

锑基 APD 研究进展

徐嘉林^{1,2}, 刘 铭^{1,2}, 谭启广¹, 张智超^{1,2}, 邢伟荣^{1,2}, 于 慧^{1,2}, 孙 浩¹, 吴 卿^{1,2}

(1. 华北光电技术研究所, 北京 100015; 2. 红外探测全国重点实验室, 北京 100015)

摘要: 锑基 APD 因在增益、过剩噪声、温度稳定性等方面的优势, 近年来在红外探测领域受到了广泛关注, 成为高速光通信、量子通信、红外成像等领域的研究热点。本文梳理了国内外各研究机构在锑基 APD 材料与器件结构方面的研究现状, 对比了不同器件结构对于锑基 APD 器件性能的影响, 分析了锑基 APD 实现更佳增益和噪声性能的可能技术途径。相较而言, SAM 结构最具研发前景。最后对锑基 APD 未来的技术发展进行了展望。

关键词: 光电探测器; 雪崩光电二极管; 锑化物; 增益; 过剩噪声

中图分类号: TN213; O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.003

Advances in Sb-based avalanche photodiodes

XU Jia-lin^{1,2}, LIU Ming^{1,2}, TAN Qi-guang¹, ZHANG Zhi-chao^{1,2}, XING Wei-rong^{1,2},

YU Hui^{1,2}, SUN Hao¹, WU Qing^{1,2}

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China;

2. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Beijing 100015, China)

Abstract: Sb-based avalanche photodiodes (APDs) have garnered significant attention in the field of infrared detection in recent years, due to their superior performance in gain, excess noise and temperature stability. These advantages have established them as key devices in many applications. This review summarizes the research progress made by domestic and international institutes regarding material systems and device architectures of Sb-based APDs. It compares the effects of different device structures on performance metrics and explores potential technical pathways for achieving higher gain and lower noise characteristics. Among the typical structures, the SAM structure appears to be the most promising candidate for future development. Finally, this paper provides a perspective on the future technological advancement of Sb-based APDs.

Keywords: photodetector; avalanche photodiode; antimonide; gain; excess noise

1 引言

在对远距离目标进行探测时, 普通探测器难以对很微弱的光信号实现收集。而雪崩光电二极管 (Avalanche Photodiode, APD) 可用于单光子探测并实现信号放大。硅基 APD 经过几十年的迭代, 已经基本成熟, 而其探测波段较窄 (可见光到近红外) 限制了它的广泛应用。为满足红外波段的应用需求, InGaAs/InP 与碲镉汞 (HgCdTe) APD 也得到了研究与开发。InGaAs/InP APD 过剩噪声因子 (Excess

Noise Factor, F) 偏大, 而 HgCdTe APD 在中长波红外暗电流较大, 限制了两者的发展。

锑化物具有独特的带隙结构和物理特性, 使其成为高性能光电探测器的重要材料。锑化物材料是以锑元素为核心, 与其余 V 族元素和 III 族元素共同构成的半导体^[1-2], 它是锑基 APD 的主要组成部分。锑基 APD 也是利用雪崩击穿机制实现载流子数倍增的器件, 它的主体部分是 PN 结。各锑化物的能带差异较大, 可以形成丰富的能带组合。锑基 APD 可以通

过调节组分来覆盖 $0.73 \sim 12 \mu\text{m}$ 波段^[2]。

锑基 APD 的发展历程可以追溯到 21 世纪初, 相关研究体现在材料制备与器件结构优化方面。早期研究集中在以 AlAsSb 材料为主的 PIN 结构上。后来发展到以 AlGaAsSb 和 AlInAsSb 等宽带隙材料作为 PIN/NIP 结构、分离吸收-倍增 (Separate Absorption and Multiplication, SAM) 结构的倍增层材料。近几年已经开发出多步阶梯 (staircase) 型结构。随着分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 技术的进步, 不仅能够实现高均匀性和低缺陷密度的材料生长, 还能实现随机合金向数字合金的转变。这些因素使得锑基 APD 的性能不断提升。

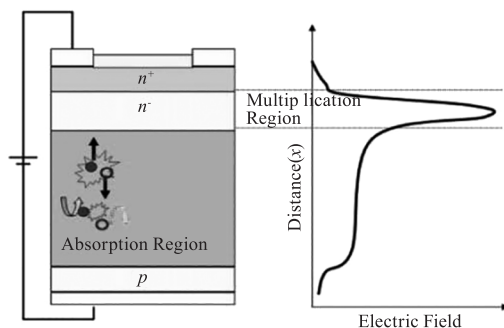
经过多年的研究与开发, 多个机构已经能够制备出性能稳定的单元器件。现在锑基 APD 在增益、暗电流和过剩噪声等参数上达到传统材料 APD 的水平。特别是在短波红外展现出低暗电流密度和高量子效率, 同时具备良好的热稳定性。以及因电离系数差异巨大而具有的低噪声性能, 使其在红外探测与成像、光通信、医学诊断等方面具有较大潜力^[3]。本文从锑基 APD 材料与器件结构、器件性能等方面出发, 分析国内外研究进展, 旨在为后续研发提供参考。

2 器件工作原理

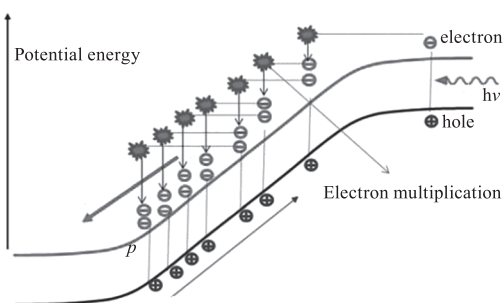
APD 电源接法与普通二极管相反, 并且施加较大的反向电压, 从而在低掺杂层形成较大的电场以触发载流子碰撞电离 (如图 1(a) 所示)^[4]。锑基 APD 属于单载流子工作器件, 即以电子形成雪崩倍增效应。图 1(b) 中的光子激发价带电子到导带上, 该电子在被电场加速到电离阈值能量后, 依概率发生碰撞电离, 从而产生电子-空穴对^[5]。光激发电子与电离产生的电子继续在电场加速下发生电离。如此循环往复, 最终形成电子的雪崩倍增。

对于由 III-V 族材料构成的 APD, 采用 minigap 和量子阱等能带工程手段, 可以进一步抑制空穴的电离。

图 2(a)、(b) 中导带电子有效质量较小, 因而易被电场加速到阈值能量, 从而发生碰撞电离。对于由随机合金 (Random Alloy, RA) 形成的普通 APD, 热化作用使得空穴达到阈值能量的难度远比电子要大。而对于由数字合金 (Digital Alloy, DA) 形成的超晶格 APD, 除了热化作用外, minigap 作为隧穿势垒阻挡空穴向更低价带移动, 使得空穴的碰撞电离更难发生, 从而进一步降低过剩噪声因子^[6]。

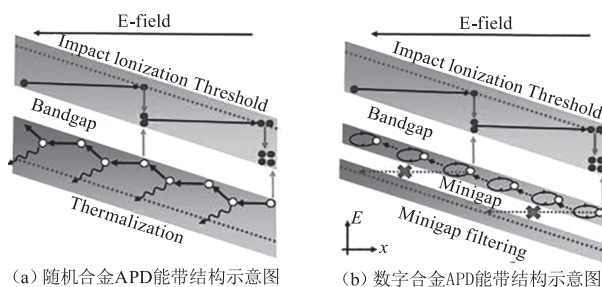


(a) APD 器件结构与电场分布示意图^[4]



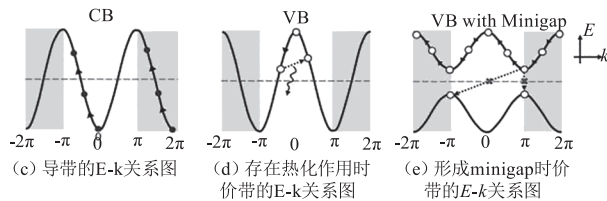
(b) 载流子碰撞电离与倍增过程示意图^[5]

图 1 APD 器件基本结构与载流子倍增示意图
Fig. 1 Schematic diagram of APD device structure and carrier multiplication process



(a) 随机合金 APD 能带结构示意图

(b) 数字合金 APD 能带结构示意图



(c) 导带的 E-k 关系图

(d) 存在热化作用时价带的 E-k 关系图

(e) 形成 minigap 时价带的 E-k 关系图

图 2 由 III-V 族材料构成的 APD 的能带结构示意图

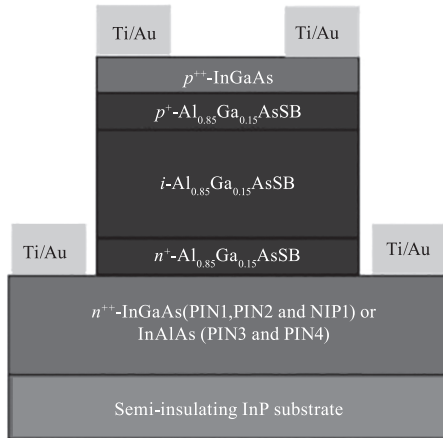
Fig. 2 Schematic diagram of the energy band structure of an APD made from III-V group materials

在器件结构设计方面, 锑基 APD 借鉴传统 APD 的思路, 早期采用 PIN/NIP 结构。在研制中波红外 APD 时, 为抑制窄禁带在强电场下的量子隧穿现象, 设计出 SAM 结构。为减少雪崩倍增过程的波动而提高信噪比, 开发出多步阶梯型结构, 使得增益更为稳定。器件一般为台面结, 因而需要在外缘进行钝化。

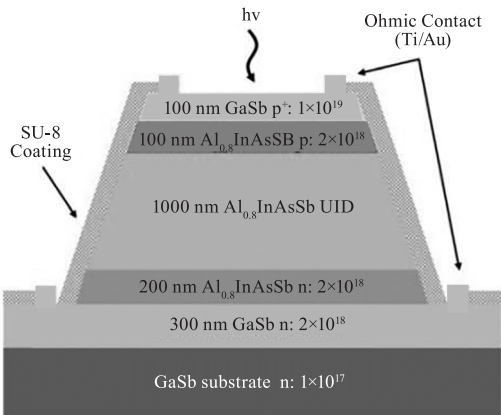
3 研究现状分析

3.1 PIN 与 NIP 结构

一般情况下,铋基 APD 的 P 区、I 区与 N 区是相同的材料,故而为同质结。P 区或 N 区在吸收光子后,将光生载流子注入到雪崩倍增层。I 区作为雪崩倍增层的主体,是此类结构的核心部件。它因电阻率比 P 区和 N 区更大,而承受更强的电场,从而产生载流子雪崩倍增效应(如图 3 所示)。



(a) Lewis等制备的PIN型APD器件结构示意图



(b) Jones等制备的PIN型APD器件结构示意图

图3 英国谢菲尔德大学与美国德克萨斯大学制备的PIN型APD示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the PIN-type APD fabricated by the University of Sheffield (UK) and University of Texas (USA)

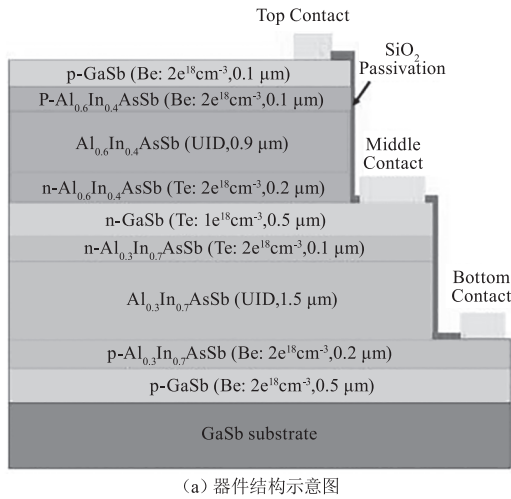
铋基 APD 早期的材料体系为 InGaAs/AlAsSb, 其晶格与 InP 衬底晶格匹配^[7]。Zhou^[8]实验发现在 AlAsSb 中加入适量的 Ga 能够在维持与 InP 衬底良好晶格匹配的同时减少器件表面漏电。David 团队后续的研究主要用 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ 随机合金作为倍增层材料。薄倍增层结构通过减少载流子渡越时间提升响应速度^[9], 而厚倍增层结构则用于增强特定条件下的探测效率^[10]。AlGaAsSb 材料因形成较大的间接带隙(1.56 eV)而降低隧穿电流, 从而具有更高的增益-带宽积上限, 可应用于高速通信。

Ng 等在 InP 衬底上制备的 $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ 薄倍增层(100 nm) APD 呈现出高达 424 GHz 的增益-带宽积^[11]。薄层 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ APD ($x = 0.05 \sim 0.15$) 在混合注入条件下有效电离系数比 k_{eff} 低至 0.05 ~ 0.1, 且纯电子注入可进一步降低过剩噪声因子至接近极限^[12]。由 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ 材料作为倍增层的 APD, 增益在宽温度范围(24 ~ 80 °C)内保持稳定, 即温度升高时增益下降幅度微弱。因为在高电场时合金散射占主导, 而声子散射减弱^[13]。这个原因也使得其雪崩击穿电压温度系数 (C_{bd}) 远低于传统材料。例如, 在薄层器件中温度系数低至 0.86 ~ 1.08 mV/K, 减少了对温度控制的需求^[14]。铋基 APD 在温度稳定性方面表现突出, 但不同结构和注入条件会导致性能差异^[15-16]。Ge 等^[17]研制的 PIN 型 APD 的室温暗电流密度低至 $16 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。在已经报道的 PIN 型(I 区厚度 1 μm) APD 中, 该暗电流密度最低。在 InP 衬底上外延高质量 AlGaAsSb 数字合金, 以及有效的表面钝化, 是其优异性质的来源。Cao 等^[18]的实验表明, 沉积 Al_2O_3 钝化层可以降低暗电流至 nA 数量级。故而对于铋基 APD, 他们认为 Al_2O_3 是最佳的钝化材料之一。

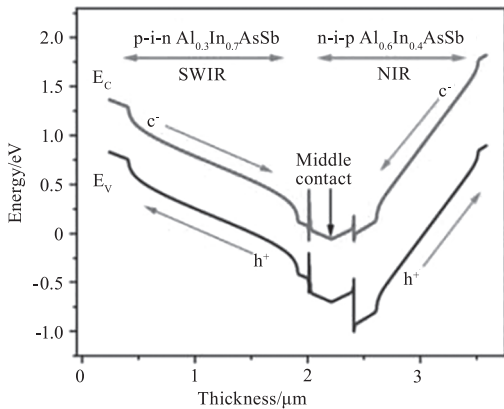
Lyu 等^[19]制备了 AlInAsSb 随机合金与数字合金 APD, 并进行了对比分析。他们指出随机合金会因偏析而出现分离相, 而数字合金通过迁移增强外延生长方法可以实现单相并且保持可重复性。考虑 Ga 原子的存在会引入本征缺陷, Campbell 与 Bank 联合团队研制的铋基 APD 的倍增层材料主要为 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ 。此外, 为规避随机合金的偏析问题, 他们从 2022 年开始采用 MBE 技术制备数字合金, 在维持碰撞电离系数基本不变的情况下使得 PIN 结构中各层厚度精准可调^[20]。 $\text{Al}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.23}\text{Sb}_{0.77}$ 材料在 GaSb 衬底上生长厚度为 1000 nm, 因非有意掺杂形成近本征的高增益 ($M = 489$) 区域^[21]。过剩噪声因子对应的电离系数比 (k) 低至 0.05 ~ 0.07。降低 Al 的组分至 $x = 0.3 \sim 0.7$, 可进一步降低电离系数比 ($k = 0.01 \sim 0.05$) 至接近硅基 APD ($k = 0.01 \sim 0.02$) 水平^[22-23]。他们通过优化制备工艺, 在室温下大幅提高增益 ($M > 1300$), 而且暗电流在 -40 V 偏压下维持在 nA 数量级^[24]。雪崩击穿电压可以通过优化掺杂分布来进一步维持温度稳定性^[25]。NIP 结构与 PIN 结构类似, 主要是对调了 P 区与 N 区的掺杂类型, 各区厚度基本不变^[20]。

Zhou 等^[26]尝试研制背靠背的 PIN & NIP 双结探测器, 用于双波段探测。在 300 K 下, 其中的子探

测器 APD 的截止波长为 1200 nm,最大响应度达 3.594 A/W@1064 nm,此时 $M = 15.5$ 。APD 可通过降低 $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$ 材料的 Al 组分来扩展截止波长至 5 μm 以上,如图 4 所示。



(a) 器件结构示意图



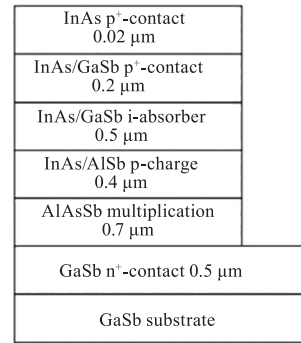
(b) 能带结构示意图

图 4 中国科学院半导体研究所 Zhou 等制备的 PIN & NIP 型双色探测器示意图

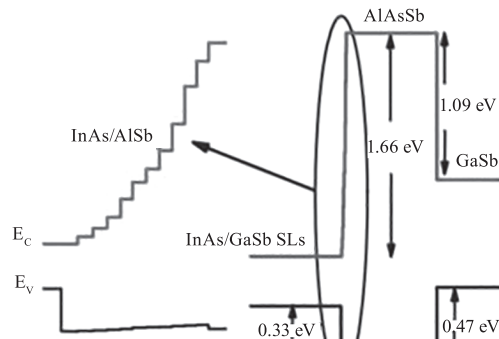
Fig. 4 Dual-band PIN & NIP photodetector fabricated by Zhou et al. at the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences

3.2 SAM 结构

PIN 和 NIP 结构使用的材料体系禁带较宽,可用于近红外与短波红外探测。即使在较强电场下,量子隧穿现象仍然不明显。对于中波红外,因材料的禁带较窄而更易产生隧穿电流。优化的方法是将吸收层与倍增层分离——利用窄禁带的吸收层吸收红外光,而利用宽禁带的倍增层实现雪崩倍增。在吸收层与倍增层之间常制备带隙梯度渐变层来保持良好的晶格衔接和电场平滑过渡,以及制备电荷层来减少异质界面的电荷积累。通过给吸收层施加低电场而给倍增层施加高电场,来降低暗电流并维持雪崩增益。如图 5 所示。



(a) 器件结构示意图



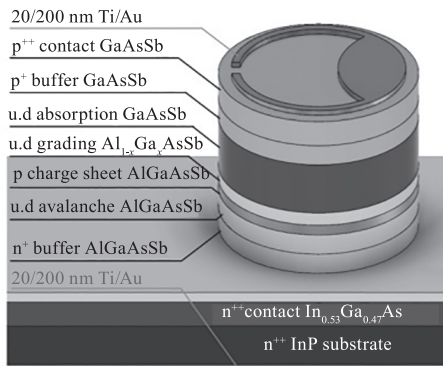
(b) 能带结构示意图

图 5 中国科学院半导体研究所 Yan 等制备的 SAM 型 APD 示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the SAM-type APD fabricated by Yan et al. at the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences

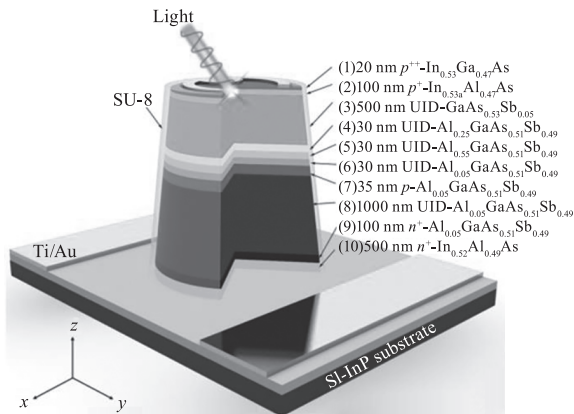
Xie 等^[27]在 2013 年用 InGaAs 材料作吸收层,而用 AlAsSb 材料作为倍增层,制备的 APD 的击穿电压温度系数很低 ($C_{bd} = 8\text{mV/K}$),显著优于硅基 APD 与 InGaAs/InP APD。Huang 等^[28]制备的 InAs/AlAsSb APD 在室温下的峰值响应波长为 3.27 μm ,响应度高达 8.09 A/W。该器件的探测率 (D^*) 在 3.27 μm 处为 $2.05 \times 10^9 \text{cm} \cdot \text{Hz}^{0.5}/\text{W}$ 。Yan 等^[29]用 InAs/GaSb 二类超晶格 (type II superlattice, T2SL) 作为吸收层,实现对特定波长红外光的高效吸收。测量了不同温度下的响应谱,并结合反向偏置电压计算了增益。随着温度的升高,增益呈下降趋势。原因是声子散射概率增加导致载流子动能损失。

Cao 等^[30]调整吸收层与倍增层材料为 GaAsSb/AlGaAsSb,制备的 APD 在 1550 nm 波长下的击穿电压温度系数大幅下降 ($C_{bd} = 4.31 \text{mV/K}$)。同时获得很低的过剩噪声因子 ($F = 1.52 @ M = 10$)^[31]。他们后来在维持低噪声增益 ($F = 1.9 @ M = 40$) 的同时,实现了极低的暗电流 (7 nA @ $M = 10$)^[32]。基于异质结构 (图 6 (a))^[33], Jin 等为延展探测波长,用 $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}_{0.19}\text{Sb}_{0.81}$ 作为吸收层 (0.45 eV) 而用 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ 作为倍增层 (1.6 eV),实现了

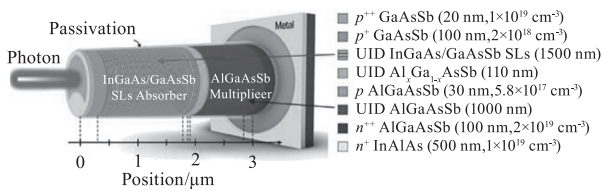
2.75 μm 截止波长的扩展短波红外 (e-SWIR) 探测。在 2 μm 处的外量子效率非常高 (EQE > 2000 %), 而噪声等效功率为 $1.69 \times 10^{-12} \text{ W/Hz}^{0.5}$ [34]。



(a) Cao等制备的SAM型APD器件结构示意图



(b) Lee等制备的SAM型APD器件结构示意图



(b) Jung等制备的SAM型APD器件结构示意图

图6 英国谢菲尔德大学与美国俄亥俄州立大学制备的SAM型APD示意图

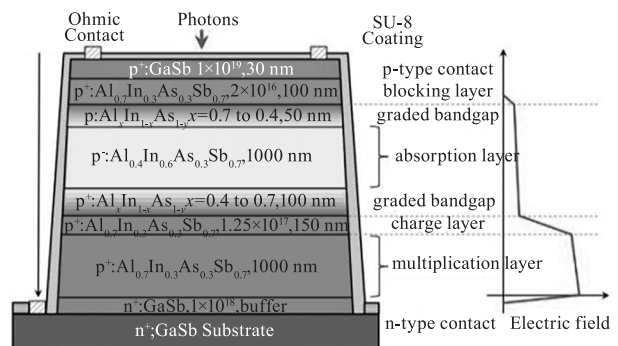
Fig. 6 Schematic diagram of the SAM-type APD fabricated by the University of Sheffield (UK) and The Ohio State University (USA)

Lee 等 [35] 为抑制 APD 表面泄漏电流, 通过柠檬酸湿化学刻蚀与 SU8 工艺实现侧壁保护, 同时降低背景掺杂浓度和优化掺杂分布。增益-带宽积为 11 GHz, 接近商用 InGaAs/InP APD。增益最大处 ($M = 70$) 的量子效率高达 5935.3 % [35]。在温度 250 K 时测试发现体暗电流是主要噪声源, 可以认为表面漏电已被有效抑制 [36]。后来 Jung 等 [37] 将吸收层做成二类超晶格, 提高室温增益到 178, 降低过剩噪声因子 $F < 2 @ M < 20$ 。而在 2 μm 处的外量子效率仍然高达 3560%。Gajowski 等 [38] 通过给 $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ 雪崩倍增层施加 210 ~

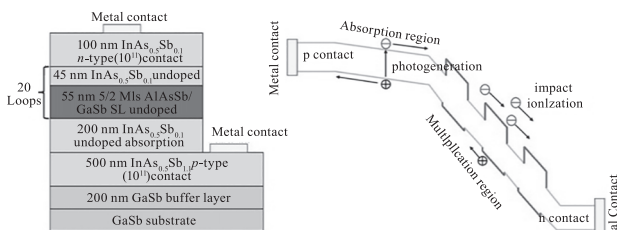
421 kV/cm 的电场, 测得电子电离系数 α 值 ($0.25 \sim 40 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$) 远比空穴电离系数 β 值 ($0.002 \sim 4.8 \times 10^3 \text{ cm}^{-1}$) 大, 证实了电子主导的雪崩倍增机制使得过剩噪声因子很小。

Campbell 与 Bank 联合团队的 SAM 型 APD 主要采用 AlInAsSb 材料。通过带隙梯度设计形成显著的导带偏移, 从而抑制带间隧穿效应并优化电场分布 [39-40]。Jones 等在 2 μm 处实现了很低过剩噪声因子 ($k = 0.01 @ M > 100$), 并在温度 200 ~ 200 K 时获得与碲镉汞 APD 相当的暗电流密度 [41]。此外, 器件设计中引入 P 型补偿以进一步平衡电场分布并提升增益 ($M = 380$) [42]。用 $\text{Al}_{0.05}\text{InAsSb}$ 作吸收层而 $\text{Al}_{0.7}\text{InAsSb}$ 作倍增层, 提升截止波长到 3.5 μm , 且在 100 K 时增益高达 850 [43]。值得注意的是, 暗电流密度在室温时低至 0.05 mA/cm², 而碲镉汞 APD 需在低温环境下才能达到如此水平 [43]。

Li 等 [44] 在 GaSb 衬底上生长 200 nm 的 InAsSb 未掺杂材料作为吸收层, 然后循环 20 次制备未掺杂的 55 nm AlAsSb/GaSb 与 45 nm InAsSb 超晶格量子阱作为 APD 的倍增层, 以增加载流子在倍增层碰撞电离的次数 (如图 7)。光生电子通过 InAsSb 吸收层注入超晶格多级倍增层, 触发雪崩效应。而 Dehngangi 等 [45-46] 通过给多量子阱设置合适的电子势垒层获得利于电子发生碰撞电离的结构。MWIR APD 在温度降到 150 K 时, 增益上升到 121, 此时的截止波长为 4.6 μm 。SWIR APD 在 300 K 时的 $k = 0.07$, 增益为 48 @ -50 V, 在 200 K 时增益升至 206。增益随温度升高而下降, 主要归因于载流子散射概率增加及动能损失 [46]。Guo 等 [47] 对倍增层能带结构进行优化, 使得导带出现较深量子阱, 而价带出现较浅量子阱。随着倍增层阶梯步数的增加, 电离系数比呈现下降趋势, 而增益可达 381。



(a) Ren等制备的SAM型APD器件结构与电场分布示意图



(b) Li等制备的SAM型APD器件结构与施加偏压时的能带结构示意图

图 7 美国弗吉尼亚大学与西北大学制备的 SAM 型 APD 示意图

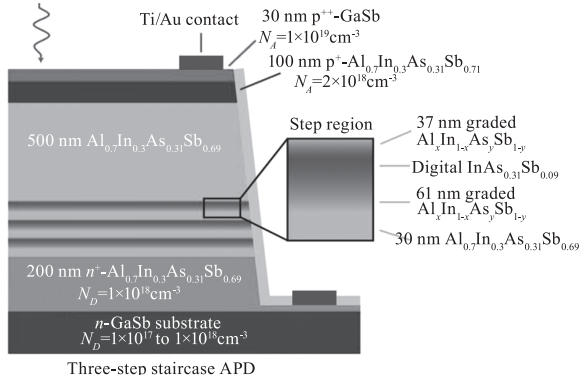
Fig. 7 Schematic diagram of the SAM-type APD fabricated by the University of Virginia and Northwestern University (USA)

3.3 Staircase 结构

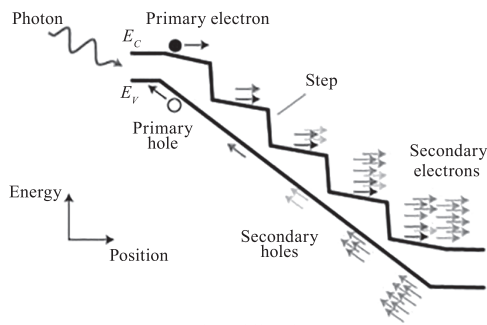
为进一步抑制载流子碰撞电离及倍增过程的随机性, Ren 等^[48] 在 2016 年提出了基于 AlInAsSb 数字合金的多步阶梯 (staircase) 型 APD。该结构通过异质交界面的能带阶梯设计, 实现了单电子触发的近乎确定性雪崩倍增。

对于窄带隙 III - V 族材料, 其电离阈值能约为 1.5 倍禁带宽度。由于导带能量落差是窄禁带材料的禁带宽度两倍多, 因而在能带不连续处容易产生电子碰撞电离倍增效应^[48]。故而增益产生机制主要来源于能带工程, 与传统 APD 的高电场激发有差异。阶梯型 APD 的噪声特性显著优于传统 APD。分级能带设计使得增益更为稳定, 从而进一步降低过剩噪声因子。理论研究指出, 过剩噪声因子与碰撞电离概率有关, 即 $F = 1 + \frac{1-P}{1+P} [1 - (1+P)^{-N}]$ 。随着电离概率的增大, 过剩噪声因子向 1 靠近^[49]。极低的过剩噪声因子与 McIntyre 理论^[50] 预测矛盾, 需引入 Weibull-Fr chet 分布模型解释。该模型表明, 仅靠电离系数不足以预测锑基 APD 的噪声行为^[10]。

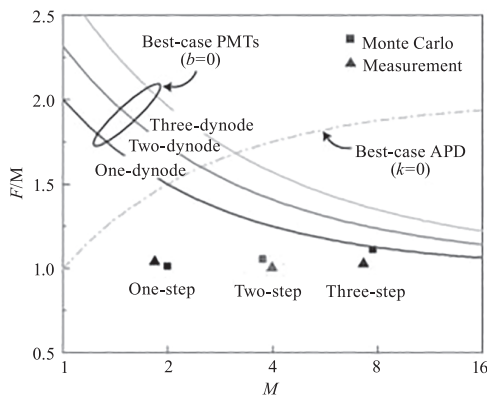
阶梯型 APD 通过多层合金台阶结构 (图 8) 优化载流子分布, 实现 2^N 倍理论增益^[51]。蒙特卡罗模拟得到的增益 $M = 1.95^N$, 在室温下实测 3 步阶梯型 APD 获得约 8 倍增益。模拟与实验表明, 过剩噪声因子 $F \approx 1$ ^[51]。



(a) Ren等制备的SAM型APD器件结构与电场分布示意图



(b) 能带结构示意图



(c) 过剩噪声因子实测值与理论分析、模拟结果对比

图 8 美国德克萨斯大学 March 等制备的 staircase 型 APD 示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the staircase-type APD fabricated by March et al. at the University of Texas (USA)

考虑阶梯型 APD 的增益受到阶梯数限制, McArthur 等^[52] 提出了级联倍增 APD 结构, 以提高碰撞电离次数。将低噪声阶梯式结构作为第一级, 结合第二级的高电场传统 APD, 其总的过剩噪声因子 (F_{total}) 可降至阶梯型 APD 的 50 % 以下。该结构通过插入电荷层来分隔低场阶梯区与高场倍增层, 有效抑制带间隧穿效应并降低暗电流密度。与纯阶梯型 APD 相比, 在相同增益下, 级联倍增 APD 的暗电流更小。该器件的制备难度较大, 可重复性有待验证。

3.4 小结

对于锑基 APD, 国内外主要研发机构以 PIN 与 SAM 为主要的器件结构。虽然都采用 MBE 技术, 但生长的材料体系略有不同。倍增层材料基于 AlAsSb 进行了适当调整。考虑到随机合金会产生偏析, 近几年器件制备更倾向于采用数字合金方式。这需要精确控制 III - V 比与阀门时序而提升了工艺难度。PIN 结构与 SAM 结构在器件性能上的差别不明显。相较而言, PIN 结构在增益方面略胜一筹。而 SAM 结构在过剩噪声因子方面较好。Staircase 结构的过剩噪声因子明显小于前两者, 接近极限。但其增益受限于制备的阶梯数而明显偏低。此外, SAM 结构在扩展红外探测波长方面更为可行。

表 1 国内外铋基 APD 主要研究机构的典型参数对比

Tab. 1 Comparison of key performance parameters of Sb-based APDs from leading research institutes worldwide

研究机构	器件结构	倍增层材料	电离系数比 k	过剩噪声因子 F	雪崩增益 M	暗电流 I_{dark}	温度系数 $C_{\text{td}}/(\text{mV} \cdot \text{K}^{-1})$
英国谢菲尔德大学 ^[12-15,30-34]	PIN 与 NIP	$\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$	0.05 - 0.1	$<2@M=20$	$<100@-12\text{ V}$	$<1\text{ mA}@-12\text{ V}$	0.86 ~ 1.08
	SAM	$\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$	0.01 - 0.05	$1.9@M=40$	$130@-65\text{ V}$	$<1\text{ mA}@-60\text{ V}$	4.31
美国弗吉尼亚大学与德克萨斯大学 ^[20-25,39-43,49,51]	PIN 与 NIP	$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	0.01 - 0.05	$<3@M<25$	$>1300@-45\text{ V}$	$<0.01\text{ mA}@-45\text{ V}$	5.4
	SAM	$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	0.01	$<2@M<11$	850	$<1\text{ mA}@-45\text{ V}$	6.7
	staircase	$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	≈ 0	≈ 1	8	-	-
美国俄亥俄州立大学 ^[35-37]	SAM	$\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$	0.01 - 0.07	$<2@M<20$	$278@-69.5\text{ V}$	$<1\text{ mA}@-70\text{ V}$	11.83
美国西北大学 ^[44-46]	SAM	$\text{AlAsSb}/\text{GaSb}/\text{InAsSb}$	0.07	$<4@M<50$	$206@-50\text{ V}$	$<1\text{ mA}@-50\text{ V}$	-
中国科学院半导体研究所 ^[26,28-29]	PIN 与 NIP	$\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{AsSb}$	-	-	$15.5@-40\text{ V}$	$<0.1\text{ mA}@-40\text{ V}$	-
	SAM	AlAsSb	-	-	$32.1@-29.4\text{ V}$	$<1\text{ mA}@-20\text{ V}$	-

除了线性工作模式, Taylor-Mew 等^[53] 尝试开发了盖革模式的 APD。其击穿电压温度系数为 13.5 mV/K, 远低于 InGaAs/InP 盖革模式 APD, 减少了工作电压的波动。

4 总结与展望

PIN 结构 APD 在增益、过剩噪声等方面表现良好。SAM 结构 APD 在维持较高增益的同时, 有效抑制暗电流并获得较小的过剩噪声因子, 而且可扩展探测波长。Staircase 结构 APD 的过剩噪声因子极小, 但其增益明显偏低。综合来看, SAM 结构最具研发前景。部分材料体系中存在的 Ga 原子本征缺陷使得少子寿命过短 (20 ~ 80 ns), 明显制约了光电器件性能的提升^[54]。无 Ga 化逐渐成为材料体系优化的发展方向。然而在去 Ga 过程中是否会产生新问题, 以及产生问题后如何解决, 还有待进一步研究。

器件结构创新是铋基 APD 性能提升的关键, 对 SAM 型 APD 的结构优化还有可深入的空间。同时结合铋化物材料体系的调整, 可扩展探测波段至长波红外。利用铋化物灵活的能带设计, 有望克服碲镉汞 APD 在长波红外暗电流较大的问题。未来的研发应探索制备焦平面阵列, 并推动其在硅基平台上集成, 以实现更低成本、更高性能的红外探测系统。由于铋化物材料的晶格常数较大, 其在硅衬底上的外延生长有一定难度。因此, 未来应进一步优化外延生长工艺, 以保证面阵材料质量和器件性能, 从而满足日益增长的应用需求。

参考文献:

[1] Liu C, Li Y B, et al. Progress in antimonide based III - V

compound semiconductors and devices [J]. Engineering, 2010, 2, 617 - 624.

- [2] Xie X M, Xu Q, et al. Research progress on antimonide based type-II superlattice mid-and long-infrared [J]. Laser Technology, 2020, 44 (6): 688 - 694. (in Chinese) 谢修敏, 徐强等. 铋化物 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.
- [3] Joe Campbell, John David, et al. Sb-based low noise avalanche photodiodes [J]. MDPI Photonics, 2023, 10: 715.
- [4] Anand Singh, Vanya Srivastav, et al. HgCdTe avalanche photodiodes: a review [J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43: 1358 - 1370.
- [5] Qiu W C. The carrier transport mechanism in new type of HgCdTe infrared detector [D]. Shanghai: Dissertation of Shanghai Institute of Technical Physics, The Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese) 邱伟成. 新型碲镉汞红外探测器载流子输运机理研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- [6] Sheikh Ahmed, Yaohua Tan, et al. Atomistic transport modeling, design principles, and empirical rules for low noise III - V digital alloy avalanche photodiodes [J]. Physical Review Applied, 2022, 17 (3): 034044 (1 - 15).
- [7] Shiyu Xie, Chee Hing Tan. AlAsSb avalanche photodiodes with a sub-mV/K temperature coefficient of breakdown voltage [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47 (11): 1391 - 1395.
- [8] Zhou X, Zhang S, et al. Avalanche breakdown characteristics of $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ quaternary alloys [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28 (22): 2495 - 2498.
- [9] Zhou X X, Lucas Pinel, et al. Thin $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ diodes with low excess noise [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2018, 24 (2), 3800105
- [10] Harry Lewis, Xiao Jin, et al. Anomalous excess noise be-

- havior in thick $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ avalanche photodiodes [J]. *Nature Scientific Reports*, 2023, 13: 9936.
- [11] Jo Ng, Chee Hing Tan. AlGaAsSb Avalanche Photodiodes [J]. *Optics Express*, 2018, 24: 24242 – 24247.
- [12] Jonathan Taylor-Mew, Vladimir Shulyak, et al. Low Excess noise of $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ avalanche photodiode from pure electron injection [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2021, 30(20): 1155 – 1158.
- [13] Salman Abdullah, Chee Hing Tan, et al. Investigation of temperature and temporal stability of AlGaAsSb avalanche photodiodes [J]. *Optics Express*, 2017, 25(26): 33610 – 33616.
- [14] Xinxin Zhou, Chee Hing Tan, et al. Thin $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ diodes with extremely weak temperature dependence of avalanche breakdown [J]. *Royal Society Open Science*, 2017, 4: 170071.
- [15] Xin Yi, Shiyu Xie, et al. Demonstration of large ionization coefficient ratio in $\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ lattice matched to InP [J]. *Nature Scientific Reports*, 2018, 8: 9107.
- [16] Xin Yi, Shiyu Xie, et al. Extremely low excess noise and high sensitivity $\text{AlAs}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ avalanche photodiodes [J]. *Nature Photonics Letters*, 2019, 13: 683 – 686.
- [17] Huachen Ge, Yan Liang, et al. Low noise low dark current AlAsSb/GaAsSb digital alloy avalanche photodiode [J]. *Optics Express*, 2025, 33(5): 10591 – 10598.
- [18] Peng Cao, Hongling Peng, et al. Surface passivation of random alloy AlGaAsSb avalanche photodiodes [J]. *Electronics letters*, 2023, 59(18): 12956.
- [19] Yuexi Lyu, Xi Han, et al. Digitally grown AlInAsSb for high gain separate absorption, grading, charge, and multiplication avalanche photodiodes [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2017, 482: 70 – 74.
- [20] Bingtian Guo, Xiao Jin, et al. Impact Ionization coefficients of digital alloy and random Alloy $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ in a wide electric field range [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(14): 4758 – 4764.
- [21] Ann-Katheryn Rockwell, Yuan Yuan, et al. $\text{Al}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.23}\text{Sb}_{0.77}$ Avalanche photodiodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 30(11): 1048 – 1051.
- [22] Min Ren, Scott Maddox, et al. Characteristics of $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ ($x: 0.3 - 0.7$) avalanche photodiodes [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(12): 2380 – 2384.
- [23] Seth Bank, Joe Campbell, et al. Avalanche photodiodes based on the AlInAsSb materials system [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(2): 3800407.
- [24] Andrew Jones, Ann-Kathryn Rockwell, et al. High gain, low dark current $\text{Al}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}_{0.23}\text{Sb}_{0.77}$ avalanche photodiodes [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(24): 1948 – 1951.
- [25] Bingtian Guo, Sheikh Ahmed, et al. Temperature dependence of avalanche breakdown of AlGaAsSb and AlInAsSb avalanche photodiodes [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(17): 5934 – 5942.
- [26] Wenguang Zhou, Yan Liang, et al. High responsivity short-wavelength dual-band photodetector based on AlInAsSb digital alloy [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2023, 133: 104763.
- [27] Jingjing Xie, Jo Ng, et al. An InGaAs/AlAsSb avalanche photodiode with a small temperature coefficient of breakdown [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2013, 5(4): 6800706.
- [28] Jianliang Huang, Chengcheng Zhao, et al. High-performance mid-wavelength InAs avalanche photodiode using $\text{AlAs}_{0.13}\text{Sb}_{0.87}$ as the multiplication layer [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(5): 755 – 759.
- [29] Shaolong Yan, Jianliang Huang, et al. Mid wavelength Type II InAs/GaSb superlattice avalanche photodiode with AlAsSb multiplication layer [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2021, 42(11): 1634 – 1637.
- [30] Ye Cao, Tarick Osman, et al. A GaAsSb/AlGaAsSb avalanche photodiode with a very small temperature coefficient of breakdown voltage [J]. *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(14): 4709 – 4713.
- [31] Ye Cao, Tarick Blain, et al. Extremely low excess noise avalanche photodiode with GaAsSb absorption region and AlGaAsSb avalanche region [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 122: 051103(1 – 5).
- [32] Xiao Collins, Benjamin Sheridan, et al. Low-noise AlGaAsSb avalanche photodiodes for 1550 nm light detection [J]. *SPIE*, 2023, 12417: 124170K(1 – 5).
- [33] Y. Cao, T. Blain, et al. GaAsSb/AlGaAsSb avalanche photodiode with high gain-linearity [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(10): 6161 – 6165.
- [34] Xiao Jin, Shouwei Zhao, et al. High-performance room temperature 2.75 μm cutoff $\text{In}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{As}_{0.19}\text{Sb}_{0.81}/\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}_{0.08}\text{Sb}_{0.92}$ avalanche photodiode [J]. *Optica*, 2024, 11(12): 1632 – 1638.
- [35] S. Lee, X. Jin, et al. High gain, low noise 1550 nm GaAsSb/AlGaAsSb avalanche photodiodes [J]. *Optica*, 2022, 10(2): 147 – 154.
- [36] M. Schwartz, H. Jung, et al. Development of antimonide based avalanche photodiodes for SWIR remote sensing applications [J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2023, 4720 – 4723.
- [37] Hyemin Jung, Seunghyun Lee, et al. Low excess noise and high quantum efficiency avalanche photodiodes for beyond 2 μm wavelength detection [J]. *Communications Materials*, 2024, 5: 219.
- [38] N. Gajowski, M. Muduli, et al. Impact ionization coefficient

- cients and excess noise characteristics of $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.07}\text{Sb}_{0.93}$ on GaSb substrate [J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126: 122101.
- [39] Min Ren, Scott Maddox, et al. AllInAsSb separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108: 191108.
- [40] Bingtian Guo, Mariah Schwartz, H. Jung, et al. InGaAs/AllInAsSb avalanche photodiodes with low noise and strong temperature stability [J]. *APL Photonics*, 2023, 8: 116112.
- [41] Andrew Jones, Stephen March, et al. Low-noise high-temperature AllInAsSb/GaSb avalanche photodiodes for 2 μm applications [J]. *Nature Photonics*, 2020.
- [42] Andrew Jones, Stephen March, et al. AllInAsSb separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiodes for mid-infrared detection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2022, 58(4), 4500306.
- [43] Adam Daddy, Andrew McArthur, et al. High-gain low-excess-noise MWIR detection with a 3.5 μm cutoff AllInAsSb-based separate absorption, charge, and multiplication avalanche photodiode [J]. *APL Photonics*, 2023, 8: 036301.
- [44] Jiakai Li, Arash Dehzangi, et al. Mid-wavelength infrared avalanche photodetector with AlAsSb/GaSb superlattice [J]. *Nature Scientific reports*, 2021, 11: 7104.
- [45] Arash Dehzangi, Jiakai Li, et al. Avalanche photodetector based on InAs/InSb superlattice [J]. *MDPI Quantum reports*, 2020, 2: 591 – 599.
- [46] Arash Dehzangi, Jiakai Li, et al. Low noise short wavelength infrared avalanche photodetector using Sb-based strained layer superlattice [J]. *MDPI Photonics*, 2021, 8: 148.
- [47] Yechuan Guo, Jing Yu, et al. Multi-step multiplication structure with low excess noise for the AllInAsSb avalanche photodiode [J]. *Journal of Electronic material*, 2024, 53: 8078 – 8086.
- [48] Min Ren, Scott Maddox, et al. AllInAsSb/GaSb staircase avalanche photodiode [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 108: 081101.
- [49] Adam Daddy, Andrew Jones, et al. Near-unity excess noise factor of staircase avalanche photodiodes [J]. *Optica*, 2023, 10(10): 1353 – 1357.
- [50] R. McIntyre. Multiplication noise in uniform avalanche photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1966, 13(1): 164 – 168.
- [51] Stephen March, Andrew Jones, et al. Multistep staircase avalanche photodiodes with extremely low noise and deterministic amplification [J]. *Nature Photonics*, 2021, 15: 468 – 474.
- [52] Andrew McArthur, Adam Daddy, et al. Demonstration of the AllInAsSb cascaded multiplier avalanche photodiode [J]. *Applied Physics Letters*, 2023, 123(4): 044106.
- [53] J. Taylor-Mew, X. Collins, et al. Development of InGaAs/AlGaAsSb Geiger mode avalanche photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(3): 1994 – 1998.
- [54] Liu S D, Fang D, et al. Advances in epitaxial growth, structural and optical properties of antimonide-based type-II superlattices [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2021, 42(2): 165 – 186. (in Chinese)
刘胜达, 房丹, 等. 铋化物 II 类超晶格材料外延生长、结构及光学特性研究进展 [J]. *发光学报*, 2021, 42(2): 165 – 186.