

# 带间级联器件的发展与感悟

杨瑞青<sup>†</sup>

(俄克拉荷马大学电气与计算机工程系 诺曼 OK 73019 美国)

2022-11-15收到

<sup>†</sup> email: Rui.Q.Yang@ou.edu

DOI: 10.7693/wl20230106

自从《带间级联激光器的发明——我的经历与物理》于2016年初在本刊第1期刊出<sup>[1]</sup>，7年过去了，带间级联器件已自成体系，并取得了新的重大进展。带间级联器件系列包括发光二极管、激光器、红外光子探测器和光伏电池等。这篇续文将介绍发展带间级联红外光子探测器和光伏电池的历史背景，综述和讨论带间级联器件的一些新进展及新认识，也将谈谈个人的一些展望与感悟。

## 1 带间级联红外光子探测器

常规半导体红外光探测器的工作原理与二极管激光器一样都是基于电子跨越导带与价带之间带隙( $E_g$ )的跃迁。激光器是基于电子从高能级的导带到低能级的价带的跃迁发出光子，而光探测器是基于电子从价带到导带的跃迁吸收光子，相当于激光器的逆过程，长波端存在截止波长，但没有驱动阈值的门槛。故人们知道常规的半导体激光器结构也可以用作光子探测器。然而，带间级联激光器(interband cascade laser, ICL)结构与通常的半导体激光器不同，当用作激光器时，每个注入的电子会产生多个光子。因此，当它用作发光逆过程的探测器时，需要多个光子才能在外部电路中产生一个电子，导致较低的量子效率。所以初看起来带间级联结构对红外光探测器的性能提高没有益处。尽管如此，当时它作为新事物可能还有些吸引力。1999—2000年我在美国陆军研究实验室从事ICL研究时，伊利诺伊大学(UIUC)的庄顺连教授联系我，与我讨论了使用ICL结构作为红外光探测器的意向。这是他基金申请书中的一项任务。当时我向他解释了级联结构的低量子效率问题，不是很积极。

但庄教授的提案在2001年获得了资助，而他的团队无法制备ICL，也没有人提供给他。然后他再次找到我，寻求帮助。那时，我去了加州喷气推进实验室(JPL)继续从事ICL研发。在2003年，我向他提供了已经制备好的ICLs和未加工的ICL样品，并且去了一趟伊利诺伊大学解答他们实验中遇到的问题。

2004年4月，庄教授的研究生李剑在液氮温度及300 K和零偏压下从我们的ICL样品中观察到显著的光电流(峰值响应度为几十mA/W)，首次在实验上展示了ICL结构作为红外光探测器的可行性。从4月到6月，他们用正入射红外光对ICL样品进行了更多研究，验证了其由于带间跃迁而不是导带内的子带间跃迁引起的光子吸收机制。但是，他们并不明白器件的工作原理，故在6月15日，李剑将他们的实验结果通过电子邮件发送给我，询问我的意见。我立即意识到带间级联光探测器应该是如何工作的，因为自从初期在休斯顿大学做光致发光实验时就有了相关的物理图像。当天，我在电话中向李剑解释了器件的工作原理。很快，我们写了一篇关于用ICL结构作为红外光探测器的实验结果和其工作原理的论文，并提交给APL，该论文于2005年初被接

受并发表<sup>[2]</sup>。然而，尽管报道了不错的器件性能以及定性解释了如何在ICL中产生和收集光电流，但量子效率低的问题以及将带间级联结构用于光探测器是否比常规光探测器架构有任何优势的疑虑仍未讨论和得到解答。那段时间，我主要忙于激光器项目，对探测器少于关注。当我在2007年从JPL转到俄克拉荷马大学(OU)工作时，这种情况发生了变化。

加入OU后，我需要启动新的研究项目并获得资金支持。将带间级联结构用作光探测器是个合适的选择。然而，为了说服潜在的赞助者，不仅需要研究课题是新的，而且方案应该比其他现有方法更具优点。因此，需要针对带间级联红外光探测器(interband cascade infrared photodetector, ICIP)发展一种具有全面而深入理解的理论，以定量评估其器件性能并与其他光探测器架构进行比较。我曾在20世纪90年代研究过量子阱红外光探测器(quantum well infrared photodetector, QWIP)中的子带间跃迁，并对其理论和工作原理有所了解。重温QWIP的理论后我意识到QWIP和ICIP在分立吸收层方面的相似性，可以将QWIP的相关理论扩展到ICIP，尽管它们的光吸收基于不同

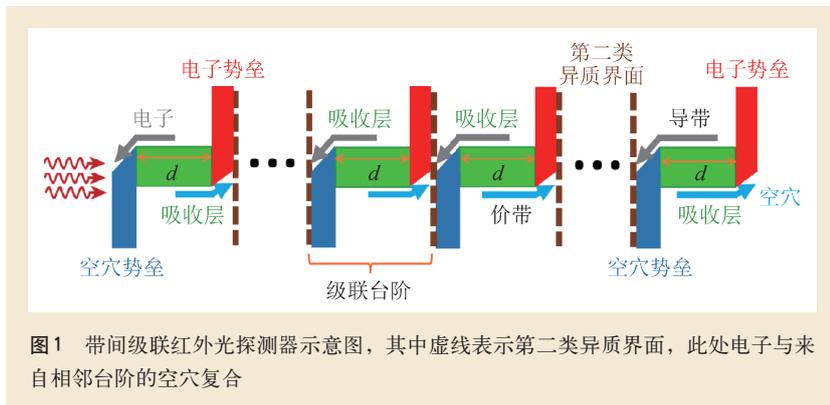


图1 带间级联红外光探测器示意图，其中虚线表示第二类异质界面，此处电子与来自相邻台阶的空穴复合

的跃迁机制。在一阶近似下，应用推广的QWIP理论，我们证明了ICIP中的噪声会随着级联阶数( $N_s$ )的增加而成比例降低，初步解答了早期的疑惑，因此明白了探测率 $D^*$  (相当于信噪比)在吸收层不是很厚的情形下随 $N_s$ 的平方根而增加<sup>[3]</sup>，与其他光子探测器(如QWIP和quantum cascade detector, QCD)中的关系相似。噪声随着级联阶数的增加而降低对光子探测器很重要，特别是在高温下运行时，因为噪声会随着温度的升高而迅速增加。之后，从较基础的层面，我们发展了更通用的理论<sup>[4-7]</sup>，对ICIP有了全面透彻的理解，从理论上演示了噪声的降低将能完全补偿ICIP中最大响应度的下降，而ICIP在有限扩散长度下可达到的终极最优探测率 $D^*$ 将高于只有单个连续吸收层的常规探测器能达到的最大值。即使在无限扩散长度的情况下，光电流匹配的ICIP由于热噪声(Johnson noise)限制可达到的终极最优探测率也比优化的单阶( $N_s = 1$ )常规探测器的最大 $D^*$ 高11%，而具有相同分立吸收层的ICIP和常规探测器的热噪声限制终极最优探测率是等同的<sup>[6]</sup>。因为电流匹配要求在现实中难于完全满足，而具有相同分立吸收层的多阶ICIP除了具有响应速度快的优点外，在实践中更容易实现。所以本

文将主要讨论具有相同吸收层的ICIP，并阐述它们的优势。

ICIP结构由多个级联台阶串联组成，吸收层两侧分别由电子和空穴势垒隔开，如图1所示，其中台阶之间由有益于带间隧穿的第二类异质界面相连。电子和空穴势垒用于阻挡与它们同名的载流子。换句话说，电子势垒中只允许通过空穴，而空穴势垒中只允许通过电子。此外，空穴势垒的导带边及电子势垒的价带边分别向两端倾斜(图1)，有助于光生载流子快速向台阶两侧移动。当入射光在一个台阶中被吸收产生电子—空穴对时，电子和空穴分别从导带和价带沿相反方向扩散至台阶边缘，然后在第二类异质界面处与来自相邻吸收层的载流子复合，如图1所示。因此，这些界面与ICIP结构两端的两个接触层一起充当光生载流子的等效收集点，它们在复合之前仅需经过一个台阶，并且载流子在同一带内的输运时间远小于带间跃迁所需时间。ICIP结构的这些独特性质使载流子能够快速移动并到达一个收集点，该收集点至多只有一个级联台阶的距离。设计该距离短于扩散长度，全部的光生载流子就能有效地被收集。扩散长度通常随着工作温度的升高而减小，从而限制了单阶常规探测器吸收层厚度及高温工作

性能。但在ICIP，多个吸收层的总厚度可超过扩散长度，使得入射光被尽可能多的吸收和利用。因此，ICIP可以绕过扩散长度限制并抑制噪声，使其有利于需要高温工作、高响应速度和探测率的应用。此外，每个级联台阶没有常规pn结，消除了通常的载流子耗尽区，从而能抑制Shockley—Read—Hall (SRH)产生电流，降低饱和暗电流密度及相应的噪声。

在OU，除了理论研究，我们还率先对基于InAs/GaSb/AlSb材料体系的ICIP进行了较为系统的实验研究。其他小组(例如新墨西哥大学、JPL、美国海军研究实验室(NRL)、维也纳技术大学、维尔茨堡大学、美国空军研究实验室、波兰军事技术大学、Vigo System公司、中国科学院上海技术物理研究所等)也随后开展了对ICIP的研究。这些研究在理解和显示基于InAs/GaSb第二类超晶格(SL)和ICL结构的ICIPs的优势方面取得了重大进展<sup>[8-21]</sup>。这些成就包括：可在温度高达420 K时仍能工作的中波ICIP<sup>[8]</sup>、能在较高温度(达180 K)下工作的带间级联焦平面阵列(FPA)<sup>[9]</sup>、高于室温工作的长波ICIPs——其室温(300 K)探测率( $D^*$ )超过 $10^8$  Jones<sup>[10]</sup>、电增益的发现和解释<sup>[11-13]</sup>、多个负微分电导和其反常温度特性的发现和解释<sup>[14]</sup>、在GaAs衬底上生长具有高探测率室温工作的ICIP<sup>[15]</sup>，以及从1.3 GHz到10 GHz的高频工作展示等<sup>[16, 17]</sup>。尽管所报道的ICIPs尚未达到最优化，但它们在从短波红外<sup>[17]</sup>到甚长波红外<sup>[18]</sup>的宽广波长范围内产生了令人鼓舞的结果，将推动其持续的研发。此外，我们成功制备了世界首个中红外ICL和ICIP在单片上集成的芯片，在

室温下工作时具有创纪录的高探测率(约 $2 \times 10^{10}$  Jones)<sup>[20]</sup>,为片上微型传感器、光谱仪、光通信和信息处理等重要应用铺平了道路。

在探索 ICIP 的过程中,我们发现散粒噪声和热噪声经常在探测器相关文献中被错误地认为是两个独立的噪声源。这种不正确的物理图像影响了对探测器 $D^*$ 的评估。造成这种误解的一个原因可能是二极管中散粒噪声常被表示为正比于总电流,将两个电流分量(即正向和反向电流)混合在单一的总电流项中。这样,后来的读者若是无暇追根溯源就难于认识到二极管中总电流包含两个电流分量,而且它们是基于不同的机制(pn 结中的扩散和漂移),在统计上应作为两个散粒噪声源独立对待。实际上,这两个流向相反的电流分量在零偏压时大小相等共同导致了平衡态时的热噪声。因此,我们基于一个相同理论框架<sup>[4]</sup>为 ICIP 中的散粒噪声和热噪声发展了统一的描述,以理解热噪声的起源并澄清其与散粒噪声之间可能存在的混淆,并推导出通用但简洁的表达式,以评估具有复杂结构的 ICIP 的电流噪声功率谱密度和探测率<sup>[7]</sup>。此外,还导出了由于光子吸收导致的信号电流和相应的光子噪声电流的简单表达式,与先前通过其他方法得出的结果一致,弥补了我们之前理论文章中的一个错误<sup>[4, 7]</sup>。另外,还导出了一个公式来正确评估常规光电探测器在反向偏压下的探测率<sup>[7]</sup>。我希望导出的公式及讨论能帮助增进对 ICIP 和其他类型光子探测器中噪声的理解,并有助于更适当地评估器件的探测率。

## 2 带间级联光伏电池

从 2008 年初,我开始在 OU 教一门固态电子学的课程,其内容包

括半导体材料与器件的基础知识。这门课程使我更深入系统地学习和思考了一些半导体器件涉及的基本概念和功能,包括光伏电池。加上其他因素,促使我提出利用带间级联结构作为光伏电池的构想,并在 2009 年与合作者一起用 ICIP 和 ICL 样品在实验上初步证实了带间级联光伏(interband cascade photovoltaic, ICPV)电池的工作原理和可行性<sup>[21]</sup>。这种 ICPV 电池结构与传统的光伏电池结构相比具有一些显著的优势。下面对其进行详细说明。

当光照射在 ICPV 电池结构时,电子和空穴被光激发,分别在每个串联台阶的导带和价带产生,然后分开向相反方向移动到每个台阶的两边,这将在每个台阶上产生电势差(即光电压)以阻止它们在开路条件下的继续运动。因此,来自每个台阶的光电压叠加在一起以产生高的总开路电压 $V_{oc}$ ,如图 2 所示,它与级联台阶数 $N_s$ 成正比,并且可以高于单个带隙( $E_g$ )限制的值 $E_g/e$ ,其中 $e$ 是电子电荷。在这种 ICPV 架构中,多个缩短的分立吸收层台阶可以具有相同的带隙,能高效地吸收来自相同光谱波段的光子。较高的工作电压可在不牺牲输出功率和功率转换效率的情况下降低工作电流密度,从而减轻由于串联电阻而损失的功率。通过结合具有不同带隙的吸收区,ICPV 架构还可用于有效分配吸收来自宽带辐射光源不同能量的光子,这类似于多结太阳能电池。ICPV 器件结构与上述可探测较弱光的 ICIP 相似,但其工作状态更像 ICL

反向运行,输出电压为正向,不同于 ICIP 上的零偏置电压或反向偏置电压。

另一个优势是基于第二类破缺带隙异质界面及量子工程提供的设计灵活性。例如,传统多结串联太阳能电池通过重掺杂的江崎(Esaki)隧道结连接,这不仅较难做,还导致自由载流子吸收和额外串联电阻的不利副作用,从而限制了可用的江崎隧道结数目。相比之下,多阶 ICPV 器件依赖于如图 1 所示的天然第二类破缺带隙异质界面串联连接分立的吸收层,该界面无需掺杂并且电阻比江崎隧道结小得多,因此第二类破缺带隙异质界面的数量基本无限制。这提供了通过较自由地操控每个波段吸收区的台阶数,而不只是靠调节分立吸收层的厚度,从而有利于接近或达到电流匹配要求及增加优化功率转换效率的灵活性。此外,类似 ICIP,每个级联台阶消除了常规 pn 结的载流子耗尽区,从而能降低由 SRH 产生电流导致的饱和暗电流密度( $J_0$ )及相应的开路电压损失。

与 ICL 和 ICIP 相同,ICPV 器件可用基于 InAs/GaSb/AlSb 材料体系的 III-V 族化合物半导体来构建,其中 InAs 和 GaSb 之间的第二类破缺带隙异质结对形成带间级联起着关键作用。该材料体系的带隙比较窄,主要对应于中红外光谱区。因

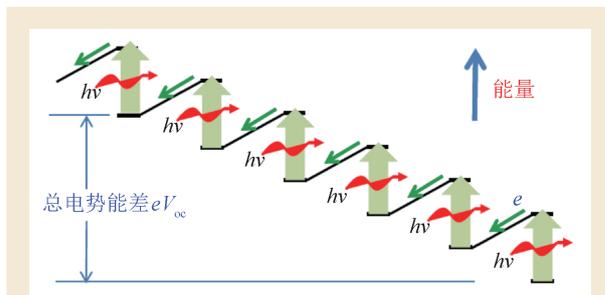


图2 带间级联光伏电池工作原理示意图

此,与主要吸收来自太阳高温表面(约6000 K)的近红外和可见光谱中的辐射光子的太阳能电池相比,窄带隙(小于0.5 eV)光伏电池主要吸收来自近距离热源的相对低能量的光子,可有较高的光电流密度,但单阶输出电压低。因此,ICPV电池可以有效地用作“多结”太阳能电池的长波长组件,或作为源温度为2000 °C或更低的热光伏(TPV)系统中的唯一光电功率转换元件。另外,TPV系统可用集中的太阳辐射将中间发射器加热到显著低于太阳表面的温度,使其发射光谱与窄带隙光伏器件完美匹配。由于与近红外光相比,自由空间中的中红外(3—5 μm)光传输具有较低的吸收和损失,因此窄带隙光伏电池也可能在各种天气条件下用于远距离激光功率输送的接收和转换。

我们对ICPV电池的初步研究是使用具有11台阶的ICL结构(在80 K时带隙为0.17 eV),和两个具有7个相同的InAs/GaSb超晶格吸收层,在80 K时带隙 $E_g$ 分别为0.24 eV和0.31 eV的ICIP结构进行的。在不同温度的标准黑体辐射源照射下,ICPV器件显现出预期的高开路电压(大于 $E_g/e$ )<sup>[21-23]</sup>。例如,来自ICIP样品的一个器件( $E_g=0.24$  eV)在80 K时的开路电压为1.17 V,电压效率 $\eta_v$ ( $\eta_v=eV_{oc}/N_sE_g$ )为70%。即使是0.17 eV的窄带隙ICL器件,其 $V_{oc}$ 在80 K时也有0.52 V,远高于单个带隙限制的值。这些观察到的高 $V_{oc}$ 表明多个带间级联台阶确实串联运行,在实验上为ICPV电池概念提供了坚实的证明。尽管这些带间级联结构不是为光伏电池设计的,其总吸收层厚度相对较薄(小于1.1 μm),还有台阶之间的光电流不匹配和半导体表面及金属接触的高

反射等不利因素,其电压效率和填充因子(FF)在80 K时仍在合理范围(例如,对于 $E_g=0.24$  eV的ICPV器件,FF~66%, $\eta_v$ 约为66—75%),但获得的功率转换效率较低(小于5%)<sup>[23]</sup>。对此,增加总吸收层厚度、调节不同分立吸收层的厚度达到电流匹配以及沉积抗反射涂层可使ICPV电池的功率转换效率在80 K时高于10%,从而为诸如太空探索所需电力等应用提供可行的选择。但对于广泛的应用,ICPV电池需要在室温下运行。

当在相同黑体辐射源的照射下,ICPV电池在300 K工作时获得的开路电压急剧降低至几mV。这是因为器件在300 K时的饱和暗电流密度 $J_0$ 明显高于广谱低强度黑体辐射产生的光电流密度 $J_p$ ,导致ICPV电池输出功率密度可忽略不计(小于0.003 mW/cm<sup>2</sup>)。根据一个半经验模型<sup>[24]</sup>,级联器件的开路电压 $V_{oc}$ 可以写为

$$V_{oc} = \frac{N_s k_B T}{e} \ln \left( \frac{J_p}{J_0} + 1 \right),$$

其中 $k_B$ 是玻尔兹曼常数, $T$ 是器件温度。因此,从方程式可以看出, $J_0$ 的值越大, $V_{oc}$ 就越低,而且 $V_{oc}$ 随 $J_p$ 缓慢增加。较大的 $J_0$ 是由于窄带隙半导体中的高本征载流子浓度和与第二类InAs/GaSb超晶格中的非辐射过程相关的较短的载流子寿命。因此,为了在室温或更高温条件下研究这些窄带隙光伏器件,需要增加光照强度或降低 $J_0$ 。随后,我们使用可调强度的中红外ICLs照射ICPV器件,研究其在各种温度下的特性<sup>[23]</sup>,在室温得到了远超单个带隙限制的开路电压。通过设计和实现具有不同吸收层厚度和不同级联阶数的ICPV结构,从理论模拟到实验,我们清楚地展示了ICPV

电池相对于传统PV架构的优势。这些优点包括高开路电压、免扩散长度限制、高收集效率,并且可以承受高强度的光照而不导致转换效率饱和,从而可普遍地提升窄带隙光伏电池的功率转换效率<sup>[23]</sup>。

然而,InAs/GaSb超晶格中的载流子寿命短(几到几十纳秒),室温 $J_0$ 高,导致填充因子小,电压效率及功率转换效率低。我们的理论模拟表明,即使采用光强为50 W/cm<sup>2</sup>的单色光照射,若载流子寿命为20 ns,带隙为0.29 eV的ICPV电池在室温的最大功率转换效率不会超过17%。这个缺点可用ICPV结构与谐振腔的片上集成来克服,使理论上的最大功率转换效率超过60%,但只能吸收转换来自窄波段的辐射光子<sup>[23]</sup>。另一种方案是用无Ga的InAs/InAsSb第二类超晶格作为吸收层,它已被证明具有相对长的载流子寿命(几微秒)。此外在实验上,仍有待探索实现的是将具有不同带隙的分立吸收层叠加合并到带间级联结构中,以利用来自宽带热源的辐射光子。这不仅能提高功率转换效率,而且能增强输出功率密度。总之,窄带隙光伏电池的研究仍处于早期阶段,它们的发展与实用化仍然存在多重挑战,ICPV架构解决了一些问题,但还有不少问题需要寻求解决方案<sup>[23]</sup>。

### 3 带间级联激光器与发光二极管最近的进展

根据相关的物理原理<sup>[1]</sup>,就所需的最低阈值电流密度和功耗而言,ICL架构是最有效的,优于其他实现半导体中红外激光器的方案。自1994年提出以来,经过20多年的研究和发 展,基于第二类或第一类量子阱有源区,生长在GaSb或

InAs衬底上的ICLs已被证明具有优越的器件性能, 激光波长覆盖了从 $2\ \mu\text{m}$ 到超 $13\ \mu\text{m}$ 的广阔光谱范围, 商业产品已被开发, 并用于许多实际应用中。本节将简要地讨论自2016年以来的一些主要进展, 更全面和详细的综述可以参阅文献[25]。

相比基于子带间跃迁的量子级联激光器(QCL)发射的横磁偏振光, ICL发射具有横电偏振的光, 可从晶片表面出射, 而横磁光不能从表面发射。因此, 带间级联架构可以与先进的垂直腔面发射激光器(VCSEL)设计相结合, 具有许多理想的特性, 例如简单的封装、高通用性、片上可测试性、具有低发散角的圆形光束轮廓等。这是ICL与QCL相比的另一个优势。2016年, NRL小组报道了在室温及更高温度(达 $70\ ^\circ\text{C}$ )下脉冲工作, 波长近 $3.4\ \mu\text{m}$ 的带间级联VCSELs[26]。虽然仍处于初步发展阶段, 级联VCSELs已经表现出比非级联且波长较短的VCSEL更低的阈值电流密度(例如 $25\ ^\circ\text{C}$ 时为 $390\ \text{A}/\text{cm}^2$ ), 显示了级联VCSEL的巨大潜力。这些报道的带间级联VCSEL在底部有n型掺杂的GaSb/AlAsSb分布式布拉格反射镜(DBR), 电流通过DBR反射镜注入, 但代价是反射率有所降低及额外的电压损耗(大于 $2\ \text{V}$ )。因此, 带间级联VCSEL的许多方面还有待探索, 其结构还远未优化。随后, Jayaraman等人报道了在室温(至 $26\ ^\circ\text{C}$ )连续工作, 波长近 $3.3\ \mu\text{m}$ 的带间级联VCSEL[27]。他们采用成熟的GaAs/AlGaAs DBR反射镜, 并用异质键合的方式把它集成到带间级联VCSEL的底部, 避免了直接生长GaSb/AlAsSb DBR反射镜的困难。

将III-V有源光学元件集成在硅上以形成光子集成电路(PIC)引起了

很多关注, 这主要是因为在大晶片上进行大规模制造可以显著降低成本。2018年, 加州大学圣塔芭芭拉分校和NRL报道了第一款通过异质键合集成在硅上的ICL[28]。其波长近 $3.6\ \mu\text{m}$ 可在温度至 $50\ ^\circ\text{C}$ 下脉冲工作, 但具有高阈值电流密度, 例如在 $20\ ^\circ\text{C}$ 时为 $1.1\ \text{kA}/\text{cm}^2$ , 比通常生长在GaSb衬底上的高质量ICL高5—10倍。这表明异质键合工艺还是不够好, 需要大力改进。另一种方式是在硅衬底上直接生长ICL结构。最近, 法国蒙彼利埃大学小组报道了直接在硅上生长、波长为 $3.6\ \mu\text{m}$ 的第二类ICLs, 可在温度高至 $50\ ^\circ\text{C}$ 下连续工作, 其性能与在GaSb衬底上生长的对应器件相似[29]。尽管位错密度在 $10^8\ \text{cm}^{-2}$ 的量级, 经过 $40\ ^\circ\text{C}$ 下连续运行3800 h老化测试后的数据表明, 器件退化非常缓慢, 推断的器件平均寿命超过312000 h。他们将这前所未有的结果归功于第二类InAs/GaInSb量子阱有源区的设计, 认为此种设计减轻了借助于与位错相关的缺陷能级的非辐射复合。他们这个推论还需进一步研究, 因为过去和现在的工作表明借助于缺陷能级的非辐射复合仍然存在, 在何种情形下可减轻值得更多深入系统的探索。

GaSb基的第二类ICL已能在室温下连续工作, 覆盖 $2.8\text{—}5.6\ \mu\text{m}$ 的光谱区域, 特别是在 $3\text{—}4\ \mu\text{m}$ 区域其性能最佳。由于诸如自由载流子吸收损耗随波长增加和第二类量子阱中导带与价带的波函数重叠减少等因素,

将高效的第二类ICL扩展到更长的波长一直有很大的挑战。2018年, 我们与加拿大国家研究院合作, 采用先进的波导结构, 实现了波长超过 $6\ \mu\text{m}$ 的低阈值电流密度(例如, 在 $300\ \text{K}$ 时小于 $400\ \text{A}/\text{cm}^2$ ) InAs基的ICLs, 其功耗密度在具有相似波长的半导体激光器中最低, 可在室温连续工作[30]。最近, 根据对能带结构的理解, 我们引入了包含InAsP层的新型量子阱有源区, 如图3所示, 实现了波长超过 $13\ \mu\text{m}$ 的InAs基ICL[31]。其波长打破了在III-V族带间激光器中由ICL保持多年的最长 $11.2\ \mu\text{m}$ 的纪录, 并在 $80\ \text{K}$ 时表现出低阈值电流密度(小于 $50\ \text{A}/\text{cm}^2$ )。2022年, 维也纳技术大学和德国的研究人员通过调整价带量子阱宽度来操控子带间跃迁间距以减少吸收, 从而改善了波长在 $4.6\ \mu\text{m}$ 和 $6.2\ \mu\text{m}$ 的GaSb基的ICL器件性能, 特别是波长为 $6.2\ \mu\text{m}$ 的ICL在温度高达 $40\ ^\circ\text{C}$ 时仍能连续工作[32]。尽管在ICL的早期研究阶段理论上就理解价带中的子带间吸收损失可通过调整量子阱宽度来操控, 但这是首次在实验上证实了操控和减轻它以提高ICL器件性能的重要性及可行性。这些成果表明ICL仍有很大的改进

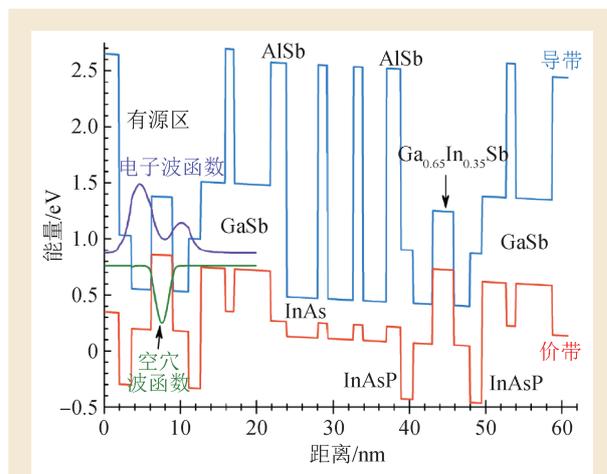


图3 激光器级联台阶的分层结构及能带边示意图

空间,尤其是在较长的波长上。然而,ICL的波长边界在哪里以及其性能如何,还需在未来的研究中得到解答。

对于许多中红外应用,激光器输出需要是单模可调谐,通常利用分布式反馈(DFB)光栅实现。然而,DFB激光器的调谐范围通常限于几纳米,而且光栅制作需要电子束曝光,很昂贵。自2008年以来,浙江大学的何建军课题组提出了一种紧凑型半波耦合V型腔激光器,无需光栅,可实现宽调谐,且有高边模抑制比的单模输出,并在光纤通信波长上得到了很好的证明和发展。2020年,何教授课题组与OU合作,将半波耦合V型腔与ICL结构结合,在波长 $2.9\ \mu\text{m}$ 附近得到了调谐范围至 $60\ \text{nm}$ 且边模抑制比达 $28\ \text{dB}$ 的单模输出<sup>[33]</sup>,初步验证了ICL与半波耦合V型腔结合实现宽调谐的可行性。最近,我们改进了器件制备,在波长 $3.4\ \mu\text{m}$ 附近得到了边模抑制比达 $35\ \text{dB}$ 的单模输出,其调谐范围超过 $100\ \text{nm}$ <sup>[33]</sup>。这些结果表明半波耦合V型腔ICL可适用于高精度的多种痕量气体检测系统。另一种具有吸引力的方法是基于频率梳,它具有独特的等距、相干的发光谱线,可提供宽带的化学传感光源,用于同时检测多种物质或快速扫描宽吸收谱。2018年,JPL和NRL实现了第一个中心波长为 $3.6\ \mu\text{m}$ 及带宽为 $35\ \text{cm}^{-1}$ 的ICL频率梳<sup>[25]</sup>。他们还应用双梳光谱来检测甲烷和盐酸<sup>[25]</sup>。随后,维也纳技术大学和德国的研究人员通过注入大射频功率实现了中心波长为 $3.85\ \mu\text{m}$ 的ICL频率梳的主动锁模。紧接着,他们用主动锁模方式在ICL上产生了宽度为 $3.2\ \text{ps}$ 、间隔为 $100\ \text{ps}$ 的脉冲,

平均功率为 $2.7\ \text{mW}$ ,但峰值功率增强了40多倍<sup>[34]</sup>。

与ICL相比,带间级联发光二极管(ICLED)结构较简单,无需光学包层。它们对低成本传感器和其他应用(如红外成像系统)是很有吸引力的解决方案。在ICL研究的初始阶段,从室温带间级联结构观察到的电致发光的波长范围就覆盖了宽广的中红外区域并超过了 $15\ \mu\text{m}$ ,第二类带间级联结构作为LED的优势在那时就被认识到。近年来,ICLEDs在室温下连续工作时的输出功率已超过 $5\ \text{mW}$ <sup>[25]</sup>,比基于传统方法的早期中红外LEDs高出10倍以上。这些ICLEDs已用于检测重要分子,例如 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[35]</sup>。德国一公司(Nanoplus)已将ICLED商业化,其波长范围为 $2.8\text{—}5.3\ \mu\text{m}$ 。另外,ICLED结构与ICIP架构兼容,可用超晶格作为有源区来增加调控的灵活性。因此,预计未来ICLED和ICIP将在同一芯片上实现小型化传感器系统。

#### 4 展望与感悟

与常规pn结一样,带间级联结构具有整流功能,是高效中红外光电器件(如激光器、光电探测器和光伏电池)的基本构件。然而,基于量子设计和工程,带间级联器件性能优于传统二极管,且能达成传统二极管无法实现的目标。与基于子带间跃迁的中红外量子级联器件(由于快速声子散射而固有地具有较短的载流子寿命)相比,带间级联器件的载流子寿命长很多,从而其饱和暗电流密度 $J_0$ 低一个量级以上,而 $J_0$ 是可统一描述级联器件性能优劣的品质指标<sup>[24]</sup>。因此,根据基本的物理机理及已获得的实验证据,带间

级联架构是中红外光电器件实现低功耗或低噪声运行的最佳选择。由于高灵敏度和低功耗,不同的带间级联器件可较为有利地被集成到同一芯片上的功能系统中,从而为各种应用提供更多机会及高性价比。然而,带间级联器件依靠的GaSb/InAs/AlSb材料体系及相关器件工艺不如量子级联器件中使用的GaAs和InP基材料及相关器件工艺成熟。此外,世界上在GaSb/InAs/AlSb材料体系和器件方面的资源和设施有限。因此,带间级联器件的研发远不如量子级联器件成长得那么快和广泛,同时也表明带间级联器件仍有巨大发展潜力。这反映在对ICL的需求增加以及一些量子级联器件领域的人转向研发带间级联器件。另外,基于相同的带间跃迁机制及光学上的相似之处,在近红外光电子器件中开发的许多知识和各种技术可以应用于中红外区域的带间级联器件。所以,随着更多人的参与和相关知识的广泛传播,可预计带间级联器件及相关系统的研发将得到加速和扩展。

回顾带间级联器件的发展及我个人的经历,从概念的提出一直到真实器件的实现及应用,我能成为这个领域的开拓者,其后20多年持续有贡献,这是非常幸运的。自中学开始,物理是我最感兴趣的学科,但直到上大学期间也从未想到物理或应用物理研究会是我一生从事的职业。回首前尘往事,自觉人生是由许多偶然组成,似乎又有必然孕育其中。偶然的事情可遇不可求,但什么是必然的关联?下面结合个人的经历,谈谈我的感悟。

我在求学及科研生涯中,追求真相重于顺从权威或关系。20世纪

80年代在南京大学做理论物理专业的研究生，导师蔡建华先生给了我一个研究课题。做了一阵子，觉得意义不大，就放在一边。之后自己另找了个题目做，把研究结果写了个初稿寄给导师看。我自找的题目不在导师的专长上，大概半年多没得到回音。这期间我与中科院的一位研究生讨论，继续沿自己选定的方向发展，又写了一篇文章，没署导师为作者，只有我的学生朋友共同署名，投到英国的物理期刊并被接收发表。这样的事情放在当下某些单位也许会被视作“违规”的行为，但当时并没有任何硬性规定，国际学术界也是自由的。比如，1995年还在斯坦福大学读研究生的L. C. West和S. J. Eglash在*APL*上报道了关于量子阱内子带间跃迁的第一个实验工作，并没有将他们的教授列为合著者。我当时不了解国际上如何做，只是按学术规范常识，文责自负，没考虑其他的，也没瞒导师。我这样做的效果大概催使了导师去图书馆查资料看懂了我的工作，从此他放手让我选择研究课题。

其实在浙江大学物理系读本科时，我的学习成绩只是属于中上水平，也不懂如何做研究，渴望有人多引导自己。那时年青，基础知识自学能力尚好，有点勇气瞎碰乱撞。另一特点或许是我自小就不太喜欢随大流，对一些问题能独立思考，且不管旁人怎么说，比较坚持。在加拿大的时候，发现自己比较适合做应用物理，对半导体材料和器件产生了很大的兴趣，为了弄清楚一个概念或事情会查阅很多文献。那时虽穷，还是买了些原版专业英文书来读。而对当时兴起的物

理人士转到电脑行业的机会毫无兴趣。因此上天就给了我发明带间级联激光器的幸运，当然这是建立在前人工作的基础上及基于自己过去不断学习累积的研究经验与物理认知。1994年我自费参加了在Banff召开的国际会议并报告了ICL的构想。其物理图像是清楚且简单的，故从物理机理来说绝对是实现半导体中红外激光器的最佳方案，尚不肯定的是所依赖的半导体材料体系能有多好。但那是技术问题，总是能随时间努力改善的。现在ICL的发展证明了当年判断的正确。

我对新事物，若是不理解，感觉不到激情就难于积极参与。刚出现时也许有些诱惑力，有时应景附和一下，或是有条件先做个初步实验也不错。但是若不能明白有什么意义或价值，无法深入系统地进行下去，就可能像大部分所谓的新东西一样被大浪淘沙而消失。所以要推进一个研究方向，仅仅是新，显然是不够的，还要找到可以深入下去的理由或者应用的独特价值。通常会尽量弄懂搞通相关的概念，起初不一定全明白，研究常常是有意外的，需要反复琢磨。在OU刚开始的几个课题都不是主流方向，个别课题到现在仍然挑战很大。这样的选题对我们学校这样的条件和环境是有利的，我们没有完备及高端的设备，又没有顶级高校的生源，但非主流的选题给我们带来了无激烈竞争、较自由的氛围。基本上每个工作都是对过去知识的更新进步，有较长的时间不断改善提高对研究课题的认识，能成系统地取得一些成就。有时，在理解或实验上的一小步改善需要多年的努力才认清或实现，恍如“众里寻他千百

度。蓦然回首，那人却在，灯火阑珊处”。很庆幸，我们努力做出了有影响的工作，引领了研究的方向。在OU，我有较多的自由和机会启动并亲自参与感兴趣的研究课题，出现的困惑难题常要由我像个守门员一样把着最后一道关口，为此日思夜想，保持前沿竞技状态，查验实验与计算细节。当然，最后也让我较为享受解决问题的乐趣。

总结上面所述，在科研中找到有意义、有潜力、适合自己并感兴趣的方向和领域最为关键。发明创造、解决问题不一定需要学习成绩最好或最聪明，但需要良好的数理基础、自学能力、独立思考和能力分析。另外追求真相的欲望和行动，专注、坚持不懈的努力也是非常重要的。

**致谢** 感谢姬扬博士的建议及评论、张永刚博士和胡升华博士的细致阅读及建议。

## 参考文献

- [1] 杨瑞青. 物理, 2016, 45(01): 46
- [2] Li J V, Yang R Q, Hill C J *et al.* Appl. Phys. Lett., 2005, 86(10): 101102
- [3] Yang R Q, Tian Z, Cai Z *et al.* J. Appl. Phys., 2010, 107(5): 054514
- [4] Hinkey R T, Yang R Q. J. Appl. Phys., 2013, 114(10): 104506
- [5] Yang R Q, Hinkey R T. Appl. Phys. Lett., 2021, 118: 241101
- [6] Yang R Q. Appl. Phys. Lett., 2021, 119: 141107
- [7] Yang R Q. Appl. Phys. Lett., 2022, 121: 51105
- [8] Gautam N, Myers S, Barve A V *et al.* Appl. Phys. Lett., 2012, 101(2): 021106
- [9] Tian Z, Godoy S E, Kim H S *et al.* Appl. Phys. Lett., 2014, 105(5): 051109
- [10] Lei L, Li L, Ye H *et al.* J. Appl. Phys.,

- 2016, 120:193102
- [11] Huang W, Lei L, Li L *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2017, 122(8):083102
- [12] Lei L, Li L, Lotfi H *et al.* *Opt. Eng.*, 2018, 57(1):011006
- [13] Huang W, Li L, Lei L *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2018, 123(11):113104
- [14] Lei L, Li L, Huang W *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2017, 111(11):113504
- [15] Hackiewicz K, Kopytko M, Rutkowski J *et al.* *Applied Optics*, 2020, 59(17):E42
- [16] Lotfi H, Li L, Lei L *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 108:201101
- [17] Sterczewski L A, Bagheri M, Frez C *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 116:141102
- [18] Lotfi H, Li L, Lei L *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2016, 119:023105
- [19] Lotfi H, Li L, Ye H *et al.* *Infrared Physics & Technology*, 2015, 70:162
- [20] Lotfi H, Li L, Rassel S M S *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109:151111
- [21] Yang R Q, Tian Z, Klem J *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 96:063504
- [22] Hinkey R T, Tian Z, Rassel S M *et al.* *IEEE J. Photovoltaics*, 2013, 3:745
- [23] Yang R Q, Huang W, Santos M B. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2022, 238:111636
- [24] Huang W, Rassel S M S, Li L *et al.* *Infrared Phys. Technol.*, 2019, 96:298
- [25] Meyer J R, Bewley W W, Canedy C L *et al.* *Photonics*, 2020, 7:75
- [26] Bewley W, Canedy C, Kim C *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109:151108
- [27] Jayaraman V, Kolasa B, Lindblad C *et al.* *Proc. SPIE*, 2020, 11300:113000M
- [28] Spott A, Stanton E J, Torres A *et al.* *Optica*, 2018, 5:996
- [29] Cerutti L, Díaz Thomas D, Rodriguez J *et al.* *Optica*, 2021, 8:1397
- [30] Yang R Q, Li L, Huang W *et al.* *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2019, 25:1200108
- [31] Massengale J A, Shen Y, Yang R Q *et al.* *Appl. Phys. Lett.*, 2022, 120:091105; *Semicond. Sci. Technol.*, 2023, 38:025009
- [32] Knotig H, Nauschutz J, Opacak N *et al.* *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16:2200156; Nauschutz J, Knotig H, Weih R *et al.* 2022, arXiv: 2207.11113v1 [physics.optics]
- [33] Yang H, Yang R Q, Gong J L *et al.* *Optics Letters*, 2020, 45:2700; Gong J L, Yang R Q, Wang Z *et al.* *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2023, 35 (to be published)
- [34] Hillbrand J, Beiser M, Andrews A *et al.* *Optica*, 2019, 6:1334
- [35] Li N, Tao L, Yi H *et al.* *Opt. Express*, 2021, 29:7221

## 读者和编者

## 订阅《物理》得好礼

——超值回馈《岁月留痕》  
——《物理》四十年集萃

部特推出优惠订阅活动：向编辑部连续订阅2年《物理》杂志，将获赠物理类科普图书或《岁月留痕——《物理》四十年集萃》一本。该书收录了1972年到2012年《物理》发表的40篇文章，476页精美印刷，定价68元，值得收藏。

希望读者们爱上《物理》！

订阅方式(编辑部直接订阅优惠价180元/年)

## (1) 邮局汇款

收款人地址：北京市中关村南三街8号中科院物理所，100190

收款人姓名：《物理》编辑部

## (2) 银行汇款

开户行：农行北京科院南路支行

为答谢广大读者长期以来的关爱和支持，《物理》编辑

户名：中国科学院物理研究所

帐号：11 250 1010 4000 5699

(请注明《物理》编辑部)

咨询电话：010-82649029；82649277

Email: physics@iphy.ac.cn

