

## 势垒型 InAs/InAsSb II 类超晶格红外探测器研究进展 (特邀)

张春芳<sup>1,2</sup>, 柳 渊<sup>1,2</sup>, 巩明亮<sup>1,2</sup>, 刘炳锋<sup>2,3</sup>, 龚蕊蕊<sup>2,4</sup>, 刘家伯<sup>1,2</sup>, 安和平<sup>1,2</sup>,  
张东亮<sup>1,2</sup>, 郑显通<sup>1,2</sup>, 鹿利单<sup>1,2</sup>, 冯玉林<sup>1,2</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

- (1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100096;
2. 光电测试技术及仪器教育部重点实验室, 北京 100016;
3. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230002;
4. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130012)

**摘 要:** 红外探测技术在卫星侦察、军事制导、天文观测、医疗检测、现代通信等重要领域发挥着关键作用。II 类超晶格 (T2SLs) 红外探测器作为继碲镉汞探测器之后的新一代红外探测材料, 在稳定性、可制造性和成本等方面具有独特优势。势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器是最具潜力的 T2SLs 红外探测器之一, 近年来其关键性能得到了稳步提高, 但仍受吸收系数低、异质外延生长困难和暗电流大等因素的制约。文中综述了 III-V 族 T2SLs 的发展历程, 分析了势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器的不同势垒结构、关键性能和发展趋势, 指出了势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器需要解决的关键问题和未来发展方向。

**关键词:** 红外探测器; T2SLs; InAs/InAsSb; 势垒结构

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220667

## Research progress of barrier InAs/InAsSb type-II superlattice infrared detectors (*invited*)

Zhang Chunfang<sup>1,2</sup>, Liu Yuan<sup>1,2</sup>, Gong Mingliang<sup>1,2</sup>, Liu Bingfeng<sup>2,3</sup>, Gong Ruixin<sup>2,4</sup>, Liu Jiabo<sup>1,2</sup>, An Heping<sup>1,2</sup>,  
Zhang Dongliang<sup>1,2</sup>, Zheng Xiantong<sup>1,2</sup>, Lu Lidan<sup>1,2</sup>, Feng Yulin<sup>1,2</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

- (1. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100096, China;
2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing 100016, China;
3. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230002, China;
4. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China)

**Abstract:** Infrared detection technology plays a key role in many important fields, such as satellite reconnaissance, military guidance, astronomical observation, medical detection, and modern communications. Type-II superlattices, as a new generation of infrared detection materials after HgCdTe detectors, have unique advantages in terms of stability, manufacturability, and cost. The barrier-type InAs/InAsSb type-II superlattice infrared detectors are one of the most promising type-II superlattice infrared detectors. Their key performance has been steadily improved in recent years but is still constrained by factors such as low absorption coefficient, difficult

收稿日期:2022-10-20; 修订日期:2022-12-01

基金项目:中国科学技术协会托举人才项目 (YESS20200146); 北京信息科技大学重点培育项目 (5212110925)

作者简介:张春芳,女,博士生,主要从事光电探测器方面的研究。

导师简介:柳渊,男,教授,博士生导师,博士,主要从事光电子物理与器件方面的研究。

祝连庆,男,教授,博士生导师,博士,主要从事精密测量与光电探测器方面的研究。

heteroepitaxial growth, and large dark current. Herein, this article reviews the development history of III-V type-II superlattices, analyzes the different barrier structures, key properties and development trends of barrier-type InAs/InAsSb type-II superlattice infrared detectors, and points out the potential key problems and future development directions of barrier type InAs/InAsSb type-II superlattice infrared detectors.

**Key words:** infrared detector; Type-II superlattice; InAs/InAsSb; barrier structure

## 0 引言

红外探测技术在卫星侦察、军事制导、天文观测、医疗检测、现代通信等领域有着重要应用。红外探测器由众多光学元件组成,其中最为重要的是焦平面阵列芯片。当外界的光辐射经过带通滤光片等内置光学元件滤除不必要的光辐射后到达光敏芯片,芯片通过光电效应将光辐射转换为电信号输出到信号处理系统,完成对目标光辐射的探测<sup>[1]</sup>。红外探测器的性能需求随着技术发展不断上升,从第一代发展到现今的第三代,在性能、成本及稳定性等方面都得到了极大提升。第三代制冷型红外光电探测器的材料主要包含碲镉汞(HgCdTe)<sup>[2-3]</sup>、量子阱光探测(QWIPs)<sup>[4-6]</sup>、II类超晶格(T2SLs)<sup>[7-9]</sup>与量子点光探测(QDIPs)<sup>[10-12]</sup>。碲镉汞材料量子效率高,迁移率高,响应速度快,但其主要由离子键构成,相互作用力小,导致稳定性差,容易在生长过程中造成材料不均匀及材料缺陷等问题。此外,碲镉汞材料的衬底是价格昂贵的CdZnTe,使碲镉汞材料在成本和良率上陷入劣势<sup>[13]</sup>。尽管量子阱红外探测器和量子点红外探测器克服了成本问题且具有更低的暗电流和更高的响应度,然而量子阱红外探测器不能直接探测垂直入射辐射且响应波段较窄,单层量子点的密度低,吸收效率较低,外延生长过程中应力的积累会限制量子点的周期数,同时外延生长的量子点尺寸、成分、掺杂的不均匀性都会降低量子点层的吸收系数<sup>[14]</sup>。

II类超晶格红外探测器势阱和势垒层的厚度随探测波长的增大而增大,对于中波II类超晶格材料,其势阱和势垒层在2~3 nm之间。电子与空穴不受势阱和势垒层的限制,通过势垒隧穿形成微带。这种电子与空穴隧穿形成的微带之间的距离类似禁带宽度,微带的位置可以通过调节超晶格的组分、厚度以及界面的应变来改变,使得II类超晶格红外探测器的光谱响应范围可在2~30  $\mu\text{m}$ 范围内调节,覆盖从短波到甚

长波的整个红外波段<sup>[15]</sup>。另外,这种结构使得电子有效质量受探测波长变化的影响较小,从而降低器件的带间隧穿电流<sup>[16]</sup>。II类超晶格材料由III-V共价键构成,材料结构稳定<sup>[17-18]</sup>,工艺成熟,器件产业化趋势明显,能够匹配GaSb和GaAs等大尺寸商业化衬底<sup>[19]</sup>。经过20多年的发展,以InAs/GaSb(含Ga)和InAs/InAsSb(不含Ga)为代表的T2SLs有望成为继碲镉汞(MCT)材料之后新一代红外探测材料。

在器件设计方面,为了减小器件暗电流,提高探测器的探测率和工作温度,势垒型结构的T2SLs探测器近年来得到了快速发展。尤其是2006年Maimon和Wicks等人提出了nBn型势垒结构nBn结构之后<sup>[20]</sup>,XBn结构<sup>[21-22]</sup>、互补势垒红外探测器(CBIRD)结构<sup>[23-24]</sup>、双异质结构(DH)<sup>[25-26]</sup>和pMp结构<sup>[27-28]</sup>等多种势垒型结构被应用于T2SLs红外探测器,展现出与传统碲镉汞红外探测器相匹敌的器件性能。

文中介绍了InAs/InAsSb T2SLs的发展历程,总结了nBn、pBn、CBIRD三种不同势垒结构的发展,分析了近年来势垒型InAs/InAsSb T2SLs红外探测器的关键性能和发展趋势,指出了势垒型InAs/InAsSb T2SLs红外探测器需要解决的关键问题和未来发展方向。

## 1 II类超晶格

超晶格按能带结构分为三种:(1)以GaAs/AlGaAs为代表的I类超晶格,GaAs的禁带完全落入AlGaAs的内部,电子和空穴都被限制在材料GaAs中;(2)以InAs/GaSb为代表的T2SLs,InAs的禁带和GaSb的禁带错开,电子被限制在InAs中,而空穴被限制在GaSb中;(3)以HgTe/CdTe为代表的III类超晶格,其能带结构与I类超晶格类似,但其中一种组成材料为半金属,半金属的厚度对超晶格的能带结构起到了决定性的作用。

碲化物T2SLs,通常由窄带系的6.1Å族材料如InAs、GaSb、AlSb、InSb、GaAs和AlAs组成,通过改

变周期厚度及材料组分,使得超晶格子带形成的禁带宽度小于组成的材料,吸收波长范围可覆盖短波到甚长波,展现出优异的能带可调节性,在红外探测器及激光器领域有着广泛的应用。目前,InAs/GaSb 和 InAs/InAsSb T2SLs 被广泛认为最具潜力的两种 T2SLs 材料体系<sup>[29]</sup>。

### 1.1 InAs/GaSb 与 InAs/InAsSb 超晶格

自 20 世纪 70 年代开始, InAs/GaSb II 类超晶格被广泛应用于红外探测器研究。近年来, InAs/GaSb II 类超晶格在很多性能参数上,比如外量子效率、响应率等已经可以与 MCT 相媲美,但仍然受限于少数载流子寿命,主要受限于材料体系内的缺陷态<sup>[30]</sup>。Ga 被认为导致 InAs/GaSb II 类超晶格的缺陷态主要来源之一。研究表明, InAs 的少子寿命 (~325 ns) 要比 GaSb (~100 ns) 的寿命长<sup>[31]</sup>,并且 InAs<sub>0.80</sub>Sb<sub>0.20</sub> 的少子寿命 (~250 ns) 与 InAs 相当<sup>[32]</sup>。因此, GaSb 或者含 Ga 的界面材料被认为是引起缺陷态的主要来源之一,其较高的缺陷态密度导致了较大的非辐射复合的暗电流,包括 Shockley-Read-Hall (SRH) 非辐射复合,缺陷辅助隧穿 (Trap-assisted tunneling, TAT) 电流等,严重制约了 InAs/GaSb T2SLs 的器件性能。相比于 InAs/GaSb, InAs/InAsSb T2SLs 具有以下优点:

(1) 更长的少子寿命: InAs/InAsSb T2SLs 不含 Ga 原子,杜绝了由于 Ga 产生的缺陷态,同时异质结界面更为简单,可实现更长的载流子寿命;研究表明, InAs/InAsSb T2SLs 比 InAs/GaSb T2SLs 的少子寿命高了~1-2 个数量级,在 77 K 达到~10 μs,可以和 MCT 材料相比拟<sup>[33]</sup>。

(2) 更简化的异质外延过程: InAs/InAsSb 异质结具有两种相同的元素 (In 和 As),只有 Sb 是变量元素,具有更加简单的异质结界面结构。InAs/InAsSb T2SLs 的能带结构依赖于层的厚度及 As/Sb 元素之比。由于 MBE 外延生长过程中, In 和 As 可以一致保持开的状态,只需要控制 Sb 源挡板阀的开关,就可以完成整个超晶格的生长过程,有望在大规模生产中更好地控制界面及更高的良率<sup>[34-35]</sup>。

(3) 更大的缺陷态容忍度: InAs/InAsSb T2SLs (导带差  $\Delta E_c \sim 142$  meV,价带差  $\Delta E_v \sim 226$  meV) 比 InAs/GaSb (导带差  $\Delta E_c \sim 930$  meV,价带差  $\Delta E_v \sim 510$  meV) 具有较小的导带差和价带差<sup>[36]</sup>,两种超晶格的能带结

构如图 1 所示。InAs/InAsSb T2SLs 的导带较低,缺陷态能级位于导带边之上,具有较大缺陷容忍度,使得相同缺陷态密度下少子寿命更长<sup>[37]</sup>。

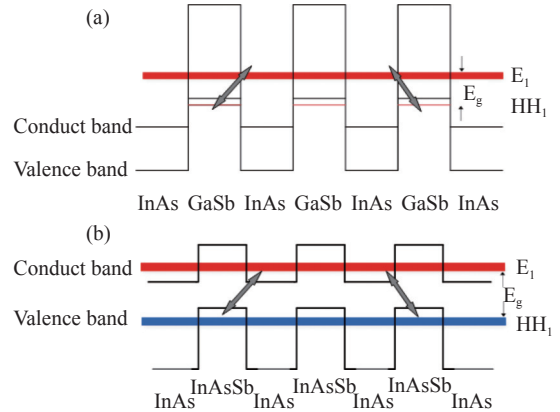


图 1 (a) InAs/GaSb 能带结构; (b) InAs/InAsSb 能带结构

Fig.1 (a) Band structure of InAs/GaSb; (b) Band structure of InAs/InAsSb

但 InAs/InAsSb T2SLs 也有诸多的局限性。图 1 中,两种超晶格都采用 InAs 电子量子阱,但它们在空穴量子阱方面有所不同: GaSb 的价带边明显高于 InAsSb 的价带边,这将超晶格子价带边 (HH1) 拉得更高,从而更容易实现更小的超晶格带隙。也就是 InAs/InAsSb 需要较大的周期厚度达到与 InAs/GaSb 相同的吸收截止波长,减少了电子-空穴波函数的交叠,从而导致较弱的振子强度和较小的吸收系数<sup>[38]</sup>。同时,对于生长在 GaSb 衬底上的 InAs/InAsSb T2SLs, InAs 层处于轻微拉伸应变,而 InAsSb 层处于相对较高的压缩应变。通常需要相对较厚的 InAs 层来对 InAs/InAsSb T2SLs 中的 InAsSb 层进行应变平衡补偿。较厚的 InAs 层导致 InAsSb 价带量子阱的更大的分离,从而使得生长方向空穴有效质量增大<sup>[39-40]</sup>,限制了 n 型吸收层的少子空穴的扩散长度,进而影响器件的量子效率<sup>[41]</sup>,尤其是在长波红外波段会导致量子效率 (QE) 较低<sup>[42]</sup>。

为了提高 InAs/InAsSb 超晶格的吸收系数,研究人员发现,提高 Sb 组分,可有效减小周期厚度,增加波函数交叠。但由于严重的 As-Sb 置换, Sb 组分的增加,需要足够高的 Sb 通量 (束流),导致表面残留大量 Sb 原子,在 InAs/InAsSb SLs 界面处易诱导 Sb 偏析问题<sup>[43-44]</sup>。Sb 偏析的产生,使超晶格出现缓变界面,不利于载流子的限制,又对应变的调控带来不确定因

素,极大地提高了器件能带设计的难度<sup>[45]</sup>。

表 1 总结了 InAs/GaSb 与 InAs/InAsSb 超晶格各自的优缺点。总体来说, InAs/InAsSb 超晶格材料在均匀性,稳定性和少子寿命上表现突出,高工作温度下暗电流小,且生长简单,是制造低成本、小尺寸、低重量和低功耗 (C-SWaP) 红外焦平面阵列 (IRFPA) 的优势材料。

表 1 InAs/GaSb 与 InAs/InAsSb 超晶格优缺点对比

Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages of InAs/GaSb and InAs/InAsSb superlattices

	InAs/InAsSb T2SLs	InAs/GaSb T2SLs
Advantages	Longer minority carrier lifetime	Higher absorption coefficient
	Simpler epitaxy process	Greater offset of conduction band and valence band
	Better defect tolerance	Larger cut-off wavelength range
Disadvantages	Lower absorption coefficient	Short minority carrier lifetime
	Lower vertical hole mobility	More complicated epitaxy process
	Shorter carrier diffusion length	Intrinsic defects of Ga atom
	Sb segregation	

### 1.2 InAs/InAsSb T2SLs 发展历程

InAs/InAsSb T2SLs 的发展路线<sup>[46]</sup>如图 2 所示, 20 世纪 90 年代 Biefeld 等首次生长了 InAs/InAsSb 超晶格<sup>[47]</sup>, Zhang 等报道了 InAs/InAsSb T2SLs 的光泵浦的中红外激光器, 并提出 InAs/InAsSb 可应用于长波红外探测器<sup>[48]</sup>。自此之后, 有大约 10 年的时间, InAs/InAsSb 超晶格一直处于沉寂期, 鲜有研究人员对其进行红外探测器的研究。直到 2009 年, 加拿大西蒙菲莎大学的 Lackner 等人为了实现低噪声探测, 再次研究了 InAs/InAsSb 超晶格, 开展了在 GaSb 衬底外延生长晶格匹配的 InAs 和 InAsSb 的超晶格结构的研究<sup>[49]</sup>。2011 年, Steenbergen 等通过时间分辨光致发光 (TRPL) 研究发现 InAs/InAsSb 超晶格具有比 InAs/GaSb 超晶格更长的少子寿命<sup>[50]</sup>。自此以后, InAs/InAsSb 超晶格得到了广泛关注。2015 年, 美国桑迪亚国家实验室与亚利桑那州立大学、伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校合作表征了 InAs/InAsSb T2SLs 的少数载流子

运输, 测量了少子扩散长度及生长方向上的空穴迁移率<sup>[51]</sup>。同年, Prins 等人通过实验表明, InAs/InAsSb T2SLs 的缺陷态能级位于导带边之上, 证明这类超晶格具有更好的缺陷态容忍能力, 在低暗电流红外探测器上具有良好的应用前景<sup>[37]</sup>。

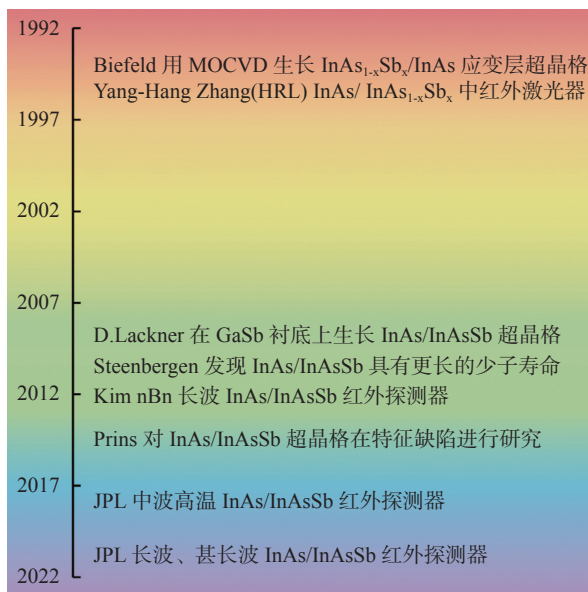


图 2 InAs/InAsSb T2SLs 发展路线图

Fig.2 InAs/InAsSb T2SLs development roadmap

基于 InAs/InAsSb T2SLs 优异的材料性能, 2012 年, Kim 等在 GaSb 衬底上外延生长 InAs/InAsSb T2SLs, 制备了 nBn 型长波红外探测器<sup>[8]</sup>。之后 InAs/InAsSb 超晶格被应用于中波<sup>[52-55]</sup>、长波<sup>[8, 56-59]</sup>、甚长波<sup>[41]</sup>及双色探测器<sup>[60]</sup>。另外, 由于 InAs/InAsSb T2SLs 较大的缺陷态容忍度等优点, GaAs<sup>[59]</sup>、Si<sup>[52, 54]</sup>、Ge-Si<sup>[61-62]</sup>等衬底外延生长的 InAs/InAsSb T2SLs 也被先后报道, 有望应用于大尺寸、低成本的红外焦平面。

## 2 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器

单极势垒结构能阻挡一种载流子类型 (电子或空穴), 但允许另一种不受阻碍地流动。单极势垒结构可通过抑制 SRH 过程降低产生复合 (Generation-Recombination, G-R) 电流<sup>[20]</sup>。基本原理是将耗尽层限制在宽带隙势垒材料中, 使 SRH 过程主要发生在宽禁带的势垒区而不是窄禁带的超晶格吸收层中。同时, 宽禁带的势垒结构对窄禁带的超晶格吸收层具有钝化作用, 有助于进一步减少器件的表面泄漏电

流<sup>[63]</sup>。这种势垒结构很大程度上解决了 III-V 族半导体红外探测器暗电流过大的问题,其发展历程如图 3 所示。

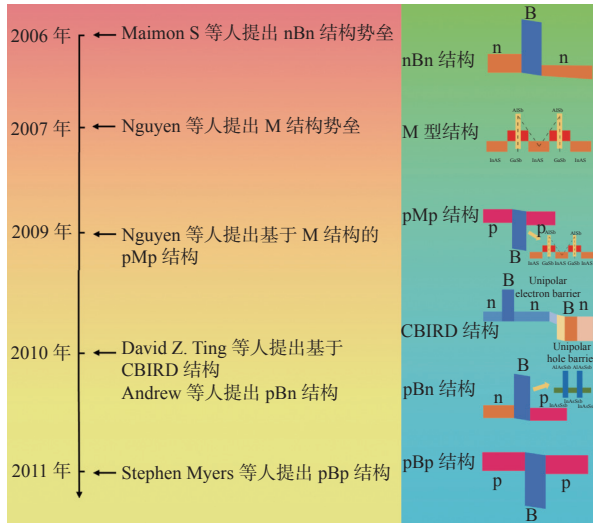


图 3 势垒结构的发展历程

Fig.3 Roadmap of the barrier structure development

### 2.1 nBn 结构

2006 年, S. Maimona<sup>[20]</sup> 等提出了 nBn 结构, 用势垒层代替 p-n 结的空间电荷区, 实验证明该结构能有效地降低暗电流和噪声, 提升器件的工作温度, 在室温附近具有更高的探测能力。

nBn 器件及能带结构如图 4 所示, 超晶格吸收层产生光生电子空穴对, 势垒层阻挡多数载流子从上电极注入, 并允许少数载流子的漂移。理想情况下, nBn 型结构中的导带偏移 (CBO) 必须足够大以阻挡大多数载流子, 并且吸收层和势垒层之间的价带偏移 (VBO) 必须最小化, 避免少数载流子空穴在势垒层界面处的积聚。同时, 在势垒足够高, 势垒区足够厚的情况下能有效抑制载流子的隧穿和热激发产生的暗电流。另外, 由于势垒层的禁带宽度比吸收层大, 使得势垒层中的 SRH 复合速率得到了极大的抑制, 从而有效降低复合暗电流, 提高器件的探测率<sup>[64]</sup>。另一方面, 较大禁带宽度的势垒层可以起到钝化作用, 有效减少了 nBn 器件的表面漏电流。标准光刻工艺后的 nBn 器件, 采用选择性刻蚀在势垒阻挡层上形成接触层, 器件有源吸收层被势垒层覆盖, 从而避免了器件表面钝化的需求。

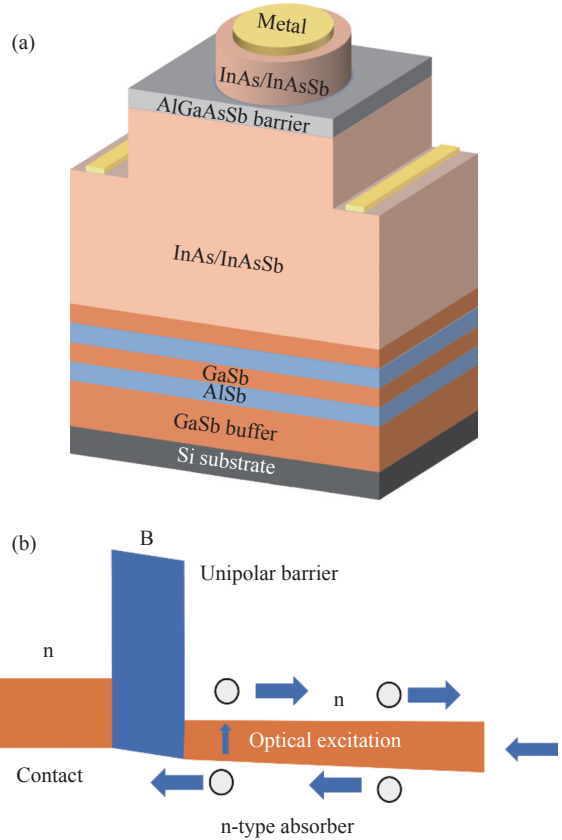


图 4 nBn 器件结构示意图。(a) nBn 探测器结构图; (b) nBn 结构能带图

Fig.4 Schematic diagram of the nBn device structure. (a) Structure diagram of nBn detector structure; (b) Energy band diagram of nBn structure

加州理工学院研究人员创立的美国宇航局喷气推进实验室 JPL (Jet Propulsion Laboratory) 和西北大学量子器件研究中心 CQD (Center for Quantum Devices) 都对 nBn 型 InAs/InAsSb T2SLs 探测器进行了深入研究<sup>[65]</sup>。JPL 探索了 nBn 探测器在高工作温度下的开启行为, 同时也分析了器件在低工作温度下的暗电流特性及载流子输运等问题<sup>[66]</sup>。2018 年, JPL 的 David Z.Ting<sup>[67]</sup> 等报道了一种基于 InAs/InAsSb 超晶格的中波高温势垒红外探测器, 其采用 nBn 结构, 使用低掺杂的 AlAsSb 势垒, 探测器在 150 K 的温度下, 50% 截止波长为 5.37  $\mu\text{m}$ 。在 4.5  $\mu\text{m}$  下的量子效率约为 52%, -0.2 V 反向偏压下的器件暗电流为  $4.5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。与 InAs/GaSb 材料相比, 势垒型 InAs/InAsSb 超晶格红外探测器有显著的高工作温度优势, 具有很大的潜力<sup>[68]</sup>。

值得注意的是,在 InAs/InAsSb T2SLs nBn 探测器中,AlAsSb 三元合金常被用作势垒层。但 AlAsSb 很容易在干法刻蚀等工艺加工的过程中氧化,在吸收层的表面形成氧化层,产生表面漏电流。同时,AlAsSb 主要通过调节组分的方法实现近零的价带偏移,在势垒层/衬底 (GaSb) 晶格匹配的条件下,三元合金势垒会与吸收层不可避免形成价带偏移,使得器件的导通电压升高,增加器件的暗电流<sup>[69]</sup>。2022 年,韩国 i3system 的 Ahreum Jang 等研究了一种 InAs/AlAsSb/InAsSb T2SLs 新型势垒,其具有最小限度的价带偏移 (~0.007 eV) 和接近零的导通电压 (T2SLs 势垒和 AlAsSb 势垒分别约为 -0.1 eV 和 -0.15 eV),器件的暗电流密度达到  $1.57 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$  (130 K),比三元合金势垒 nBn 器件的暗电流密度降低了 20 倍<sup>[70]</sup>。

### 2.2 pBn 结构

基于 nBn 结构,2010 年,Andrew<sup>[71]</sup> 等提出了具有能在零偏置状态下工作的 pBn 势垒探测器。pBn 结构如图 5(a) 所示,由 n 型掺杂吸收层, n 型掺杂 InAs/InAsSb 势垒层和 p 型掺杂接触层组成。在 pBn 结构中, p-n 结位于重掺杂 p 型材料和低掺杂 n 型势垒之间的界面处,其能带结构如图 5(b) 所示。与 nBn 结构一样,由于耗尽区主要存在于势垒中, pBn 结构仍然可以有效减少与 SRH 中心相关的 G-R 暗电流,并且不会明显穿透窄带隙 n 型吸收材料。

2020 年,昆明物理研究所的 Deng<sup>[72]</sup> 等人报道了基于 InAs/InAsSb T2SLs 的 pBn FPA 器件,实现了 50% 截止波长为 4.8  $\mu\text{m}$ ,最高工作温度达到 185 K。在无防反射涂层的情况下,平均量子效率为 57.8%。工作偏压为 -400 mV 时,暗电流密度达到  $5.39 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。2022 年,西北大学西部能源光子技术国家重点实验室和中国科学院半导体研究所联合报道了使用 AlAsSb/InAsSb 超晶格势垒结构的 pBn 中波红外光电探测器,在 150 K 下的截止波长约为 5.0  $\mu\text{m}$ 。在 150 K 和 -100 mV 外加偏压下,光电探测器的暗电流密度为  $1.2 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ ,峰值响应率 (~4.1  $\mu\text{m}$ ) 下的量子效率为 29%,比探测率为  $1.2 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ <sup>[73]</sup>。相比于 nBn 型结构, pBn 需要较小的工作电压,有效降低了器件量子效率对偏压的依赖性,在低功耗、高动态响应的红外探测器中有着重要的应用前景。

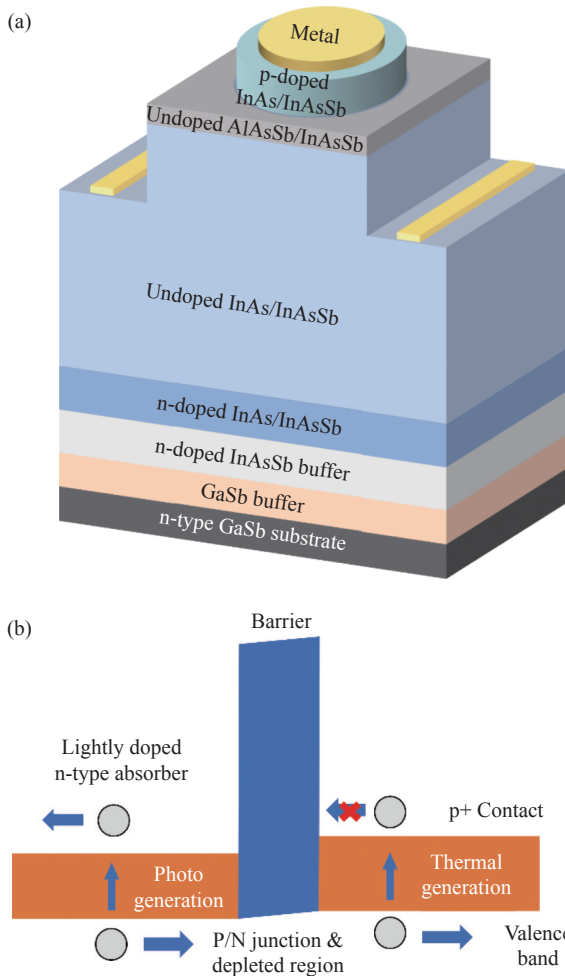


图 5 pBn 器件结构示意图。(a) pBn 探测器结构图; (b) pBn 结构能带图

Fig.5 Schematic diagram of the pBn device structure. (a) Structure diagram of pBn detector structure; (b) Energy band diagram of pBn structure

### 2.3 CBIRD 结构

由于 InAs/InAsSb 较短的空穴扩散长度限制了 nBn 器件在量子效率上的提升。采用 p 型超晶格吸收层,利用较长的电子扩散长度,可有效提升器件的量子效率。2009 年,David Z.Ting 等提出一种 p 型超晶格吸收层被一对电子和空穴单极势垒包围的长波长 InAs/GaSb 红外探测器结构,即互补势垒红外探测器 (CBIRD)。使用 p 型 InAs/GaSb T2SLs 吸收层, InAs/GaSb T2SLs 电子势垒和 InAs/AlSb T2SLs 空穴势垒结构,可有效解决表面漏电流问题并实现器件量子效率的提升<sup>[24]</sup>,器件结构如图 6 所示。但对于 p 型 InAs/InAsSb T2SLs 吸收层的 CBIRD,量子效率的提升具有较大的挑战。

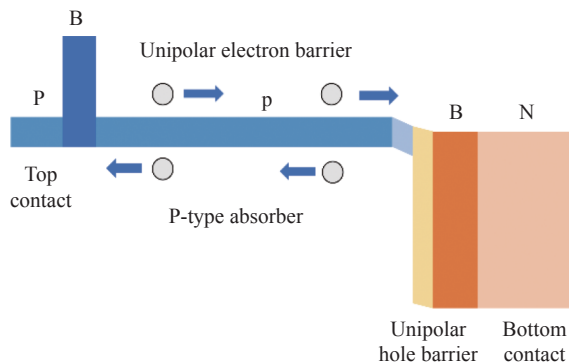


图 6 p-CBIRD 能带结构图

Fig.6 Energy band structure diagram of p-CBIRD

在 p 型 InAs/InAsSb T2SLs 作为吸收层 CBIRD 中,探测器阵列需要暴露整个吸收层部分进行深台面蚀刻。尽管 InAs/InAsSb T2SLs 进行了 p 型掺杂,其表面仍为简并 n 型,暴露的侧壁受到表面 p-n<sup>+</sup>结和表面缺陷的影响,形成新的暗电流产生路径<sup>[74]</sup>。CBIRD 结构可以利用 n 型电子势垒有效抑制表面泄露电子形成的暗电流,但无法有效避免表面 p-n<sup>+</sup>导致的 G-R 电流和隧穿电流。与仅使用 p 型吸收层不同,具有 p 型和 n 型吸收层部分组合的 CBIRD 可以采用较浅的台面蚀刻,减少 p 型吸收层暴露的表面积。

2021 年, JPL 使用 CBIRD 结构制备势垒型红外探测器,该结构实现了截止波长从 10.0~15.3 μm 的覆盖范围,其中使用渐变 n 型 InAs/InAsSb T2SLs 吸收层和 p 型 InAs/InAsSb T2SLs 吸收层组合的互补势垒红外探测器结构 (pn-CBIRD)<sup>[75]</sup>,其能带结构图如图 7 所示。在该类器件中,采用空穴扩散长度所允许的厚度构造 n 型吸收层,然后在其上叠加 p 型吸收层,实现了较高的量子效率。在 60 K, 50% 截止波长 13.3 μm 的 pn-CBIRD InAs/InAsSb T2SLs 的暗电流为

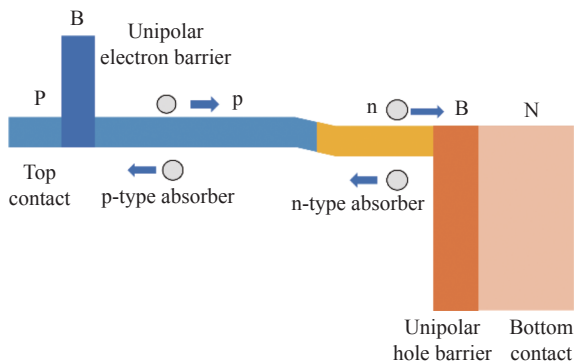


图 7 pn-CBIRD 能带结构图

Fig.7 Energy band structure diagram of pn-CBIRD

$6.6 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ , 最大 QE 为 ~53%。13.3 μm 截止 pn-CBIRD 样品在 30 K 温度, 比探测率为  $9.9 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ , 显示出良好的器件性能<sup>[76]</sup>。

通过对比使用 n 型吸收层、p 型和 n 型组合吸收层或 p 型吸收层的三种互补势垒红外探测器结构, 具有 p 型和 n 型组合吸收层的 pn-CBIRD 结构可以实现最小蚀刻深度, 实现较小暗电流<sup>[76]</sup>, 三种互补势垒结构拍摄的画面如图 8 所示。其中 n-CBIRD, 在 77 K, 0.15 V 反偏下, 截止波长为 10.0 μm 的 QE 为 ~25%。而 p-CBIRD 和 pn-CBIRD 的 QE 为 ~35%, 由于使用 p 型吸收层, p-CBIRD 和 pn-CBIRD 的 QE 比 n-CBIRD 要高约 10%。

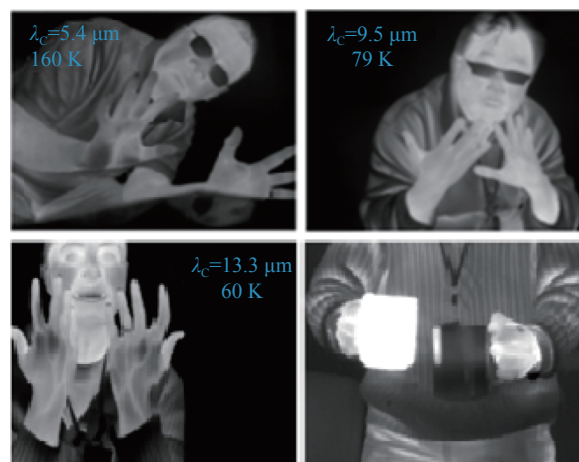


图 8 JPL CBIRD FPA 成像<sup>[75,77]</sup>

Fig.8 Image taken with the CBIRD FPA of JPL<sup>[75,77]</sup>

CBIRD 结构可以有效解决表面漏电流问题, 同时, 通过调整势垒处附近的掺杂分布, 可以进一步降低隧穿电流。但是其较短的空穴扩散长度和较低的吸收系数, 限制了器件 QE 的进一步提升。尽管使用 p 型吸收层能够增加少子扩散长度, 但是目前报道的探测性能还不够理想, 在偏压较高时暗电流会迅速上升。因此, CBIRD 结构还有很大的研究发展空间。

### 2.4 三种势垒结构特点对比

nBn 结构与传统 p-n 结相比, 空间电荷区被阻挡电子的单极势垒层替代, p 型接触层被 n 型接触层替代, 有效地减少与 SRH 中心相关的 G-R 电流。nBn 结构的势垒层位置接近少数载流子接触层, 且距离光学吸收区域较远, 多数载流子的扩散被耗尽区的势垒阻挡, 同时少数载流子可以相对自由地穿过器件, 保证了高的量子效率, 相比于 p-n 结, 结合 InAs/InAsSb T2SLs 较长少子寿命等优势, nBn InAs/InAsSb

T2SLs 探测器的暗电流得到了极大的降低,但需要一定的偏置电压进行工作。

pBn 结构与 nBn 结构的不同之处在于, nBn 结构中的 n 型接触层变为 p 型接触层, p 型接触层和 n 型势垒层提供了内建电场,使器件能够零偏置工作。同时, p 型接触层可以提升少数载流子空穴的传输效率,从而获得更高的量子效率<sup>[78]</sup>。但是 p 型层也同时引入较大的 SRH 复合电流,增大了器件的暗电流。

受限于较短的空穴扩散长度, InAs/InAsSb T2SLs 在长波红外波段难以采用 nBn 和 pBn 型结构。CBIRD 结构使用 p 型吸收层,通过较长的电子(少子)扩散长度可有效提高器件的量子效率。利用 n 型电子势垒可有效抑制表面泄露暗电流,但 InAs/InAsSb T2SLs 表面为 n 型简并,即使对其进行 p 型掺杂,不可避免引入表面 p-n<sup>+</sup>结导致的 G-R 电流和隧穿电流。目前减少这种暗电流的方法是同时采用 p 型与 n 型吸收层,使 n 型吸收层的厚度尽可能接近空穴(少子)的扩散长度,目前,该类器件性能还有较大的提升空间。

### 3 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器关键性能研究进展

目前, InAs/InAsSb T2SLs 在中波红外探测方面有着十分优秀的表现,高工作温度下的量子效率与 MCT 探测器相当。在长波方面,与更为成熟的 InAs/GaSb T2SLs 相比, InAs/InAsSb T2SLs 具有更易于生长,更长的少数载流子寿命等优点,但 InAs/InAsSb T2SLs 需要更长的超晶格周期来实现相同的截止波长<sup>[79]</sup>。同时,在长波波段, InAs/InAsSb T2SLs 在生长方向上空穴迁移率低于 InAs/GaSb T2SLs,进一步降低了少子扩散长度。而 InAs/InAsSb T2SLs 的电子迁移率明显优于空穴迁移率<sup>[80]</sup>,因此,为了提高量子效率,长波需要采用 p 型 InAs/InAsSb T2SLs 作为吸收层,相关性指标仍处于研发初期。总体来说,目前 InAs/InAsSb T2SLs 在高温工作中波红外探测器上优势明显,为进一步提升势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器性能,研究人员对其暗电流和探测率等关键性能参数进行了详细研究。

#### 3.1 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器关键性能分析

##### 3.1.1 暗电流

暗电流是指在没有外加光辐射,探测器在外加偏

压时产生的电流。暗电流一般由载流子的扩散或者器件表面和内部的缺陷以及杂质引起。对于 T2SLs 红外探测器其暗电流包含四种机制:扩散电流、产生-复合电流、隧穿电流、表面泄露电流。

扩散电流与少数载流子密切相关。扩散电流  $I_{diff}$  随少子寿命  $\tau$  延长而减少 ( $I_{diff} \sim \tau^{-1}$ )。InAs/InAsSb T2SLs 的少子寿命比 InAs/GaSb T2SLs 的延长了数十倍,理论上扩散电流将比 InAs/GaSb T2SLs 小数十倍,但实验上并没有得到证明。

器件的内部会存在许多不同的缺陷和杂质。在器件工作时,这些缺陷和杂质会捕获电子和空穴进行复合,产生 G-R 复合暗电流。G-R 复合暗电流主要发生在耗尽层,也是 pn 型 T2SLs 红外探测器的主要组成部分。采用势垒型结构 InAs/InAsSb T2SLs 探测器可有效抑制 G-R 复合电流,降低器件 G-R 复合暗电流。

隧穿电流包括带间隧穿电流和陷阱辅助隧穿电流。隧穿电流与有效质量、掺杂浓度及外加电场密切相关。当器件的反向工作电压较大时,隧穿电流较大。势垒型结构 InAs/InAsSb T2SLs 探测器中降低器件工作电压是降低隧穿电流的有效途径。

表面漏电流是由于在蚀刻过程中器件侧壁形成的界面态产生的暗电流,势垒型结构能够有效地抑制表面泄露暗电流<sup>[81]</sup>。

近年来,中波 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器的暗电流变化趋势如图 9 所示,在 150~160 K 的条件下,器件的暗电流已经接近 Rule 07。这些具有如此

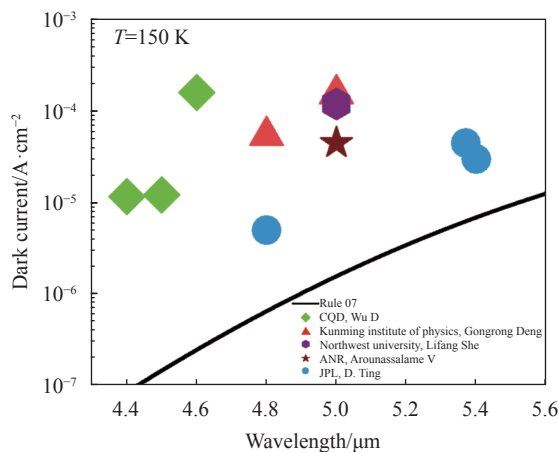


图 9 中波 InAs/InAsSb T2SLs 暗电流变化趋势<sup>[68, 72-73, 82-88]</sup>

Fig.9 Dark current change trend of MWIR InAs/InAsSb T2SLs<sup>[68, 72-73, 82-88]</sup>



低暗电流密度的势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 将在高温工作的中波红外探测器方面极具竞争潜力。

### 3.1.2 探测率

光电探测器的噪声等效功率 (NEP), 是探测器的本征属性, 和器件面积、测试环境有关。为了屏蔽这两者的影响, 1953 年 Jones<sup>[89]</sup> 定义了归一化探测率  $D^*$ :

$$D^* = D \times (A_e \cdot \Delta f)^{1/2} [\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}] \quad (1)$$

式中:  $D$  为探测率即噪声等效功率的倒数;  $A_e$  为器件面积;  $\Delta f$  为检测带宽。温度较高时, 归一化探测性能受热噪声限制, 此时归一化探测率  $D^*$  为:

$$D^* = \frac{q\lambda\eta}{2hc} \left( \frac{R_0 A}{kT} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中:  $q$  为电子电量;  $\lambda$  为波长;  $\eta$  为量子效率;  $h$  为普朗克常数;  $c$  为光速;  $R_0 A$  为零偏动态电阻与器件面积的乘积;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为温度。

近年来, 报道的中波 InAs/InAsSb T2SLs 探测率如图 10 所示。总体上, 中波 InAs/InAsSb T2SLs 探测率在  $10^{11} \sim 10^{12} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ , 相关的提升机制有待进一步探索。

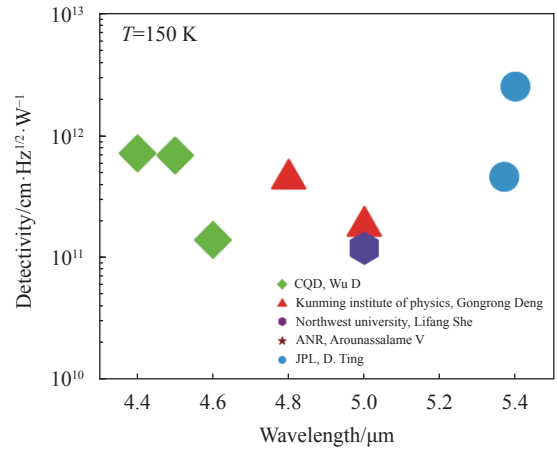


图 10 中波 InAs/InAsSb T2SLs 探测率变化趋势<sup>[68, 72-73, 82-86]</sup>

Fig.10 Detectivity change trend of MWIR InAs/InAsSb T2SLs<sup>[68, 72-73, 82-86]</sup>

步探索。

### 3.2 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器关键性能进展

近年来, 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 的关键性能提升趋势明显。为方便比较, 表 2<sup>[68, 72-73, 75-76, 82-88, 90-93]</sup> 汇总了近年来势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器的关键性能。2016~2018 年, JPL 在中波 InAs/InAsSb

表 2 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器关键性能对比表

Tab.2 Key performance comparison chart of barrier-type InAs/InAsSb T2SLs infrared detectors

Time	Structure	Wavelength/ μm	Detection rate/ cm·Hz <sup>1/2</sup> ·W <sup>-1</sup>	QE	Working temperature/K	Dark current/ A·cm <sup>-2</sup>	Research institutions	Reference
2018	nBn	5.4	2.53×10 <sup>11</sup>	49.1%	150	~3×10 <sup>-5</sup>	JPL	[68]
2018	nBn	5.37	4.6×10 <sup>11</sup>	52%	150	4.5×10 <sup>-5</sup>	JPL	[82]
2019		12.5			62	2.6×10 <sup>-5</sup>	JPL	[91]
2019	nBn	4.6	1.4×10 <sup>11</sup>		150	1.6×10 <sup>-4</sup>	CQD	[83]
2019	nBn	5.5		56%	160	3.4×10 <sup>-4</sup>	Air Force Research Lab	[90]
2019	nBn	4.8		50%	150	5×10 <sup>-6</sup>	JPL	[88]
2020	pBn	4.4	7.1×10 <sup>11</sup>	39%	150	1.16×10 <sup>-5</sup>	CQD	[84]
2020	nBn	5	1.82×10 <sup>11</sup>	37.5%	150	1.55×10 <sup>-4</sup>	Kunming Institute of Physics	[85]
2020	pBn	4.8	4.43×10 <sup>11</sup>	57.6%		5.39×10 <sup>-5</sup>	Kunming Institute of Physics	[72]
2020	double barrier	4.5	6.9×10 <sup>11</sup>	45%	150	1.21×10 <sup>-5</sup>	CQD	[86]
2020	nBn	3.35	9.12×10 <sup>11</sup>	23.5%	77	1.23×10 <sup>-6</sup>	CQD	[92]
2021	XBn	5		50%	150	4.5×10 <sup>-5</sup>	ANR	[87]
2021	pn-CBIRD	10.3	1.3×10 <sup>11</sup>		77	5.4×10 <sup>-5</sup>	JPL	[75]
2021	nBn	3		50%	80	2×10 <sup>-9</sup>	Korea i3 system	[93]
2022	pn-CBIRD	13.3		53%	60	6.6×10 <sup>-5</sup>	JPL	[76]
2022	pBn	5.0	1.2×10 <sup>11</sup>	29%	150	1.2×10 <sup>-4</sup>	Northwestern University of China	[73]

T2SLs 关键性能上进行了大量研究,通过蚀刻工艺降低表面态密度和暗电流,提高 QE,设计了许多性能优异的器件。2021~2022 年,该团队在中波的基础上,研究了长波、甚长波 InAs/InAsSb T2SLs,基于 pn-CBIRD 势垒结构设计长波长 InAs/InAsSb T2SLs,发现其暗电流特性受限于表面漏电流,需要在较低偏置条件下工作。

美国西北大学量子器件中心 CQD 的 Razeghi 团队 2017 年报道了势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 的在多色探测器上的应用。在基于 M 结构的双带/多带集成探测上,设计了随偏压改变而探测不同波长的光电探测器<sup>[94]</sup>。偏压可选双频带器件通常由两个 T2SLs 吸收层和插入两个吸收层之间的薄势垒层组成,双带结构可以通过切换所施加的偏置电压来交替地处理两

个吸收层。2020 年,CQD 使用锌离子注入设计了 nBn 型 T2SLs 中波红外光电探测器<sup>[92]</sup>,其比探测率可达  $9.12 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$ 。

其他国外研究机构如韩国 i3system,法国国家研究署 (ANR) 也对势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 展开了研究,都取得了不错的器件性能。2021 年,韩国 i3system 通过干法刻蚀和等离子体处理制备了 InAs/InAsSb T2SLs nBn 型中波红外探测器<sup>[93]</sup>,暗电流达到  $2 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ 。

表 3<sup>[78,95-105]</sup> 汇总了近年来势垒型 InAs/GaSb T2SLs 红外探测器的关键性能。2016 年,美国 CQD 设计的 nBn 型 InAs/GaSb T2SLs 红外探测器的探测率最高达到  $1.12 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} / \text{W}$  且其暗电流可以降低到  $9.5 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ 。

表 3 势垒型 InAs/GaSb T2SLs 红外探测器关键性能对比表

Tab.3 Key performance comparison chart of barrier-type InAs/GaSb T2SLs infrared detectors

Time	Structure	Wavelength/ μm	Detection rate/ cm·Hz <sup>1/2</sup> ·W <sup>-1</sup>	QE	Working temperature/K	Dark current/ A·cm <sup>-2</sup>	Research institutions	Reference
2008	nBn	4.8	$2.8 \times 10^{11}$	23%	250	$3.1 \times 10^{-6}$	University of New Mexico	[95]
2012	p-CBIRD	11.5	$1.1 \times 10^{11}$	21%	80		JPL	[96]
2012	pBiBn	4.2/8.7	$8.9 \times 10^{12} / 7.9 \times 10^{11}$	38%/23.5%	77	$1.6 \times 10^{-7} / 1.42 \times 10^{-5}$	University of New Mexico	[97]
2014	pMp	4.9	$1.2 \times 10^{12}$	67%	150	$1.2 \times 10^{-5}$	Northwestern University	[100]
2015	nBn	2.7	$2.5 \times 10^{10}$		77	$2.5 \times 10^{-6}$	Kunming Institute of Physics	[99]
2017	pBn	5		50%	80	$2 \times 10^{-5}$	University of New Mexico	[102]
2017	pBp	2.3/2.9/4.4	$1 \times 10^{11} / 6.3 \times 10^{11} / 2 \times 10^{11}$	20%/22%/34%	150	$5.5 \times 10^{-8} / 1.8 \times 10^{-6} / 8.7 \times 10^{-5}$	CQD	[101]
2018	pBn	4.5		50%	80	$4.7 \times 10^{-6}$	The Ohio State University	[103]
2019	pBn	6.4	$7.6 \times 10^{11}$		77	$2.9 \times 10^{-5}$	Shanghai University of Science and Technology	[78]
2020	nBn	5.6	$2.5 \times 10^{11}$		77	$1.44 \times 10^{-5}$	Shanghai University of Science and Technology	[98]
2021	nBn	5.3	$2.6 \times 10^{11}$		77	$3.5 \times 10^{-3}$	Korean Academy of Sciences	[104]
2022	nBn	10.4/12.2	$1.7 \times 10^{10} / 1.5 \times 10^{10}$			$9 \times 10^{-4} / 2 \times 10^{-2}$	University of Science and Technology of China	[105]

对比表 2、表 3 中的探测率和暗电流, InAs/GaSb T2SLs 在探测率上优于 InAs/InAsSb T2SLs,但在暗电流方面, InAs/InAsSb T2SLs 得益于没有 Ga 原子带来的缺陷,高温工作下暗电流低于 InAs/GaSb T2SLs。

#### 4 InAs/InAsSb T2SLs 红外焦平面发展历程及未来发展方向

##### 4.1 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外焦平面研究进展

美国喷气推进实验室 (JPL) 自 20 世纪 90 年代早期以来一直在积极开发 III-V 族红外探测器用于远程

探测。JPL 最初的势垒型红外探测器 (nBn 和 XBn) 使用在 InAs 衬底上生长的 InAs/GaSb 吸收层,或在 GaSb 衬底上生长的晶格匹配的 InAsSb 合金,截止波长分别约为  $3.2 \mu\text{m}$  和  $4 \mu\text{m}$ 。这些探测器比基于 InSb 的 MWIR 探测器工作温度更高,但它们的光谱响应并未覆盖整个 (3~5.5  $\mu\text{m}$ ) MWIR 大气传输窗口。基于势垒结构探测器在工作温度上表现出的显著优势,在美国 NASA SmallSat 任务中,立方体卫星红外大气探测器和高光谱热成像仪都使用了 JPL 的势垒型 T2SLs FPA<sup>[106]</sup>。

2018 年, JPL 报道了一种基于 BIRD 的高温 MWIR FPA, 在 150 K 工作温度下截止波长为 5.4  $\mu\text{m}$ 。通过干蚀刻工艺, 制备了 640 $\times$ 512, 像元间距 24  $\mu\text{m}$  的 FPA。在 80~150 K 的温度范围内, FPA 实现了 18.5 mK 的低噪声等效温差 (NETD) 和 99.7% 的有效像元。基于 InAs/InAsSb T2SLs 的 BIRD FPA 为实现制造低成本、高性能、具有出色均匀性的 FPA 提供了突破性的解决方案<sup>[68]</sup>。

2019 年, JPL 报道了具有极低暗电流的 InAs/InAsSb 中波 FPA。在 100 K 的工作温度下, 像元间距 19  $\mu\text{m}$  的 1024 $\times$ 1024 FPAs 实现了单个像素  $1\times 10^{-10}$  A/cm<sup>2</sup> 的极低暗电流, 35% 的 QE, 有效像元率高达 99.7%<sup>[88]</sup>, 为 NASA 外太空成像和高分辨光谱成像提供技术支持。

2021 年, JPL 将 InAs/InAsSb T2SLs 的波长拓展到长波波段, 采用 CBIRD 结构, 实现了 13.3  $\mu\text{m}$  的截止波长。制备的 30  $\mu\text{m}$  像元间距的 320 $\times$ 256 FPA, 在 60 K 工作温度, 300 K 背景温度和 F/4 条件下, 实现了 28 mK 的 NETD, 有效像元率达 98.9%<sup>[75]</sup>。这为 InAs/InAsSb T2SLs 在长波红外探测的应用开辟了新的设计方案。

2021 年, 韩国 i3system 制备了像元间距为 15  $\mu\text{m}$  的 640 $\times$ 512 InAs/InAsSb FPA。在 150 K 温度下, 平均 NETD 值低于 15 mK, 有效像元率达 99.5%<sup>[93]</sup>, 实现了小体积、低重量及低功耗 (SWaP) 的高温工作的中波 FPA。

2020 年, 昆明物理研究所提出了一种具有 AlGaAsSb 四元合金势垒的 MWIR InAs/InAsSb T2SLs。他们采用倒置器件结构, 在 nBn 器件中生长 InAs/InAsSb T2SLs 吸收层之前, 预先生长了晶格匹配的 Al<sub>0.83</sub>Ga<sub>0.17</sub>AsSb 四元合金作为电子势垒<sup>[85]</sup>。该倒置的 nBn 器件结构可以减缓小像元间距 FPA 中的光电谱串扰的问题影响<sup>[107]</sup>。同年, 昆明物理研究所基于 InAs/InAsSb T2SLs 制备了 15  $\mu\text{m}$  间距 640 $\times$ 512 的 pBn 型 MWIR FPA<sup>[72]</sup>, 可在 185 K 温度下工作, 器件的有效像元率可达 99.6%, 在 77 K 和 120 K 时 NETD 分别为 15.1 mK 和 27.8 mK。当温度升高到 150 K 和 185 K 时, FPA 的 NETD 值上升至 39.5 mK 和 84.9 mK, 比探测率分别为  $4.43\times 10^{11}$  和  $1.33\times 10^{11}$  Jones。

2022 年, 中国空空导弹研究院的何英杰<sup>[108]</sup>等制

备了中心距 30  $\mu\text{m}$  的 320 $\times$ 256 InAs/InAsSb 二类超晶格中/中波双色焦平面探测器。器件短中波峰值探测率达到  $7.2\times 10^{11}$  cm $\cdot$ Hz<sup>1/2</sup>/W, 中波峰值探测率为  $6.7\times 10^{11}$  cm $\cdot$ Hz<sup>1/2</sup>/W, 短中波有效像元率为 99.51%, 中波为 99.13%, 获得了高质量的成像效果, 实现中中双色探测。

总体而言, 国外有许多研究 InAs/InAsSb T2SLs 的机构, 其中以美国喷气推进实验室 (JPL) 和美国西北大学量子器件中心 (CQD) 两家机构为主。在国内, 昆明物理研究所、中国科学院半导体研究所和中国空空导弹研究院等对 InAs/InAsSb T2SLs 开展了较多研究, 但性能指标与欧美国家仍有较大差距。

#### 4.2 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器存在问题及发展方向

势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器能有效抑制暗电流, 提升器件的工作温度。目前, 中波势垒型 InAs/InAsSb FPA 的工作温度已经超过 InSb 探测器工作温度, 极大地减少了制冷机的尺寸和重量需求。InAs/InAsSb T2SLs 的理论性能可以超越 MCT 探测器, 但尚未被实验报道。现阶段势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器主要有以下几点问题及发展方向:

(1) 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器波长覆盖范围较小, 受限于较低的吸收系数及较短的空穴扩散长度, 现在报道的势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器基本都处于中波波段, 仅 JPL 设计出性能良好的长波、甚长波势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器, 但器件性能仍与 InAs/GaSb T2SLs 红外探测器有一定的差距。如何设计出吸收系数高, 少子扩散长度大是 InAs/InAsSb T2SLs 所面临的重大挑战及发展方向<sup>[109-110]</sup>。为了进一步提升 InAs/InAsSb 的吸收系数, 可以适当增加 Sb 组分来减少单位周期厚度, 实现吸收系数的提升。但较大的 Sb 组分也带来应变平衡及 Sb 偏析问题。InAs/InAsSb 是一种应变平衡超晶格, 精细调节 InAs 和 InAsSb 层的厚度及 Sb 的组分达到应变平衡是未来的重要研究方向。同时, 较大的 Sb 组分容易造成 Sb 偏析, 如何通过控制外延生长时的工艺参数如沉积温度、沉积速率和 V/III 束流比来提升 V 族元素的黏附系数, 增强 Sb 元素并入效率仍然是目前面临的严峻挑战<sup>[111]</sup>。

与此同时, InAs/InAsSb 虽然比 InAs/GaSb T2SLs

具有数十倍长的少子寿命,但由于 InAs/InAsSb 在外延生长方向上的空穴迁移率较小,从而限制了少子的扩散长度。另外,电子的有效质量远低于空穴的有效质量,与体材料 InSb 相当。因此,采用 p 型材料作为吸收层,增大吸收区厚度是提升器件量子效率的有效措施<sup>[75]</sup>。但由于 InAs/InAsSb 的表面是简并 n 型,会引入表面 pn+结复合电流<sup>[75]</sup>。因此,结合 p 型和 n 型吸收层,采用 CBIRD 型结构是未来发展的高量子效率 InAs/InAsSb 超晶格探测器的一个重要研究方向。

(2) 势垒结构设计及外延生长是低暗电流势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器面临的重大挑战。势垒结构的设计需要从势垒的能带结构、晶格匹配,少子寿命,迁移率等多方面考虑。对于 InAs/GaSb,其空穴的迁移率随着截止波长变化较小<sup>[39]</sup>。因此,在中波、长波乃至甚长波波段,都可采用 n 型吸收层。势垒层可采用晶格匹配的 InAs/AlSb T2SLs 等,可有效实现较大的导带势垒和零价带偏移,阻挡多子,并避免少子积聚。对于 InAs/InAsSb,在中波波段,空穴迁移率与 InAs/GaSb 相当,可采用 n 型 InAs/InAsSb 作为吸收层,势垒通常采用晶格匹配的三元合金 AlAsSb,但较难实现零价带偏移,因此更为复杂的四元合金 AlGaAsSb<sup>[85]</sup> 或 AlAsSb/InAsSb T2SLs<sup>[84]</sup> 等材料作为势垒结构被研究应用,增大了器件制备难度。因此,结构简单满足高可靠性要求的导带势垒有待进一步研究。

值得一提的是,对于长波 p 型 InAs/InAsSb 吸收层,由于 InAs/InAsSb T2SLs 的导带随截止波长几乎不变,较短波段的 InAs/InAsSb T2SLs 可作为长波 InAs/InAsSb T2SLs 的有效价带势垒<sup>[75]</sup>。

(3) 势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器缺乏高质量钝化技术,尤其对于 p 型吸收层的势垒型器件,器件的侧壁表面 pn 结导致暗电流较高。相比于 MCT 红外探测器,势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器的暗电流还未达到可替代水平,研究降低表面漏电流的方法未来的一个重要发展方向<sup>[112]</sup>。

## 5 结论

红外探测技术在航天航空、导弹制导,生物医疗等多种领域里发挥着重要作用,暗电流、探测率和工作温度等关键参数决定了红外探测器的适用范围。

为保证探测精度、探测范围和探测效率,必须采取有效的方法减小器件暗电流,提高探测率和工作温度。势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 由于较长的少子寿命,较大的缺陷态容忍度,较为简单的外延生长过程,是 InAs/GaSb T2SLs 的有力竞争者。势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器由最初的 nBn 型单极势垒到现在的 pn-CBIRD 的双极势垒,实现了中波和长波波段的高效探测。目前,在中波波段,InAs/InAsSb T2SLs 已经实现了与 InAs/GaSb T2SLs 相匹敌甚至更优的器件性能。但在长波和甚长波波段仍有较大的发展空间。未来,势垒型 InAs/InAsSb T2SLs 红外探测器需要解决吸收系数低、载流子扩散长度短、Sb 组分偏析、势垒结构生长难度大等问题。

## 参考文献:

- [1] Yi C. Review and prospect of HgCdTe detectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20210988. (in Chinese)
- [2] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, 68(10): 2267.
- [3] Rogalski A. HgCdTe Photodetectors [M]. US: Elsevier, 2020: 235-335.
- [4] De Rossi A, Costard E, Guerineau N, et al. Effect of finite pixel size on optical coupling in QWIPs [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, 44(5-6): 325-330.
- [5] Levine B. Quantum - well infrared photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(8): R1-R81.
- [6] Schneider H, Liu H C. Quantum Well Infrared Photodetectors [M]. US: Springer, 2007: 126.
- [7] Gautam N, Kim H, Kutty M, et al. Performance improvement of longwave infrared photodetector based on type-II InAs/GaSb superlattices using unipolar current blocking layers [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 96(23): 231107.
- [8] Kim H, Cellek O, Lin Z-Y, et al. Long-wave infrared nBn photodetectors based on InAs/InAsSb type-II superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(16): 161114.
- [9] Tidrow M Z. Type II strained layer superlattice: A potential future IR solution [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2009, 52(6): 322-325.
- [10] Maimon S, Finkman E, Bahir G, et al. Intersublevel transitions in InAs/GaAs quantum dots infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(14): 2003.
- [11] Martyniuk P, Rogalski A. Quantum-dot infrared photode-

- tectors: Status and outlook [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2008, 32(3-4): 89-120.
- [12] Liu H, Gao M, McCaffrey J, et al. Quantum dot infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 78(1): 79-81.
- [13] Hoke W, Lemonias P, Traczewski R. Metalorganic vapor deposition of CdTe and HgCdTe epitaxial films on InSb and GaAs substrates [J]. *Applied Physics Letters*, 1984, 44(11): 1046.
- [14] Wu J, Chen S, Seeds A, et al. Quantum dot optoelectronic devices: lasers, photodetectors and solar cells [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, 48(36): 363001.
- [15] Kinch M A. Fundamentals of Infrared Detector Materials [M]. US: SPIE Press, 2007.
- [16] Rogalski A. Recent progress in infrared detector technologies [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, 54(3): 136-154.
- [17] Osbourn G, Dawson L, Biefeld R, et al. III-V strained layer superlattices for long - wavelength detector applications: Recent progress [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 1987, 5(5): 3150.
- [18] Rogalski A, Kopytko M, Martyniuk P. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: Three decades of development[C]//Proceedings of SPIE, 2017.
- [19] Bajaj J, Sullivan G, Lee D, et al. Comparison of type-II superlattice and HgCdTe infrared detector technologies[C]//Proceedings of SPIE, 2007.
- [20] Maimon S, Wicks G. n B n detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(15): 151109.
- [21] Klipstein P, Klin O, Grossman S, et al. MWIR InAsSb XBn detectors for high operating temperatures[C]//Proceedings of SPIE, 2010.
- [22] Klipstein P. "XBn" barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature infrared sensors[C]//Proceedings of SPIE, 2008.
- [23] Ting D Z-y, Hill C J, Soibel A, et al. A high-performance long wavelength superlattice complementary barrier infrared detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(2): 023508.
- [24] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. Exclusion, extraction, and junction placement effects in the complementary barrier infrared detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(12): 121109.
- [25] Canedy C, Aifer E, Vurgaftman I, et al. Antimonide type-II "W" photodiodes with long-wave infrared R 0 A comparable to HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, 36(8): 852-860.
- [26] Xie X, Zhang Z, Shan C, et al. Dual-color ultraviolet photodetector based on mixed-phase-MgZnO/i-MgO/p-Si double heterojunction [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(8): 081104.
- [27] Nguyen B-m, Chen G, Hoang A, et al. Effect of contact doping in superlattice-based minority carrier unipolar detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(3): 033501.
- [28] Nguyen B-m, Bogdanov S, Pour S A, et al. Minority electron unipolar photodetectors based on type II InAs/GaSb/AlSb superlattices for very long wavelength infrared detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(18): 183502.
- [29] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: Future prospect [J]. *Applied Physics Reviews*, 2017, 4(3): 031304.
- [30] Hakala M, Puska M J, Nieminen R M. Native defects and self-diffusion in GaSb [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(8): 4988-4994.
- [31] Svensson S, Donetsky D, Wang D, et al. Growth of type II strained layer superlattice, bulk InAs and GaSb materials for minority lifetime characterization [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2011, 334(1): 103-107.
- [32] Belenky G, Kipshidze G, Donetsky D, et al. Effects of carrier concentration and phonon energy on carrier lifetime in type-2 SLS and properties of InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> alloys [C]//Proceedings of SPIE, 2011.
- [33] Olson B, Shaner E, Kim J, et al. Time-resolved optical measurements of minority carrier recombination in a mid-wave infrared InAsSb alloy and InAs/InAsSb superlattice [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(9): 092109.
- [34] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2019, 68: 100228.
- [35] Ting D Z, Keo S A, Liu J K, et al. Barrier infrared detector research at the Jet Propulsion Laboratory[C]//Proceedings of SPIE, 2012.
- [36] Schuler-sandy T, Myers S, Klein B, et al. Gallium free type II InAs/InAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub> superlattice photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(7): 071111.
- [37] Prins A, Lewis M, Bushell Z, et al. Evidence for a defect level above the conduction band edge of InAs/InAsSb type-II superlattices for applications in efficient infrared photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(17): 171111.
- [38] Webster P, Riordan N, Liu S, et al. Absorption properties of type-II InAs/InAsSb superlattices measured by spectroscopic ellipsometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(6):

- 061907.
- [39] Ting D Z, Soibel A, Gunapala S D. Hole effective masses and subband splitting in type-II superlattice infrared detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(18): 183504.
- [40] Ting D Z, Soibel A, Gunapala S D. Type-II superlattice hole effective masses [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 84: 102-106.
- [41] Hoang A, Chen G, Chevallier R, et al. High performance photodiodes based on InAs/InAsSb type-II superlattices for very long wavelength infrared detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251105.
- [42] Vurgaftman I, Belenky G, Lin Y, et al. Interband absorption strength in long-wave infrared type-II superlattices with small and large superlattice periods compared to bulk materials [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(22): 222101.
- [43] Kotulak N A, Nolde J A, Katz M B, et al. Three-dimensional visualization of Sb segregation in InAs/InAsSb superlattices using atom probe tomography [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 128(1): 015302.
- [44] Haugan H, Mahalingam K, Szmulowicz F, et al. Quantitative study of the effect of deposition temperature on antimony incorporation in InAs/InAsSb superlattices [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2016, 436: 134-137.
- [45] Klipstein P, Avnon E, Benny Y, et al. InAs/GaSb Type II superlattice barrier devices with a low dark current and a high-quantum efficiency[C]//Proceedings of SPIE, 2014.
- [46] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. The emergence of InAs/InAsSb type-II strained layer superlattice barrier infrared detectors[C]//Proceedings of SPIE, 2019.
- [47] Biefeld R, Baucom K, Kurtz S. The growth of InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/InAs strained-layer superlattices by metalorganic chemical vapot deposition [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1994, 137(1-2): 231-240.
- [48] Zhang Y H. InAs/InAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub> Type-II Superlattice Midwave Infrared Lasers [M]. Boca Raton: CRC Press, 2019: 461-500.
- [49] Lackner D, Pitts O, Steger M, et al. Strain balanced InAs/InAsSb superlattice structures with optical emission to 10 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(8): 081906.
- [50] Steenbergen E, Connelly B, Metcalfe G, et al. Significantly improved minority carrier lifetime observed in a long-wavelength infrared III-V type-II superlattice comprised of InAs/InAsSb [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(25): 251110.
- [51] Zuo D, Liu R, Wasserman D, et al. Direct minority carrier transport characterization of InAs/InAsSb superlattice nBn photodetectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(7): 071107.
- [52] Wu D, Durlin Q, Dehzangi A, et al. High quantum efficiency mid-wavelength infrared type-II InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> superlattice photodiodes grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(1): 011104.
- [53] Hao R, Ren Y, Liu S, et al. Fabrication and characterization of high lattice matched InAs/InAsSb superlattice infrared photodetector [J]. *J Cryst Growth*, 2017, 470: 33-36.
- [54] Delli E, Letka V, Hodgson P D, et al. Mid-infrared InAs/InAsSb superlattice nBn photodetector monolithically integrated onto silicon [J]. *ACS Photonics*, 2019, 6(2): 538-544.
- [55] Durlin Q, Perez J, Cerutti L, et al. Midwave infrared barrier detector based on Ga-free InAs/InAsSb type-II superlattice grown by molecular beam epitaxy on Si substrate [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 96: 39-43.
- [56] Haddadi A, Chen G, Chevallier R, et al. InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> type-II superlattices for high performance long wavelength infrared detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(12): 121104.
- [57] Haddadi A, Dehzangi A, Adhikary S, et al. Background-limited long wavelength infrared InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> type-II superlattice-based photodetectors operating at 110 K [J]. *APL Materials*, 2017, 5(3): 035502.
- [58] Chevallier R, Haddadi A, Razeghi M. Dark current reduction in microjunction-based double electron barrier type-II InAs/InAsSb superlattice long-wavelength infrared photodetectors [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 1-6.
- [59] Michalczewski K, Martyniuk P, Wu C, et al. Demonstration of HOT LWIR T<sub>2</sub> SLs InAs/InAsSb photodetectors grown on GaAs substrate [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 95: 222-226.
- [60] Haddadi A, Chevallier R, Chen G, et al. Bias-selectable dual-band mid-/long-wavelength infrared photodetectors based on InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> type-II superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(1): 011104.
- [61] Fastenau J M, Lubyshev D, Nelson S A, et al. Direct MBE growth of metamorphic nBn infrared photodetectors on 150 mm Ge-Si substrates for heterogeneous integration [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2019, 37(3): 031216.
- [62] Fastenau J M, Lubyshev D, Nelson S A, et al. GaSb-based infrared photodetector structures grown on Ge-Si substrates via metamorphic buffers [C]//Proceedings of SPIE, 2019.
- [63] Wicks G, Savich G, Pedrazzani J, et al. Infrared detector epitaxial designs for suppression of surface leakage current

- [C]//Proceedings of SPIE, 2010.
- [64] Yablonoitch E, Gmitter T. Auger recombination in silicon at low carrier densities [J]. *Applied Physics Letters*, 1986, 49(10): 587-590.
- [65] Soibel A, Hill C J, Keo S A, et al. Room temperature performance of mid-wavelength infrared InAsSb nBn detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(2): 023512.
- [66] Hossain K, Höglund L, Phinney L, et al. Hydrogenation defect passivation for improved minority carrier lifetime in midwavelength Ga-Free InAs/InAsSb superlattices [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45(11): 5626-5629.
- [67] Ting D Z, Hill C J, Seibel A, et al. High operating temperature barrier infrared detector with tailorable cutoff wavelength [P]. US. Patent Application, 20100072514, 2015.
- [68] Ting D Z, Rafol B, Keo S A, et al. InAs/InAsSb type-II superlattice mid-wavelength infrared focal plane array with significantly higher operating temperature than InSb [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(6): 1-6.
- [69] Wieder H. Surface and interface barriers of In x Ga 1-x As binary and ternary alloys [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2003, 21(4): 1915-1919.
- [70] Jang A, Lee H-j, Kim Y C, et al. Electrical characteristics of a Ga-free T2SL mid-wave infrared nBn detector based on an InAs/AlAsSb/InAsSb barrier [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51: 4681-4688.
- [71] Hood A D, Evans A J, Ikhlassi A, et al. LWIR strained-layer superlattice materials and devices at Teledyne imaging sensors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(7): 1001-1006.
- [72] Deng G, Chen D, Yang S, et al. High operating temperature pBn barrier mid-wavelength infrared photodetectors and focal plane array based on InAs/InAsSb strained layer superlattices [J]. *Opt Express*, 2020, 28(12): 17611.
- [73] She L, Jiang J, Chen W, et al. Mid-wave infrared p+-Bn InAs/InAsSb type-II superlattice photodetector with an AlAsSb/InAsSb superlattice barrier [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 121: 104015.
- [74] Marozas B, Hughes W, Du X, et al. Surface dark current mechanisms in III-V infrared photodetectors [J]. *Optical Materials Express*, 2018, 8(6): 1419-1424.
- [75] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. Long wavelength InAs/InAsSb superlattice barrier infrared detectors with p-type absorber quantum efficiency enhancement [J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(13): 133503.
- [76] Ting D Z, Khoshakhlagh A, Soibel A, et al. Long and very long wavelength InAs/InAsSb superlattice complementary barrier infrared detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51: 4666-4674.
- [77] Ting D Z, Rafol S B, Khoshakhlagh A, et al. InAs/InAsSb Type-II strained-layer superlattice infrared photodetectors [J]. *Micromachines (Basel)*, 2020, 11(11): 958.
- [78] Deng Z, Guo D, Huang J, et al. Mid-wave infrared InAs/GaSb type-II superlattice photodetector with nBp design grown on GaAs substrate [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2019, 55(4): 1-5.
- [79] Klipstein P, Livneh Y, Glozman A, et al. Modeling InAs/GaSb and InAs/InAsSb superlattice infrared detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, 43(8): 2984-2990.
- [80] Casias L K, Morath C P, Steenberg E H, et al. Vertical carrier transport in strain-balanced InAs/InAsSb type-II superlattice material [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(18): 182109.
- [81] Liu Z, Zhu L, Zhang D, et al. Recent progress in dark current suppression and efficiency enhancement methods for antimonide superlattice detectors [C]//AOPC 2021: Infrared Device and Infrared Technology, 2021, 12061: 344-349.
- [82] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. Antimonide e-SWIR, MWIR, and LWIR barrier infrared detector and focal plane array development [C]//Proceedings of SPIE, 2018.
- [83] Wu D, Dehzangi A, Razeghi M. Demonstration of mid-wavelength infrared nBn photodetectors based on type-II InAs/InAs1-xSbx superlattice grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 115(6): 061102.
- [84] Wu D, Li J, Dehzangi A, et al. Mid-wavelength infrared high operating temperature pBn photodetectors based on type-II InAs/InAsSb superlattice [J]. *AIP Advances*, 2020, 10(2): 025018.
- [85] Deng G, Song X, Fan M, et al. Upside-down InAs/InAs 1-x Sb x type-II superlattice-based nBn mid-infrared photodetectors with an AlGaAsSb quaternary alloy barrier [J]. *Optics Express*, 2020, 28(9): 13616.
- [86] Wu D, Li J, Dehzangi A, et al. High performance InAs/InAsSb Type-II superlattice mid-wavelength infrared photodetectors with double barrier [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 109: 103439.
- [87] Arounassalame V, Bouschet M, Alchaar R, et al. Electro-optical characterizations to study minority carrier transport in Ga-free InAs/InAsSb T2SL XBn midwave infrared photodetector; proceedings of the Electro-optical and infrared systems [C]//Proceedings of SPIE, 2021.

- [88] Soibel A, Ting D Z, Rafol S B, et al. Mid-wavelength infrared InAsSb/InAs nBn detectors and FPAs with very low dark current density [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(16): 161103.
- [89] Jones R C. A method of describing the detectivity of photoconductive cells [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1953, 24(11): 1035-1040.
- [90] Ariyawansa G, Duran J, Reyner C, et al. InAs/InAsSb strained-layer superlattice mid-wavelength infrared detector for high-temperature operation [J]. *Micromachines (Basel)*, 2019, 10(12): 806.
- [91] Gunapala S, Rafol S, Ting D, et al. Infrared digital focal plane arrays for earth remote sensing instruments [J]. *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2019, 27(1): 54.
- [92] Dehzangi A, Wu D, McClintock R, et al. Planar nBn type-II superlattice mid-wavelength infrared photodetectors using zinc ion-implantation [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 116(22): 221103.
- [93] Kim Y H, Lee H J, Kim Y C, et al. HOT InAs/InAsSb nBn detector development for SWaP detector [C]//Proceedings of SPIE, 2021.
- [94] Haddadi A, Dehzangi A, Chevallier R, et al. Bias-selectable nBn dual-band long-/very long-wavelength infrared photodetectors based on InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>/AlAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> type-II superlattices [J]. *Sci Rep*, 2017, 7(1): 3379.
- [95] Bishop G, Plis E, Rodriguez J, et al. nBn detectors based on InAs/GaSb type-II strain layer superlattice [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 2008, 26(3): 1145-1148.
- [96] Soibel A, Nguyen J, Khoshakhlagh A, et al. High-performance LWIR superlattice detectors and FPA based on CBIRD design[C]//Proceedings of SPIE, 2012.
- [97] Gautam N, Myers S, Barve A V, et al. Barrier engineered infrared photodetectors based on type-II InAs/GaSb strained layer superlattices [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 49(2): 211-217.
- [98] Huang J, Xie Z, Chen Y, et al. High speed mid-wave infrared uni-traveling carrier photodetector [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, 56(4): 1-7.
- [99] Shi Y, Hu R, Deng G, et al. InAs/Ga(In)Sb type-II superlattices short/middle dual color infrared detectors[C]//Proceedings of SPIE, 2015.
- [100] Chen G, Haddadi A, Hoang A M, et al. Demonstration of type-II superlattice MWIR minority carrier unipolar imager for high operation temperature application [J]. *Opt Lett*, 2015, 40(1): 45-7.
- [101] Haddadi A, Razeghi M. Bias-selectable three-color short-, extended-short-, and mid-wavelength infrared photodetectors based on type-II InAs/GaSb/AlSb superlattices [J]. *Opt Lett*, 2017, 42(21): 4275-4280.
- [102] Kazemi A, Myers S, Taghipour Z, et al. High quantum efficiency mid-wavelength infrared superlattice photodetector[C]//Proceedings of SPIE, 2017.
- [103] Kazemi A, Myers S, Taghipour Z, et al. Mid-wavelength infrared unipolar nBp superlattice photodetector [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 88: 114-118.
- [104] More V M, Kim Y, Jeon J, et al. Dual-band unipolar barrier infrared photodetector based on InGaAsSb bulk and type-II InAs/GaSb superlattice absorbers [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2021, 868: 159195.
- [105] Liu J, Zhu H, Zhu H, et al. Long-wavelength InAs/GaSb superlattice double heterojunction infrared detectors using InPSb/InAs superlattice hole barrier [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2022, 37(5): 055016.
- [106] Gunapala S, Ting D, Soibel A, et al. Antimonides T2SL mid-wave and long-wave infrared focal plane arrays for Earth remote sensing applications[C]//Proceedings of SPIE, 2020.
- [107] Du X, Savich G, Marozas B, et al. Suppression of lateral diffusion and surface leakage currents in nBn photodetectors using an inverted design [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(2): 1038-1044.
- [108] He Yingjie, Zhenyu P, Xiancun C, et al. Dual-color mid-wavelength infrared InAs/InAsSb superlattice focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(3): 545-550.
- [109] Zavala-moran U, Bouschet M, Perez J-P, et al. Structural, optical and electrical characterizations of midwave infrared Ga-free type-II InAs/InAsSb superlattice barrier photodetectors[C]//proceedings of the Photonics MDPI, 2020.
- [110] Ting D Z, Khoshakhlagh A, Soibel A, et al. Long wavelength InAs/InAsSb infrared superlattice challenges: A theoretical investigation [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(11): 6936-6945.
- [111] Klipstein P. XBnn and XBpp infrared detectors [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2015, 425: 351-356.
- [112] Sidor D, Savich G, Wicks G. Surface leakage mechanisms in III-V infrared barrier detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45(9): 4663-4667.