029.
- [127] Kim C S, Kim M, Bewley W W, et al. Corrugated-sidewall interband cascade lasers with single-mode midwave-infrared emission at room temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 95(23): 231103.
- [128] Edlinger M V, Scheuermann J, Weih R, et al. Monomode interband cascade lasers at 5.2 μm for

- nitric oxide sensing[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(5): 480-482.
- [129] Kim C S, Kim M, Abell J, et al. Mid-infrared distributed-feedback interband cascade lasers with continuous-wave single-mode emission to 80 °C [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(6): 061104.
- [130] Koeth J, Weih R, Scheuermann J, et al. Mid infrared DFB interband cascade lasers [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10403: 1040308.
- [131] Scheuermann J, Weih R, von Edlinger M, et al. Single-mode interband cascade lasers emitting below 2.8 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(16): 161103.
- [132] 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.
- [133] Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, et al. Continuous-wave interband cascade lasers operating above room temperature at $\lambda = 4.7\text{-}5.6 \mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2012, 20(3): 3235-3240.
- [134] Ikyo B A, Marko I P, Adams A R, et al. Temperature dependence of 4.1 μm mid-infrared type II "W" interband cascade lasers[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(2): 021102.
- [135] Tian Z, Li L, Ye H, et al. InAs-based interband cascade lasers with emission wavelength at 10.4 μm [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(2): 113-114.
- [136] Li L, Jiang Y C, Ye H, et al. Low-threshold InAs-based interband cascade lasers operating at high temperatures[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(25): 251102.
- [137] Rassel S M S, Li L, Li Y Y, et al. High-temperature and low-threshold interband cascade lasers at wavelengths longer than 6 μm [J]. *Optical Engineering*, 2018, 57(1): 011021.
- [138] Arafin S, Bachmann A, Kashani-Shirazi K, et al. Electrically pumped continuous-wave vertical-cavity surface-emitting lasers at $\sim 2.6 \mu\text{m}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131120.
- [139] Abell J, Kim C S, Bewley W W, et al. Mid-infrared interband cascade light emitting devices with milliwatt output powers at room temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(26): 261103.
- [140] Kim C S, Bewley W W, Merritt C D, et al. Improved mid-infrared interband cascade light-emitting devices[J]. *Optical Engineering*, 2017, 57(01): 011002.
- [141] Li J V, Yang R Q, Hill C J, et al. Interband cascade detectors with room temperature photovoltaic operation[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(10): 101102.
- [142] Hinkey R T, Yang R Q. Theory of multiple-stage interband photovoltaic devices and ultimate performance limit comparison of multiple-stage and single-stage interband infrared detectors[J]. *Journal of Applied Physics*, 2013, 114(10): 104506.
- [143] Gautam N, Myers S, Barve A V, et al. High operating temperature interband cascade midwave infrared detector based on type-II InAs/GaSb strained layer superlattice [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(2): 021106.
- [144] Tian Z B, Schuler-Sandy T, Krishna S. Electron barrier study of mid-wave infrared interband cascade photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(8): 083501.
- [145] Lin Y Z, Li L, Huang W X, et al. Quasi-fermi level pinning in interband cascade lasers[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(4): 1-10.
- [146] Yang H T, Yang R Q, Gong J L, et al. Mid-infrared widely tunable single-mode interband cascade lasers based on V-coupled cavities [J]. *Optics Letters*, 2020, 45(10): 2700.
- [147] Bagheri M, Frez C, Sterczewski L A, et al. Passively mode-locked interband cascade optical frequency combs [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 3322.
- [148] Schwarz B, Hillbrand J, Beiser M, et al. Monolithic frequency comb platform based on interband cascade lasers and detectors[J]. *Optica*, 2019, 6(7): 890.
- [149] Hillbrand J, Beiser M, Andrews A M, et al. Picosecond pulses from a mid-infrared interband cascade laser[J]. *Optica*, 2019, 6(10): 1334.
- [150] Sterczewski L A, Westberg J, Bagheri M, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with low drive-power on-chip sources[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 2113.
- [151] Sterczewski L A, Westberg J, Patrick C L, et al. Multiheterodyne spectroscopy using interband cascade lasers [J]. *Optical engineering*, 2018, 57(1): 011014.
- [152] Sterczewski L A, Bagheri M, Frez C, et al. Near-infrared frequency comb generation in mid-infrared interband cascade lasers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(23): 5828-5831.
- [153] Sterczewski L A, Bagheri M, Frez C, et al. Mid-infrared dual-comb spectroscopy with room-temperature bi-functional interband cascade lasers and detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(14): 141102.