

文章编号: 1001-3806(2024)06-0822-10

T2SL 红外探测器高量子效率机理的研究进展

杨雪艳¹, 孙童¹, 关晓宁¹, 赵雅琪¹, 张凡^{1,2}, 张焱超^{1,2}, 芦鹏飞^{1,2}, 周峰^{1*}

(1. 北京邮电大学 集成电路学院, 北京 100876, 中国; 2. 浙江超晶晟锐光电有限公司, 宁波 315412, 中国)

摘要: 二类超晶格 (T2SL) 红外探测器灵敏度高、响应速度快, 适用于更远距离成像、更高速度的运动目标追踪。量子效率 (QE) 是决定光电探测器能否高质量成像的关键指标之一, 提高 T2SL 红外探测器的 QE 具有重要意义。为了更直观地理解 T2SL 红外探测器 QE 的提高方式, 梳理了中长波 T2SL 红外探测器提高 QE 的方法, 归纳了 QE 在不同调控手段下能达到的程度, 重点讨论了能带结构设计、吸收层厚度设定、吸收层掺杂类型选择、材料改进等方面对 T2SL 红外探测器 QE 的影响情况, 并对 T2SL 红外探测器高 QE 的研究现状和未来发展进行了展望。

关键词: 探测器; 二类超晶格; 量子效率; 吸收层

中图分类号: TN215 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.06.007

Research progress on the high quantum efficiency mechanism of T2SL infrared detectors

YANG Xueyan¹, SUN Tong¹, GUAN Xiaoning¹, ZHAO Yaqi¹, ZHANG Fan^{1,2},
ZHANG Yanchao^{1,2}, LU Pengfei^{1,2}, ZHOU Feng^{1*}

(1. School of Integrated Circuits, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China; 2. Zhejiang SuperMat Sen-Ray Optoelectronics Co. Ltd., Ningbo 315412, China)

Abstract: Type-II superlattice (T2SL) infrared detector has high sensitivity and fast response speed, which is suitable for longer distance imaging and higher speed tracking of moving targets. Quantum efficiency (QE) is one of the key indicators to determine whether the photodetector can achieve high quality imaging, so it is of great significance to improve the QE of T2SL infrared detector. In order to have a more intuitive understanding of how T2SL infrared detector QE can be improved, the methods to improve QE of mid-long wave T2SL infrared detector were reviewed, and the extent to which QE can be achieved under different regulatory means were summarized. The effects of band structure design, absorption layer thickness setting, absorption layer doping type selection and material improvement on QE of T2SL infrared detectors are discussed, and the research status and future development of high QE of T2SL infrared detectors are also prospected.

Key words: detector; type-II superlattice; quantum efficiency; absorption layer

0 引言

制冷型高性能中波红外探测器材料主要有碲镉汞 (mercury cadmium telluride, MCT)、铟化铟 (indium antimonide, InSb)、二类超晶格 (type-II superlattice, T2SL) 和量子阱等。MCT 是目前性能最优的中波探测器材料, 通过调节组分, 波长能够覆盖整个红外波段。MCT 红外探测器具有光吸收效率高、量子效率 (quantum efficiency, QE) 高、光响应大且响应率高等优点, 但由于材料的缺陷、材料的不均匀、器件性能的不均匀以及材料生长的衬底问题, 造成材料外延尺寸受

限、良品率低、造价昂贵, 大大限制了 MCT 在大面积方面的应用^[1-2]。InSb 红外探测器制备工艺十分成熟, 具有阵列规模大、有效像元率高、稳定性高、工艺重复性好等特点, 且由于 InSb 具有非常窄的带隙、非常小的电子有效质量和非常高的电子迁移率, 在 $3\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ 的光谱范围内是本征吸收, 故理论上具有近 100% 的 QE。但因 InSb 材料波长不可调, 且在高温下材料中的杂质和缺陷会更加活跃, 从而加速载流子的复合过程, 致使器件暗电流增大, 因此, 器件需要制冷在 110 K 左右的温度下工作, 很难制备出性能优良的 InSb 高温红外探测器^[3-4]。T2SL 是两种不同材料从几个纳米到几十个纳米的薄层交替生长并保持严格周期性的多层膜结构, 事实上就是特定形式的层状精细复合材料。由于是多种材料层叠构成, 具有普通材料没有的特殊性能。T2SL 具有带隙灵活可调、高大面积

基金项目: 红外探测器全国重点实验室开放课题资助项目 (IRDT-23-S01)

* 通信作者: zfsimon@163.com

收稿日期: 2023-12-28; 修回日期: 2024-03-20

均匀性、较高的重现性和可操作性、低俄歇复合及宽光谱响应范围(3 μm ~ 30 μm)等优点,是第 3 代光电探测器有希望的候选材料,有望成为替代 MCT 的第 3 代光电探测器材料^[5-7],在激光测距、成像、遥感、夜视等领域具有重要应用。

1 T2SL 材料特性

T2SL 由于具有与 MCT 相当的高吸收系数、较小隧道电流、抑制俄歇复合、高均匀性和基于 III-V 材料体系的良率等优异性能,在红外探测领域受到了广泛的关注。随着外延和制造技术的发展,T2SL 的优势不断地得到验证(如表 1 所示)。

表 1 3 种材料优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of three materials

材料	优点	缺点
MCT	(1) 迁移率高,光生少数载流子寿命长; (2) QE 高,暗电流低; (3) 覆盖 2 μm ~ 24 μm 波段,波长可调。	(1) Hg 原子不稳定; (2) 当前工作温度低; (3) 产线专用、工艺复杂; (4) 衬底成本高,良率低,器件稳定性差; (5) 大面阵难度高,发展多色探测器困难。
InSb	(1) 电子有效质量小、迁移率高,光生少数载流子寿命长, QE 高; (2) 材料均匀性、稳定性高,成品率高; (3) 工艺兼容性强,成本低,易批产。	(1) 覆盖 1.0 μm ~ 5.5 μm 波段,波长不可调; (2) 工作温度低,要求制冷成本高; (3) 暗电流大; (4) 不能发展长波、双色及多色探测器。
T2SL	(1) 电子空穴空间分离,电子有效质量大,材料缺陷密度小,暗电流低,均匀性好; (2) 带隙可调,覆盖 2 μm ~ 30 μm 波段; (3) 工艺兼容性强,成本低,成品率高,易批产; (4) 可高温工作; (5) 可制作大面阵,可发展双色、多色红外探测器。	产业化时间有限,工程化经验需要积累。

近年来,大尺寸和高性能的 T2SL 焦平面阵列(focal-plane array, FPA) 技术快速发展,尽管如此,T2SL 探测器的性能仍没有达到理论预测。T2SL 红外探测器的 QE 约为 30% ~ 50%^[8-11],MCT 红外探测器的 QE 在 80% 以上^[12-15],二者还有很大差距。这归因于 T2SL 材料中的 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合限制了光生载流子扩散长度,使得 T2SL 具有相对较短的载流子寿命,接近 30 ns ~ 100 ns,而 MCT 的载流子寿命可超过 1 μs。另外工艺上很难生长出较厚的高质量 T2SL 外延材料,相对较薄的 T2SL 外延材料会导致光吸收不足,更阻碍了 T2SL 的 QE 提高。针对这一系列问题,一方面可以通过有意插入的界面层来实现应变

补偿;另一方面,界面可用于处理相邻的没有公共原子的 T2SL 材料层之间的生长转变,从而提高 T2SL 材料质量。然而,由于 InSb 界面层与 T2SL 材料层之间存在高晶格失配,导致很容易发生 3-D 生长,这使得表面形貌和晶体质量可能会随着外延层厚度的增加而恶化,其中通常包含数千个界面。因此,如何设计并生长出足够厚且界面质量良好的 T2SL 外延材料是一项艰巨的任务,这对提高 T2SL 红外探测器的 QE 有重要意义。

2 T2SL 的 QE 介绍

QE 作为超晶格红外探测器的一项重要性能,能够反映器件光电转换效率的高低,是决定光电探测器能否高质量成像的关键指标之一,其表示光电探测器表面接收到的光子转换为电子-空穴对的百分比,即 QE 等于光生电子除以入射光子数。正入射 N-on-P 结构(如图 1 所示^[16])的 QE 可分为 N 区、耗尽区(depleted region, DR)和 P 区。

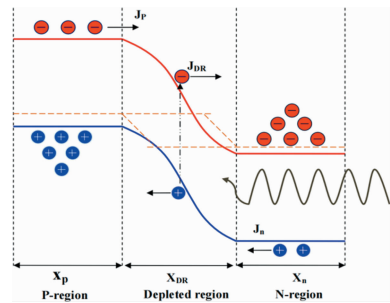


图 1 正入射 N-on-P 结构的光电二极管的光学过程示意图^[16]

Fig. 1 Optical process diagram of a photodiode with a normal incident N-on-P structure^[16]

不同区域的 QE 可表示为^[16]:

$$\eta_N = (1 - R) \frac{\alpha L_h}{(\alpha L_h)^2 - 1} \times$$

$$\left[\frac{-\alpha L_h - \exp(-\alpha x_N) \sinh\left(\frac{x_N}{L_N}\right)}{\cosh\left(\frac{x_N}{L_N}\right) - \alpha L_e \exp(-\alpha x_N)} \right] \quad (1)$$

$$\eta_{DR} = (1 - R) \{ \exp(-\alpha x_N) - \exp[-\alpha(x_N + x_{DR})] \} \quad (2)$$

$$\eta_P = (1 - R) \frac{\alpha L_e}{(\alpha L_e)^2 - 1} \exp[-\alpha(x_N) + x_{DR}] \times \left[\frac{-\alpha L_e \exp(-\alpha x_P) - \sinh\left(\frac{x_P}{L_e}\right)}{\cosh\left(\frac{x_P}{L_e}\right) + \alpha L_e} \right] \quad (3)$$

$$\eta_{total} = \eta_N + \eta_{DR} + \eta_P \quad (4)$$

式中: R 为器件表面反射率,由器件光入射表面的材料折射率决定; α 为吸收系数; L_h 与 L_e 分别为空穴扩散长度和电子扩散长度; x_N 、 x_{DR} 和 x_P 分别是探测器N区、耗尽区、P区的厚度; η_N 、 η_{DR} 、 η_P 和 η_{total} 分别为N区、耗尽区、P区以及总的QE。由公式可以看出,T2SL超晶格红外探测器的QE主要是由吸收系数、扩散长度、材料厚度以及器件表面反射率决定,材料的吸收系数表征的是器件吸收红外辐射的能力,吸收系数越大,吸收红外辐射能力越强,生成的光生载流子越多;随之生成的光生载流子会被收集,因此材料的扩散长度越长,耗尽区越厚,耗尽区范围内的光生载流子被收集的越多。因此,材料的吸收系数和少数扩散长度对器件的QE在本质上有着决定性意义。由于载流子的光生效应主要发生在器件吸收区,即QE主要由吸收层决定,所以,主要通过调节吸收层的结构参数及材料类型提高器件的光电转换效率。

3 T2SL 红外探测器高 QE 的研究进展

当前,提高T2SL红外探测器QE的主要方法可以归纳为以下几种(如图2所示):首先通过对吸收层材料的能带结构设计增大吸收系数,从而提高光电转换效率;其次采用较厚的吸收层增大材料的光吸收能力;再者使用P型掺杂的吸收层增大载流子的扩散长度、具有更长载流子寿命的材料;以及对器件进行表面微纳结构处理,调控入射光的空间分布来增大器件的光吸收能力。

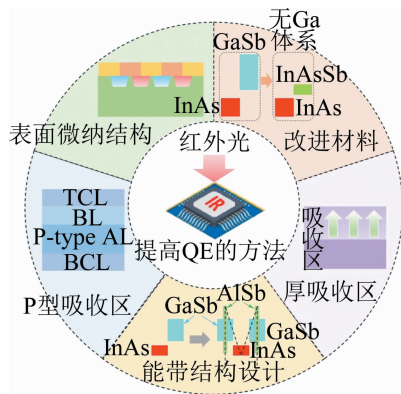


图2 增大T2SL红外探测器的主要方法

Fig. 2 Main method of enlarging T2SL infrared detector

3.1 能带结构设计-增大吸收系数的高QE研究进展

众所周知,T2SL中波函数重叠(wave function overlap, WFO)减弱,这种能带排列的改变会对光电转换过程产生不利影响^[17-19],并呈现出增大WFO的同时QE也增大的规律。据报道,目前增大WFO的方法有:通过调节过渡矩阵元来调节WFO^[20-21];利用量子约束Stark效应,通过对InAs/GaSb超晶格光电探测器

施加合适的外部电压,使其达到WFO的最佳状态^[22];在InAs/AlSb超晶格中的InAs层中插入InAsSb层以增加II型带对准中的界面数量,从而显著促进电子-空穴WFO;在T2SL中引入空穴(电子)阻断单极势垒,通过波函数的局域化来增加电子-空穴WFO,如“InAs/GaInSb/InAs/AlGaInSb”W结构的超晶格和“GaSb/InAs/GaSb/AlSb”M结构的超晶格^[23-25]等。从吸收系数与波函数的关系便可解释QE增大的原因,如下式所示:

$$\alpha(\hbar\omega) = A_0 \sum_n |\varphi_n(0)|^2 \delta(E_g + E_n - \hbar\omega) n \quad (5)$$

式中: $|\varphi_n(0)|^2$ 为基态波函数模的平方,表示电子-空穴波函数之间的相互作用强度, $|\varphi_n(0)|^2$ 越大, α 越大; E_g 为禁带宽度; $\hbar\omega > 0$ 为光子能量; n 是正整数; E_n 为对应能级; A_0 是含有带间过渡矩阵元素的物理量。

2017年,复旦大学ZHAO等人^[23]采用离轴电子全息技术在真实空间中对原位偏置下T2SL的电荷分布波动进行成像,定性地建立了一个基于波函数模平方的简单模型,在合适的偏压下使得WFO达到最大,表明了QE与WFO呈正相关,从而揭示了QE与WFO之间的关系,并且将器件的QE从34%提高到51%。2022年,复旦大学WU等人^[26]提出了通过调节生长温度以及在AlSb层中插入阻挡层的双重策略来增强InAs/AlSb T2SL中的WFO。如图3所示,通过实验优化对比后发现,470 °C的温度生长有利于促进AlSb-on-InAs(AOI)界面处的As-Sb交换,这将导致能带结构

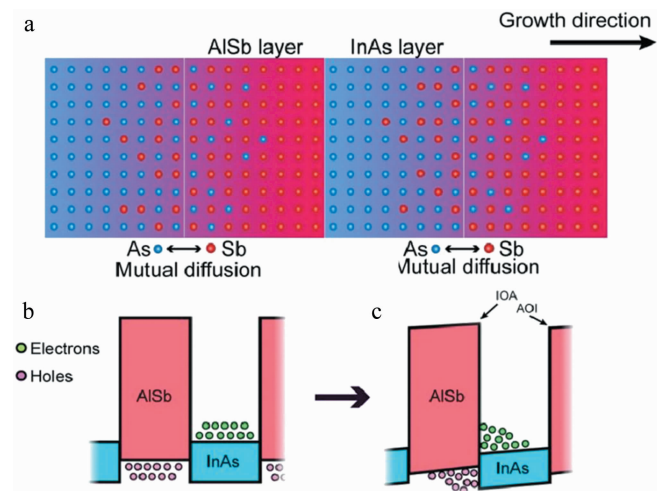


图3 a—AOI界面As-Sb交换示意图^[26] b—InAs/AlSb的理想能带结构电子和空穴在各层的对称分布^[26] c—改进的带模型和载流子不对称分布示意图^[26]

Fig. 3 a—schematic diagram of As-Sb exchange at AOI interface^[26] b—symmetrical distribution of electrons and holes in each layer of the ideal band structure of InAs/AlSb^[26] c—schematic diagram of improved band model and carrier asymmetry distribution^[26]

向 InAs-on-AlSb (IOA) 界面倾斜,这种能带结构可以同时驱动电子和空穴到 IOA 界面,从而导致 WFO 增强;其次在 AlSb/InAs 层界面处插入相对较厚(0.15 nm ~ 0.3 nm)的 AlAs 阻挡层挤压更多的空穴朝向相邻的界面处。图 4 所示为插入阻挡层可以将空穴波函数挤压到两侧^[26],从而提高 InAs/AlSb T2SL 中的 WFO。最终,优化 WFO 后的 InAs/AlSb 超晶格具有更好的光学性能,其光致发光 (photoluminescence, PL) 光谱值强度比原来的提高了 50%。

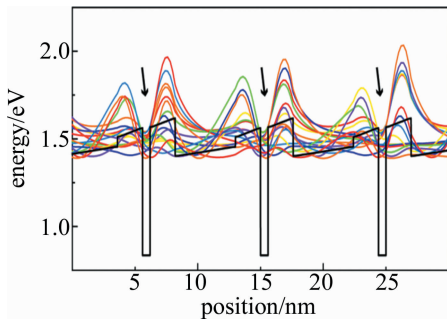


图 4 价带态和波函数分布图^[26]

Fig. 4 Valence band state and wave function distribution diagram^[26]

2022 年,中国科学院半导体所的研究人员^[27]报道了一种 InAs/InAsSb/AlAsSb 高性能红外 P-I-N 光电探测器(如图 5 所示)。探测器通过引入高吸收系数的吸收区材料,用 M-InAs/InAsSb/AlAsSb/InAsSb 超晶格替代传统的 M-InAs/GaSb/AlSb/GaSb 超晶格。同时,在一个超晶格周期内减小 InAs、InAsSb 和 AlAsSb 层的厚度,每层材料厚度的减小导致载流子局域化衰减,InAs 量子阱中的电子波函数与 InAsSb 量子阱中的空穴波函数的空间重叠度提高,吸收系数增大。并且,将顶部接触层设计得较薄,减少接触区域的吸收,提高了器件的 QE。在 -130 mV 偏置电压下,器件的 QE 为 28%。

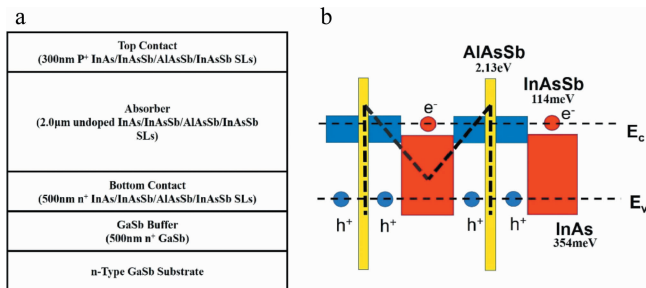


图 5 a—结构图^[27] b—吸收区和势垒区超晶格的能带排列^[27]

Fig. 5 a—structure diagram^[27] b—energy band arrangement of superlattice in absorption and barrier regions^[27]

尽管如此,W 结构的 T2SL 和 M 型结构的 T2SL 虽然引入空穴(电子)阻断单极势垒,使得波函数的局域化来增加电子-空穴 WFO,但是由于周期长、界面多、

电子迁移率降低等原因,它们的 QE 不高。因此,如何在不牺牲生长质量和改变操作条件的前提下,提高 T2SL 内的 WFO 仍然是一个很大的挑战。

3.2 采用厚吸收区提高 QE 的研究进展

由第 1 节可知,器件的 QE 可表示成生成电子-空穴对占入射光子数的百分比:

$$\eta = (1 - R) \cdot \exp(-\alpha x_N) [1 - \exp(-\alpha \omega_a)] \quad (6)$$

式中: η 即为 QE; R 为器件顶部的反射率; α 为吸收系数; ω_a 和 x_N 分别为吸收层厚度和 N 区厚度。可以看出 QE 与吸收层厚度成正比,故可通过增大吸收层厚度来增大 QE。

2007 年,美国西北大学 NGUYEN 等人^[28]通过对长波 InAs/GaSb T2SL 红外探测器的吸收层厚度进行调节,实现了 54% 的高 QE 性能,如图 6 所示,吸收层厚度 1 μm 增加到 6 μm ,器件 QE 从 27% 增大至 54%。2009 年,美国西北大学量子器件研究中心 (Center for Quantum Devices, CQD) 在 NGUYEN 等人^[29]的基础上研制出了 InAs/GaSb T2SL FPA 外探测器。这项工作中使用的 FPA 是基于一个 M 结构的 InAs/GaSb/AlSb 超晶格,在 N 型超晶格接触和 π 有源区之间插入 M 结构势垒,减小了暗电流的体积分量,使探测器的背景限性能工作在 110 K。吸收层(总厚度为 6.5 μm) 由 12 个单分子层 (monolayer, ML) InAs 和 7 ML GaSb 组成。FPA 为 25 $\mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 的 320 \times 256 阵列探测器,直径为 30 μm 。将 FPA 装入 26° 视场的液氮低温恒温器中,并使用 SE-IR 公司的 CamIRA 红外 FPA 评估系统进行测试。在 50% 截止波长 9.6 μm 处,FPA 表现出高达 72% 的 QE。

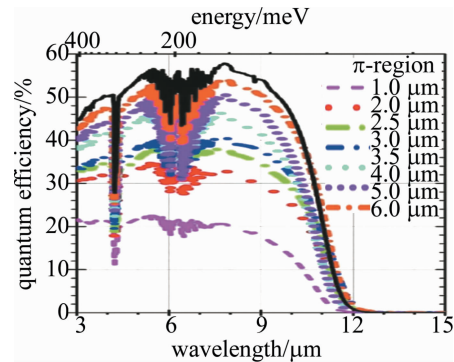


图 6 器件 QE 随吸收层厚度变化情况^[28]

Fig. 6 Variation of device QE with the thickness of the absorption layer^[28]

针对 T2SL 中波红外探测器,2013 年,瑞典 IRnova 公司^[30]设计制作了一种中波红外异质结 T2SL 势垒焦平面探测器,在没有抗反射涂层的情况下,采用 4 μm 的厚吸收层屏障结构,在 50% 截止波长 5 μm 处,实现了 65% 的高 QE。2022 年,IRnova 公司^[31]报道了一种

已经在生产的 HOT T2SL 红外焦平面探测器,无抗反射涂层、140 K 下的峰值 QE ($\lambda \approx 3.5 \mu\text{m} \sim 4.5 \mu\text{m}$) 高达 70% 以上。图 7 所示为不同工作温度下的 QE 变化情况。

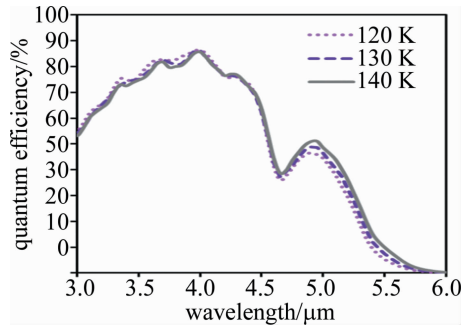


图 7 IRnova 公司 HOTA T2SL 器件在不同工作温度下 QE 的变化^[31]

Fig. 7 QE in IRnova HOTA T2SL devices at different operating temperatures^[31]

2021 年,土耳其 Akdeniz 大学的 HOSTUT 等人^[32]采用 N-on-P 结构的 InAs/GaSb T2SL 对器件不同区域的 QE 进行了研究,分析了具有相同周期长度和不同 I 层和 P 层厚度的 3 种 T2SL InAs/GaSb 红外光电探测器的 QE 成分,如图 8 所示。层厚增大 0.4 μm 时, QE 从 34% 增大至 40%。

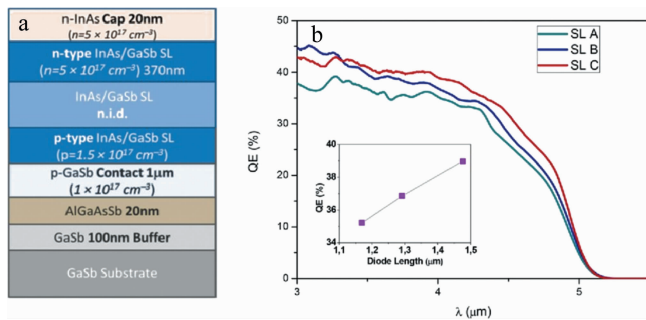


图 8 a—结构图^[32] b—QE 随波长的变化情况^[32]

Fig. 8 a—structure diagram^[32] b—QE changes with wavelength^[32]

针对 InAs/InAsSb 材料,印度德里实验室^[33]模拟了 QE 随吸收层厚度的变化情况 ($\tau_{\text{eff}} = 150 \text{ ns}$),并与不同实验室的数据进行了比较,如图 9 所示。由图 9

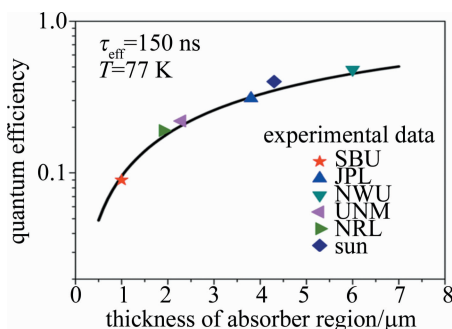


图 9 QE 随吸收层厚度的变化情况^[33]

Fig. 9 Change of QE with the thickness of the absorbing layer^[33]

可知,在一定范围内 QE 随吸收层厚度增大,趋势逐渐平缓。2019 年,美国 CQD^[34]报道了采用金属有机化学气相沉积法在 GaSb 衬底上生长中波长红外 T2SL InAs/InAsSb 光电二极管,器件为 P-I-N 结构,在 150 K、50% 截止波长为 5.0 μm 、无增透涂层时, QE 为 55%。讨论了不同吸收层厚度下的 QE 变化情况,由图 10 可以看出,吸收层越厚, QE 越高。

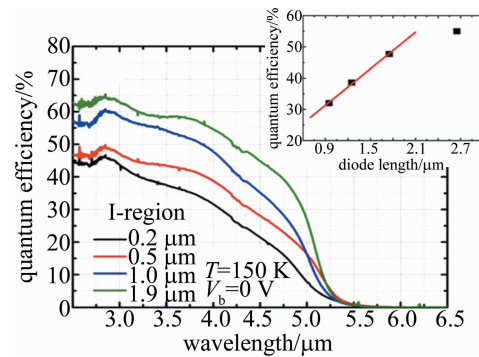


图 10 无增透涂层的正偏压下不同 I 区厚度器件的 QE^[34]

Fig. 10 QE of devices with different I-zone thicknesses at positive bias without antireflection coating^[34]

3.3 P 型吸收区的 QE 研究进展

载流子的扩散长度 $L = \sqrt{D\tau}$, D 为载流子的扩散系数,单位是 cm^2/s ,反映非平衡少数载流子扩散本领的大小, τ 为少数载流子寿命(载流子复合概率的倒数),扩散长度 L 标志着非平衡载流子深入到材料的平均距离。扩散系数 $D = \mu kT/q$, μ 为载流子迁移率, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, q 为电荷量,载流子迁移率 $\mu \propto 1/m^*$ (m^* 为有效质量)。由于电子有效质量小于空穴有效质量,因此可通过调节吸收区 P 型掺杂来增大载流子的扩散长度,从而增大 QE。

2009 年, NGUYEN 等人^[35]提出了一种完全基于超晶格的替代设计,并使用电子作为少数载流子。如图 11a、图 11b 所示,不同于 M 结构势垒,该器件是传统的光导体,暗电流是空穴输运,空穴是 P 型导体中的主要载流子。如图 11c 所示,该器件结构为 PMP 型,由两个 P 掺杂的超晶格有源区和一个使用 M 结构超晶格的薄价带势垒组成,相对于 P 型有源区传导带不连续为零。由于 M 结构超晶格的存在,该层在价带中充当势垒,阻挡了空穴的输运。最终器件的 QE 在 50% 截止波长 9.6 μm 处为 17.5%。2015 年,西北大学研究人员^[36]同样采用 PMP 结构应用在 320×256 中波 InAs/GaSb T2SL 焦平面器件上,在 150 K 和 -50 mV 工作偏压下, 50% 截止波长为 4.9 μm , 峰值响应度(4.6 μm 处) QE 为 67%。

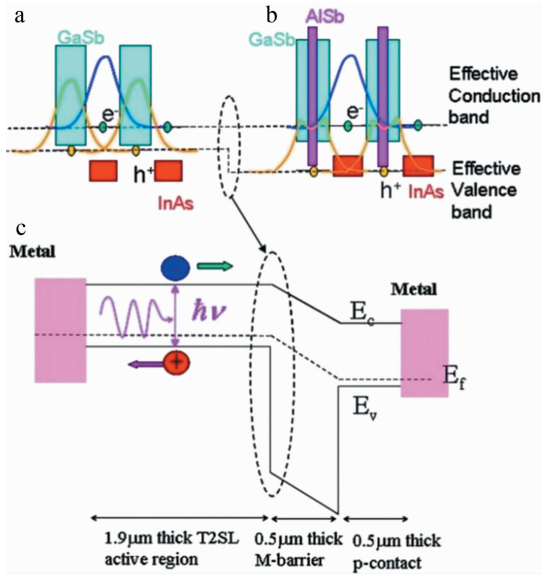


图 11 a—InAs/GaSb 超晶格^[35] b—M 结构超晶格的能带对准和有效带隙^[35] c—PMP 设计原理图及工作原理^[35]
 Fig. 11 a—InAs/GaSb superlattice^[35] b—energy band alignment and effective band gap of M structure superlattice^[35] c—PMP design schematic and working principle^[35]

2017 年,瑞典 IRnova 公司 ASPLUND 等人^[37]研究了载流子扩散长度与外部 QE 之间的关系,并建立了光载流子运输模型。利用该模型,从外部 QE 测量中提取扩散长度,微调光学腔的波长范围,以获得最佳的 QE。器件结构如图 12a 所示,采用 P 型掺杂的吸收区,最终实现了器件的高 QE 性能。工作温度 80 K、波长为 3 μm 时,器件的实测 QE 高达 80%,如图 12b 所示。

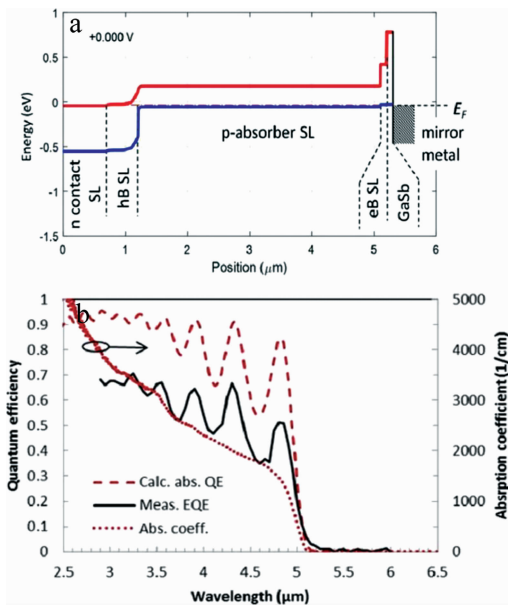


图 12 a—能带图^[37] b—吸收系数(虚线)以及探测器外 QE 测量值(实线)^[37]
 Fig. 12 a—the energy band diagram^[37] b—absorption coefficient (dashed line) and detector external quantum efficiency measurements (solid line)^[37]

2018 年,美国俄亥俄州立大学的研究人员^[38]报道了一种基于 InAs/GaSb/AlSb 型超晶格(T2SL)材料体系的中波红外(medium wave infrared, MWIR)势垒光电探测器。器件结构为 NBP 型,由一个单极势垒(InAs/AlSb 超晶格)组成,位于 4 μm 厚的 P 型掺杂吸收层(InAs/GaSb 超晶格)和 N 型接触层(InAs/GaSb 超晶格)之间。在 80 K 时,该器件显示出 50% 的截止波长为 5 μm,在零偏压下、4.5 μm 波长时测量得 QE 为 50% (正面照明,无抗反射涂层);在 150 K 和偏置电压 $V_b = 50$ mV 下,50% 截止波长增加到 5.3 μm,在 4.5 μm 波长处, QE 为 54%。

2019 年,IRnova 公司采用双异质结构的 InAs/GaSb T2SL 结构^[39](如图 13a 所示),吸收层为 4 μm 厚的 P 型掺杂层,研究了大型单像素光电二极管的暗电流和 QE 的偏置和温度依赖性。从图 13b 中 QE 的温度依赖性可以看出,最大 QE 随温度升高变化很小,并且当温度从 80 K 增加到 120 K 时, QE 值($\lambda = 4$ μm 处测量)保持在 60% 左右。

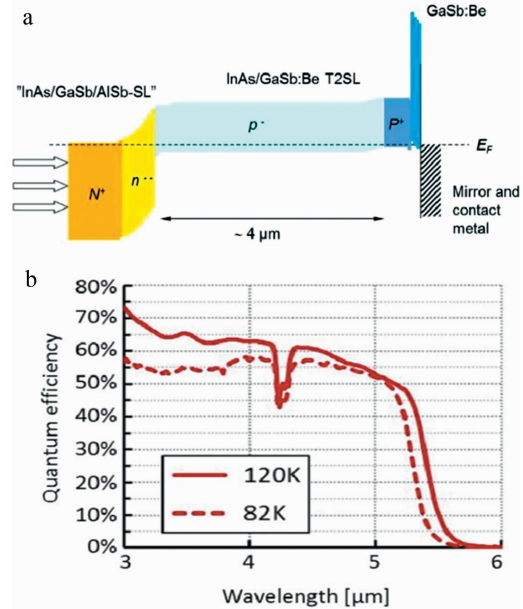


图 13 a—双异质结构(DH)探测器结构图^[39] b—单像素光电二极管的外 QE^[39]
 Fig. 13 a—double heterostructure (DH) detector structure diagram^[39] b—the external quantum efficiency of a single-pixel photodiode^[39]

2020 年,美国 SOIBEL 等人^[40]研究了 5.6 μm 截止波长 N 型 InAs/InAsSb T2SL 探测器,如图 14 所示。图 14a 是器件结构示意图,图 14b 为根据吸收系数与扩散长度 L 计算得到的 QE 变化情况。从图中可看出,温度从 $T = 50$ K 增加到 $T = 180$ K 时, QE 从 30% 增加至 60%。通过分析 QE 与温度的关系,发现 QE 随温度的增加是由于少数载流子(空穴)扩散长度的增加,而 QE 随偏压的增加是由于耗尽宽度的增加。

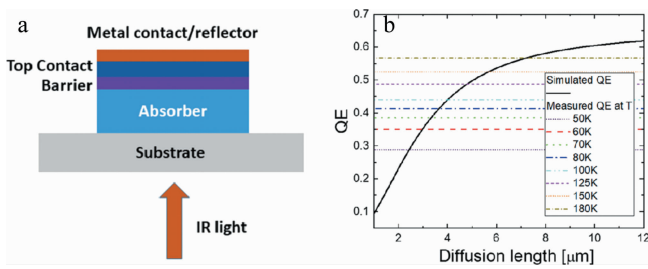


图 14 a—结构图^[40] b—QE 计算值^[40]

Fig. 14 a—structure diagram^[40] b—QE calculated value^[40]

在温度为 50 K 时,少数载流子(空穴)的扩散长度为 $L = 2.4 \mu\text{m}$;在温度为 180 K 时,扩散长度单调增加到 $L = 7.2 \mu\text{m}$ 。由扩散长度和少数载流子寿命计算得到的空穴迁移率在 $T = 50 \text{ K}$ 时为 $4.5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$,并随温度升高而增大,在 $T = 150 \text{ K}$ 时增大至 $7.2 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。此处扩散长度和迁移率的增加为 QE 随温度升高的主要原因。

3.4 改进材料提高 QE 的研究进展

InAs/GaSb 超晶格自提出以来,已经得到了广泛的应用, QE 和响应度与 MCT 相当,但载流子寿命仍不如 MCT,主要局限于 InAs/GaSb 超晶格的缺陷态,而 Ga 即为缺陷态来源^[41]。研究表明,InAs 少数载流子寿命约 325 ns ^[42], GaSb 少数载流子寿命约 100 ns ^[42], InAsSb 少数载流子寿命约 250 ns ^[43]。如图 15 所示^[44], 77 K 时,由无 Ga T2SL、MCT 及其它 III-V 材料中少数载流子寿命的报道数据可以看出,由于无 Ga 原子, InAs/InAsSb 超晶格比 InAs/GaSb 拥有更长的载流子寿命。根据 SRH 机制, SRH 中心越多,少子寿命越短。GaSb 体材料中的费米能级位于带隙中间或价带边缘附近,而 InAs 体材料中的费米能级位于导带边缘上方,所以位于 GaSb 带隙中间的陷阱能级可促进 SRH 复合,而 InAs 中陷阱中心的 SRH 复合减少。由第 3.3 节可知,载流子的扩散长度为 $L = \sqrt{D\tau}$,增大载流子寿命使得扩散长度增大,最终影响器件的 QE。少数载流子寿命

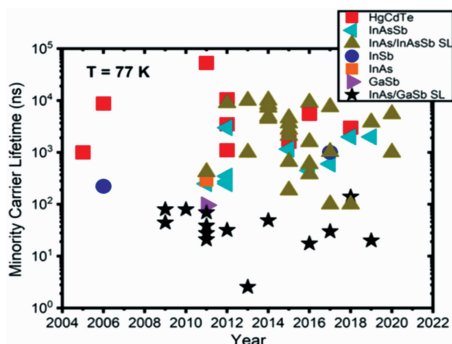


图 15 文献报道数据中的少数载流子寿命汇总^[44]

Fig. 15 Summary of minority carrier lifetimes in the reported data of the references^[44]

的长短主要是由于载流子局域化,即 T2SL 材料的杂质、成分变化或是厚度较薄时,因层厚变化引起的导带激价带电位的局域空间变化。这些局域势导致的尾态能量低于态联合密度中的带隙,因此,低温下这些状态可以捕获载流子,在低注入条件下,这些状态可以被观察到。载流子局部化的两种常见表现是极长的载流子寿命和低温下的 PL 峰蓝移。因此,可通过优化材料质量来减少缺陷、减少 SRH 中心,从而增大载流子寿命,优化器件 QE。

2017 年,复旦大学 BI 等人^[21]采用 InAs/GaSb 超晶格与 3 种不同的界面组成,研究了 T2SL 残余应变和 QE 之间的关系,本质是减小界面残余应变增大载流子寿命。具体为:采用适量的铟(In)沉积改善界面平整度,从而提高载流子寿命,进而增大器件的 QE。图 16a~图 16c 所示为 3 种不同界面下对应不同波长的 QE 分布图;图 16d、图 16e、图 16f 分别为不同界面 In 沉积时间下的 QE 随偏压的变化关系情况,随着 In 沉积时间的增加, QE 的峰值从 23% 提高到 50%。同样针对材料界面优化来减小界面间残余应力,2021 年,中国科学院上海技术物理研究所的研究人员^[45]基于新型的快门序列,实现了表面光滑的延材料的逐层生长,研制了一种 QE 高达 80%、PIN 结构的 MWIR 红外探测器。

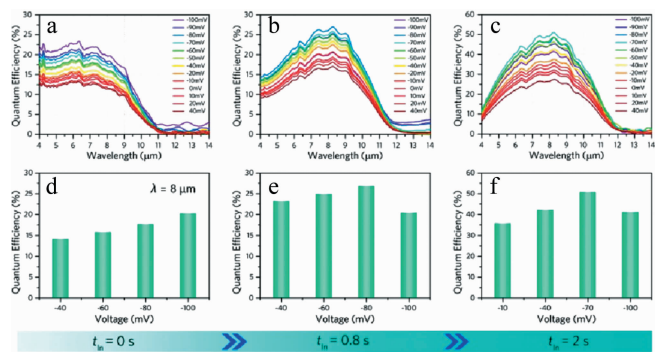


图 16 a~c—3 种不同界面下的 QE 图^[21] d~f—3 种超晶格的最大 QE 值与偏置电压的函数关系^[21]

Fig. 16 a~c—QE diagrams under three different interfaces^[21] d~f—the maximum QE value of three superlattices as a function of bias voltage^[21]

当然,增大载流子寿命最直接的方法是选用更高载流子寿命的材料,比如无 Ga 材料 InAs/InAsSb。如表 2 所示,吸收区均为 InAs/InAsSb 超晶格材料, QE 高达 60%。可以看出, InAs/InAsSb 材料的载流子寿命更高,会对 T2SL 红外探测器的 QE 有影响,但相比 MCT,还有待提高。参考文献[46]中讨论了 InAsSb 材料未来 30 年的发展方向,从文中可知,无 Ga 材料载流子寿命高但 QE 增长不明显,是由于无 Ga 材料的载流子迁移率低,而载流子迁移率与载流子寿命共同影响

扩散长度,从而影响 QE。因此,无 Ga 材料若能解决载流子迁移率问题,其高 QE 实现将大有可为。

表 2 InAs/InAsSb 超晶格红外探测器的性能参数

Table 2 Performance parameters of InAs/InAs Sbsuperlattice infrared detector

年份	结构	波长/ μm	温度/K	QE/%	参考文献
2018	互补势垒 红外探测器	4.24	295	72	[9]
2019	NBN	5	150	55	[34]
2018	NBN	5.4	150	49.1	[47]
2018	NBN	5.37	150	52	[48]
2019	NBN	5.5	160	56	[49]
2020	PBN	4.8	185	57.6	[50]
2020	双势垒	3.95	150	45	[51]
2021	XBN	5	150	50	[52]
2021	NBN	3	80	50	[53]
2022	PBN	4.54	77	63.7	[54]
		4.98	160	59.8	

3.5 其它相关研究

除了对器件材料本身进行材料性质的调控、器件结构的能带设计和优化以外,光学调控也是一种较为直接有效增大 QE 的方式。光学调控通常采用表面微纳结构,调控入射光的空间分布,比如采用光子晶体、陷光结构、表面等离子体增强等方式。借助于多种微加工手段和图形转移技术在器件表面设计并制备维纳结构,其尺寸可以精确控制在纳米量级,从而增大红外光吸收的吸收效率。中国科学院西安光学精密机械研究所^[55]报道了一种宽光谱探测器,它可以同时探测 $0.4\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ 的可见光和中红外光谱。该探测器采用在中红外 InAs/GaSb T2SL 材料上制作的各种光子陷阱结构,实现了探测器在 $3\ \mu\text{m}$ 处的 QE 达到 52.5% 的高性能。美国德克萨斯大学^[56]采用 NBN 结构,利用探测器下方的高掺杂半导体层来形成波导结构,将光栅蚀刻到 NBN 探测器上方生长的 GaSb 层中,吸收层截止波长为 $5\ \mu\text{m}$,在室温 ($T = 296\ \text{K}$) 下实现了约为 60% 的 QE。

4 结束语

现阶段高 QE 的 T2SL 红外探测器的主要问题以及未来发展方向如下。

(a) 设计合适的能带结构增强探测器吸收系数。InAs/GaSb T2SL 红外探测器的 QE 低主要受限于吸收系数,波函数模的平方的大小为主要影响因素,针对 T2SL 吸收系数,可进行吸收层结构设计,使得吸收层波函数重叠达到最大,通过过渡矩阵元来调节 WFO,利用量子约束 Stark 效应来增大 WFO;另外可通过适当地调整 InAs/GaSb 的界面无序性、减小缺

陷,提高材料质量,从而增大少数载流子寿命,提高探测器的 QE。

(b) 增大吸收层厚度来增大扩散长度。对于吸收层厚度来说,吸收层厚度在一定范围内与 QE 呈正相关,随着吸收层厚度增大, QE 趋于一个定值,归因于器件的 QE 随吸收层厚度的变化规律是由吸收与扩散两种机制共同主导的,薄吸收层时吸收为主导,厚吸收层时扩散占主导。因此筛选出吸收层的最优值有助于提高 T2SL 红外探测器的 QE。

(c) 调控掺杂类型增大载流子寿命。载流子扩散长度与载流子的有效质量呈负相关,由于 T2SL 电子有效质量远低于空穴,故采用较大厚度的 P 型掺杂的吸收层可以有效增大器件的 QE。对于 InAs/InAsSb 超晶格来说,由于 InAs/InAsSb 的表面是简并 N 型,会在表面引入复合电流,因此,结合 P 型和 N 型吸收层并采用互补势垒红外探测器结构是未来高 QE T2SL 红外探测器的重要研究方向。

(d) 采用无 Ga 材料体系。对于 InAs/InAsSb T2SL 红外探测器,无 Ga 的 InAs/InAsSb 材料的少数载流子寿命远大于 InAs/GaSb,但扩散长度是由载流子寿命和载流子迁移率共同决定的,InAs/InAsSb 材料的载流子的有效质量较大,致使载流子迁移率低,因此,载流子扩散长度最终限制了 InAs/InAsSb T2SL 红外探测器的 QE 性能。如何提高无 Ga 材料 InAs/InAsSb 的 QE 面临严峻考验,为了达到高 QE 的目的,可以适当地增大 InAs/InAsSb 材料的 Sb 组份,减小周期厚度,提高吸收来实现,但 Sb 组份较大会导致超晶格 InAs/InAsSb 面临应变平衡以及 Sb 偏析问题,因此通过精细调节 InAs/InAsSb 的组分、厚度、以及工艺外延生长优化,解决 Sb 偏析问题,来达到材料的应变平衡以及高质量界面,是未来的重要研究方向。

红外探测器是红外检测技术的核心元件,在航天航空、制导、生物医疗等领域具有重要作用, QE 为红外探测器能高质量成像的重要指标之一,因此提高 T2SL 红外探测器的 QE 具有重要意义。本文中总结了当前提高中长波 T2SL 红外探测器 QE 的方法以及相关研究进展。吸收系数大小、吸收层厚度、扩散长度以及载流子寿命长短都会对 QE 产生较大影响。重点讨论了能带结构设计、吸收层厚度设定、吸收层掺杂类型选择、材料改进等方面对 T2SL 红外探测器 QE 的影响机理以及在一定程度上取得的进展。总体而言,国内外有许多研究机构对提高 T2SL 红外探测器的 QE 进行了大量研究,从已报道的结果来看,国内相对国外研究还存在很大差距,亟需机理方面的改进。本工作对今后 T2SL 红外探测器高 QE 设计具有较强指导意义。

参 考 文 献

- [1] YE Zh H, CHEN Y Y, ZHANG P. Overview of latest technologies of HgCdTe infrared photoelectric detector[J]. *Infrared*, 2014, 35(2): 1-8 (in Chinese).
叶振华, 陈奕宇, 张鹏. 碲镉汞红外探测器的前沿技术综述[J]. *红外*, 2014, 35(2): 1-8.
- [2] ZHAO J, WANG X X, LI X J, *et al.* Development of a mercury cadmium telluride infrared detector[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2023, 53(9): 1419-1433 (in Chinese).
赵俊, 王晓璇, 李雄军, 等. 碲镉汞红外探测器研究进展[J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(9): 1419-1433.
- [3] SI J J. Novel InSb-based infrared detector materials (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 79-97 (in Chinese).
司俊杰. 基于 InSb 的新型红外探测器材料 (特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, 51(1): 79-97.
- [4] LU Y Q, LU X, LU Zh X, *et al.* Review of antimonide infrared detector development at home and abroad[J]. *Aero Weaponry*, 2020, 27(5): 1-12 (in Chinese).
吕衍秋, 鲁星, 鲁正雄, 等. 碲化物红外探测器国内外发展综述[J]. *航空兵器*, 2020, 27(5): 1-12.
- [5] XIE X M, XU Q, CHEN J, *et al.* Research progress on antimonide based type-II superlattice mid-and long-infrared detectors[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(6): 688-694 (in Chinese).
谢修敏, 徐强, 陈剑, 等. 碲化物 II 类超晶格中远红外探测器的研究进展[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 688-694.
- [6] WANG G W, XU Y Q, NIU Zh Ch. Development of high-performance novel low-dimensional structure antimonide infrared FPAs: Challenges and solutions[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44(4): 368-389 (in Chinese).
王国伟, 徐应强, 牛智川. 新型低维结构碲化物红外探测器的研究与挑战[J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2014, 44(4): 368-389.
- [7] SUN T, GUAN X N, ZHANG F, *et al.* Progress in simulation of type-superlattice infrared detectors based on the $k \cdot p$ method[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(4): 439-453 (in Chinese).
孙童, 关晓宁, 张凡, 等. 基于 $k \cdot p$ 方法的 II 类超晶格红外探测器仿真进展[J]. *激光技术*, 2023, 47(4): 439-453.
- [8] ASPLUND C, von WURTEMBERG RM, LANTZ D, *et al.* Performance of mid-wave T2SL detectors with heterojunction barriers[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 59(6): 22-27.
- [9] KIM J, YUAN H, KIMCHI J, *et al.* HOT MWIR InAs/InAsSb T2SL discrete photodetector development [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2018, 10624: 108-115.
- [10] HOGLUND L, ASPLUND C, von WURTEMBERG RM, *et al.* Manufacturability of type-II InAs/GaSb superlattice detectors for infrared imaging[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 84: 28-32.
- [11] OGUZ F, ULKER E, ARSLAN Y, *et al.* High performance 15 μm pitch 640 \times 512 MWIR InAs/GaSb type-II superlattice sensors[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2021, 58(1): 1-6.
- [12] ROBBERTO M, BAGGETT S M, HILBERT B, *et al.* The infrared detectors for the wide field camera 3 on HST[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5499: 15-22.
- [13] GARNETT J D, FARRIS M C, WONG S S, *et al.* 2K \times 2K molecular beam epitaxy HgCdTe detectors for the James Webb Space Telescope NIRCcam instrument [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2004, 5499: 35-46.
- [14] SINGH A, PAL R. Performance of $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ infrared focal plane array at elevated temperature[J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2017, 32(4): 045011.
- [15] YUAN H, ZHANG J, KIM J, *et al.* High performance SWIR HgCdTe 320 \times 256/30 μm FPAs at Teledyne Judson Technologies [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2018, 10766: 109-119.
- [16] HOANG A M. Theoretical design and material growth of Type-II antimonide-based superlattices for multi-spectral infrared detection and imaging [D]. Evanston, Illinois, USA: Northwestern University, 2016.
- [17] KROEMER H. The 6.1 family (InAs, GaSb, AlSb) and its heterostructures: A selective review[J]. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, 2004, 20(3/4): 196-203.
- [18] POTEMSKI M, VIA L, BAUER G E W, *et al.* Magnetoexcitons in narrow GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs quantum wells [J]. *Physical Review*, 1991, B43(18): 14707.
- [19] COHEN-ELIAS D, ULIEL Y, KLIN O, *et al.* Short wavelength infrared InAs/InSb/AlSb type-II superlattice photodetector[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 84: 82-86.
- [20] FELDMANN J, SATTMANN R, G? BEL E O, *et al.* Subpicosecond real-space charge transfer in type-II GaAs/AlAs superlattices [J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62(16): 1892-1895.
- [21] BI H, HAN X, LIU L, *et al.* Atomic mechanism of interfacial-controlled quantum efficiency and charge migration in InAs/GaSb superlattice[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(32): 26642-26647.
- [22] CAI C, ZHAO Y, CHANG F, *et al.* Understanding the role of interface in advanced semiconductor nanostructure and its interplay with wave function overlap [J]. *Nano Research*, 2020, 13(6): 1536-1543.
- [23] ZHAO Y H, LIU L, BI H, *et al.* Quantum efficiency optimization by maximizing wave function overlap in type-II superlattice photodetectors[J]. *Nanoscale*, 2017, 9(33): 11833-11840.
- [24] MEYER J R, HOFFMAN C A, BARTOLI F J, *et al.* Type-II quantum-well lasers for the mid-wavelength infrared [J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(6): 757-759.
- [25] WU Y, ZHANG Y, ZHAO Y, *et al.* Insights into growth-oriented interfacial modulation within semiconductor multilayers [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(23): 27262-27269.
- [26] WU Y Y, ZHANG Y H, ZHANG Y, *et al.* Dual strategy of modulating growth temperature and inserting ultrathin barrier to enhance the wave function overlap in type-II superlattices[J]. *Nano Research*, 2022, 15(6): 5626-5632.
- [27] JIANG J K, WANG G W, WU D H, *et al.* High-performance infrared photodetectors based on InAs/InAsSb/AlAsSb superlattice for 3.5 μm cutoff wavelength spectra [J]. *Optics Express*, 2022, 30(21): 38208-38215.
- [28] NGUYEN B M, HOFFMAN D, WEI Y, *et al.* Very high quantum efficiency in type-II InAs/GaSb superlattice photodiode with cutoff of 12 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(23): 231108.
- [29] DELAUNAY P Y, RAZEGHI M. Noise analysis in type-II InAs/GaSb focal plane arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 106(6): 063110.
- [30] TIAN Z B, SCHULER-SANDY T, GODOY S E, *et al.* High-operating-temperature MWIR detectors using type II superlattices[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2013, 8867: 232-240.
- [31] DELMAS M, HOGLUND L, IVANOV R, *et al.* HOT SWaP and HD detectors based on type-II superlattices at IRnova[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2022, 12107: 185-192.
- [32] HOSTUT M, ERGUN Y. Quantum efficiency contributions for type-II InAs/GaSb SL photodetectors[J]. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2021, 130: 114721.
- [33] SINGH A, PAL R. Performance simulation of unipolar InAs/InAs_{1-x}Sb_x

- type-II superlattice photodetector[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(9): 4653-4662.
- [34] WU D, DURLIN Q, DEHZANGI A, *et al.* High quantum efficiency mid-wavelength infrared type-II InAs/InAs_{1-x}Sb_x superlattice photodiodes grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(1):011104.
- [35] 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): 053519.
- [36] 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]. *Optics Letters*, 2015, 40(1): 45-47.
- [37] ASPLUND C, von WURTEMBERG R M, HOGLUND L. Modeling tools for design of type-II superlattice photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 84: 21-27.
- [38] KAZEMI A, MYERS S, TAGHIPOUR Z, *et al.* Mid-wavelength infrared unipolar nBp superlattice photodetector [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 88: 114-118.
- [39] HOGLUND L, NAUREEN S, IVANOV R, *et al.* Type-II superlattices: Hot MWIR production and development at IRnova [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2019, 11002: 166-172.
- [40] SOIBEL A, TING D Z, FISHER A M, *et al.* Temperature dependence of diffusion length and mobility in mid-wavelength InAs/InAsSb superlattice infrared detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(23): 231103.
- [41] 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.
- [42] SVENSSON S P, 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.
- [43] 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_{1-x}Sb_x alloys [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8012: 318-327.
- [44] ALSHAHRANI D O, KESARIA M, ANYEBE E A, *et al.* Emerging type-II superlattices of InAs/InAsSb and InAs/GaSb for mid-wavelength infrared photodetectors [J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, 3(2): 2100094.
- [45] CHEN K H, XU Z C, LIANG Z M, *et al.* Molecular beam epitaxy growth and characteristics of the high quantum efficiency InAs/GaSb type-II superlattices MWIR detector [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 40(3): 285-289.
- [46] ROGALSKI A, MARTYNIUK P, KOPYTKO M, *et al.* InAsSb-based infrared photodetectors: Thirty years later on [J]. *Sensors*, 2020, 20(24): 7047.
- [47] 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.
- [48] TING D Z, HILL C J, SOIBEL A, *et al.* Mid-wavelength high operating temperature barrier infrared detector and focal plane array [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(2): 021101.
- [49] ARIYAWANSA G, DURAN J, REYNER C, *et al.* InAs/InAsSb strained-layer superlattice mid-wavelength infrared detector for high-temperature operation [J]. *Micromachines*, 2019, 10(12): 806.
- [50] DENG G R, CHEN D Q, YANG Sh P, *et al.* High operating temperature pBn barrier mid-wavelength infrared photodetectors and focal plane array based on InAs/InAsSb strained layer superlattices [J]. *Optics Express*, 2020, 28(12): 17611-17619.
- [51] WU, D H, 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.
- [52] 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 [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2021, 11866: 25-34.
- [53] KIM Y H, LEE H J, KIM Y C, *et al.* Hot InAs/InAsSb nBn detector development for SWaP detector [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2021, 11741: 164-168.
- [54] HUANG J L, YAN Sh L, XUE T, *et al.* Mid-wavelength InAs/InAsSb superlattice photodetector with background limited performance temperature higher than 160 K [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2022, 69(8): 4392-4395.
- [55] GUO Ch Y, SUN Y Y, JIA Zh, *et al.* Visible-extended mid-infrared wide spectrum detector based on InAs/GaSb type-II superlattices (T2SL) [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 89: 147-153.
- [56] NORDIN L, PETLURU P, KAMBOJ A, *et al.* Ultra-thin plasmonic detectors [J]. *Optica*, 2021, 8(12): 1545-1551.