

带间级联激光器：从原始概念到实际器件

楊瑞青*, 李 路, 江宇超

俄克拉荷马大学电子与计算机工程系, 美国

摘要: 本文讨论了带间级联激光器中相关的概念, 材料体系和生长, 器件制造, 量子阱结构和物理过程, 回顾了它们从原始的概念到实际器件的发展历程。介绍了最近的进展和目前的状态, 并讨论了带间级联激光器的未来前景。

关键词: 中红外; 量子阱; 二极管激光器; 锗化物; 二类异质结

中图分类号: TN365 **文献标识码:** A

目 录

I. 引言	169
II. 带间级联激光器的工作原理	170
III. 早期发展和挑战	172
IV. 近来的进展和目前的状态	175
A. 波导结构的优化	176
1. 分别限制层	176
2. 等离子波导	177
B. 级联区结构的优化	179
1. 注入区	179
2. 载流子再平衡	179
C. 其它特性	180
1. 远场分布和光束质量	180
2. 双波长, 宽调谐, 自由空间通讯和自混合效应	181
V. 未来发展趋势及总结	181
致 谢	183
附录 A: 带间级联激光器结构的材料生长	183
附录 B: 带间级联激光器的器件工艺	184
参考文献	186

I. 引言

带间级联 (interband cascade) 激光器是基于量子工程的中红外半导体激光器件。它结合了通常半导体带间激光器和基于子带间跃迁的量子级联 (quantum cascade) 激光器的优点。带间级联激光器的概念是作

者之一 (楊瑞青, 当时在加拿大) 首次在 1994 年八月召开的第七届国际超晶格微结构微器件会议的张贴报告中提出^[1,2]。而贝尔实验室在 1994 年四月的《科学》上报告了第一个子带间量子级联激光器^[3]。无论是带间级联激光器的提出, 还是子带间量子级联激光器的实现, 都有源于早期半导体超晶格^[4]的研究和追求通过子带间跃迁达到光放大^[5,6]或激射的探索。文献 [1] 和 [2] 主要讨论了通过子带间跃迁达到激射的多种途径, 而只用较少篇幅描述了带间级联激光器的构思。因此文献 [1] 和 [2] 的标题集中在子带间跃迁红外激光器。采用上述标题的另一因素是当摘要提交给会议时贝尔实验室量子级联激光器的报告还没有在《科学》上发表, 而文献 [1] 的作者当时已开展了数年关于子带间跃迁红外激光器的研究^[7~9], 有较强的意愿先实现子带间跃迁红外激光器。但在贝尔实验室实现量子级联激光器后, 他的意愿转向了致力于实现和发展带间级联激光器。他在 1994 年提交了一篇专门讨论带间级联激光器的文章^[10]到《应用物理快报》(Applied Physics Letters)。可是, 评审者当时没能认识到带间级联激光器的重要性, 拒绝了这篇文章的发表。1995 年初楊瑞青从加拿大到美国休斯顿大学 (University of Houston) 工作, 与人合作开始推动了带间级联激光器的实际研究, 并先后在美国陆军研究实验室 (Army Research Laboratory, ARL), Maxion 公司, 加州理工喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL), 和俄克拉荷马大学 (University of Oklahoma) 开展了带间级联激光器的研发和应用^[11~42]。

最近几年, 带间级联激光器的性能取得了显著进展^[11~71]。所取得的成就包括其封装后可在热

Received date: 2014-5-20
*rui.q.yang@ou.edu

电冷却条件下实现单模分布反馈 (distributed feedback) 连续波 (continuous wave, cw) 工作^[37,38]和在高于室温 (达 115 °C) 条件下的连续波工作以及低功耗工作 (例如室温时低于 0.1 W)^[46~53,59,68]。分布反馈的带间级联激光器已在实验室, 野外和火星上用于探测重要的气体分子, 如甲烷, 甲醛, 乙烷, 和氯化氢^[33,60~66,72,73]。本文将讨论带间级联激光器中相关的概念, 材料体系和生长, 器件制造, 量子阱结构和物理过程。第 II 节我们将阐述带间级联激光器的工作原理。在第 III 节中, 我们将回顾从最初的概念到实际器件过程中的发展和挑战。第 IV 节中, 我们将介绍一些近来的进展和目前的状态。第 V 节是对带间级联激光器的未来展望和结束语。最后, 我们还在附录 A 和 B 中分别概述了带间级联激光器的材料生长和器件工艺。

II. 带间级联激光器的工作原理

在常规的二极管激光器中, 多个有源量子阱 (quantum wells, QWs) 为并联连接以实现载流子注入; 与此不同, 带间级联激光器的多个有源区是串联连接的, 这使得整个激光器结构在正向偏压下形成一个能量 (E) 阶梯, 如图 1 所示。因此, 每当一个电子从上一级联阶梯输运跃迁至下一级联阶梯时, 它就能够再发射一个额外的光子, 从而导致高的量子效率 (> 1 , 由每个电子产生的光子数决定), 类似于子带间量子级联激光器^[3]。利用级联结构实现量子效率大于一的想法, 并不是带间级联 (或量子级联) 激光器的原创。早在 1982 年, van der Ziel 和 Tsang 在研究单片集成的 GaAs 二极管激光器与隧道结时就明确提出了这一可行性^[74]。但是, 在他们研究的结构中, 这些二极管激光器被不同的光波导所隔离, 而在带间级联 (和量子级联) 激光器中, 所有的有源区都在同一个波导内, 且微分增益随着级联阶数 (N_c) 而增加。

与常规的并联结构截然不同的是, 带间级联激光器的阈值电压 (V_{th}) 与级联阶数成正比。所需的正向偏压不小于 $N_c h\nu/e$, 其中 $h\nu$ 是光子能量, e 是电子电荷。理想情况下, 带间级联激光器的工作电流将会比等效的并联二极管激光器小 N_c 倍。因此, 带间级联激光器实质上是用较高的阈值电压的代价来换取较低的阈值电流。这种交换的结果是, 来自寄生电阻 (比如源自接触和包层区域) 的电功率消耗要比并联型的二极管激光器小 N_c^2 倍^[11,12,53], 这就意味着级联激光器比常规的并联二极管激光器的运行效率高。而在实际的情形

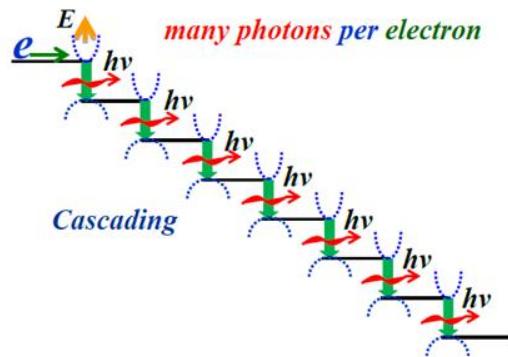


图 1. 带间级联激光器在正向偏压下的示意图。其中开口向上的曲线代表导带的能量-波矢的色散关系, 而开口向下的曲线代表价带的能量-波矢色散关系

中, 由于存在其它因素, 一个级联激光器未必严格地遵循电流和电压这种此消彼长的关系。不过, 级联结构仍会保持着对于常规并联结构的优势, 这尤其体现在波长较长的激光器中。因为当光子能量更小时, 适当的光波导限制和足够的增益都要求更大的 N_c 。对于常规并联二极管激光器, 这 (更大的 N_c) 将使得落在寄生电阻上的电压占外加电压的比例变大; 因此, 浪费在寄生电阻上的电功率占总功率的比例也将变大。而整个级联结构在利用电压的效果上相当于一个带隙约为 $N_c h\nu$ 的半导体。因此, 落在寄生电阻上的外加电压的比例显著减少, 从而导致级联激光器具有高电压效率 ($\eta_v = N_c h\nu / (eV_{th})$)。此外, 在常规并联的激光器中, 更多的有源量子阱使得注入电流无法在所有的发光区域均匀地分布, 且高电流注入时能带填充效应可能会更加显著。这些因素都将明显地降低常规并联激光器在较长波段的性能。然而, 在级联激光器结构中, 串联的连接方式确保了同等数量的载流子注入到每个有源区中, 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小。总之, 级联结构带来诸多优点, 它们对于中红外波段的激光器特别显著和重要。这些级联结构的优点和重要性并没有在早期半导体超晶格的研究中明显提到或强调。比如, 文献 [5] 和 [6] 虽然提出了通过子带间跃迁达到光放大的原始想法, 但完全没有讨论级联结构对光放大或激射的重要性和特征; 而文献 [3] 虽然首次构造了量子级联激光器的名称, 但更强调子带间跃迁激射的实现和特征。很可能包括那些量子级联激光器的先驱在内, 人们并没有在初期就完全认识到级联结构的优点和重要性。基于注入线路连接方式差异对于常规和级联激光器性能影响的明确认知和重要讨论是最早出现在涉及带间级联激光器的

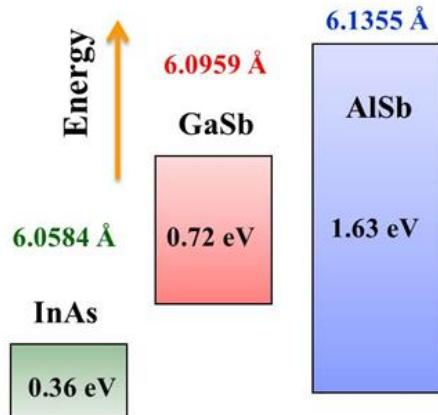


图 2. InAs, GaSb 和 AlSb 的能隙、晶格常数及它们的能带边相对位置示意图

文献 [11] 和综述性文章 [12] 及 [22] 中。

虽然带间级联和量子级联激光器都具有重复使用电子以产生多个光子达到高量子效率的优点，它们在发生光跃迁的途径上仍有重要的差异。量子级联激光器是单极型 (unipolar) 器件，电子输运和跃迁都在导带中，因此所有涉及的子带都具有相同朝向的色散曲线（即能量 E 与波矢 k 的关系），导致了快速声子散射参与于子带间跃迁中并在激射之前起主导作用。与此不同的是，带间级联激光器的发光是基于电子在导带和价带间的跃迁。这两个带具有相反的色散曲线，如图 1 所示。因此在带间级联激光器中，电子带间跃迁不允许快速声子散射的参与，但是，像其它的带间二极管激光器，它们可能会有较严重的俄歇复合。尽管如此，俄歇复合在中红外光谱（例如 $3\sim5 \mu\text{m}$ ）区域通常比光学声子散射慢。所以，粒子数反转可以很好地在带间级联激光器中形成^[11,12]，而无需采用在量子级联激光器中借助快速声子和多能级移去电子达到粒子数反转的方案^[3]。因此，在带间级联激光器中，过电压、阈值电流密度和功率消耗可以显著降低。

带间级联激光器可以用近晶格匹配的 InAs/GaSb/AlSb 三五族材料体系来构造。在这种材料体系中，如图 2 所示，InAs 的导带边在能量上低于 GaSb 的价带边，它们形成一种半金属般的异质结界面：一种在半导体量子阱和超晶格中具备独特性质的二类破缺带隙异质结^[75~77]。这样的带边特性导致了与一类量子阱（图 3a）和超晶格明显不同的一些性质和应用。比如，对于电子和空穴波函数都受限于同一层的一类量子阱，二类量子阱基态的电子和空穴波函数主要分布在不同的层，如图 3 所示。而且，二类量子阱结构的能隙 (E_g) 取决于电子和空穴基态的能量差 ($E_e - E_h$)，

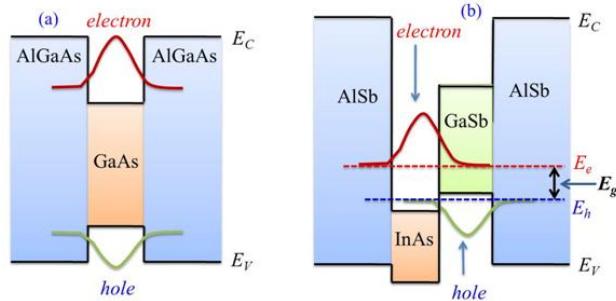


图 3. (a) 一类量子阱：电子和空穴波函数的中心在同一量子阱层；(b) 二类量子阱：电子和空穴波函数的中心在不同量子阱层；带隙 E_g 可以通过调节层厚在较大范围内进行裁剪

而不是所用材料本身的能隙 ($E_c - E_v$)。由于破缺带隙异质结，这种二类量子阱结构的能隙 (E_g) 可以通过简单地调节阱层的厚度而覆盖从远红外到整个中红外的波段。Ting 等人从历史的观点和它们在探测器上的应用上对二类 InAs/GaSb 超晶格的发展做了精彩的评述^[78]。如下面指出，这种破缺带隙的排列有利于带间级联激光器中重复使用注入电子所需的高效带间隧穿^[1,2,7~12]。在正向偏压下，一个典型二类带间级联激光器结构的能带边示意图如图 4 所示，其重复多次的个体有源区被层厚渐变的 InAs/Al(In)Sb 多量子阱构成的 n 型注入区所隔开。每个有源区包含 InAs/GaInSb 二类量子阱，而光跃迁发生在导带量子态 E_e 和价带量子态 E_h 之间，其相应的波函数主要分别分布在 InAs 和 GaInSb 层中。InAs 量子阱设计成其电子基态能级 E_e 位于 GaInSb 的带隙之中，如图 4 所示。因此，从能级 E_e 左边的注入区输入的电子实际上被 GaInSb、AlSb 和 GaSb 层阻挡而无法直接隧穿出去，从而有效地抑制从上跃迁能态到下一阶注入区的电流泄漏。这样，电子唯一可能到达下一阶的方式是通过带间跃迁到达价带量子态 E_h ，后者可位于 InAs 导带边之上。跃迁之后，电子穿过价带 GaSb 量子阱，然后通过带间隧穿到达下一级台阶注入区的导带，准备好了产生另一次辐射跃迁而发出额外的光子。在这个电子输运的循环过程中，InAs 和 GaSb 之间的二类破缺带隙能带排列促成了有效的带间隧穿，使所有的级联合阶一个接一个紧密地连在一起，从而扮演了重要作用。这种二类破缺带隙异质结界面也可看作是产生电子和空穴的半金属源^[79,80]，如图 5c 所示^[53]，而将 GaSb 量子阱（毗邻于电子注入区）视为空穴注入区^[11,12,53]，如图 6 所示。对比于常规的双极型（电子和空穴）激光器（图 5a）和单极型（仅有电子或空穴）量子级联激光器（图 5b），带间级联激光器可

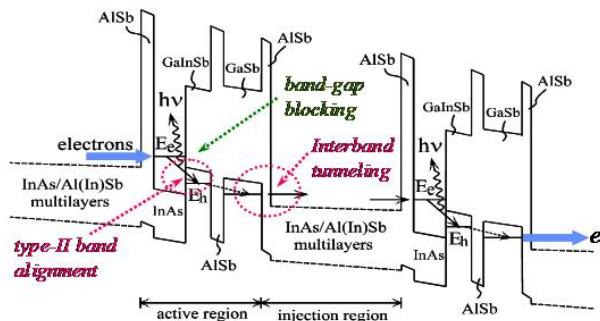


图 4. 在正向偏压下, 带间级联激光器中两个级联周期台阶的结构及其能带边排列示意图

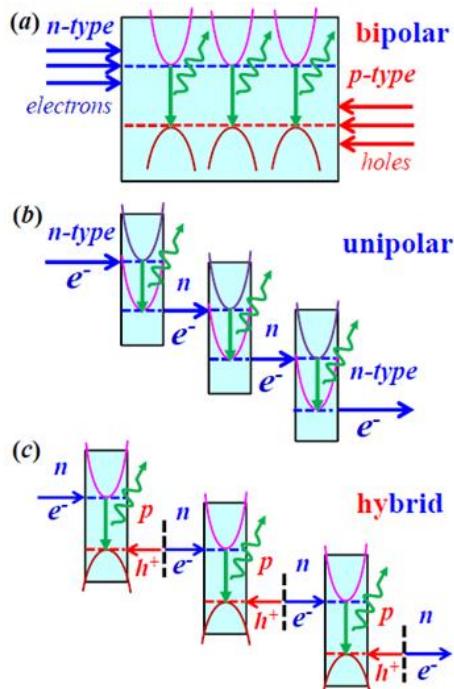


图 5. 三种类型激光器的对比。(a) 常规的双极型(电子和空穴)激光器; (b) 单极型(仅有电子或空穴)量子级联激光器; (c) 结合了两者优点的带间级联激光器

以被看成结合了两者优点的混合型(图 5c)。

由于 InAs/GaSb 材料体系中的二类破缺带隙能带排列, 通过调节 InAs 和 GaInSb 量子阱的层厚, 能态 E_e 和 E_h 的能量间隔可以从几个 meV 变化到 700 meV。因此, 在这种 III-V 族材料体系中可以实现优异的载流子限制, 且可以只调节量子阱厚度来裁剪带间级联激光器的激射波长, 从而能覆盖包括重要的 3~12 μm 区域在内的大范围光谱。

然而, 使用二类量子阱作为有源区的一个缺点是, 相比于电子和空穴波函数局限于同一层中的一类量子阱激光器, 带间跃迁的两个态之间的波函数交叠

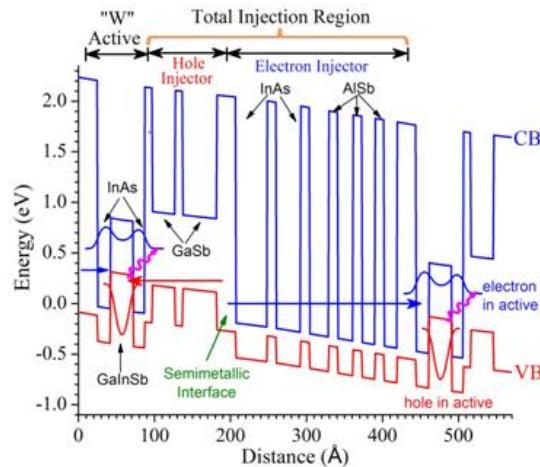


图 6. 具有 W 形状量子阱有源区的带间级联激光器能带边排列和有源区的波函数示意图(根据 J. R. Meyer 提供的图修订)

变小, 导致较小的光增益。然而, 由于破缺带隙的能带排列(如图 4 中圈出)和 InAs 中较小的电子有效质量, 穿透到 GaInSb 层的电子波函数是足以导致激射所需的增益。而且, 如图 6 所示, 可在 GaInSb 层的右边插入一额外的 InAs 层, 构成一个类似“W”形的二类量子阱^[81], 这样波函数交叠得到加强, 从而增加带间级联激光器的增益^[16~18]。这种“W”形量子阱的带间级联激光器的范例曾在早期文献[18]中给出, 其一个级联周期的详细层序(厚度单位为 Å)为: 18/19/32/13/10/60/15/40/15/40/15/70/14/51/12/43/12/35/13/30/13/26/14/23/14/21, 其中黑体数字代表 AlSb 层厚度, 带下划线的数字是 Ga_{0.7}In_{0.3}Sb 层, 斜体数字为 GaSb 层, 其它数字标注的是 InAs 层的厚度。普通二类超晶格和 W 形量子阱有源区已经用在光泵浦和电泵浦的非级联二极管激光器中, 并在中红外波段中取得了当时令人印象深刻的器件性能^[82~103]。应当指出的是, 三五族一类量子阱有源区, 虽然较少用在波长较长的中红外波段, 但应用到带间级联激光器的结构中是可行的^[12,19,79,80]。在这里, 我们的讨论将主要集中于二类量子阱有源区的带间级联激光器, 其能力可覆盖从中红外到远红外的波长范围。

III. 早期发展和挑战

随着带间级联激光器的提出和量子级联激光器的实现带来的激励, 发展二类带间级联激光器的实验工作始于 1995 年初的休斯顿大学。在那里一台 Riber-32 型分子束外延(molecular beam epitaxy,

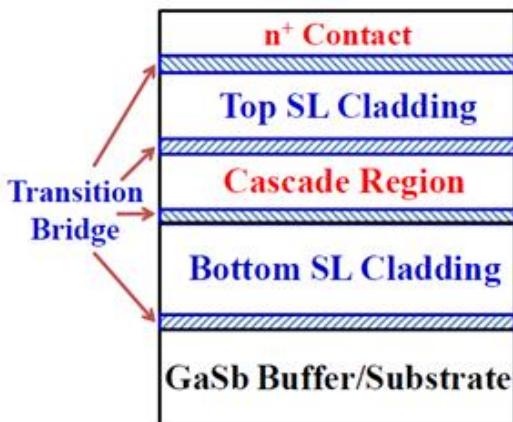


图 7. 基于 GaSb 衬底的带间级联激光器分区层状结构示意图

MBE) 系统可用于含锑化合物半导体量子阱的生长。这些早期的带间级联激光器, 生长于非故意掺杂的 *p* 型 GaSb(001) 衬底上。如图 7 所示, 它们从上到下的结构为: 电接触层 (contact), 上光波导包层 (top cladding), 多个 (> 15) 周期台阶组成的级联区 (cascade region) 和下包层 (bottom cladding)。级联区是由半导体材料 InAs, Ga(In)Sb 和 Al(In)Sb 所组成的多量子阱层, 单个周期台阶厚度大约为 680~860 Å (取决于所需的激射波长)。包层由短周期 (~5 nm) 的 InAs/AlSb 超晶格 (superlattice, SL) 组成, 典型厚度为 1.5~3 μm。层厚渐变的多量子阱区域作为过渡/连接桥 (transition bridge) 插入级联区与包层、包层和接触 (或缓冲) 层之间, 用于平滑它们间的载流子输运。在 GaSb 衬底上的这些带间级联激光器结构中, InAs 层有轻微的拉伸应变 (~0.6%), 而 GaInSb 和 Al(In)Sb 层有压缩应变。每个区域设计成尽可能地逼近应变平衡, 留有最小的残余应变。整个带间级联激光器结构由数千个薄层组成, 总厚度可能会高达 5 μm (或更厚, 取决于波长), 这就给 MBE 生长带来了挑战。

1997 年初, 休斯顿大学和桑迪亚国家实验室 (Sandia National Laboratories) 合作实现了一支具有 20 个级联周期的带间级联激光器, 其脉冲激射波长在 3.8 μm 附近, 工作温度可达 170 K^[13]。虽然这个首支带间级联激光器在高阈值电流密度下 (80 K 时为 4.17 kA/cm²) 激射不久后就烧坏了, 并没有表现出所预期的来自级联过程的特性, 但是它证实了在 GaSb 衬底上通过 MBE 生长复杂的带间级联激光器结构是可行的。很快, 从随后生长和制作的激射波长分别为 ~4 μm (采用简单的二类量子阱有源区)^[14,15] 和 ~3 μm (采用 W 形量子阱有源区)^[16,17] 的带间级联激

光器中, 得到的微分量子效率超过了传统极限的百分之百 (100%), 从而直接证实了级联过程。这些带间级联激光器具有相对低的阈值电流密度 (80 K 时为 100~200 A/cm²), 脉冲模式下工作温度达 225 K。此后, 波长位于 3.6 μm 附近的带间级联激光器在短脉冲下工作温度达 286 K^[18]。不过, 在低温下 (< 180 K) 其阈值电流密度甚至高于前述的 W 形量子阱带间级联激光器^[16~18]。在这一先驱性的发展时期, 带间级联激光器性能远低于理论预测^[19~21], 也没有实现连续波工作。一篇早期的综述文章讨论了更多相关的细节^[22]。

在此期间, 一个带间级联发光二极管 (LED) 在室温时电致发光的波长超过 15 μm^[104], 证实了这些锑族二类量子阱结构有独特的能力覆盖很宽的波长范围。另外, 带间级联激光器的研究也遇到了一些问题。这些包括: (1) 晶体生长条件的多变导致可重复性差; (2) 由于材料质量缺乏合适的控制所导致的各种缺陷以及 Sb、As 原子互混所引起的界面粗糙, 从而导致大的漏电流; (3) 长时间的生长 (> 15 小时) 和高频次的闸门开合, 从而导致较高的失败率。还有其它与器件工艺和运行相关的问题。对于传统的脊形波导二极管激光器, 脊的刻蚀只从顶部到有源区上方。而对带间级联激光器, 刻蚀必须从顶部穿过整个级联周期的有源区, 以确保同等数量的载流子注入到每一个台阶周期。这是因为, 如果不用刻蚀等方法限制沿垂直方向注入的电流, 那么电流沿横向平面的扩展将会在这样一个含有数千个薄层的级联结构中非常显著 (即放大了电阻各向异性)。这些早期的、有深蚀刻台面结构的带间级联激光器, 容易在功率饱和之前被注入的较高电流损坏, 这就限制了输出功率和工作温度。W 形有源区带间级联激光器, 虽然能在较高温度下激射, 却只能在低频 (5~200 Hz) 的短脉冲 (~100 ns) 条件下工作。

1999 年初, 美国陆军研究实验室 (ARL) 开始利用一台 Varian Gen-II MBE 系统研发带间级联激光器。在先前经验的基础上, 随着理解的提升和材料质量的提高, ARL 小组在带间级联激光器的研发中迅速取得了显著进展, 如连续波工作, 相当高的量子效率 (> 600%)、峰值功率达到 ~6 W/端面、较好的功率转换效率 (> 14%) 和重复性^[23~28]。2001 年, 一个波长位于 3.5 μm 附近的带间级联激光器达到室温脉冲工作, 其阈值电流密度被进一步降低 (80 K 时为 13 A/cm²)^[28]。之后, 从 ARL 剥离出来的 Maxion 公司利用 ARL 的设备, 实现了更高的连续波工作温度 (214 K) 和功率转换效率 (23%)^[29]。在此期间, 人们认识到,

带间级联激光器中的应变平衡需要考虑不同半导体材料(如 InAs, GaInSb, AlSb)的弹性劲度常数的差异。对于某些器件结构的设计, 常用的平均晶格常数(匹配于衬底)的方法并不总是适当的。例如对带间级联激光器这样有许多不同的应变层, 因其总厚度约为5 μm或更多, 即使是最轻微的应变也可能会随MBE生长中其整体结构厚度的增加积累到显著的程度。这种考虑的必要性也在其它器件结构的设计和模拟计算中被人们意识到^[105,106]。

2002年, 喷气推进实验室(JPL)安装了一台含锑源的新Gen-III MBE系统。随后的几年中, 带间级联激光器在那里取得了快速的进展^[30~35]。一些突出的性能特点包括: 低阈值电流密度(80 K时为8 A/cm², 300 K时为630 A/cm²)^[33,35], 高于室温的脉冲工作(350 K, 受温控装置所限)^[35], 连续波工作温度达237 K, 激射波长延伸到5.1~5.6 μm的波段并且连续波工作温度达165 K^[34]。在JPL的主要工作都集中在3到4 μm的光谱范围。许多分子, 尤其是那些有C-H链的如甲烷和乙烷, 在这个波段具有很强的吸收谱线。JPL(以及Maxion)发展了位于这个波段的低温制冷的单模连续波分布反馈式带间级联激光器, 并将其安装在处于空中平台上的仪器里用于分析大气中的甲烷和氯化氢, 以及在实验室中测量乙烷, 乙炔和甲醛^[33,60~65]。2006年初, 中红外带间级联激光器在JPL的进展达到了一个重要的里程碑—实现了其连续波工作温度达264 K且功耗小于1.1 W^[36]。这使得带间级联激光器, 结合一个简单的单级热电制冷器, 就可以在室温连续工作。此外, 在近2000个小时的连续工作后没有观察到任何性能的退化, 说明了其良好的可靠性, 可用于实际应用。随后, JPL成功地制造出可在温度高达261 K环境中连续工作的单模分布反馈带间级联激光器, 其波长调谐的范围在245~260 K间可覆盖3.27 μm附近的甲烷吸收谱线^[37,38]。这些单模激光器与热电制冷器结合封装后, 通过了各种测试, 于2007年交付给NASA用于飞行项目。其中一支激光器被安装在好奇号火星车(Curiosity Rover)中的可调谐激光光谱仪中, 于2012年登陆火星用于甲烷和甲烷同位素的测量^[73,107]。

在为NASA火星科学探索任务而研发的热电制冷单模分布反馈带间级联激光器的过程中, 一个主要的技术挑战是将激射波长与所需测量的甲烷吸收线相吻合, 并在带间级联激光器狭窄的工作温度窗口内(250~260 K)具有足够的调谐范围(几个波数, 通过改变电流达到)。考虑到当时的Fabry-Pérot带间级

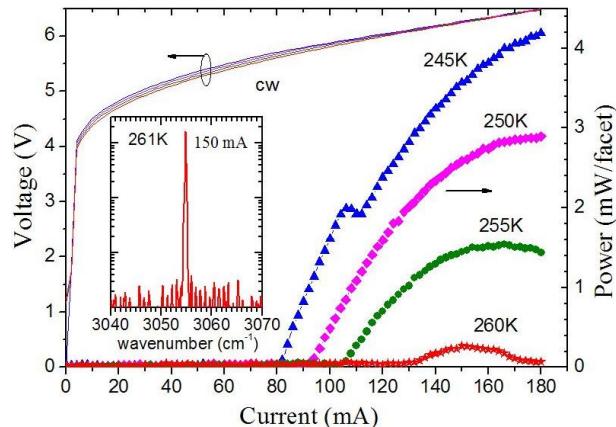


图8. 一个带间级联激光器的电流-电压-光功率特性, 插图为激光器在261 K的单模激射光谱, 其纵轴是对数尺度

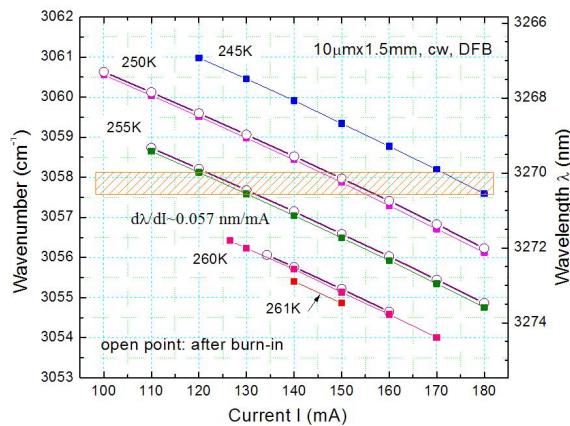


图9. 不同温度下, 分布反馈激光器的波长随电流的调制。空心点为24小时持续预烧后测得。阴影区域是探测甲烷和其同位素所需的目标波段

联激光器的最大连续工作温度仅能到264 K^[36], 研究人员需要对有源量子阱层的厚度和分布反馈光栅周期有非常精确的控制^[37], 而且需要尽最大可能地削减分布反馈光栅引入的损耗。虽然这在当时看来是不可能完成的任务, 但是, 经过在分子束外延生长、器件制备和表征方面的高强度工作, 结合器件设计的精细考虑和设备的优先调配使用, 最终生产的带间级联激光器能在温度达261 K的范围内以稳定的单模连续波方式工作, 并有高的边模抑制比(大于20 dB), 如图8中的激光器输出功率在所要求的温度范围内(250~255 K)高于1 mW, 足以用于原位气体检测。在整个工作温度范围, 其阈值电流和电压分别低于140 mA和6 V。因此, 这些单模带间级联激光器的总电功率消耗在整个工作区域内小于1.1 W, 这就使得激光器能在简单的单级热电制冷器所能达到的温度范围内连续工作。此外, 这些分布反馈激

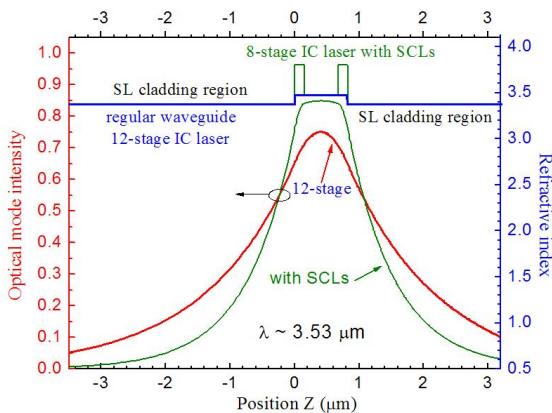


图 10. 具有简单常规波导、12 个级联台阶的带间级联激光器与具有分别限制层结构、8 个级联周期的带间级联激光器的光学模式(左轴)和折射率(右轴)的分布。

光器的波长可用电流以 $\sim 0.057 \text{ nm/mA}$ 的调谐系数在超过 3 nm 的范围内调谐，并在 250 到 255 K 的热沉温度下匹配中心位于 $3.27 \mu\text{m}$ 的目标波段，如图 9 所示。这个波段对于灵敏检测甲烷和它的同位素来说极为重要。从图中可以看到，在对该激光器进行了室温下 140 mA 的 24 小时预烧检验后测定的其波长与初始测量数据几乎重叠；其不确定性在仪器精度范围以内，这表明所制造出的 DFB 带间级联激光器具有好的可靠性。对比更早期的带间级联激光器和典型的量子级联激光器，这些热电制冷的带间级联激光器用了较少的级联台阶数(11 或 12)。这是因为带间级联激光器中每单位电流密度所产生的光增益较高。这也被后来的一些实验研究结果所验证^[39,40]。由于级联台阶数的减少，阈值电压被降低，导致其功率损耗减小，从而有利于便携式仪器的应用。一个完全封装的单模分布反馈带间级联激光器，后来成功地用于野外甲烷和水的原位测量^[66]。

尽管带间级联和量子级联激光器有着类似的级联架构，它们之间还是有着重要的区别。例如，带间跃迁的非辐射驰豫过程相比相应的子带间跃迁慢一个数量级以上。此外，带间级联激光器的电流输运由导带态和价带态同时参与，是一个双极型器件。因此，在考虑优化载流子输运和粒子数反转以实现激射时，可以在设计上有明显的变化。即便如此，早期带间级联激光器的器件设计和实践，仍受基本上平行展开的量子级联激光器研究的影响，后者进展十分迅速且成果斐然。例如，为了确保类似于量子级联激光器中所需的平滑和快速的输运以建立粒子数反转，如早期的理论工作所建议的那样^[20]，带间级联激光器中空

穴和电子注入区之间的二类异质结界面处的 AlSb 层是相当薄的(10 或 12 \AA)^[22,28]。然而，AlSb 势垒也应保持足够厚，以抑制经过类似于半金属界面的带间光吸收损耗。这类光损耗可能是导致早期的带间级联激光器有较大内部损耗(80 到 200 K 温度时损耗为 $36\text{--}62 \text{ cm}^{-1}$ ^[108])的部分原因。后来在 JPL，几个改进的设计被付诸实施，其中包括在级联区和过渡/连接区的二类异质界面、以及电子注入区与有源区之间，采用较厚的 AlSb 势垒($16\text{--}32 \text{ \AA}$)。二类异质界面处较厚的 AlSb 势垒减少了经过类半金属界面的带间光吸收损耗，而电子注入区与有源区之间的厚 AlSb 势垒则抑制了有源区的导带跃迁态的波函数延伸到相邻的注入区。因此，光跃迁的电子态更多地限制在有源区，这样增强了带间跃迁的两个态的波函数交叠，从而提高了增益。这些设计变化使得器件能以较少的级联阶数达到相当高的工作温度(例如脉冲模式下达 350 K)；与之前的带间级联激光器相比，内部光损耗也降低了(80 K 为 17 cm^{-1} , 270 K 为 35 cm^{-1} ^[39])。然而，应该指出的是，设计的改进并不总是会产生器件性能上所期待的进展。由于带间级联激光器的复杂性、材料质量和含锑材料器件的制备上较为广泛的可变性，很难仅仅根据理论模拟就能断定一些设计上的修改对器件性能上产生哪些影响，往往需要将理论上的建议和实验上的反复试验相结合才能有所进展。

上述的早期带间级联激光器采用了简单的常规三层波导结构，即由下包层、级联区和上包层组成。这些波导包层由短周期的 InAs/AlSb 超晶格组成，其折射率(~ 3.37)比级联区($\sim 3.43\text{--}3.47$)略小，导致大量的光波穿透深入到包层区域，如图 10 所示。如果下包层不够厚，那么会有大量的光波导模式泄漏到高折射率(~ 3.8)的 GaSb 衬底，并与衬底光腔模式发生干涉。这导致了一个对光增益/损耗的周期调制，其周期与衬底厚度成反比^[109\text{--}111]。这就是在早期带间级联激光器光谱中观察到的多峰模式分组和组间跳模的原因^[28\text{--}32]，这也使得分布反馈激光器的模式选择和波长调谐变得复杂^[32]。这个问题可以用增加超晶格下包层厚度来减轻，代价是更长的生长时间和更差的热导率。更优的解决方案是在带间级联激光器中引入分别限制层(separate confinement layers, SCLs)和适当的包层。这些将在下一节中讨论。

IV. 近来的进展和目前的状态

当带间级联激光器的特点逐渐为人们所认识后，

更多的小组加入了这个研究领域，并在器件性能上不断取得突破性进展，包括室温连续波工作，低阈值和大功率输出等。这些成果得益于多方面的改进，例如波导结构和级联区结构的优化，以及材料生长和器件工艺的稳定性提升。必须说明的是，虽然下面各节从不同区域分别阐述结构的优化，但是器件性能的提高往往是多个因素共同作用的结果，而不能简单地归功于某个单一因素。

A. 波导结构的优化

一般地，激光器在阈值时的光增益和损耗的关系为：

$$g_{\text{th}} = \frac{\alpha_{\text{free}} + \alpha_{\text{mirror}} + \alpha_{\text{other}}}{\Gamma}$$

其中， α_{free} 是自由载流子吸收损耗， α_{mirror} 是镜面损耗， α_{other} 是其它损耗， Γ 是有源区的限制因子。优化激光器波导结构的目的包括提高有源区的限制因子并减少波导中的自由载流子吸收损耗，从而达到降低阈值的效果。

提高有源区的限制因子有两种方法，一是增加有源区的总厚度或有效厚度；二是提高波导芯层与包层的折射率差。下面提到的分别限制层和等离子波导，都是利用第二种方法。

1. 分别限制层

分别限制层 (separate confinement layers) 很早就被用在有源区较薄的二极管激光器中，以增强载流子和光场的双重限制^[112~114]。虽然分别限制层曾在早期关于带间级联激光器中的一篇综述中提到^[22]，但是并没有应用到早期的带间级联激光器中。这些早期的带间级联激光器，采用了较多的级联阶数 (> 20)，可以在结构设计尚不优化的情况下有较高的光增益和光限制因子。后来，人们意识到，由于带间级联激光器在单位电流密度下具有相当高的微分增益，用较少的级联阶数仍是可以达到激射的。由此带来的好处包括：工作电压和功率消耗的降低，以及由此带来的可能更高的连续工作温度。此外，为补偿级联阶数较少引起的光限制因子下降，可以在级联结构的有源区和上下波导包层之间各插入一层 GaSb 作为分别限制层。由于 GaSb 层的折射率 (~3.8) 比级联区还高，波导中心层 (级联区+分别限制层) 的平均折射率被拉高了，提高了波导包层和中心层的折射率差，这样光泄漏到包层后的衰减会更快，对超晶格结构的包层厚度的要求

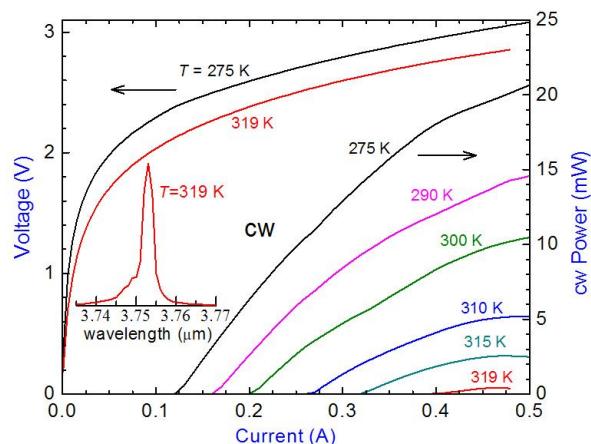


图 11. 一个带间级联激光器的电流-电压-光功率特性，插图为在 319 K 时的激射光谱（承蒙 NRL 的 Jerry R. Meyer 提供）

就会降低，进而减少热阻。而且，具有分别限制层结构的波导可以得到更高、更均匀的有源区光场分布（如图 10 所示）。因此，具有分别限制层结构的带间级联激光器有望得到更好的连续工作性能。

JPL 曾经（2005 年至 2006 年）在带间级联激光器上采用 GaSb 分别限制层和较少级联阶数（6~10）的结构，但相比常规的简单三层波导结构，器件性能并没有提高^[42]。在这些初期的带有分别限制层的带间级联激光器结构中，为了平滑载流子输运，GaSb 层 ($\sim 100 - 200$ nm) 是轻微 p 型掺杂或者不掺杂的。由于 GaSb 材料本身具有 p 型背景，较多的空穴（浓度约 $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 或更高）增加了自由载流子的吸收损失。后来，为了减少光损耗，JPL 生长了以掺 Te 的 GaSb 作为分别限制层的带间级联激光器结构；但由于背景浓度的起伏以及对 Te 掺杂浓度精确度控制的困难，当时其器件性能的提高有限（比起常规三层波导结构的器件，80 K 时的功率效率提高到约 31%，最高连续工作温度达到 266 K）^[42]。

2005 年，美国海军实验室 (NRL) 开始使用 Riber 分子束外延系统生长带间级联激光器。凭借之前在含锑化合物光泵浦和电泵浦的二类量子阱中红外激光器方面积累的丰富经验，他们迅速取得了显著进展（例如，80 K 时连续输出光功率超过 1 W^[43]，连续工作温度达到 269 K^[44] 和 288 K^[45]，均采用了单层分别限制层和 10 个级联周期）。终于在 2008 年，他们达到了室温连续波工作这一重要里程碑。如图 11 所示，他们实现的带间级联激光器在连续波模式下激射的最高温度为 319 K，激射波长在 3.7 μm 附近^[46]。该

带间级联激光器有 5 个级联周期，级联区两侧各有一层 n 型 200 nm 厚的 GaSb 分别限制层。另外，其结构采用了后面将要讨论的短注入区设计。器件在 300 K 时的输出光功率超过 10 mW，阈值功耗小于 0.6 W，功率转换效率大于 1%。紧接着，NRL 将这种优异的器件性能覆盖到 2.9~4.2 μm 波段，连续波工作温度提高至 345 K，并且通过分布反馈光栅和外腔调制，实现了器件的单模工作^[47~53]。这些高性能的带间级联激光器一般由 5 个级联周期构成，其阈值电流密度很低（78 K 时为 1.7 A/cm²，300 K 时为 360 A/cm²），阈值电压也较低（300 K 时为 2.1~2.5 V），从而器件的功耗大大降低（0.9~2.5 kW/cm²）^[53]。另外，这些激光器都在它们的波导结构中使用了 n 型的 GaSb 分别限制层并生长在掺 Te 的 n 型 GaSb 衬底上。与采用 p 型 GaSb 分别限制层和衬底比，这种结构的光学损耗大为降低。

2. 等离子波导

前述的带间级联激光器都是生长在 GaSb 衬底上，波导包层由超过 2000 个界面，总厚度达数微米的 InAs/AlSb 超晶格构成。在这么复杂结构上要实现应变平衡，MBE 源炉闸门要数千次的开合，这些都对材料生长提出了挑战。除此之外，InAs/AlSb 超晶格材料的热导率很低 ($\kappa \sim 0.03 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$ ^[115])。而对于所有激光器来说，散热是一个很重要的问题。如此厚的超晶格层不利于将有源区产生的热传递出去，还可能会带来器件可靠性方面的隐患。而且，当采用超晶格波导包层的带间级联激光器往更长的波长发展，就需要更厚的波导包层来补偿更长的光波衰减长度，这使得散热问题变得更加严峻。这一问题可以用等离子波导的方式解决。这就是将带间级联激光器生长在 InAs 衬底上，波导包层由高掺杂的 InAs 层构成。InAs 在高掺下由于等离子效应其折射率显著降低，使之成为良好的波导包层材料，这样的波导也被称为等离子增强型波导，简称等离子波导^[116]。与 InAs 相比，GaSb 则由于电子有效质量约大一倍等原因，需要更高的掺杂才能降低折射率，并且可能导致光学损耗比 InAs 基的带间级联激光器大。此外，在 GaSb 中 n 型掺杂（使用 GaTe）浓度高于 $5\times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 是很困难的。所以，GaSb 较不适合作为等离子波导包层。

InAs 等离子波导相对于 InAs/AlSb 超晶格波导，主要有如下三个优势。首先，InAs/AlSb 超晶格的折射率约为 3.37，而 InAs 等离子层的折射率可以通过高掺杂调节到 3 左右，远小于级联区的折射率。因此采用等离子波导可以得到相当大的折射率差，加上

采用 InAs 作为分别限制层（折射率约 3.5），光场被更多地限制在整个波导的中心，从而减少光泄漏入波导包层和衬底。而且越往长波方向，等离子效应越显著，折射率差越大，等离子波导的优势越明显。其次，InAs/AlSb 超晶格和 InAs 体材料的热导率分别约为 $0.03 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$ ^[115] 和 $0.3 \text{ W/cm}\cdot\text{K}$ ，因而 InAs 等离子波导有更好的散热，有助于提高器件的工作温度和可靠性。热模拟结果表明，对于脊宽为 20 μm，含有相同厚度波导包层的未厚镀金的器件，等离子波导激光器比采用超晶格波导包层的器件的比热阻要低 42%（两者分别为 $7.2 \text{ Kcm}^2/\text{kW}$ 和 $12.5 \text{ Kcm}^2/\text{kW}$ ）。相比于等离子波导包层，当波长增长时，超晶格波导包层需要变得更厚，所以采用等离子波导包层的带间级联激光器的热阻的降低实际上应会比 42% 更多些。第三，等离子波导带间级联激光器采用高掺的 n 型 InAs 代替厚的 InAs/AlSb 超晶格作为波导包层，极大地减少了 MBE 生长过程中的源炉闸门开合，显著减小了整个激光器结构的应变累积。不过要注意的是，InAs 的晶格常数在 InAs/GaSb/AlSb 体系中是最小的，因而要引入 AlAs 或 GaAs 界面来保持整个结构应变平衡。这种界面可能会影响注入区中载流子的注入效率和输运过程。

图 12 是激射波长都在 4.6 μm，一个具有 10 阶级联结构，高掺的 InAs 作为上下波导包层的带间级联激光器与一个具有 20 阶级联结构的常规超晶格波导包层的带间级联激光器（图 12a）及一个具有 10 阶级联结构的含 GaSb 分别限制层的带间级联激光器（图 12b）中光场分布模式的比较。从图中我们可以看出，对于等离子波导的带间级联激光器，泄漏入包层的光场 (Γ_{clad}) 仅仅只占 4%。这样，由于只有很小部分的光波存在于损耗很高的 n 型高掺 InAs 波导包层中，激光器的光学损耗将会大大降低。这一点也被在具有相似等离子波导结构的 InAs 基的子带量子级联激光器上证实：研究者^[117,118]发现它们在 4.5 和 10 μm 波段的光学损耗只有 $6 \sim 8 \text{ cm}^{-1}$ 。而且，这种等离子波导结构也使得人们有较大的灵活性和自由度来调节级联的阶数以提高器件性能，而不必过多考虑光波向波导包层和衬底的泄漏。

虽然等离子波导很早就在量子级联激光器上采用过^[116~119]，但一直都没有应用到带间二极管激光器上。直到 2008 年，俄克拉荷马大学的研究者开始尝试在 InAs 衬底上生长等离子波导带间级联激光器。他们从最初的两片材料所获得的结果证实了等离子波导带间级联激光器与早期超晶格波导带间级联激光

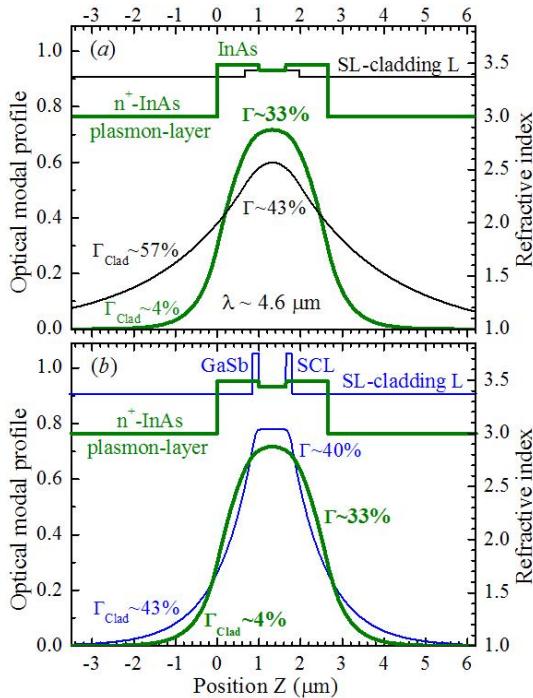


图 12. 一个具有等离子波导、10 个级联台阶的带间级联激光器结构(粗线)与(a)常规波导、20 个级联台阶, 和(b)具有超晶格光包层—分别限制层、10 个级联台阶结构的光学模式和折射率分布。图中给出了三种结构中级联区(不包含分别限制层)和光包层的限制因子

评：这是两个很差劲的比较图。a图的级联数不一样，不具可比性；b图SL的光限制明显更好

器相比, 热阻降低了约 50%^[54~56,120]。尽管在初次尝试时, 材料质量和器件设计还比较原始, 缺乏优化, 这些等离子波导结构的带间级联激光器(无电镀厚金)在 6 μm 和 7.5 μm 波段的最高连续波工作温度分别达到 184 K 和 141 K^[56]。在脊形波导上面电镀一层厚金以提高散热后, 器件能实现 7 μm 附近 152 K 的最高连续工作温度; 器件在脉冲模式下的最高工作温度为 168 K, 这也表明当时的器件性能主要受限于本征的器件性质而非散热问题。与那时候其他激射波长超过 5.5 μm 的半导体激光器相比, 它们具有较低的阈值电流密度(82 K 时 6 μm 波长激光器 49 A/cm², 84 K 时 7 μm 波长激光器 72 A/cm²)。而且, 这些等离子波导带间级联激光器的电压利用效率也非常高, 达到 93%。

为简化 MBE 生长, 这些初始的等离子波导带间级联激光器只有一层厚的高掺 InAs 作为波导下包层, 波导芯层上只有一层很薄的(35 nm)高掺 InAs 层作为顶部电接触层, 而没有通常的半导体波导上包层, 因此顶部制作的金属接触层可能会引起较大的光学损耗。但损耗并不足够大到阻止激光器在低温时工作。必须指出的是, 相比于横磁(TM)偏振模式的量子级

联激光器, 金属层引起的光学损耗在横电(TE)偏振模式的带间级联激光器中较小。并且, 半导体电接触层与金属接触层之间大部可以插入一层电介质层(如二氧化硅), 起到波导上包层的作用, 从而大幅降低损耗。研究表明, 波导上包层采用电介质-金属混合层来代替 InAs 等离子层, 可以取得类似或者略微更好的激光器性能, 这与模拟结果相符^[121]。因而在后来的 InAs 基带间级联激光器结构中, 上波导包层都没有 InAs 等离子层, 这样不仅简化了 MBE 生长, 还能使制作分布反馈激光器时更便于引入顶部光栅以加强耦合。

此后, 通过改进级联区的结构, 如缩短电子注入区^[58], 等离子带间级联激光器的性能得到了进一步提高^[122~125]。例如, 它们的阈值电流密度(80 K 时≤10 A/cm²)被进一步降低了, 同时多个激射波段的最高连续波工作温度也被提升了。其中, 它们在波长 4.8 μm, 5.3 μm, 7.4 μm 和 10.3 μm 附近的最高连续波工作温度分别为 282 K^[122], 253 K^[123], 189 K^[124]和 166 K^[125]。图 13 展示了一系列 6 μm 到 10 μm 波段的, 具有 15 个级联台阶的带间级联激光器在 80 K 和它们最高连续工作温度时阈值附近的连续波激射谱。这些器件在低温时阈值电流密度非常低(如 80 K 时 6 到 10 A/cm²), 而且几乎对激射波长不敏感。这说明长波长对带间激射机制的影响并不如预期的严重。窄脊器件的低阈值电流密度和低阈值电压(2 ~ 4 V)意味着非常低的功耗(如 80 K 时小于 10 mW)。这种低功耗在某些应用中是很重要的, 比如需要高灵敏度的长波长探测器的平台。在这种平台中, 探测器由于需要制冷以最小化噪声而已经提供了一个制冷系统。加入一个功耗小于 10 mW 的带间级联激光器将基本上不需要额外的功率来维持制冷环境。因此, 将高效的带间级联激光器和探测器集成在一个系统中是可行的, 而且能大幅节约能量, 从而促进更小尺寸和成本的应用。

在较短的波段, InAs 基的带间级联激光器也取得了令人鼓舞的成果^[122]。例如, 宽脊器件在脉冲模式能在室温以上(可达 320 K)工作, 激射波长接近 5 μm, 300 K 时的阈值电流密度小于 600 A/cm², 阈值电压小于 4 V(级联阶数为 8)。这意味着顶部厚镀金的窄脊器件有可能实现室温连续工作。实际上, 一个窄脊器件(15 μm×2mm)在连续模式下工作温度达 282 K。在 282 K 时阈值电流密度为 1.0 kA/cm², 阈值功耗小于 1 W。另外, 2013 年, University of Wurzburg 的研究者报道了能在脉冲模式, 室温以上工作的等离子波导带间级联激光器^[126], 激射波长超过 6 μm, 最高工作

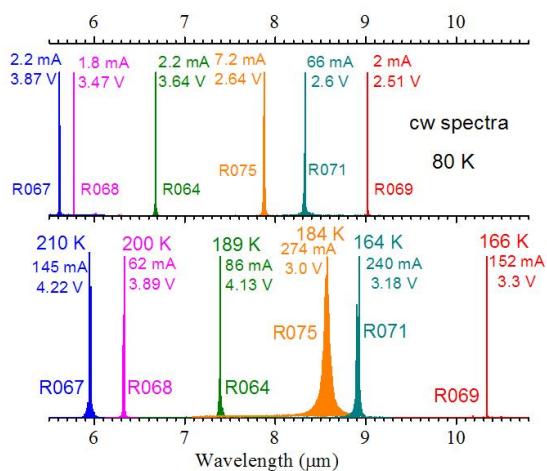


图 13. 多个等离子波导带间级联激光器的连续波工作激射谱

温度达到了 40 °C，室温阈值电流密度为 1.4 kA/cm²。这些激光器有 10 个级联阶数，其波导结构为上下对称结构，包含 1.15 μm 厚的 InAs 分别限制层和 1.6 μm 厚的高掺杂 InAs 等离子层（掺杂浓度为 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ）。

总之，这些器件的性能证实了等离子波导在波长较长的波段是有效的，它们有希望在许多应用上作为高效和可靠的中红外激光源。不过，相比 GaSb 基的带间级联激光器，InAs 基的带间级联激光器依然处于发展的早期。另外，InAs 衬底的质量不如 GaSb 衬底也可能是原因之一。所以需要更多的工作来推进对 InAs 基的带间级联激光器的理解和优化，以及材料生长、工艺和封装的相关技术。

B. 级联区结构的优化

如图 6 所示，一个级联区分为有源区、空穴注入区和电子注入区。级联区优化的目的是减小损耗、提高光增益，从而降低阈值电流密度。

1. 注入区

2010 年德国 University of Wurzburg 的研究小组发表的一篇论文讨论了采用缩短的注入区设计的带间级联激光器^[58]。在这种设计中，注入区只保留必要的厚度使注入区两端基态的能量差在适当正向偏压下约大于一个光子能量。通过减小最开始的 InAs 量子阱的厚度，整个级联周期的厚度可以减小到约 63 nm，这比常规值要小 16%。带来的益处包括异质结界面数的减小，有源区内的光学模式强度的增大，并使得应变

平衡更加容易，从而器件性能得以提高。这个小组曾多年研究锑基一类量子阱激光器，近年来他们开始使用 Eiko EV100S 固源 MBE 系统生长基于 n 型 GaSb 衬底的带间级联激光器。2009 年他们初次报道了关于带间级联激光器的工作^[57]。大约两年后，他们实现了波长在 3.5 μm 附近，最高连续波工作温度达 303 K 的带间级联激光器^[127]。早期人们曾担心缩短的注入区在高电场下可能会出现材料介质击穿的问题^[22]，而此种设计的器件的优异表现消除了这种担心，同时也反映出这个小组高质量的材料和器件工艺。

2. 载流子再平衡

2011 年，美国海军实验室研发出了新一代的带间级联激光器^[59]，其连续波工作温度高达 109 °C，激射波长约为 3.9 μm^[128]。他们采用的自治准平衡分布模型表明，电子大部分滞留在电子注入区，而空穴几乎全部转移到了有源区的 GaInSb 量子阱中，因而有源区空穴的数量远远超过了电子。这对于电子空穴复合发光的双级型器件是不利的。解决这个问题的方案称为“载流子再平衡”(carrier rebalancing)，即在电子注入区进行高掺杂，以平衡有源区中过高的空穴浓度。在具体的结构设计中，电子注入区里六个 InAs 量子阱的中间四个（图 6）的 n 型掺杂浓度，从以前的 $4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 被提高到 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。实验结果表明，阈值电流密度降低到了之前的一半，如 300 K 时为 170 A/cm²。25 °C 时，具有 5 个级联周期的窄脊器件的连续波输出光功率高达 158 mW，是之前的 3 倍，功率转化效率达到 13.5%。与当时已报道的最好的量子级联激光器^[129]相比，新一代的带间级联激光器的功耗密度要小两个量级，25 °C 时其最低功耗只有大约 30 mW。带间级联激光器这种极低功耗的优势在一些需要便携和电池供电设备的应用中显得非常重要。

2012 年，NRL 又将这种低功耗的带间级联激光器拓展到超过 4.2 μm 的波段，并且实现了连续波下 4.9 μm 波长的 60 °C 激射和 5.7 μm 波长的 45 °C 激射^[130]。另外，采用激光器倒焊的方式，改进了散热，从而提高了输出功率和连续工作温度，如图 14 所示。一个窄脊器件 (7.7 μm × 4 mm) 的连续工作温度可达 115 °C，激射波长为 3.9 μm，如图 14 所示。窄脊器件 (25.2 μm × 4 mm) 在 25 °C 时的连续波输出光功率提高到 291 mW，一个短腔长的器件 (15.7 μm × 0.5 mm) 的功率转化效率达到了 15%^[131]，如图 14 所示，这已经逐步接近量子级联激光器目前最好的功率转化效率 (27%)^[132,133]。另外，器件的侧壁被制作成波浪形，这些波浪形侧壁

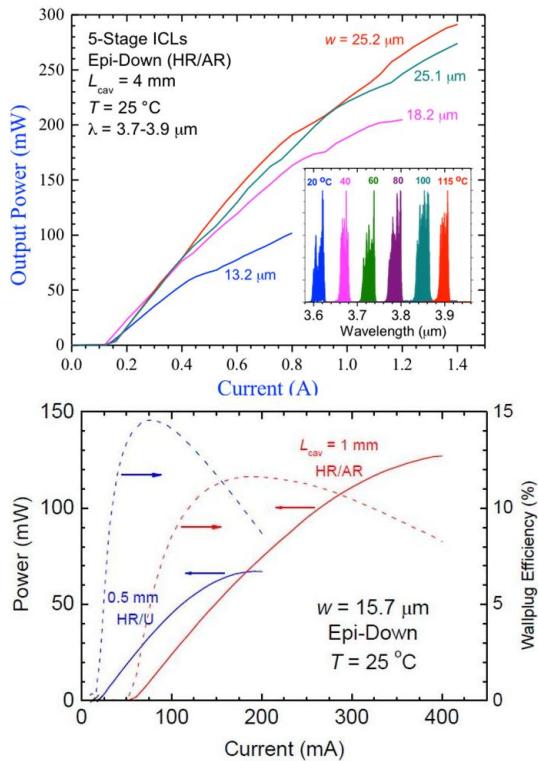


图 14. (上图) 几个不同脊宽(w)的脊型波导带间级联激光器在室温连续工作下的光-电流特性曲线。对于所有不同脊宽的器件, 最高输出功率点的光束质量约为其衍射极限的两倍。这些连续工作的带间级联激光器在 25 °C 到 115 °C 的温度区间内的激射波长从 3.6 μm 变化到 3.9 μm, 插图是其中一个窄脊器件(7.7 μm×4 mm)在此温度区间的激射光谱。(下图)两个脊宽为 15.7 μm 的器件在连续模式下的光功率曲线和相应的功率转换效率。(图片来自于文献 [131], with permission from OSA)

使得较少的光子会处在易于遭受光散射损耗的高阶光波模式, 从而降低了光损耗。

2013 年, University of Wurzburg 的研究小组在“载流子再平衡”设计的基础上, 对比了级联阶数分别为 6 和 10 对带间级联激光器性能的影响, 并在材料生长过程中十分注重过渡区 (transition layer) 的微调。器件测试结果表明, 具有 10 个级联周期的激光器室温下的阈值电流密度降低至创纪录^[134]的 98 A/cm², 这一数值已经比目前最好的量子级联激光器结果^[135]约低一个数量级。阈值电流密度的降低得益于更大的光限制因子。另外, 他们尝试了使用四元化合物 AlGaAsSb 代替传统的 InAs/AlSb 超晶格作为波导包层, 结合 GaSb 分别限制层, 也实现了 3.4 μm 附近 45 °C 的连续波工作^[136]。美国海军实验室则通过锥形脊的设计, 进一步提高输出光功率, 将 25 °C 时的连续波工作下的光功率提升至 403 mW^[137]。此外, 在器件单模特性工作方面, 他们通过在器件顶部刻

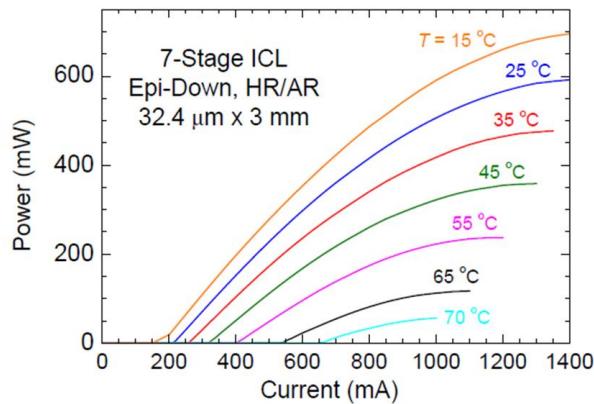


图 15. 15 至 70 °C 时, 具有 7 个级联周期的带间级联激光器在连续模式下的光功率曲线。(图片来自于文献 [139], with permission from OSA)

蚀 DFB 光栅, 将带间级联激光器的连续波单模工作温度提升至 80 °C, 器件在 40 °C 时的单模输出光功率达 27 mW, 边模抑制比大于 30 dB, 激射波长为 3.8 μm^[138]。

2014 年, 美国海军实验室将级联周期从 5 个增加到 7 个的同时把分别限制层从 500 nm 加厚到 700 nm, 进一步提高了激光器的输出功率。一个有着倒焊和腔面镀膜工艺的窄脊器件(32.4 μm×3 mm)在室温连续波条件下输出功率达到创纪录的 592 mW (如图 15), 其斜率效率高达 815 mW/A^[139]。这一纪录已经逐渐逼近早期理论的预测^[140]。采取更多的级联周期还可能再提高激光器的输出功率, 但同时也会提高功耗密度。所以最优的级联阶数取决于实际应用的需要。

C. 其它特性

随着带间激光器性能的逐渐成熟, 其它的一些特性如光束质量、波长调谐、高速调制等性能也开始得到重视和多方面的研究, 为其将来能投入更加广泛的实际应用开辟了前景。

1. 远场分布和光束质量

在中红外波段, 激光的远场光斑往往受制于光的衍射的本征特性。由于带间级联激光器的波导中心区厚度只有几微米或更小, 与波长尺寸相当, 所以发出的激光在纵向(快轴方向)的发散角很大。而在侧向(慢轴方向), 脊的宽度一般要大于激射波长, 所以在这个方向的光的发散程度受到的衍射影响较小, 激光光束能以接近衍射极限的较小发散角进行传播。

NRL 曾报道了在 14 倍阈值大小的注入电流区间内, 带间级联激光器的光束质量仍能在慢轴方向保持在衍射极限的两倍以内^[141]。

在制作半导体激光器的常规工艺中, 人们习惯把脊的中间位置作为电注入的窗口。然而, 俄克拉荷马大学的研究者发现, 如果顶部半导体波导包层缺失或者非常薄, 横侧方向上的基模会遭受更大的损耗, 基模的激射被抑制, 而一阶模会优先激射, 这会导致远场出现双峰的图案^[142]。而双峰的远场使光变得发散从而不利于实际的应用。研究者发现当将电注入窗口置于脊的两侧附近时, 一阶模的损耗增加, 使得激光器在基模工作。

当带间激光器的输出功率得到稳步提升后, 光束质量因子 (beam quality factor) 或亮度 (brightness) 开始受到研究者的关注。具有光子晶体分布反馈结构的带间级联激光器, 其远场发散角的半高宽仅为 0.5 度, 光束质量因子 M^2 为 2, 达到了近衍射极限的光束质量^[143]。具有 5 个级联区的带间级联激光器锥形器件的光束质量因子 M^2 为 2.3, 亮度 B 可达 175 mW^[137]。尽管亮度已经很高, 但是激光的远场光斑整体上还是一个纵向很长的扁椭圆形状, 不利于一些需要进行光耦合的光学系统的应用。如果能制作成垂直腔面发射的器件, 则可以从根本上解决这个问题。

2. 双波长, 宽调谐, 自由空间通讯和自混合效应

能发射两个或更多截然不同的波长的半导体激光器在光通信, 光记录系统, 光谱学和非线性光学等领域有着重要的应用。特别地, 为了实现腔内非线性光学和发散较小的光束质量, 以及顶部光栅与谐振腔模式的耦合, 很有必要在单个波导内实现双波长的激射。然而, 对于带间二极管激光器, 要在单个波导内实现双波长激射则很困难, 因为载流子复合将优先发生于最先激射的有源区, 而且含有较长波长的有源区会造成较短波长的光吸收损耗。这种优先复合的问题可由一个高掺杂的 Esaki 隧穿结来避开^[144~146], 即通过串联连接的方式使得载流子能够均匀地注入各个有源区中。但是, 这种高掺杂的 Esaki 隧穿结导致了很高的吸收损耗。为了减少这些损耗, 不同波长的有源区用较大距离分隔开, 波导设计成垂直方向的高阶模激射, 而不是基模, 但这会导致激光束变得更发散。带间级联激光器可以避免这个问题, 这是因为在这种结构中, 带间的隧穿可以通过二类异质结界面来实现, 而无须采用 Esaki 隧穿结。俄克拉荷马大学的研究者在单个

波导内生长了两个堆叠在一起的级联结构。下级联区有 12 个级联周期, 设计在较长的波长激射; 上级联区有 9 个级联周期, 设计在较短的波长激射。器件在脉冲模式下实现了 6 μm 和 5 μm 两个波长的同时激射^[147]。在不同电流注入的条件下测得的垂直方向上的远场呈现的是稳定的单瓣图案, 与模拟结果相符^[122]。这证实了两个波长的光场完全交叠, 且同为基纵模。

在光谱学和生化分析等领域需要波长可广泛调谐的中红外激光器。S. Suchalkin 等人首次报导了可以通过电流在较宽范围内调制波长的带间级联激光器^[148], 其波长蓝移的范围为 120 nm 或 120 cm^{-1} 。而俄克拉荷马大学的研究者实现了更大范围调谐的带间级联激光器^[149], 且波长是随电流增加往长波方向移动的。他们通过设计来调节有源区二类量子阱的波函数, 使得在电流注入下热效应和 Stark 效应可以在同一个方向共同作用以加强激射波长的红移。这种调谐的带间级联激光器在 4.5 μm 波长附近的红移范围约为 280 cm^{-1} (以能量计为 34 meV, 以波长计为 630 nm), 在 7 μm 波长附近的红移范围约为 180 cm^{-1} (即 22 meV 或 900 nm)。

与近红外光相比, 中红外自由空间光通讯具有衰减更小的优势。2009 年, Soibel 等人报导了首个高速调制的带间级联激光器, 其调制频率可达 3.2 GHz^[150]。随后他们报导了用带间级联激光器在 3 到 5 μm 的大气透射窗口进行自由空间通信的实验^[151]。其传输速率可达 70 Mb/s, 误码率则小于 10^{-8} 。此外, 2013 年, Bertling 等人验证了带间级联激光器中存在的自混合效应 (self-mixing)^[152]。自混合效应是激光器发出的光与探测物体发生相互作用后返回到激光器谐振腔, 从而引起激光器工作参数的微扰变化。该小组通过监测激光器两端电压的变化来获得自混合信号, 再还原出探测物体的图像, 这样用单个激光器实现了外置探测器的功能。

V. 未来发展趋势及总结

经过近 20 年的发展, 带间级联激光器现在已经能在 2.7~5.9 μm 的范围实现室温及室温以上的连续波模式工作。图 16 总结了部分结果, 图中也包括了已有报道的基于三五族的带间二极管激光器的结果。考虑到带间级联激光器的研究仍然具有广阔的发展空间, 其室温连续工作的波长很可能超过 6 μm 。不过, 目前仍然不清楚此种激光器的最高连续工作温度和激射波长的极限在哪, 这可能要取决于对俄歇复合的抑制程

度。在二类量子阱中, 俄歇复合由于波函数交叠的减少而降低, 并且原则上俄歇复合可通过量子工程的能带剪裁进一步得到抑制^[153~155]。不过, 不管是对设计还是实际操作, 由于需要考虑激发态, 通过量子工程抑制俄歇复合依然是个挑战, 其有效性尚无实验上的证据。然而, 近来的研究发现带间级联激光器的二类量子阱中的俄歇系数低于预估; 而且, 跟早期的结果相比, 波长的变化对俄歇系数的影响变弱^[156,157]。但是, 最近的另一研究工作^[158]指出, 阈值电流中由非辐射复合引起的电流损失仍然很大, 此种现象在高温下更为显著 (300 K 时 > 90%), 这也是俄歇复合参与的结果。尽管人们仍然不太清楚俄歇复合和其他一些非辐射复合到底如何影响带间级联激光器的器件性能及其优化, 但带间级联激光器是目前唯一的能涵盖整个中红外波段, 并且在光输出功率和工作温度上具有相当表现的带间半导体二极管激光器。与同样能涵盖中红外波段的量子级联激光器相比, 带间级联激光器具有低得多的阈值电流密度^[134] (20 °C 时低至 98 A/cm²) 和阈值电压^[131] (低至 2.3 V), 从而具有很低的功耗密度^[131] (目前最低 315 W/cm²), 如图 17 所示^[159]。这种优势从根本上是因为带间跃迁的载流子弛豫过程要比子带间跃迁约慢三个数量级, 从而导致带间级联激光器中每个台阶单位电流密度下具有的微分增益要比量子级联激光器约大两个数量级^[68]。另外, 它们激射的光子的极化模式也不同。和所有的带间激光器一样, 带间级联激光器的激射光子是横电波 (TE) 模式, 而量子级联激光器的激射光子是横磁波 (TM) 模式。因此, 带间级联激光器结构是可以实现电泵浦的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的。目前, 光泵浦的垂直腔面发射二类量子阱中红外激光器已经实现^[160], 基于边发射带间级联激光器研究所取得的长足进步, 研究者将可能实现具有良好光束质量及灵活二维阵列排列的电泵浦垂直腔面发射的带间级联激光器。另外, 边发射的带间级联激光器需要能实现在室温下连续波输出光功率超过 1 W, 以满足远程遥感及红外对抗的需要。这需要研究者进一步提高材料质量、器件设计和工艺以及热控制 (如倒焊) 技术。值得一提的是, 最近基于一类量子阱的带间级联激光器的研究在提高斜率效率和输出光功率方面也取得了显著成绩, 这使得含有级联结构的带间激光器的激射波长可在短波方向拓展至 2.3 μm^[161,162]。此外, 一个波长约为 2.3 μm 的电泵浦的垂直腔面发射激光器也采用了类似于带间级联的结构, 实现了室温连续波工作, 并相比单阶的面发射激光器, 获得了更高的输出光功率^[163]。

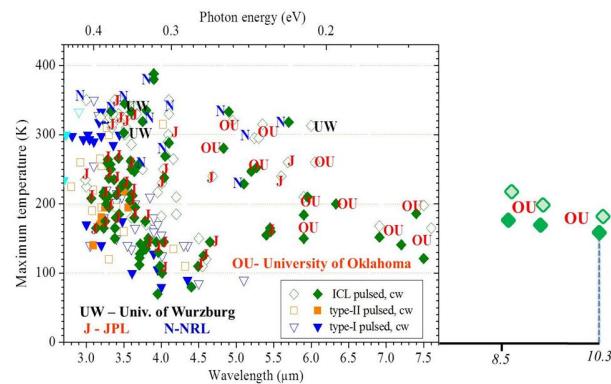


图 16. 基于 III-V 族半导体化合物的中红外带间二极管激光器的工作温度和波长。字母 J, N, OU 和 UW 分别代表在 JPL, NRL, University of Oklahoma 和 University of Wurzburg 所生长的激光器

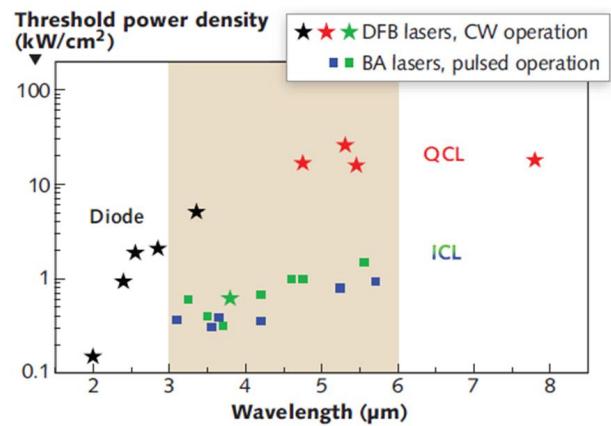


图 17. 二极管激光器、量子级联激光器与带间级联激光器在阈值时的功耗密度的比较。其中, 黑色星形代表 DFB 二极管激光器 (数据来自于 University of Würzburg 及德国 nanoplus 公司); 红色星形代表 DFB 量子级联激光器 (数据来自于 Northwestern University 及瑞士 Alpes 公司); 方形代表宽脊带间级联激光器, 绿色是来自于 NRL 的结果, 蓝色是来自于 University of Würzburg 的结果, 绿色星形是 DFB 带间级联激光器的结果。可以看到, DFB 带间级联激光器的功耗密度与宽脊的带间级联激光器相当, 但远远低于量子级联激光器的功耗密度^[159]

随着室温工作的中红外激光器发展到可实用化的阶段, 人们对其它相关的红外光电器件的需求也会日益增长。实际上, 基于量子工程的带间级联结构可以用于实现高性能光电探测器^[164~167]。这类被称为带间级联红外探测器 (ICIP) 的光电器件可以克服载流子扩散长度的限制, 可高温、高速工作, 并且具有低噪的优点。初步的研究结果表明带间级联红外探测器可以在 400 K 以上温度环境中工作^[168,169]。另外, 带间级联结构也可以应用到热光伏 (TPV) 器件上^[170~172]。在这类器件中, 多级分立的吸收区通过二类异质结的结构被串联起来, 这使得载流子可在不同的级联区之间顺

利地输运; 同时, 每一单独的级联区产生的光电压被叠加起来, 从而使得整体的开路电压很高。窄带隙(例如, 0.23 eV, 对应截止波长超过 5.3 μm) 带间级联热光伏(IC TPV) 器件已经实现了在室温及更高温度工作, 并具有高的开路电压(比如 0.65 V)^[173~175]。从这些结果看来, 将带间级联激光器, 带间级联红外探测器及其他一些相关器件集成在同一芯片或子系统上是可行的, 这也将是带间级联相关器件未来的发展方向之一。

致 谢

文章作者感谢他们的同事和合作者们: L. E. Christensen, M. E. Curtis, C. J. Hill, R. T. Hinkey, M. B. Johnson, J. C. Keay, J. F. Klem, K. Mansour, T. D. Mishima, Y. Qiu, M. B. Santos, Z. Shi, J. Sluss, A. Soibel, Z. Tian, H. Ye, Z. Yin, M. Zaman, F. Zhao, L. Zhao 对俄克拉荷马大学(University of Oklahoma) 的带间级联激光器研究和发展所提供的支持、帮助以及贡献。本文描述的激光器工作曾经受到美国航天航空总署(NASA), 加州理工喷气推进实验室(JPL), 美国科学基金会(NSF)(ECCS-1002202) 以及位于俄克拉荷马大学的纳米结构和半导体物理研究中心(C-SPIN, Oklahoma/Arkansas MRSEC)(DMR-050550) 的支持。

附录 A: 带间级联激光器结构的材料生长

材料生长是带间级联激光器研究的挑战之一, 目前生长带间级联激光器结构的主要手段是分子束外延(MBE) 技术。尽管金属有机物气相外延(MOVPE) 技术也能生长出具有较高光学性能的含锑多量子阱结构^[176], 但目前尚未有 MOVPE 制备带间级联激光器的报道。

虽然早在 1977 年, IBM 公司的 C. -A. Chang 等人就采用 MBE 技术生长出 InAs/GaSb 材料^[177], 但在楊瑞青于 1994 年提出带间级联激光器概念的时候, 这种复杂的有数千层超精细的含锑超晶格结构(基于 GaSb 衬底)对于 MBE 技术仍然有不少未知的因素。首先, 构成带间级联激光器结构的 InAs、Ga(In)Sb 和 AlSb 材料具有各自的生长条件, 比如: GaSb 的生长窗口相对较宽, 而 InAs 的生长窗口则很窄^[178]; 高质量的 AlSb 需要高温(560~600 °C) 生长, 但 InAs 生长却不能承受如此高的温度^[179]。而且, 在生长这种含各种超薄层结构的过程中, 各层的生长



图 18. GaSb 和 InAs 基带间级联激光器材料结构的示意图

时间极短, 不宜中途调节诸如生长温度、各层生长速率及 V/III 比等生长参数, 这要求生长者不仅要考虑各层, 还要兼顾整体, 得到适合各层的优化组合。另外, 对于 InAs/GaSb 及 InAs/AlSb 界面, 由于两层薄膜间没有共同的元素, 界面处会出现原子的交换, 界面态有可能为 InSb 界面或者是 Ga(Al)As 界面, 不同的界面态及界面态的厚度不仅会影响整个结构的应变, 也会影响材料的光学质量, 这要求根据需要人为地在生长细节上进行控制。除此之外, 由于带间级联激光器材料的厚度可达数微米, 超晶格层的界面达数千层, 生长时间长, 生长过程中源炉闸门切换频繁, 这也会影响材料生长对设计结构的复制性以及材料生长的可重复性。

带间级联激光器可以生长在 GaSb 或 InAs 两种衬底上。对于前者, 由于 GaSb 的晶格常数恰好位于 InAs 和 AlSb 之间, 通过 InAs、Ga(Al)Sb 和 AlSb 层厚度的精细设计, 较易于实现外延层与 GaSb 衬底间的应力平衡。而若要生长在 InAs 衬底上, 因为 InAs 是“6.1 Å 体系”中晶格常数最小的, 在之上生长 InAs、Ga(Al)Sb 和 AlSb 层时, 需要引入 Al(Ga)As 界面, 以达到外延层与衬底的应力平衡。根据衬底的不同, 生长结构及生长条件也会有差异, 生长时间则从数小时到数十小时不等。图 18 是 GaSb 和 InAs 基带间级联激光器材料结构的示意图。从图中可以看到 GaSb 基结构由于含数微米的 InAs/AlSb 超晶格波导包层, 结构中所含界面较多; 而 InAs 基结构的大部分为 InAs 体材料, 相对易于生长。

休斯顿大学于 1995 年开始尝试生长基于 GaSb 衬底的带间级联激光器, 当时他们使用的是一台 Riber-32 MBE 设备。在 1997 年初, 他们与桑迪亚国家实验室合作, 生长的材料所制作的器件实现了激射。这对研究者是很大的鼓舞—这证明, MBE 技术是可以实现带间级联激光器这种复杂结构的。近年, 随着研究者对材料生长以及器件结构设计理解的深入, 高质量的带间级联激光器材料已经在多个单位的不同

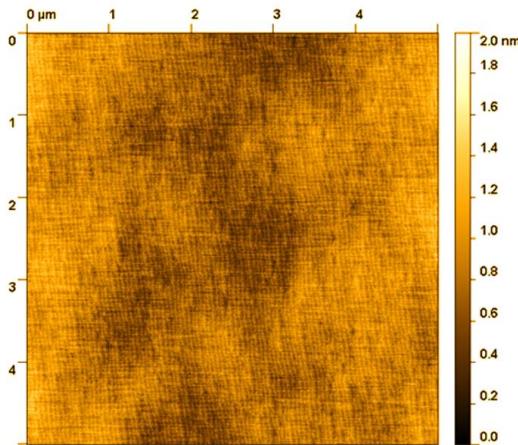


图 19. 一片 $4.9 \mu\text{m}$ 波长 InAs 基带间级联激光器材料的表面 ($5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$) 原子力显微镜照片。材料表面的均方根粗糙度 (RMS) 仅为 2 \AA

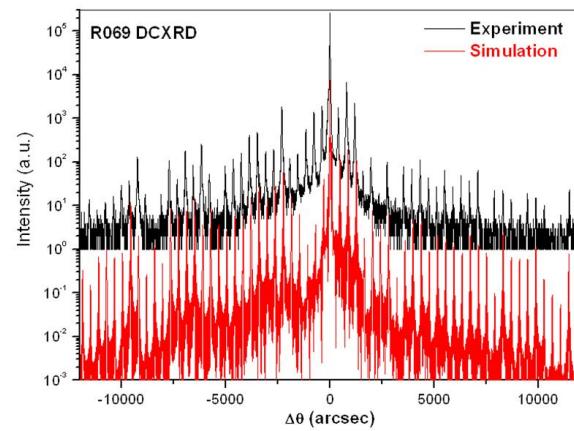


图 20. 一片 $10.4 \mu\text{m}$ 波长的 InAs 基带间级联激光器材料的 [004] 高分辨率双晶 XRD 摆摆曲线 (上) 与模拟结果 (下) 的对比

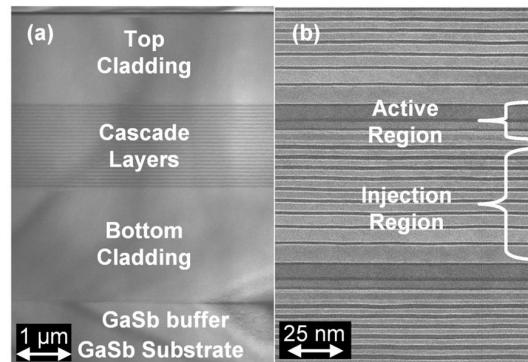


图 21. 一片 $3.7 \mu\text{m}$ 波长的 GaSb 基带间级联激光器材料的截面透射显微镜照片。左图是全结构的照片，右图是大约两个级联周期的照片。(图片来自于文献 [34])

型号的 MBE 设备上实现。其中，NRL、ARL、JPL 以及 University of Maryland/Maxion Technologies 公司专注于 GaSb 基带间级联激光器，俄克拉荷马大学则主要集中于 InAs 基带间级联激光器，而 University of Würzburg 则在 GaSb 及 InAs 衬底上都制备出了高质量的带间级联激光器材料。

光学显微镜、原子力显微镜、双晶X射线衍射以及扫描/透射电子显微镜等材料表征手段可以用来评判材料质量，给材料生长提供反馈，并为下一步的器件制作提供参考。图 19 是一片波长为 $4.9 \mu\text{m}$ 的 InAs 基带间级联激光器材料的表面原子力显微镜 (AFM) 照片，在 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 的扫描区域内未见缺陷，原子台阶清晰可见，均方根粗糙度 (RMS) 仅为 2 \AA 。图 20 是一片波长为 $10.4 \mu\text{m}$ 的 InAs 基带间级联激光器材料 (俄克拉荷马大学生长) 在 [004] 方向的高分辨率双晶X射线衍射结果，衬底峰两侧 $\pm 3.5^\circ$ 范围分别有超过 30 级的卫星峰，显示出材料中超薄层间界面的良好平整度；从卫星峰峰间距得出的级联区周期值为 473 \AA ，与设计值 475 \AA 相比，误差仅为 -0.4% ；实验结果与模拟结果的高度相似度也反映出在数十小时的生长过程中，MBE 的稳定性以及其能很好复制带间级联激光器结构的能力。图 21 是在 JPL 生长的一片波长为 $3.7 \mu\text{m}$ 的 GaSb 基带间级联激光器材料的截面透射显微镜 (TEM) 照片^[34]，从图中可以直观地看到整个结构 (左图)，而且级联区中超薄层间的界面平整，层与层间的切换清晰 (右图)。从这些材料表征结果可以看出，研究者通过“能带工程”调节带间级联激光器各项性能指标的愿望完全可以由 MBE 技术生长的高质量

材料而实现。

附录 B: 带间级联激光器的器件工艺

带间级联激光器的器件结构一般为双沟道脊形结构。脊宽的大小对器件性能影响显著，宽脊会提升输出光功率，但降低了器件散热能力；而窄脊会提升器件连续波工作温度，但却牺牲了输出光功率。根据脊宽的大小，带间级联激光器可以大致分为宽脊器件 (脊宽为 $70\sim150$ 微米)^[180] 和窄脊器件 (脊宽为几微米至数十微米)^[52,142]。

宽脊器件的器件工艺相对简单，可以不需沉积绝缘层，而且脊的刻蚀粗糙度对器件性能的影响较小，但其散热性能较差。所以，一般通过测试宽脊器件在脉冲条件下工作的器件性能 (如阈值电流密度，最高脉冲工作温度等)，评估设计的改动对器件性能的影

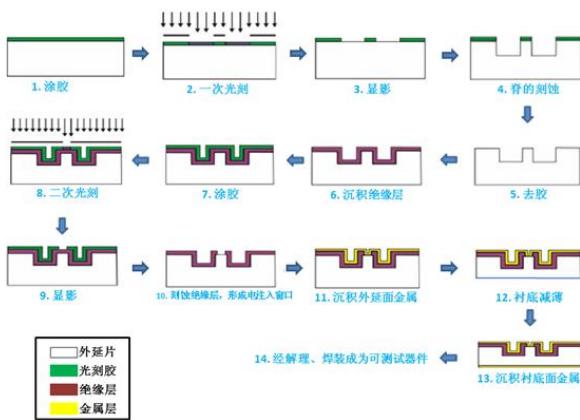
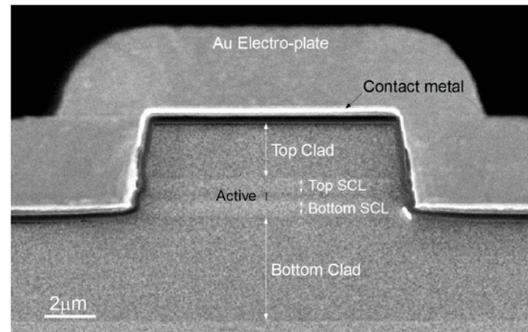
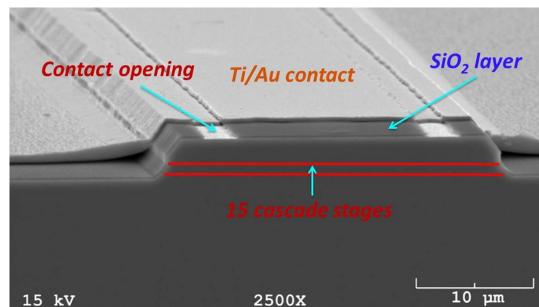


图 22. 带间级联激光器窄脊器件的基本工艺流程示意图

响, 判断外延材料质量, 从而达到对外延材料的筛选。宽脊的刻蚀一般通过化学湿法实现, 刻蚀深度须达到级联区以下, 以阻止注入电流在级联区的横向扩散。由于宽脊器件中侧向(脊宽方向)的模式较多, 在刻蚀脊时, 可在侧壁引入类似光栅的褶皱, 以抑制侧向寄生模式的激射, 纯化激射模式^[52]。

与宽脊器件相比, 窄脊器件的周边面积与体积之比较大, 因此窄脊器件具有更好的散热性能, 在连续波模式下易于达到更高的工作温度。图 22 是带间级联激光器窄脊器件的基本工艺流程示意图, 其中, 脊的刻蚀是关键步骤之一。由于化学湿法刻蚀的各向同性及其对材料的选择性, 极窄脊宽的脊通常需要通过干法刻蚀来实现, 以达到更精确的对脊宽和刻蚀深度的控制; 不过, 干法刻蚀会带来侧壁的损伤, 通常需要再附加一段短时间的化学湿法刻蚀。图 23 是 NRL 通过干法刻蚀制备的脊宽为 $10.3\text{ }\mu\text{m}$ 的 GaSb 基带间级联激光器的截面 SEM 照片^[130]。可以看到, 虽然由于干法刻蚀后化学湿法的处理, 在侧壁的分别限制层(SCL)部分, 有轻微的侧向腐蚀发生, 但总体来说, 脊的侧壁轮廓整齐、陡直。对于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以上脊宽的脊结构, 化学湿法刻蚀仍然是可行的, 图 24 是俄克拉荷马大学通过化学湿法刻蚀而制备的脊宽为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 的 InAs 基带间级联激光器的 SEM 照片。与图 23 相比, 湿法刻蚀得到的脊的侧壁具有相当的倾斜角度, 这与湿法刻蚀的各向同性相关; 另外, 侧壁轮廓是一条不规则的折线, 这来自于湿法刻蚀对材料的高选择性; 图中的器件采用了近侧边的双注入电流通道, 这主要是为了减少光损耗和改善器件的远场特性^[142]。

带间级联激光器的绝缘层材料通常采用 Si_3N_4 和(或) SiO_2 。虽然 SiO_2 的刻蚀工艺简单, 但

图 23. 一个采用干法刻蚀的窄脊器件(脊宽 $10.3\text{ }\mu\text{m}$)的截面 SEM 照片(图片来自于文献 [130], with permission from OSA)图 24. 一个采用湿法刻蚀的窄脊器件(脊宽 $30\text{ }\mu\text{m}$)的 SEM 照片

热导率却比 Si_3N_4 低一个数量级以上^[181,182], 所以通常采用 Si_3N_4 作为绝缘层材料。不过, 湿法刻蚀 Si_3N_4 时须采用 SiO_2 作为掩膜, 且刻蚀速度慢、较难控制, 因此对于 Si_3N_4 通常采用干法刻蚀。而且, 如用 PECVD 等手段来沉积时, Si_3N_4 材料有可能出现针孔, 需要另外包覆一层磁控溅射的 SiO_2 材料。

除了图 22 所列的基本步骤外, 一些可以降低阈值电流, 提高散热的工艺手段的采用可以显著提高器件性能。比如, 在沉积外延面一侧的金属后, 可以电镀一层微米量级(一般为 $5\sim 6\text{ }\mu\text{m}$)厚度的金层, 加强器件的散热。或者, 为了降低器件的阈值电流、增加出射光功率, 可以在解理出腔长后, 在后腔面镀高反膜(通常是 Al_2O_3 和 Au), 在前腔面镀增透膜(通常为厚度为 $1/4$ 波长的 Al_2O_3)。而将外延面朝向热沉焊接的倒焊(epi-down mounting)工艺^[131], 缩短了生热的主要区域(级联区)与高热导系数的热沉间的距离(从数百微米至几微米), 更能显著提升器件散热能力, 进一步降低连续波模式下的器件阈值电流, 提升工作温度, 以及增加出射光功率。

參考文獻

- [1] Yang R Q. "Infrared laser based on intersubband transitions in quantum wells", at the 7th Inter. Conf. on Superlattice, Microstructure and Microdevices, Banff, Canada, Aug. 22-26, 1994
- [2] Yang R Q. *Superlattices Microstruct.*, 1995, **17**(1): 77-83
- [3] Faist J, Capasso F, Sivco D L, Sirtori C, Hutchinson A L, Cho A Y. *Science*, 1994, **264**(5158): 553-556
- [4] Esaki L, Tsu R. *IBM Journal of Research and Development*, 1970, **14**(1): 61-65
- [5] Kazarinov R F, Suris R A. *Sov. Phys. Semicond.*, 1971, **5**(4): 707-709
- [6] Kazarinov R F, Suris R A. *Sov. Phys. Semicond.*, 1972, **6**(120-131): 120
- [7] Yang R Q, Xu J M. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **59**(2): 181-182.
- [8] Yang R Q. *Phys. Lett. A*, 1994, **186**(4): 339-344
- [9] Yang R Q, Xu J M. *Can. J. Phys.*, 1992, **70**(10-11): 1153-1158
- [10] Yang R Q. "Infrared cascade lasers based on interband transitions in type-II quantum well heterostructures", submitted to *Appl. Phys. Lett.* 1994 (unpublished).
- [11] Yang R Q, Pei S S. *J. Appl. Phys.*, 1996, **79**(11): 8197-8203
- [12] Yang R Q. "Novel concepts and structures for infrared lasers", chapter 2 in Long Wavelength Infrared Emitters Based on Quantum Wells and Superlattices, ed. M. Helm, Singapore: Gordon and Breach Science Publishers, 2000. pp. 13-64
- [13] Lin C H, Yang R Q, Zhang D, Murry S J, Pei S S, Allerman A A, Kurtz S R. *Electron. Lett.*, 1997, **33**(7): 598-599
- [14] Yang R Q, Yang B H, Zhang D, Lin C H, Murry S J, Wu H, Pei S S. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(17): 2409-2411
- [15] Yang B H, Zhang D, Yang R Q, Lin C H, Murry S J, Pei S S. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(18): 2220-2222
- [16] Felix C L, Bewley W W, Vurgaftman I, Meyer J R, Zhang D, Lin C H, Yang R Q, Pei S S. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, **9**(11): 1433-1435
- [17] Felix C L, Bewley W W, Aifer E H, Vurgaftman I, Meyer J R, Lin C H, Zhang D, Murry S J, Yang R Q, Pei S S. *J. Electron. Mater.*, 1998, **27**(2): 77-80
- [18] Olafsen L J, Aifer E H, Vurgaftman I, Bewley W W, Felix C L, Meyer J R, Zhang D, Lin C H, Pei S S. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(19): 2370-2372
- [19] Meyer J R, Vurgaftman I, Yang R Q, Ram-Mohan L R. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(1): 45-46
- [20] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, **9**(2): 170-172
- [21] Mu Y M, Yang R Q. *J. Appl. Phys.*, 1998, **84**(9): 5357-5359
- [22] Yang R Q. *Microelectron. J.*, 1999, **30**(10): 1043-1056
- [23] Yang R Q, Bruno J D, Bradshaw J L, Pham J T, Wortman D E. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(15): 1254-1255
- [24] Bradshaw J L, Yang R Q, Bruno J D, Pham J T, Wortman D E. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(16): 2362
- [25] Bradshaw J L, Bruno J D, Pham J T, Wortman D E, Yang R Q. *IEE Proc.-Optoelectron.*, 2000, **147**(3): 177-180
- [26] Bruno J D, Bradshaw J L, Yang R Q, Pham J T, Wortman D E. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(22): 3167-3169
- [27] Bradshaw J L, Pham J T, Yang R Q, Bruno J D, Wortman D E. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 2001, **7**(2): 102-105
- [28] Yang R Q, Bradshaw J L, Bruno J D, Pham J T, Wortman D E. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2002, **38**(6): 559-568. And references therein
- [29] Bradshaw J L, Breznay N P, Bruno J D, Gomes J M, Pham J T, Towner F J, Wortman D E, Tober R L, Monroy C J, Olver K A. *Physica E*, 2004, **20**(3-4): 479-485
- [30] Hill C J, Yang B, Yang R Q. *Physica E*, 2004, **20**(3-4): 486-490
- [31] Yang R Q, Hill C J, Yang B, Liu J K. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(11): 2109-2111
- [32] Yang R Q, Hill C J, Yang B H, Wong C M, Muller R E, Echternach P M. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(18): 3699-3701
- [33] Yang R Q, Hill C J, Christensen L E, Webster C R. *Proc. of SPIE*, 2005, **5624**: 413-422
- [34] Hill C J, Yang R Q. *J. Cryst. Growth*, 2005, **278**(1-4): 167-172
- [35] Yang R Q, Hill C J, Yang B H. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(15): 151109
- [36] Mansour K, Qiu Y, Hill C J, Soibel A, Yang R Q. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(18): 1034-1035
- [37] Yang R Q, Hill C J, Mansour K, Qiu Y M, Soibel A, Muller R E, Echternach P M. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(5): 1074-1078
- [38] Yang R Q, Hill C J, Mansour K, Qiu Y, Soibel A, Muller R E, Echternach P M. "Development of thermoelectric cooled single-mode distributed feedback mid-IR interband cascade lasers for chemical sensing", paper 2007-01-3151 at the the processing of 37th International Conference on Environmental Systems (ICES), Chicago, IL, July 9-12, 2007
- [39] Soibel A, Mansour K, Qiu Y, Hill C J, Yang R Q. *J. Appl. Phys.*, 2007, **101**(9): 093104.
- [40] Bewley W W, Lindle J R, Canedy C L, Kim M, Kim C S, Larrabee D C, Vurgaftman I, Meyer J R. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(1): 013114
- [41] Mansour K, Hill C J, Qiu Y, Yang R Q, "Dual-wavelength interband cascade lasers in mid-infrared spectral region", paper CTuZ4 at the Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and the Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS), San Jose, CA, May 4-9, 2008
- [42] Yang R Q, Tian Z, Hinkey R T, Zhao F, Mansour K, Hill C J, Qiu Y. *Proc. of SPIE*, 2009, **7230**: 72300S
- [43] Canedy C L, Bewley W W, Lindle J R, Kim C S, Kim M, Vurgaftman I, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(16): 161103
- [44] Bewley W W, Canedy C L, Kim M, Kim C S, Nolde J A, Lindle J R, Vurgaftman I, Meyer J R. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(5): 283-284
- [45] Canedy C L, Kim C S, Kim M, Larrabee D C, Nolde J A, Bewley W W, Vurgaftman I, Meyer J R. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2008, **26**(3): 1160-1162
- [46] Kim M, Canedy C L, Bewley W W, Kim C S, Lindle J R, Abell J, Vurgaftman I, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(19): 191110
- [47] Canedy C L, Lindle J R, Bewley W W, Kim C S, Kim M, Nolde J A, Vurgaftman I, Meyer J R. *J. Electron. Mater.*, 2009, **38**(9): 1948-1951; Where there was a typo in the label for the vertical axis j_{th} in Fig. 2, which should be A/cm^2 instead of kA/cm^2
- [48] Vurgaftman I, Canedy C L, Kim C S, Kim M, Bewley W W, Lindle J R, Abell J, Meyer j R. *New J. Phys.*, 2009, **11**(12): 125015

- [49] Kim C S, Kim M, Bewley W W, Lindle J R, Canedy C L, Abell J, Vurgaftman I, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(23): 231103
- [50] Canedy C L, Abell J, Bewley W W, Aifer E H, Kim C S, Nolde J A, Kim M, Tischler J G, Lindle J R, Jackson E M, Vurgaftman I, Meyer J R. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2010, **28**(3): C3G8
- [51] Kim C S, Kim M, Bewley W W, Lindle J R, Canedy C L, Abell J, Vurgaftman I, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(23): 231103
- [52] Bewley W, Canedy C, Kim C S, Kim M, Lindle J R, Abell J, Vurgaftman I, Meyer J. *Optical Engineering*, 2010, **49**(11): 111116
- [53] Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, Kim M, Lindle J R, Merritt C D, Abell J, Meyer J R. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 2011, **17**(5): 1435-1444
- [54] Tian Z, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Hinkey B T, Curtis M E, Johnson M B. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(1): 48-49
- [55] Tian Z, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2009, **21**(21): 1588-1590
- [56] Tian Z, Chen C, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Keay J C, Johnson M B, Klem J F. *Proc. of SPIE*, 2010, **7616**: 76161B. Also at MIOMD-X, Shanghai, Sept. 6, 2010
- [57] Bauer A, Langer F, Dallner M, Kamp M, Motyka M, Sek G, Ryczko K, Misiewicz J, Höfling S, Forchel A. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(25): 251103
- [58] Bauer A, Dallner M, Kamp M, Höfling S, Worschech L, Forchel A. *Optical Engineering*, 2010, **49**(11): 111117
- [59] Bewley W W, Kim C S, Kim M, Merritt C D, Canedy C L, Vurgaftman I, Abell J, Meyer J R, Khodaparast G A, Santos M B, Stanton C J. *AIP Conf. Proc.*, 2011, **1416**: 46-48
- [60] Horstjann M, Bakhirkin Y A, Kosterev A A, Curl R F, Tittel F K, Wong C M, Hill C J, Yang R Q. *Appl. Phys. B*, 2004, **79**(7): 799-803
- [61] Miller J H, Bakhirkin Y A, Ajtai T, Tittel F K, Hill C J, Yang R Q. *Appl. Phys. B*, 2006, **85**(2-3): 391-396
- [62] Peng C, Le H Q, Yang R Q, Hill C J. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(6): 1275-1297
- [63] Wysocki G, Bakhirkin Y, So S, Tittel F K, Hill C J, Yang R Q, Fraser M P. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(33): 8202-8210
- [64] Christensen L E, Webster C R, Yang R Q. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(7): 1132-1138
- [65] Parameswaran K R, Rosen D I, Allen M G, Ganz A M, Risby T H. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(4): B73-B79
- [66] Christensen L E, Mansour K, Yang R Q. *Optical Engineering*, 2010, **49**(11): 111119
- [67] Yang R Q. “Interband cascade laser”, chapter 12 in *Semiconductor Lasers: Fundamentals and Applications*, ed. A. Baranov and E. Tournié, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited, 2013. pp. 487-513
- [68] Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, Kim M, Merritt C D, Abell J, Meyer J R. *IEEE J. Select. Top. Quantum Electron.*, 2013, **19**(4): 1200210
- [69] Edlinger M V, Scheuermann J, Weih R, Zimmermann C, Nähle L, Fischer M, Koeth J, Höfling S, Kamp M. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2014, **26**(5): 480-482
- [70] Ryu G, Chryssis A N, Amirloo J, Saini S, Towner F J, Dagenais M. *IEEE Photonics Journal*, 2012, **4**(1): 133-142
- [71] von Edlinger M, Scheuermann J, Nähle L, Zimmermann C, Hildebrandt L, Fischer M, Koeth J, Weih R, Höfling S, Kamp M. *Proc. of SPIE*, 2013, **8993**: 899318
- [72] Lundqvist S, Kluczynski P, Weih R, Edlinger M V, Nähle L, Fischer M, Bauer A, Höfling S, Koeth J. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(25): 6009-6013
- [73] Webster C R, Mahaffy P R, Atreya S K, Flesch G J, Farley K A, Team M S. *Science*, 2013, **342**(6156): 355-357
- [74] van der Ziel J P. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**(6): 499
- [75] Sai-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **30**(12): 651-653
- [76] Frenzley W R, Kroemer H. *Phys. Rev. B*, 1977, **16**(6): 2642-2652
- [77] Sai-Halasz G A, Esaki L, Harrison W A. *Phys. Rev. B*, 1978, **18**(6): 2812-2818
- [78] Ting D Z Y, Soibel A, Höglund L, Nguyen J, Hill C J, Khoshakhlagh A, Gunapala S D. “Type-II superlattice infrared detectors”, chapter 1 in *Semiconductors and Semimetals*, vol. 84, ed.; Gunapala S, Rhiger D, Jagadish C. *Academic Press*, 2011. pp. 1-57
- [79] Allerman A A, Biefeld R M, Kurtz S R. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(4): 465-467
- [80] Kurtz S R, Allerman A A, Biefeld R M, Baucom K C. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(17): 2093-2095
- [81] Meyer J R, Hoffman C A, Bartoli F J, Ram-Mohan L R. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(6): 757-759
- [82] Chow D H, Miles R H, Hasenberg T C, Kost A R, Zhang Y H, Dunlap H L, West L. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **67**(25): 3700-3702
- [83] Hasenberg T C, Miles R H, Kost A R, West L. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1997, **33**(8): 1403
- [84] Baranov A N, Bertru N, Cuminal Y, Boissier G, Alibert C, Joullié A. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(6): 735-737
- [85] Bewley W W, Aifer E H, Felix C L, Vurgaftman I, Meyer J R, Lin C H, Murry S J, Zhang D, Pei S S. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(25): 3607-3609
- [86] Wilk A, El Gazzouli M, El Skouri M, Christol P, Grech P, Baranov A N, Joullié A. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(15): 2298-2300
- [87] Deguffroy N, Tasco V, Gassenq A, Cerutti L, Trampert A, Baranov A N, Tournié E. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(23): 1285-1286
- [88] Gassenq A, Boissier G, Grech P, Narcy G, Baranov A N, Tournié E. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(3): 165
- [89] Malin J I, Meyer J R, Felix C L, Lindle J R, Goldberg L, Hoffman C A, Bartoli F J, Lin C H, Chang P, Murry S J, Yang R Q, Pei S S. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(21): 2976-2978
- [90] Malin J I, Felix C L, Meyer J R, Hoffman C A, Pinto J F, Lin C H, Chang P C, Murry S J, Pei S S. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(17): 1593-1594
- [91] Lin C H, Yang R Q, Murry S J, Pei S S, Yan C, McDaniel J D L, Falcon M. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1997, **9**(12): 1573-1575
- [92] Bewley W W, Felix C L, Aifer E H, Vurgaftman I, Olafsen L J, Meyer J R, Lee H, Martinelli R U, Connolly J C, Sugg A R, Olsen G H, Yang M J, Bennett B R, hanabrook B V. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **73**(26): 3833-3835
- [93] Flatté M E, Hasenberg T C, Olesberg J T, Anson S A, Bogges T F, Yan C, McDaniel D L. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(26): 3764-3766
- [94] Aifer E H, Bewley W W, Felix C L, Vurgaftman I, Olafsen L J, Meyer J R, Lee H, Martinelli R U, Connolly J C, Sugg

- A R, Olsen G. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(16): 1587-1588
- [95] Bewley W W, Felix C L, Vurgaftman I, Stokes D W, Aifer E H, Olafsen L J, Meyer J R, Yang M J, Shanabrook B V, Lee H, Martinelli R U, Sugg A R. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(8): 1075-1077
- [96] Felix C L, Bewley W W, Olafsen L J, Stokes D W, Aifer E H, Vurgaftman I, Meyer J R, Yang M J. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1999, **11**(8): 964-966
- [97] Kaspi R, Ongstad A P, Dente G C, Chavez J R, Tilton M L, Gianardi D M. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(4): 041122
- [98] Ongstad A P, Dente G C, Tilton M L, Chavez J R, Kaspi R, Gianardi D M. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(12): 123113
- [99] Lee H, Olafsen L J, Menna R J, Bewley W W, Martinelli R U, Vurgaftman I, Garbuзов D Z, Felix C L, Maiorov M, Meyer J R, Connolly J C, Sugg A R, Olsen G H. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(20): 1743
- [100] Bewley W W, Lee H, Vurgaftman I, Menna R J, Felix C L, Martinelli R U, Stokes D W, Garbuзов D Z, Meyer J R, Maiorov M, Connolly J C, Sugg A R, Olsen G H. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(3): 256-258
- [101] Joullié A, Skouri E M, Garcia M, Grech P, Wilk A, Christol P, Baranov A N, Behres A, Kluth J, Stein A, Heime K, Heukens M, Rushworth S, Hulicius E, Simecek T. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **76**(18): 2499-2501
- [102] Canedy C L, Bewley W W, Lindle J R, Vurgaftman I, Kim C S, Kim M, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(21): 211105
- [103] Canedy C L, Bewley W W, Kim C S, Kim M, Lindle J R, Vurgaftman I, Meyer J R. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2006, **24**(3): 1613-1616
- [104] Zhang D, Dupont E, Yang R Q, Liu H C, Lin C H, Buchanan M, Pei S. *Opt. Express*, 1997, **1**(4): 97-101
- [105] Ekins-Daukes N J, Kawaguchi K, Zhang J. *Crystal Growth & Design*, 2002, **2**(4): 287-292
- [106] Jovanovic V D, "Strained quantum wells", chapter 7 in Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures, Second Edition, ed. P. Harrison, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK., 2005. pp. 219-241
- [107] Webster C R, Mahaffy P R. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(2-3): 271-283.
- [108] Suchalkin S, Bruno J, Tober R, Westerfeld D, Kisim M, Belenky G. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(8): 1500-1502
- [109] Arzhanov E V, Bogatov A P, Konyaev V P, Nikitina O M, Shveikin V I. *Quantum Electronics*, 1994, **24**(7): 581-587
- [110] O'Reilly E P, Onischenko A I, Avrutin E A, Bhattacharyya D, Marsh J H. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(21): 2035-2036
- [111] Westerfeld D, Suchalkin S, Kisim M, Belenky G, Bruno J, Tober R. *IEE Proceedings - Optoelectronics*, 2003, **150**(4): 293-297
- [112] Thompson G H B, Kirkby P A. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1973, **9**(2): 311-318
- [113] Tsang W T. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(25): 939-941.
- [114] Garbuзов D Z, Lee H, York P K, Menna R J, Martinelli R U, DiMarco L A, Narayan S Y, Capewell D R, Connolly J C. *Laser Diodes and Applications II*, 1996, **2682**: 216-223
- [115] Borca-Tascic T, Song D W, Meyer J R, Vurgaftman I, Yang M J, Noshko B Z, Whitman L J, Lee H, Martinelli R U, Turner G W, Manfra M J, Chen G. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(9): 4994-4998
- [116] Sirtori C, Faist J, Capasso F, Sivco D L, Hutchinson A L, Cho A Y. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(24): 3242-3244
- [117] Teissier R, Barate D, Vicet A, Alibert C, Baranov A N, Marcadet X, Renard C, Garcia M, Sirtori C, Revin D, Cockburn J. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(2): 167-169
- [118] Ohtani K, Fujita K, Ohno H. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **87**(21): 211113
- [119] Sirtori C, Faist J, Capasso F, Sivco D L, Hutchinson A L, Chu S N G, Cho A Y. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **68**(13): 1745-1747
- [120] Yang R Q, Hill C J, Yang B, Wong C M. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, **16**(4): 987-989
- [121] Tian Z, Jiang Y, Li L, Hinkey R T, Yin Z, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2012, **48**(7): 915-921
- [122] Yang R Q, Li L, Zhao L, Jiang Y, Tian Z, Ye H, Hinkey R T, Niu C, Mishima T D, Santos M B, Keay J C, Johnson M B, Mansour K. *Proc. of SPIE*, 2013, **8640**: 86400Q
- [123] Jiang Y, Li L, Tian Z, Hinkey R T, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B, Mansour K. "Room-temperature InAs-based interband cascade lasers", paper CF3K.1 at the The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and the Qutuam Electronics and Laser Science Conference (QELS), San Jose, CA, USA, May 6-11, 2012
- [124] Li L, Tian Z, Jiang Y, Ye H, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B. "Interband cascade lasers at long wavelengths", paper CF3K.2. at the The Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and the Qutuam Electronics and Laser Science Conference (QELS), San Jose, CA, USA, May 6-11, 2012
- [125] Tian Z, Li L, Ye H, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B. *Electron. Lett.*, 2012, **48**(2): 113-114
- [126] Dallner M, Höfling S, Kamp M. *Electron. Lett.*, 2013, **49**(4): 286-287
- [127] Höfling S, Weih R, Bauer A, Kamp M, Forchel A. *Proc. of SPIE*, 2012, **8432**: 84320N
- [128] Vurgaftman I, Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, Kim M, Merritt C D, Abell J, Lindle J R, Meyer J R. *Nature Communications*, 2011, **2**: 585
- [129] Bai Y, Slivken S, Darvish S R, Razeghi M. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(2): 021103.
- [130] Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, Kim M, Merritt C D, Abell J, Vurgaftman I, Meyer J R. *Opt. Express*, 2012, **20**(3): 3235-3240
- [131] Bewley W W, Canedy C L, Kim C S, Kim M, Merritt C D, Abell J, Vurgaftman I, Meyer J R. *Opt. Express*, 2012, **20**(19): 20894-20901
- [132] Razeghi M, Bandyopadhyay N, Bai Y, Lu Q, Slivken S. *Optical Materials Express*, 2013, **3**(11): 1872-1884
- [133] Bai Y, Bandyopadhyay N, Tsao S, Slivken S, Razeghi M. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **98**(18): 181102
- [134] Weih R, Kamp M, Höfling S. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **102**(23): 231123
- [135] Bandyopadhyay N, Slivken S, Bai Y, Razeghi M. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **100**(21): 212104
- [136] Weih R, Bauer A, Kamp M, Höfling S. *Optical Materials Express*, 2013, **3**(10): 1624-1631
- [137] Bewley W W, Kim C S, Canedy C L, Merritt C D, Vurgaftman I, Abell J, Meyer J R, Kim M. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **103**(11): 111111
- [138] Kim C S, Kim M, Abell J, Bewley W W, Merritt C D, Canedy C L, Vurgaftman I, Meyer J R. *Proc. of SPIE*, 2013, **8631**: 863110
- [139] Canedy C L, Abell J, Merritt C D, Bewley W W, Kim C S, Kim M, Vurgaftman I, Meyer J R. *Opt. Express*, 2014,

- 22(7): 7702-7710**
- [140] Meyer J R, Olafsen L J, Aifer E H, Bewley W W, Felix C L, Vurgaftman I, Yang M J, Goldberg L, Zhang D, Lin C H, Pei S S, Chow D H. *IEE Proceedings - Optoelectronics*, 1998, **145**(5): 275-280
- [141] Bewley W W, Nolde J A, Larrabee D C, Canedy C L, Kim C S, Kim M, Vurgaftman I, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(16): 161106
- [142] Yin Z, Jiang Y, Tian Z, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2011, **47**(11): 1414-1419
- [143] Kim C S, Kim M, Bewley W W, Lindle J R, Canedy C L, Nolde J A, Larrabee D C, Vurgaftman I, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(7): 071110
- [144] Garcia J C, Rosenthaler E, Collot P, Laurent N, Guyaux J L, Vinter B, Nagle J. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **71**(26): 3752-3754.
- [145] Yan J, Cai J, Ru G, Yu X, Fan J, Choa F S. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2006, **18**(16): 1777-1779
- [146] Nekorkin S M, Biryukov A A, Demina P B, Semenov N N, Zvonkov B N, Aleshkin V Y, Dubinov A A, Gavrilenco V I, Maremyanin K V, Morozov S V, Belyanin A A, Kocharyan V V, Kocharyan V V. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **90**(17): 171106
- [147] Li L, Zhao L, Jiang Y, Yang R Q, Keay J C, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**(17): 171118
- [148] Suchalkin S, Kisim M V, Luryi S, Belenky G, Towner F J, Bruno J D, Monroy C, Tober R L. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(3): 031103
- [149] Jiang Y, Li L, Tian Z, Ye H, Zhao L, Yang R Q, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B, Mansour K. *J. Appl. Phys.*, 2014, **115**(11): 113101
- [150] Soibel A, Wright M W, Farr W, Keo S, Hill C, Yang R Q, Liu H C. *Electron. Lett.*, 2009, **45**(5): 264-265
- [151] Soibel A, Wright M W, Farr W H, Keo S A, Hill C J, Yang R Q, Liu H C. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2010, **22**(2): 121-123
- [152] Berling K, Lim Y L, Taimre T, Indjin D, Dean P, Weih R, Höfling S, Kamp M, von Edlinger M, Koeth J, Rakic A D. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **103**(23): 231107.
- [153] Hjalmarson H P, Kurtz S R. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(7): 949-951
- [154] Grein C H, Flatté M E, Olesberg J T, Anson S A, Zhang L, Boggess T F. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(12): 7311-7316
- [155] Flatté M E, Grein C H, Ehrenreich H. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, **72**(12): 1424-1426
- [156] Bewley W W, Lindle J R, Kim C S, Kim M, Canedy C L, Vurgaftman I, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **93**(4): 041118
- [157] Vurgaftman I, Kim M, Kim C S, Bewley W W, Canedy C L, Lindle J R, Meyer J R. *Proc. of SPIE*, 2009, **7211**: 721111
- [158] Ikyo B A, Marko I P, Adams A R, Sweeney S J, Canedy C L, Vurgaftman I, Kim C S, Kim M, Bewley W W, Meyer J R. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, **99**(2): 021102
- [159] Nähle L, Hildebrandt L, Kamp M, Höfling S. "Inteband cascade lasers: ICLs open opportunities for mid-IR sensing", May, 2013, Laser Focus World, No.5: 70
- [160] Bewley W W, Felix C L, Vurgaftman I, Aifer E H, Meyer J R, Goldberg L, Lindle J R, Chow D H, Selvig E. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1998, **10**(5): 660-662
- [161] Shterengas L, Liang R, Kipshidze G, Hosoda T, Suchalkin S, Belenkay G. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **103**(12): 121108
- [162] Shterengas L, Liang R, Kipshidze G, Hosoda T, Suchalkin S, Belenkay G. *Proc. of SPIE*, 2014, **9002**: 900213.
- [163] Sanchez D, Cerutti L, Tournié E. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2013, **25**(9): 882-884
- [164] Li J V, Yang R Q, Hill C J, Chuang S L. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(10): 101102
- [165] Yang R Q, Tian Z, Cai Z, Klem J F, Johnson M B, Liu H C. *J. Appl. Phys.*, 2010, **107**(5): 054514
- [166] Tian Z, Hinkey R T, Yang R Q, Lubyshev D, Qiu Y, Fastenau J M, Liu M K, Johnson M B. *J. Appl. Phys.*, 2012, **111**(2): 024510
- [167] Hinkey R T, Yang R Q. *J. Appl. Phys.*, 2013, **114**(10): 104506
- [168] Gautam N, Myers S, Barve A V, Klein B, Smith E P, Rhiger D R, Dawson L R, Krishna S. *Appl. Phys. Lett.*, 2012, **101**(2): 021106.
- [169] Tian Z B, Schuler-Sandy T, Krishna S. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **103**(8): 083501
- [170] Hinkey R T, Lotfi H, Li L, Yang R Q, Klem J F, Keay J C, Johnson M B. "Interband cascade thermophovoltaic devices with type-II superlattice absorbers of 0.4 eV bandgap", at the IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, FL, June 16-21, 2013
- [171] Yang R Q, Tian Z, Klem J F, Mishima T D, Santos M B, Johnson M B. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **96**(6): 063504
- [172] Hinkey R T, Tian Z B, Rassel S M S S, Yang R Q, Klem J F, Johnson M B. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2013, **3**(2): 745-752
- [173] Lotfi H, Hinkey R T, Li L, Yang R Q, Klem J F, Johnson M B. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, **102**(21): 211103
- [174] Ye H, Lotfi H, Li L, Hinkey R T, Yang R Q, Lei L, Keay J C, Johnson M B, Mishima, Santos M B. *Chin. Sci. Bull.*, 2014, **59**(10): 950-955
- [175] Yang R Q, Lotfi H, Li L, Hinkey R T, Ye H, Klem J F, Lei L, Mishima T D, Keay J C, Santos M B, Johnson M B. *Proc. of SPIE*, 2014, **8993**: 899310
- [176] Behet M, Schneider P, Moulin D, Hamadeh H, Woitok J, Heime K. "Low-pressure-MOVPE growth and characterization of InAs/AlSb/GaSb-heterostructures", pp. 23-28 at the Int. Symp. Compound Semicond., San Diego, September 18-22, 1994
- [177] Chang C A, Ludeke R, Chang L L, Esaki L. *Appl. Phys. Lett.*, 1977, **31**(11): 759-761.
- [178] Razeghi M. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2003, **23**(3): 149-205
- [179] Bennett B R, Shanabrook B V, "Molecular beam epitaxy of Sb-based semiconductors", chapter 9 in *Thin Films: Heteroepitaxial systems*, ed. Liu W K, Santos M B, Singapore: World Scientific, 1999. pp. 401-452
- [180] Kim M, Canedy C L, Kim C S, Bewley W W, Lindle J R, Abell J, Vurgaftman I, Meyer J R. *Physics Procedia*, 2010, **3**: 1195-1200
- [181] Sze S M, Ng K K. "Physics of Semiconductor Devices", 3rd ed.: John Wiley & Sons, Inc., 2006
- [182] Alam M T, Manoharan M P, Haque M A, Muratore C, Voevodin A, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2012, **22**(4): 045001

Interband Cascade Lasers: From Original Concept to Practical Devices

Yang Rui-Qing, Li Lu, Jiang Yu-Chao

School of Electrical and Computer Engineering, University of Oklahoma, Norman, OK 73019 USA

This article discusses relevant concepts, material systems and growth, device fabrication, quantum well structures, and physical processes involved in interband cascade lasers, reviewing their development from original concept to practical devices. Recent progress and current status are presented. Future prospects for interband cascade lasers are also discussed.

Key words: Mid-IR; quantum wells; diode lasers; antimonide; type-II heterostructure