

短波红外单光子探测器的发展 (特邀)

史衍丽^{1,2*}, 李云雪^{1,2}, 白容^{1,2}, 刘辰^{1,2}, 叶海峰^{1,2}, 黄润宇^{1,2}, 侯泽鹏^{1,2},
马旭^{1,2}, 赵伟林^{1,2}, 张家鑫^{1,2}, 王伟^{1,2}, 付全³

- (1. 云南大学 物理与天文学院, 云南昆明 650000;
2. 云南大学 量子信息重点实验室, 云南昆明 650000;
3. 云南贵金属实验室有限公司, 云南昆明 650000)

摘要: InP/InGaAs 短波红外单光子探测器 (SPAD) 是目前制备技术较为成熟且获得广泛应用的单光子探测器, 通过半导体热电制冷 (TEC) 即可达到的工作温度 ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右), 具有体积小、成本低, 方便安装和携带的应用优势; 另外, 基于常规半导体二极管的芯片制造工艺很容易实现大面阵单光子阵列, 除了探测信号, 还具备三维数字成像功能。国外包括美国、瑞士、意大利、韩国、日本等对 InP/InGaAs SPAD 进行了长期持续的研究, 目前已研制出单管的货架产品, 性能还在不断的优化和改进之中, 其单光子探测器阵列呈现了清晰的三维成像效果, 正在逐步应用。国内包括重庆光电技术研究所、中国科学院上海技术物理所、西南技术物理研究所、中国科学技术大学、云南大学等对 InP/InGaAs SPAD 芯片先后进行了器件设计和器件制备研究, 目前单管的性能已经达到与国外报道相当的性能。国内单光子探测器阵列的研究获得了一定的进展, 但芯片规模和器件性能有待提升。文中对国内外 InP/InGaAs 短波红外单光子探测器的发展, 在设计和研制中存在的问题, 以及近 10 年来的优化改进进行了介绍, 重点介绍了高温、高速以及单光子焦平面阵列的发展, 并结合新颖的离化工程和新的材料体系发展, 分析了未来的短波红外单光子探测器的发展趋势。

关键词: 短波红外; 单光子探测器; InP/InGaAs; 高温; 高速; 单光子焦平面

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220908

0 引言

工作在通讯波段 1310 nm 和 1550 nm 波段的短波红外单光子探测器 (SPAD), 在光纤通讯、激光雷达、量子保密通讯等技术领域具有广泛的应用需求。结合对人眼安全的应用考虑, 1550 nm 短波红外单光子探测器体现出了更为广泛的应用, 同时也对高探测效率、高计数率、高温工作、低成本的单光子探测器提出了迫切的发展需求。

随着 InP/InGaAs 短波红外单光子探测器 (SPAD) 在材料结构、材料质量、工艺制备和淬灭电路等方面的不断改进和发展, 目前 InP/InGaAs SPAD 的性能获得了显著的提升, 探测效率典型值从 20% 提升到 30%, 而暗计数率进一步降低, 低于 $\text{kHz}^{\text{[1]}}$ 。另外一个

显著的性能提升是用以抑制器件后脉冲的死时间降低, 通过优化淬灭电路、采用负反馈单光子探测器等方法, 目前报道的死时间已经从 μs 量级提升到亚 $\mu\text{s}^{\text{[2]}}$ 。这对于高速应用提供了重要的芯片技术支撑。

对于 1550 nm 的单光子探测技术, 除了传统的 InP/InGaAs SPAD, 目前还发展了 Sb 基数字合金构建的低噪声材料体系、采用离化工程的多倍增 InP/InGaAs SPAD、InAlAs/InGaAs SPAD 等新材料、新结构探测技术, 使短波红外单光子探测芯片技术获得了快速的发展和进步。

文中对近 10 年来基于 InP/InGaAs SPAD 的技术改进进行了归纳总结, 分析了器件设计和研制中面临的主要问题、技术解决途径和取得的进展, 重点介绍

收稿日期: 2022-12-30; 修订日期: 2023-02-13

基金项目: 量子保密通信关键技术研究及开发 (2018ZJ002); 云南贵金属实验室科技计划项目 (YPML-2022050220)

作者简介: 史衍丽, 女, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事半导体光电器件物理与器件方面的研究。

了国内外高温、高速 InP/InGaAs 单光子探测器及焦平面阵列的发展,对探测效率、暗计数率、后脉冲和时间抖动等性能进行了对比分析;最后结合出现的离化工程、新机理新材料体系,探讨了短波红外单光子探测器未来的发展趋势。

1 InP/InGaAs 雪崩二极管探测器设计和研制面临的问题

InP 和 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 材料晶格匹配,但具有不同的带隙值,室温下两者的禁带宽度分别约为 1.35 eV 和 0.75 eV,因此,采用这两个材料作为倍增层和吸收层,一方面对应着截止波长 1.65 μm 的吸收,另一方面宽带隙 InP 倍增层可大大降低高电场下的隧穿电流。因此,分离吸收、渐变、电荷、倍增(即: separate

absorption, grading, charge, and multiplication, SAGCM) 结构一旦被发明和应用以来,一直沿用至今,如图 1(a) 所示,入射光在 InGaAs 吸收区中被吸收形成电子空穴对,在电场作用下光生电子空穴对被分开,空穴经过渐变层及电荷层漂移到 InP 倍增区。在倍增层中空穴与晶格碰撞产生新的电子空穴对,新的电子空穴对在电场中加速与晶格碰撞产生新的电子空穴对,该过程重复发生,载流子触发自持雪崩,使微弱的光信号转化为足以探测的电信号。结构中渐变层消除了 InGaAs-InP 异质界面处的空穴堆积;薄且高掺杂的电荷层调控了吸收区和倍增区的电场,使 SPAD 在工作时吸收区电场足够低以避免载流子隧穿,同时倍增区的电场足够高以确保载流子在倍增区能触发雪崩倍增,通过保护环降低边缘击穿。

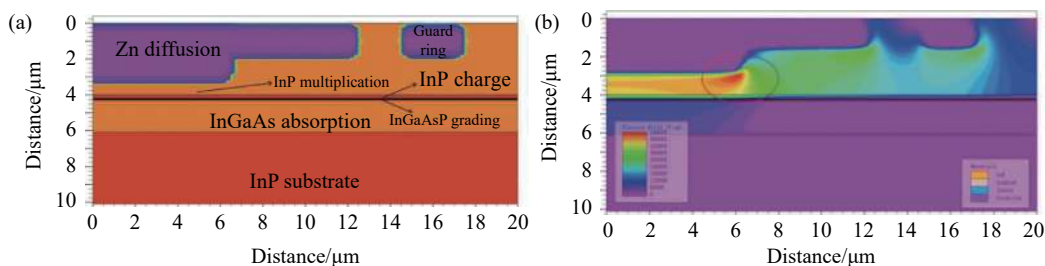


图 1 (a) InP/InGaAs SPAD 结构示意图; (b) 击穿时 SPAD 内部电场分布

Fig.1 (a) Schematic diagram of InP/InGaAs SPAD; (b) Electric field distribution inside SPAD at breakdown voltage

InP/InGaAs SPAD 设计的重点在于精确控制吸收区、倍增区的电场大小。根据 InP、InGaAs 材料的禁带宽度,为了避免发生带间隧穿,要求在两种材料内的电场不能高于 $7 \times 10^5 \text{ V/cm}$, $1.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$,而为了维持载流子在倍增区的雪崩和在吸收区的漂移,两种材料内最低的电场需要大于 $4.5 \times 10^5 \text{ V/cm}$, $1.0 \times 10^5 \text{ V/cm}$ 。为此需要优化设计电荷层、倍增层等材料参数,同时要求材料生长时能精确控制各层的掺杂浓度和厚度。

倍增区内的电场分布不均匀,尤其边缘尖峰电场会引入过早的边缘击穿,使器件无法正常雪崩,器件性能大大衰退。因此实际器件制备时通常要采用二次扩散和增加保护环来抑制边缘击穿,但器件内部仍存在不均匀电场,如图 1(b) 所示,图中给出了器件处于击穿电压下的电场的二维分布,其中的红圈位置是由于二次扩散时形成的尖角产生的不均匀区域,该区域内电场高于中心倍增区内的电场,导致过早的边缘

击穿和大的暗计数。因此实现均匀的雪崩电场也是 InP/InGaAs SPAD 设计和制备的一个重点。

针对以上两个关键问题,为了精确控制电场大小,并获得均匀的倍增区电场分布,目前主要采用以下几种方法:(1)使用以二甲基锌作为锌源的金属有机化学气相沉积(MOCVD)设备进行锌扩散,通过调整扩散参数包括 Zn 扩散温度、磷化氢超压和二甲基锌源流速等,优化电场分布和倍增区的缺陷分布。(2)采用两步同心扩散方法控制二极管中心区域的 p-n 结比外部区域更深。(3)在器件的中心处选择性生长未掺杂的锥形 InP 层,获得中心区薄、而边缘逐渐增厚的 InP 层,通过这一锥形 InP 层扩散铟,使 InP 中心区的掺杂比外围区更深,从而确保器件中心区电场高于边缘周围的电场。(4)增加电荷层浓度,在 InGaAs 吸收区中实现较低的电场,以减少来自吸收层场增强产生的暗计数率。

目前 InP/InGaAs SPAD 还存在着的一个问题是

后脉冲现象,这也是当前制约 InP/InGaAs 在高速应用中的一个瓶颈问题。这主要是由于 InP 倍增层里存在深能级缺陷,对倍增层里产生的大量雪崩载流子进行俘获,并慢慢释放导致虚假雪崩计数信号,后脉冲会增加暗计数,产生误计数。为了降低后脉冲概率,目前采用的主要方法有:(1)对 InP 材料生长技术和 SPAD 芯片工艺的持续改进;(2)适度降低雪崩载流子数,但这同时降低了探测效率;(3)通过增加两次雪崩之间的时间(又称之为死时间),使陷阱俘获的载流子获得充分的释放,从而降低后脉冲概率,但这大大降

低了最大计数率。(4)通过采用正弦门控的淬灭方式,减少雪崩时的门宽时间,降低雪崩量,从而减小后脉冲。

2 InP/InGaAs 单光子探测器性能改进

通过对器件结构参数的优化设计,在器件光入射窗口涂上抗反射涂层或增加微透镜,优化器件制备工艺条件使有源区电场更均匀,大大改善了 InP/InGaAs SPAD 的探测效率、降低了暗计数率,近 10 年国内外有代表性的进展如表 1 所示。

表 1 近 10 年报道的高探测效率 InP/InGaAs SPAD 的性能汇总

Tab.1 Summary of the InP/InGaAs SPADs with high detection efficiency reported in the past decade

Institution	Year	Detection efficiency	Temperature/K	Dark count rate/kHz	Time jitter/ps	Afterpulse probability
Politecnico di Milano	2012 ^[3]	>25%	225	100	<90	-
	2014 ^[4]	28%	225	few	87	-
	2021 ^[5]	11%-30%	225	1.46-6.47	340-119	1%-5.9%
University of Science and Technology of China	2020 ^[6]	40%	253	14.5	-	5.5%
	2022 ^[1]	30%	233	0.665	-	About 15%
Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences	2022 ^[7]	25.72%	223	9.09	-	-
Princeton Lightwave	2014 ^[8]	25%	225	6	-	-
	2020 ^[9]	>10%	233	<10	-	<10%
Chongqing Institute of Optoelectronic Technology	2017 ^[10]	20%	223	1	-	-
Yunnan University	2022 ^[11]	35.7%	233	3.3	-	-

探测效率是光电探测器的重要指标,表征了器件的光电探测能力。该效率是几个效率的乘积,包括量子效率、空穴被注入到倍增区的概率、空穴在倍增层触发雪崩的概率、雪崩被探测到的概率,因此,提高器件的量子效率可提高探测效率。2012 年,米兰理工大学^[3]报道了在原有的 SAGCM 结构顶部加上针对 1550 nm 光子优化的 200 nm SiN_x 抗反射涂层,以减少光子的反射,提高量子效率。该 SPAD 在 5 V 过偏压下,200 K 时,不同波长的光与探测效率关系如图 2 所示,对于 1550 nm 波长的光探测效率>25%,对于 1000 nm 的光探测效率为 40%。

2020 年,中国科学技术大学^[6]制备了平面背入射式 SPAD,通过增加介电-金属反射层,使入射光子的吸收效率相对提高 20%。在 1.25 GHz 正弦波门控和不同正弦门峰峰值条件下测试了暗计数率和探测效

率随温度的变化关系,测试结果如图 3(a)所示,其中门高峰峰值为 10.5 V,工作温度为 253 K 时,SPAD 的

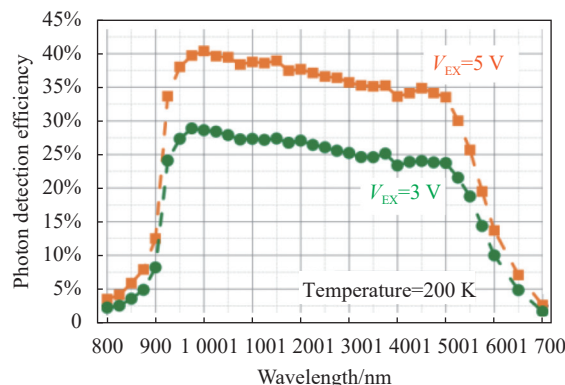


图 2 米兰理工大学 SPAD 探测效率与波长的关系^[3]

Fig.2 Relationship between different light wavelengths and SPAD detection efficiency from Politecnico di Milano^[3]

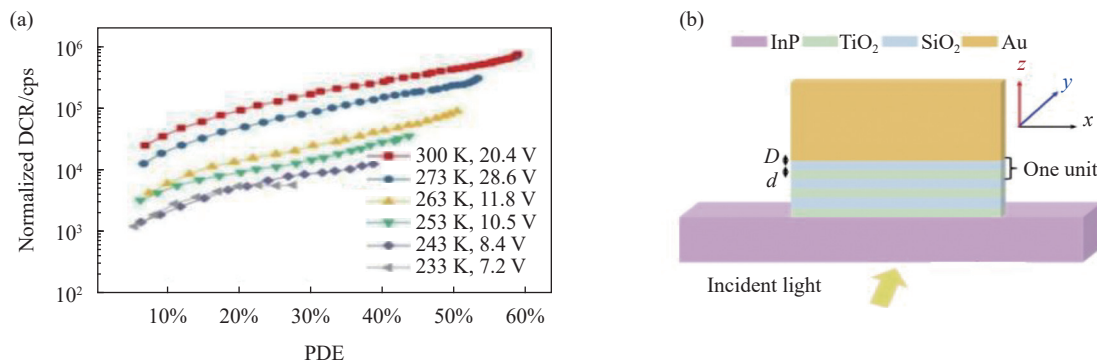


图 3 (a) 中国科学技术大学 1.25 G 正弦门控, 不同温度、不同峰峰值条件下探测效率与暗计数的关系^[6]; (b) 中国科学技术大学金属层和三个周期的 SiO₂/TiO₂ 布拉格反射镜组成的增强反射结构^[1]

Fig.3 (a) Relationship between detection efficiency and dark counts rate under different temperatures and different peak-to-peak values with 1.25 G sinusoidal gating from University of Science and Technology of China^[6]; (b) Enhanced reflection structure consisting of metal layer and three-cycle SiO₂/TiO₂ Bragg mirror made by University of Science and Technology of China^[1]

探测效率约 40%，暗计数率为 14.5 kHz (归一化)。

2022 年, 中国科学技术大学^[1] 提出在 p+掺杂 InP 接触层上增加由金属层和三个周期的 SiO₂/TiO₂ 布拉格反射镜组成的增强反射结构, 如图 3(b) 所示, 同时采用了微透镜的结构, 对 12 μm 有源区和 1.1 μm 吸收层厚度的 SPAD 吸收效率提高了 58%。在 233 K 温度下, 门控频率为 50 MHz 时, 探测效率分别为 10%、20% 和 30%, 对应的归一化暗计数率分别为 127 Hz、361 Hz 和 665 Hz。

暗计数率也是器件的一个重要性能指标, 器件在工作时, 希望探测效率高的同时暗计数尽可能低。暗计数率是器件在没有光照条件下, 单位时间内器件内部触发雪崩的次数, 是一个统计平均值, 表征 SPAD 的基本噪声。暗计数主要来源于 In_{0.53}Ga_{0.47}As 窄带隙吸收区材料热激发及 InP 倍增层里的隧穿, 为了减少由热激发带来的暗计数, 将 SPAD 降温是一种有效的方法。暗计数的另一主要来源是倍增层里的隧穿, 这主要是器件内部有源区高电场造成的, 电场的不均匀、局部电场高也会引起场致隧穿或缺陷辅助隧穿, 所以选择最佳的工艺条件使有源区电场更均匀, 减少材料缺陷也是降低暗计数可行的方法。

2014 年, 米兰理工大学^[4] 报道了使用以二甲基锌作为锌源的金属有机化学气相沉积反应器扩散锌, 通过改进锌扩散条件, 获得均匀的雪崩电场, 与之前的 SPAD 相比, 提高了探测效率同时降低了器件噪声, 实验结果如图 4 所示。有源区直径为 25 μm 的 SPAD,

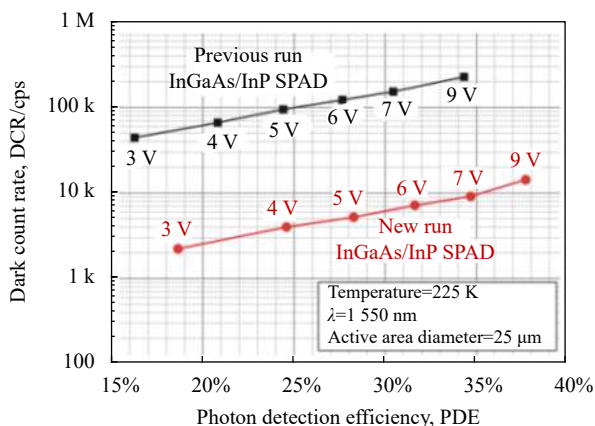


图 4 温度为 225 K, 2014 年米兰理工大学研制的 SPAD 性能对比, 相同探测效率暗计数率显著降低^[4]

Fig.4 Detection efficiency and dark counts rate comparison of improved and previous SPADs at 225 K from Politecnico di Milano in 2014^[4]

对于 1550 nm 的光, 在门控模式、5 V 过偏压, 温度为 225 K 时, 探测效率为 28%, 暗计数率只有几 kHz。

2021 年, 米兰理工大学^[5] 基于之前的实验数据及模拟数据, 进一步优化改进器件结构, 保持 InP 帽层厚度不变, 而锌扩散深度较浅, 使倍增区域较厚, 击穿时具有较低电场, 减少场增强载流子的产生; 增加电荷层中的电荷, 减少来自吸收区场增强产生的暗计数率, 在 InGaAs 吸收区中实现较低的电场, 整体改善雪崩二极管暗计数率。对于 10、25 μm 的 InP/InGaAs SPAD, 5 V 过偏压、温度为 225 K 时, 在门控模式下暗计数率分别约为 1、4 kHz; 而 10 μm 的 SPAD, 在

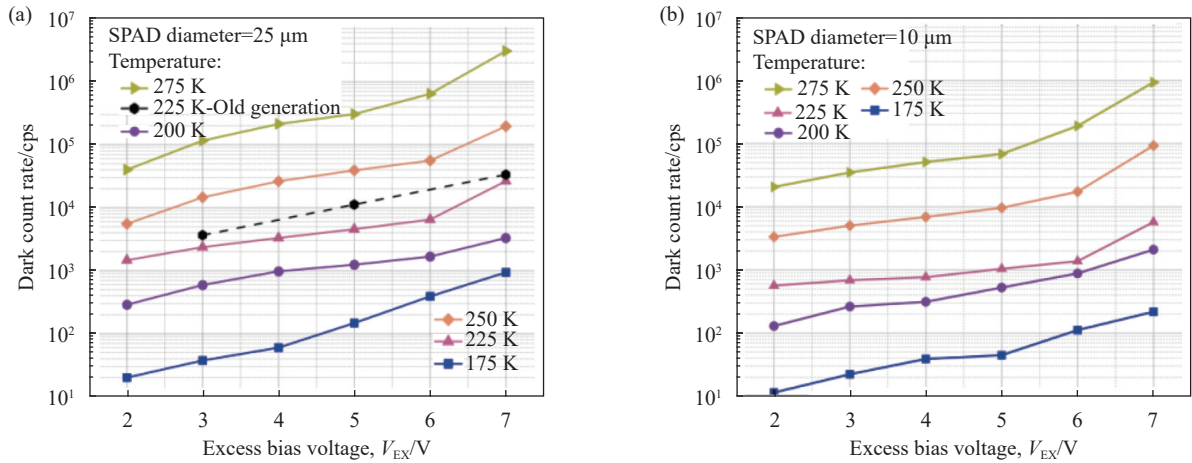


图 5 2021 年, 米兰理工大学直径为 25 μm (a)、10 μm (b) SPAD 不同温度下的过偏压与暗计数的关系^[5]

Fig.5 Relationship between excess bias voltage and dark counts rate of SPAD with a diameter of 25 μm (a), 10 μm (b) at different temperatures from Politecnico di Milano in 2021^[5]

175 K 温度下暗计数率降低到几十 Hz。不同温度下暗计数率与过偏压的关系如图 5 所示。

2017 年, 重庆光电技术研究所^[10] 基于 InP 顶层的掺杂浓度越低越有利于抑制边缘击穿, 降低隧穿暗载流子的产生速率, 提高雪崩击穿几率的理论计算结果, 制造了 InP 顶层为非故意掺杂层的 SPAD, 在 223 K 下获得了 20% 的单光子探测效率和 1 kHz 的暗计数率, 其探测效率比顶层掺杂浓度为 $5 \times 10^{15}/\text{cm}^3$ 的 SPAD 高 3%~8%, 而暗计数率低一个量级, 两种设计的 SPAD 温度与暗计数的关系如图 6 所示。

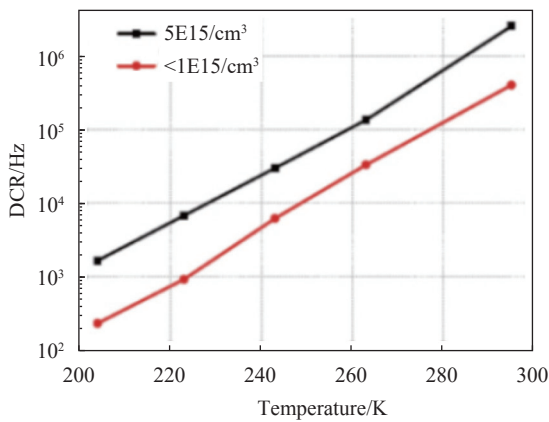


图 6 重庆光电技术研究所温度与暗计数率关系^[10]

Fig.6 Relationship between temperature and dark counts rate from Chongqing Institute of Optoelectronic Technology^[10]

2021 年, 云南大学^[11] 通过优化材料结构、材料质量和器件工艺, 制备了有源区直径为 12 μm 的 InP/InGaAs SPAD, 通过电容平衡和双脉冲雪崩信号提取

的门控淬灭方进行性能测试, 门控频率为 1 MHz, 门高 5 V, 1550 nm 激光的重复频率为 500 kHz, 每脉冲 1 个光子, 工作温度 233 K, 测得探测效率为 35.7%, 暗计数率为 3.3 kHz。

2022 年, 中国科学院半导体研究所^[7] 采用两步同心闭管扩散方法使二极管中心区域的 p-n 结比外部区域更深, 制备了无保护环结构的 SPAD。扩散时气压为 5×10^{-4} Pa, 扩散温度为 550 $^{\circ}\text{C}$, 两次扩散时间分别为 30 min 和 8 min, 器件中心和外围的 p-n 结深度分别为 2.5 μm 和 1.8 μm 。该有源区直径为 25 μm 的 SPAD 样品器件在门控模式下, 探测效率、暗计数与过偏压的关系如图 7 所示, 图中过偏压为 3 V 时, 探测效率

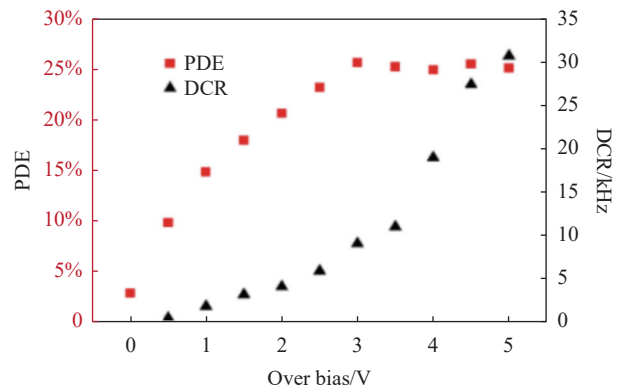


图 7 中国科学院半导体研究所研制的 SPAD 探测效率、暗计数率与过偏压的关系^[7]

Fig.7 Detection efficiency and dark counting rate versus overbias from the Institute of Semiconductors, University of Chinese Academy of Sciences^[7]

为 25.72%，暗计数率为 9.09 kHz。

3 高温工作的 InP/InGaAs 单光子探测器

InP/InGaAs SPAD 需要在低温 (约 230 K) 下工作, 以降低暗计数率, 但在低温时 SPAD 后脉冲大。若器件在室温条件下能保持可接受的暗计数率和探测效率, 对抑制后脉冲、提高计数率具有显著的优势。工作温度为室温或接近室温 (如零度以上, 通过一级 TEC 很容易实现) 被视为高温工作条件, 有别于常规

制冷单光子探测器, 高温工作的单光子探测器需要对暗计数进行特别的抑制, 一方面, 这需要在材料结构、器件结构上进行特殊的设计, 确保吸收区、倍增区与热有关的载流子激发、隧穿降至最小, 由此引发的暗计数最小, 暗计数率控制在可接受的范围内; 另外一方面, 通过运用正弦门控淬灭电路亚 ns 级的有效门宽, 减少暗计数, 也能使性能较好的单光子探测器在室温下工作。目前报道的高温器件性能如表 2 所示。

表 2 国内外报道的室温 SPAD 性能

Tab.2 Performance of SPAD operating at room temperature

Institution	Year	Temperature/K	Detection efficiency	Dark count rate/kHz	Afterpulse probability	Time jitter/ps
University of Shanghai for Science and Technology	2017 ^[12]	293	21%	551	1.4%	-
Woorio Co Ltd	2021 ^[13]	293	20.9%	5.1	0.8%	-
École Polytechnique Fédérale de Lausanne	2022 ^[14]	300	43%	4000	-	109
National University of Defense Technology	2018 ^[15]	294	10.6%	2.5×10^{-5} /gate	1.3%	-

2021 年, 韩国 Woorio 公司^[13] 设计制备了有源区直径小、具有背面微透镜的 InP/InGaAs SPAD, 如图 8

所示, 微透镜可以增强光线采集能力, 在减小有源区直径的同时提高填充因子。该 SPAD 在门控频率为

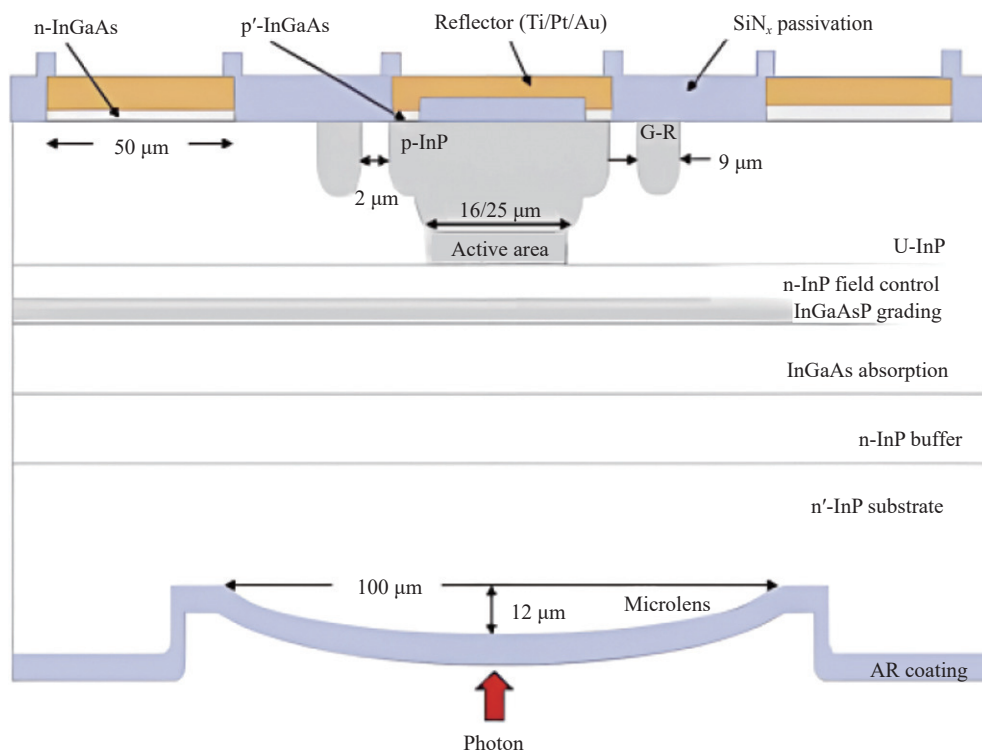


图 8 韩国 Woorio 公司设计的 SPAD 横截面图^[13]

Fig.8 Cross-sectional view of SPAD designed by Woorio Corporation^[13]

10 MHz, 门高为 6.6 V 的门控模式下, 对于 1550 nm 的光, 在 293 K 的工作温度下, 测得探测效率为 20.9%, 暗计数率为 5.1 kHz, 后脉冲概率为 0.8%。

2022 年, 洛桑联邦理工学院^[14]报道了 Zn 扩散之前, 在器件的中心处选择性区域内生长约 300 nm 厚的未掺杂的锥形 InP 层。Zn 扩散时通过锥形 InP 层, 使 InP 内部的掺杂轮廓向外围稳定过渡, 确保器件边

缘周围的电场低于中心, SPAD 截面图如图 9 所示。制成有源区直径为 70 μm 的 SPAD, 对于 1550 nm 的光, 温度为 300 K, 过偏压为 5 V 时, 探测效率为 32%, 暗计数率为 1.6 MHz, 时间抖动为 149 ps; 过偏压为 7 V 时, 探测效率为 43%, 暗计数率为 4 MHz, 时间抖动为 109 ps。

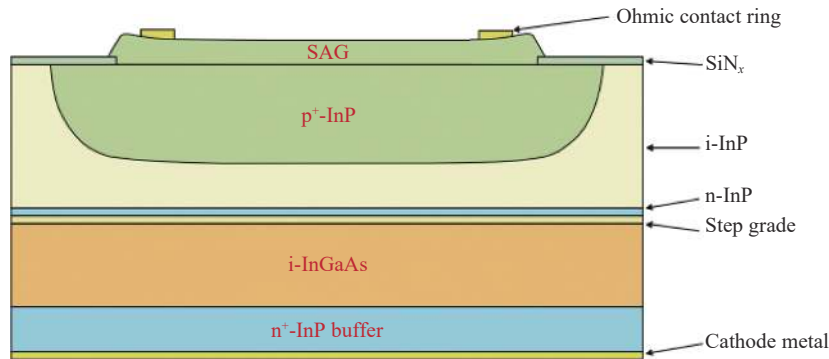


图 9 洛桑联邦理工学院 SPAD 结构图, SAG 部分为未掺杂的锥形 InP 层^[14]

Fig.9 Structure diagram of SPAD at Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, SAG part is an undoped tapered InP layer^[14]

门控模式下采用正弦门, SPAD 电容响应频率分布相对简单, 主要集中在门的重复频率及其谐波频率上, 采用低通滤波器很方便滤除噪声提取雪崩信号。2017 年, 上海理工大学^[12]采用两个 1.05 GHz 截止的低通滤波器, 其中一个在 1.5 GHz 频率下衰减高于 40 dB, 用于滤除尖峰噪声; 另外一个用于提高射频放大器放大的雪崩信号信噪比。对于该设计电路, 如果门控频率发生变化, 则只需相应地更改带通滤波器, 而无需更改用于消除尖峰噪声的组件。采用普林斯顿光波公司制造的 SPAD(型号为 PGA-300-1), 对于 1550 nm 的光, 温度为 293 K, 正弦门控频率为 1.5 GHz, 峰峰值为 14 V, 有效门宽为 145 ps, 探测效率为约 21%, 暗计数率为 551 kHz(归一化), 后脉冲概率为 1.4%。

2018 年, 国防科技大学^[15]报道了室温下门控频

率可调(从 900~1000 MHz)的取样电路研究工作。采用模数转换器将每个周期时钟内 APD 输出数字化, 调整采样时钟与门控延时以确保每个周期内准确地采样。采用普林斯顿光波公司生产的 InP/InGaAs SPAD, 对于 1550 nm 的光, 温度为 294 K 时, 正弦门控频率为 1 GHz, 门宽未知的门控模式下, 探测效率约 10.6%, 每门暗计数率为 2.5×10^{-5} , 后脉冲概率为 1.3%。

4 高计数率 InP/InGaAs 单光子探测器

InP/InGaAs SPAD 向高计数率发展面临的一个关键问题是死时间不断变短带来的后脉冲概率增大。通过采用正弦门、自差分等技术目前实现了 GHz 的高速 SPAD, 相关的性能指标如表 3 所示。

表 3 近 10 年报道的高计数率 InP/InGaAs SPAD 的性能汇总

Tab.3 Summary of the InP/InGaAs SPADs with high count rate reported in the past decade

Institution	Year	Method	Frequency/ GHz	Temperature/ K	Detection efficiency	Dark count rate/ kHz	Afterpulse probability
Nihon University	2020 ^[16]	Sine-wave gating	1.27	289	55.9%	2350	4.8%
Toshiba Research Europe Ltd	2015 ^[17]	Self-differencing	1	293	55%	-	10.2%
University of Science and Technology of China	2020 ^[6]	Sine-wave gating	1.25	300	60.1%	744	14.8%
ID Quantique	2019 ^[18]	Dual anode SPAD	1	253	20.4%	54.25	3.5%

4.1 正弦门控实现高计数率

日本大学的 Naoto Namekata 等人在 2006 年最早报道将 800 MHz 高频正弦门控技术应用到 InP/InGaAs SPAD 中用作门控淬灭^[19],从而开始了将高速门控 InP/InGaAs SPAD 最大计数率引领到 GHz 的水平。利用高频正弦门控亚纳秒量级门宽、超窄死时间,以及通过 SPAD 后输出信号纯净的频谱成分这三大特点,Naoto Namekata 等人在输出端口利用带阻滤波器滤去正弦门控信号及其高次谐波,成功从约 0.1 mV 的背景噪声中提取到了振幅约 1 mV 的微弱雪崩信号。通过不断优化系统,他们在 2009 年报道了正弦门控技术实现门控频率达到 2 GHz 的 InP/InGaAs SPAD^[20],并于 2011 年^[21]演示了超过 100 km 的量子密钥分发。在 2020 年^[16],报道了过偏压超过 12 V 的高探测效率的正弦门控 InP/InGaAs SPAD。在 1.27 GHz 门控频率下,55.9% 探测效率时,后脉冲概率仅为 4.8%,暗计数率为 2350 kHz (归一化)。利用正弦门控技术,日内瓦大学于 2010 年^[22]实现了迄今为止速度最快的 InP/InGaAs SPAD, 2.23 GHz 的门控频率,已经逼近 InP/InGaAs SPAD 的理论带宽极限。

2020 年,中国科学技术大学^[6]在温度为 300 K 时,使用门高峰峰值为 20.4 V,频率为 1.25 GHz 正弦门控,获得了探测效率为 60%,暗计数率为 744 kHz,和后脉冲概率为 14.8% 的结果。

4.2 自差分技术实现高计数率

2007 年,东芝欧洲研究有限公司^[23]使用他们提出的自差分技术实现 1.25 GHz 方波门控(方波幅值 4.6 V)下的高速 InP/InGaAs SPAD,自差分电路如图 10 所示。该技术原理是首先将 SPAD 阳极输出的信号用功率分配器分割为两路,其中一路输出信号被延时一个周期,接着再直接将这两路输出信号进行差分,消除 SPAD 容性响应及电路寄生电容电感响应,雪崩信号即很容易地被提取。该技术的优点是可以采用多种延时手段、自差分原理可以适应任意 SPAD 输出信号的波形,但雪崩互相抵消的缺点导致自差分技术的最大理想计数率仅为门频率的一半。

基于 2007 年报道的自差分电路技术,2015 年东芝研究欧洲有限公司^[17]优化了自差分模式,在该模式下使用频率为 1 GHz,门宽为 360 ps 的门控信号,

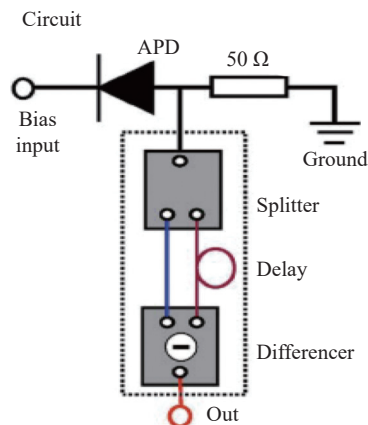


图 10 东芝欧洲有限公司自差分电路^[23]

Fig.10 Self-differential circuit at the Toshiba Research Europe Ltd^[23]

1550 nm 的激光,温度为 293 K, InP/InGaAs SPAD 探测效率与后脉冲概率关系如图 11 所示。当探测效率为 50% 时,死时间为零时后脉冲概率为 7%;当 InP/InGaAs APD 的探测效率为 55% 时,采集死时间为 10 ns 测量的后脉冲概率仅为 10.2%。

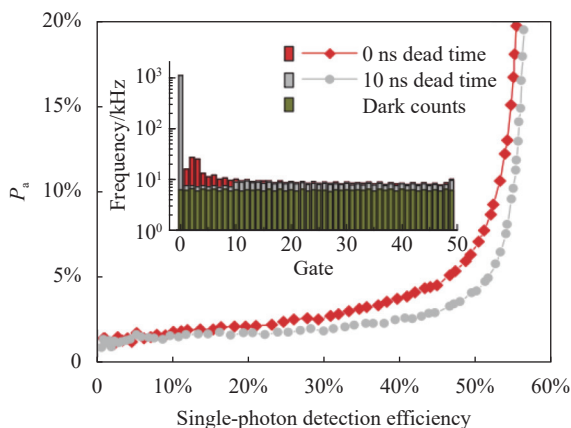


图 11 东芝研究欧洲有限公司在温度为 20 °C 的情况下,每次计数后应用和不应用 10 ns 死区时间的后脉冲概率值比较^[17]

Fig.11 Comparison of afterpulse probability with and without 10 ns dead time at temperature of 20 °C from the Toshiba Research Europe Ltd^[17]

5 InP/InGaAs 单光子探测器焦平面阵列

焦平面阵列具有广泛应用,特别是人眼安全的 1550 nm 的 InP/InGaAs SPAD 阵列,可用于三维成像、激光雷达等。像素之间的串扰问题是制约高密度阵列性能的主要问题。另外,焦平面阵列的均匀性是保证焦平面工作的重要参数,阵列中像素的击穿电压

越接近,其工作电压越接近,阵列工作条件实现越容易。阵列均匀性包括击穿电压均匀性、暗电流均匀性、探测效率均匀性、暗计数均匀性,通常通过阵列

元素的击穿电压分布、暗电流分布、暗计数分布、探测效率分布进行表征,目前国内外均有研究团队对焦平面阵列性能进行了报道,相关性能比较见表 4。

表 4 近 10 年 SPAD 焦平面阵列性能汇总

Tab.4 Summary of SPAD focal plane array performance in the past ten years

Institution	Year	Format/ pixel	Pixels pitch/ μm	Temperature/ K	Breakdown voltage/ V	Dark current/ nA	Average detection efficiency	Average dark count rate/kHz
Princeton Lightwave	2014 ^[8]	32×32	100	248	-	-	30.5%	2.2
		128×32	50	353	-	-	33.4%	6.8
Hamamatsu Photonics	2018 ^[24]	32×32	100	242	60	-	-	234
Chongqing Optoelectronics Research Institute	2015 ^[25]	8×8	150	235	68±0.2	0.273	19.5%	32.5
Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences	2022 ^[7]	64×64	150	293	58.5±1.5	<1	-	-
Lincoln Laboratory	2018 ^[26]	256×64	50	-	63±0.5	-	45%	-

美国普林斯顿光波公司 2014 年^[8]研制了具有单光子灵敏度的盖革模式焦平面阵列。该焦平面阵列包括三个部分:(1) InP/InGaAs 雪崩二极管阵列 (PDA); (2) 定制硅 CMOS 读出集成电路 (ROIC); (3) 一个 GaP 微透镜 (MLA) 阵列,以提高有效填充因子。将 InP/InGaAs PDA 与定制硅 ROIC 耦合后,将 MLA 对准并集成到 PDA 背面实现了 75% 的有效填充因子。最后通过与陶瓷针插板的键合实现与 ROIC 的电气连接。其阵列包括 32×32、128×32 两种规格,其中 32×32 规格的焦平面阵列中像素间距为 100 μm ,而 128×32 规格的像素间距为 50 μm 。用 1.06 μm 的光照射两种规格的焦平面阵列,每个脉冲每个像素 0.1 光

子,128×32 规格的暗计数、探测效率测试结果统计如图 12 所示。在温度为 253 K 下,阵列的平均探测效率为 33.4%,平均暗计数率为 6.8 kHz。

美国 MIT 林肯实验室 (Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory) 报道了采用自研的 256×64 的 1064 nm InP/InGaAsP SPAD 焦平面阵列^[27],阵列中心距 50 μm ,零度条件下探测效率 25%,暗计数率 10 kHz,完成了激光雷达三维成像,以下是对 Maynard 市 500 m×500 m 面积进行扫描的三维成像图,如图 13 所示,扫描时间 10 s,其中的颜色含有距离信息。

日本滨松光子 2018 年^[24]研制了规格为 32×32,

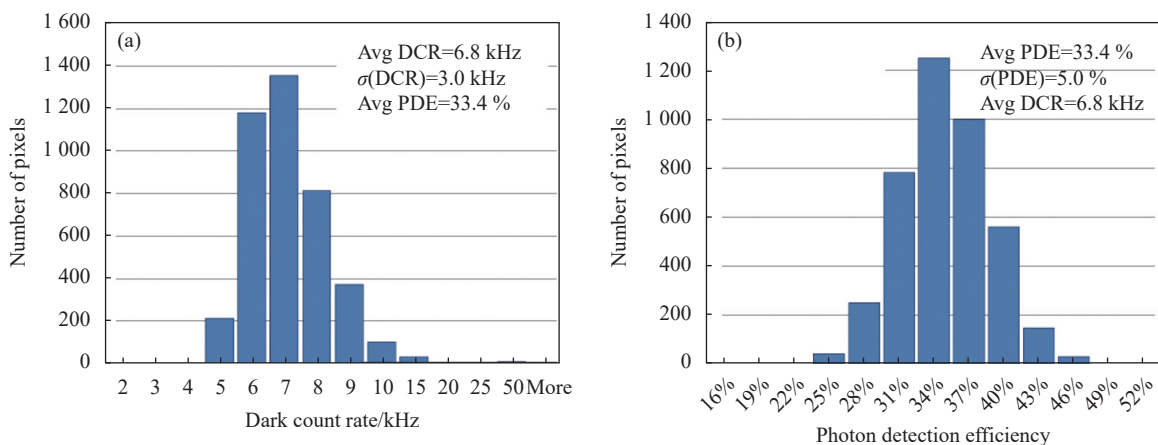


图 12 普林斯顿光波公司 128×32 盖革模式 SPAD 焦平面阵列的暗计数率、探测效率分布^[8]

Fig.12 Distribution of dark counts rate and detection efficiency of 128×32 Geiger mode SPAD focal plane arrays made by Princeton Lightwave^[8]

像素间距为 100 μm 的 InP/InGaAs SPAD 焦平面阵列, 通过在每个像素周围设置隔离槽, 以防止相邻像素之间的光串扰, 并阻断表面漏电流, 采用倒装键合技术实现阵列与集成读出电路之间的互连。该阵列像素的击穿电压在 60 V 附近, 在 242 K 时, 阵列暗计数、探测效率统计图如图 14 所示, 该阵列的平均暗计数率为 234 kHz, 99% 的阵列像素暗计数率低于 350 kHz。采用 1550 nm 的光源照射, 阵列像素的探测效率为 10%~12%。

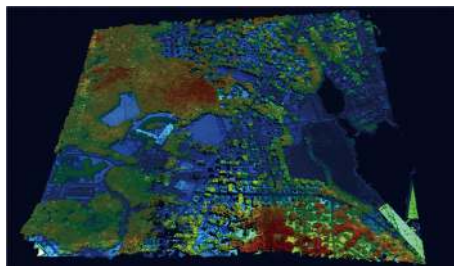


图 13 美国 MIT 林肯实验室对 Maynard 市的 500 m \times 500 m 目标面积的扫描三维成像图^[27]

Fig.13 Target-scan of a 500 m \times 500 m area of Maynard, MA. by MIT^[27]

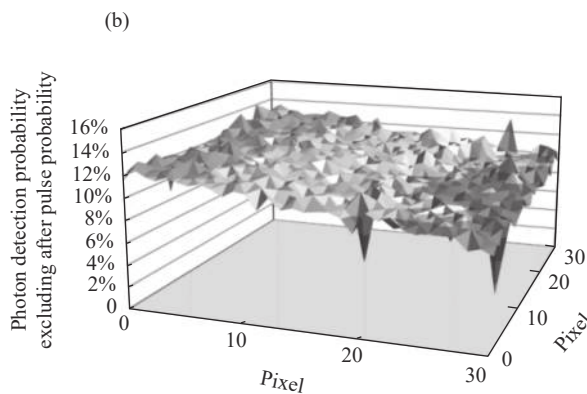
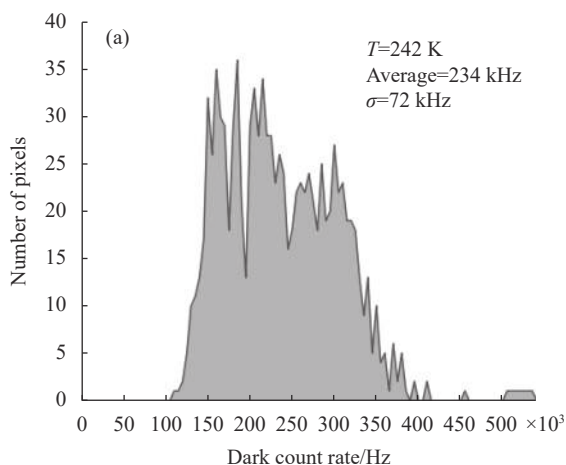


图 14 日本滨松光子 32 \times 32 焦平面的暗计数率、探测效率统计图^[24]

Fig.14 Statistical distribution of dark counts rate and detection efficiency of 32 \times 32 focal plane arrays from Hamamatsu photon^[24]

国内重庆光电技术研究所、中国科学院半导体研究所也报道了研制的单光子焦平面探测器。2015 年, 重庆光电技术研究所^[25]报道了规格为 8 \times 8, 像元中心距为 150 μm 的 InP/InGaAs 盖革模式焦平面阵列。该阵列采用 ICP 刻蚀形成隔离槽, 阻断相邻单元载流子的耦合通路, 抑制像元间的电串扰。在 InP 衬底背面采用光刻胶热熔法制作微透镜, 实现微透镜阵列的单片集成。在背部其余区域蒸发金属层, 作为 n 极共面引出, 在各单元 p 型扩散区蒸发金属层形成 p 电极, 通过 In 柱阵列制备与读出集成电路实现互连。该 InP/InGaAs SPAD 阵列的击穿电压为 68 V \pm 200 mV 范围内呈正态紧密分布, 标准偏差为 80 mV; 暗电流分布在 0.2~0.4 nA 范围内, 其均值为 0.273 nA, 阵列均匀性较好。

2022 年, 中国科学院半导体研究所^[7]设计了用于 1550 nm 波长的三维成像激光雷达系统的 64 \times 64 InP/InGaAs SPAD 阵列, 阵列中的二极管采用的是

SAGCM 结构, 其有源区直径为 25 μm , 像素间距为 150 μm 。阵列击穿电压、暗电流统计如图 15 所示。阵列内大多数阵列像素的击穿电压在 57 V 和 60 V 之间, 阵列击穿电压均匀地保持在 \pm 1.5 V 的范围内, 击穿电压处的暗电流低于 1 nA。

2023 年, 中国科学院上海光学精密机械研究所联合中国电波传播研究所^[28]共同研制了基于国内自研的 InGaAs 盖革模式雪崩光电二极管阵列探测器的小型化激光雷达系统样机。该样机可搭载于车载移动平台开展三维地形测绘, 其结构组成主要包括以下五个模块: 光纤激光器模块、阵列探测器模块、发射接收光学模块、扫描模块以及总控模块。其中探测器模块所用探测器为 64 \times 64 InGaAs 盖革 APD 阵列, 对于 1550 nm 波长的光子量子效率为 20%, 低温制冷条件下对应的暗计数率为 20 kHz。该三维成像激光雷达系统成像性能良好, 可实现动平台高分辨率三维成像。

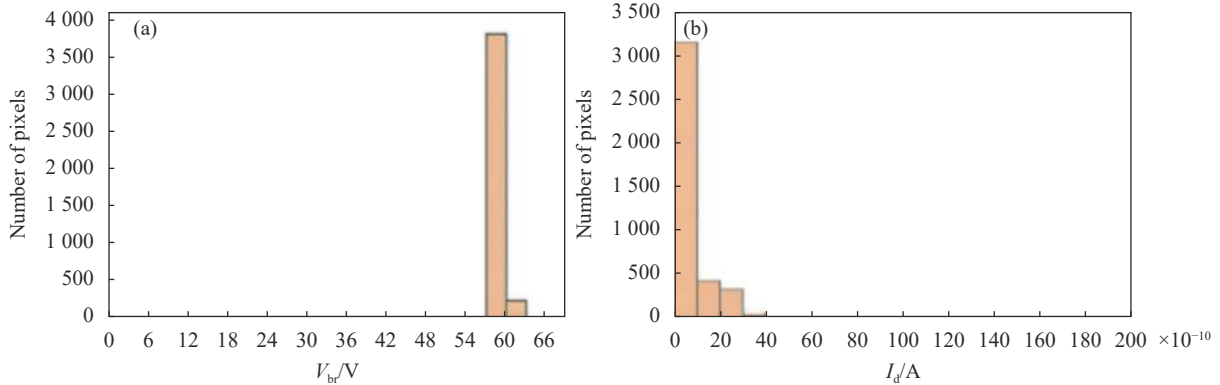


图 15 中国科学院半导体研究所 64×64 焦平面阵列击穿电压、暗电流分布^[7]

Fig.15 Distribution of breakdown voltage and dark current of 64×64 focal plane arrays from the Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences^[7]

6 未来的发展趋势

通过在器件倍增层增加离化工程,采用噪声因子更小、带隙更宽且与吸收层 InGaAs 晶格匹配的 In_{0.52}Al_{0.48}As 作为倍增层、或采用数字合金新材料等方法以进一步提高短波红外单光子探测器的性能。

6.1 离化工程

对于 SAGCM 结构的短波红外单光子探测器,载流子离化倍增时,存在死区效应而需要厚倍增层,这降低了器件的响应速度。因此,2006 年,康塞普西翁大学^[29] 报告了具有能量积累层的分离吸收倍增层结构 SPAD,该 SPAD 倍增层由宽带隙 In_{0.52}Al_{0.48}As 层(能量积累层)和 InP 层构成。由于能量积累层 In_{0.52}Al_{0.48}As 的离化能比 InP 的离化能高,InGaAs 层中的光生空穴进入能量积累层后在电场的作用下积累能量,设计 InAlAs 层的宽度略小于空穴死区,空穴在 InAlAs 层中碰撞电离的概率为零,但空穴进入 InP 层时,其能量超过在 InP 中的电离阈值能量,因此,空穴进入 InP 倍增区将不需要空穴死区立即电离,这样既保证了器件的探测效率,同时降低了器件的过剩噪声因子。

2018 年,美国海军实验室报道了基于碰撞电离工程制成的 InAlAs/InGaAs 雪崩光电二极管阵列^[30],该阵列的几何结构如图 16 所示,阵列包括一个中心像素和四个同心外围像素。阵列直径为 264 μm,中心元直径为 112 μm,相邻元素之间的距离约为 10 μm。阵列填充因子约为 85%,对于 1550 nm 波长的光、超过 80 GHz 的增益带宽积下测得的器件量子效率约为 84%。

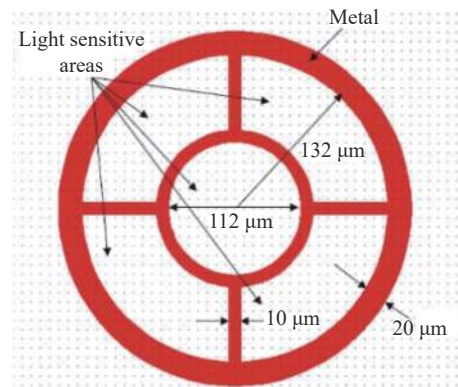


图 16 美国海军实验室 InAlAs/InGaAs SPAD 阵列结构图^[30]

Fig.16 Schematic diagram of the InAlAs/InGaAs SPAD arrays made by US Naval Laboratory^[30]

6.2 电子倍增 InGaAs/InAlAs SPAD

倍增层材料除了空穴倍增的 InP 材料外,可以用与 InGaAs 晶格匹配、电子倍增的 In_{0.52}Al_{0.48}As 作为倍增材料。相比于 InP, In_{0.52}Al_{0.48}As 带隙更宽,雪崩击穿电压的温度依赖性相对 InP 更不敏感,因此 InAlAs 材料的 SPAD 工作温度具有灵活性。与 InP/InGaAs SPAD 相比, InGaAs/InAlAs SPAD 具有高增益带宽积、低过量噪声、低温度系数和高灵敏度等优点。

2016 年,谢菲尔德大学^[31] 设计了用于探测 1550 nm 的 InGaAs/InAlAs SPAD。该 SPAD 采用 InP 基底,1700 nm InGaAs 作为吸收层,1000 nm InAlAs 为倍增层。对该探测器进行了不同温度下击穿电压的测试,如图 17 所示。由图中可知 InAlAs SPAD 的温度系数约为 50 mV/K,小于 InP 材料的温度系数约 100 mV/K。

运行于门控模式下,对 1550 nm 的光,温度为 210 K,探测效率为 26%,暗计数率为 10^8 Hz。

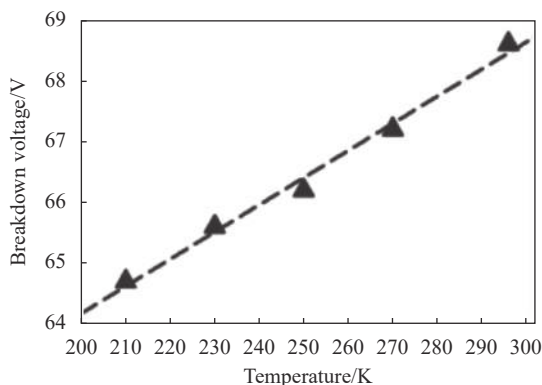


图 17 谢菲尔德大学 InGaAs/InAlAs SPAD 温度与击穿电压关系^[31]
Fig.17 Relationship between temperature and breakdown voltage of InGaAs/InAlAs SPAD at the University of Sheffield^[31]

2021 年,新加坡国立大学^[32]设计制造了能够抑制表面漏电流和过早击穿的三台面 InGaAs/InAlAs SPAD,结构如图 18 所示。该 InGaAs/InAlAs SPAD 在 150~270 K 的范围内,测得击穿电压的温度系数为 37.4 mV/K。在门控模式下,门控重复频率为 15 kHz、脉冲宽度(半峰全宽)为 20 ns、幅度为 10 V 的高斯脉冲,对于 1550 nm 的光,在 240 K 时探测效率为 35%,暗计数率为 3.3×10^7 Hz。

同年,新加坡国立大学^[33]通过低温片间键合技术,首次在一个共同的 SiO₂ 平台上集成光栅耦合器、波导耦合器以及三台面 InGaAs/InAlAs SPADs,如图 19 所示。对于 1550 nm 的光,在门控频率为 15 kHz,门宽为 20 ns 的门控模式下,温度为 220 K,获得探测效率约 22%,暗计数率为 8.6×10^5 Hz。

2022 年,华中科技大学^[34]制造了平面 InGaAs/InAlAs

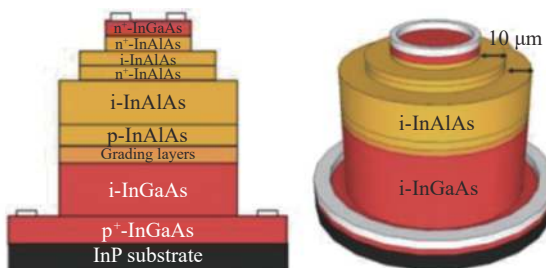
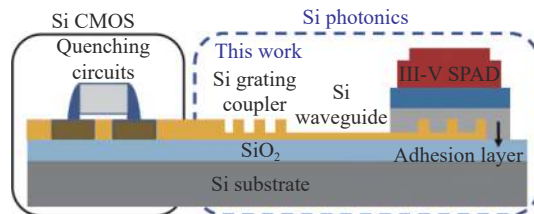


图 18 新加坡国立大学报道的 InGaAs/InAlAs SPAD^[32]

Fig.18 InGaAs/InAlAs SPAD made by National University of Singapore^[32]



The first heterogeneously integrated III-V SPADs on SOI substrate

图 19 新加坡国立大学制成的单片集成 InAlAs SPAD^[33]

Fig.19 Integrated single-chip with InAlAs SPAD made by the National University of Singapore^[33]

SPAD,器件截面图如图 20 所示,吸收层为 1000 nm 厚的未掺杂 InGaAs,倍增层为 200 nm 厚的未掺杂 InAlAs。对 1550 nm 的光,在门控频率为 100 MHz 的正弦门控模式下,温度为 290 K,探测效率为 10.4%,暗计数率为 3.1 MHz。

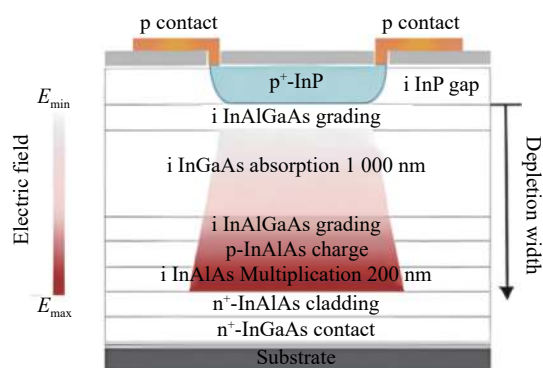


图 20 华中科技大学研制的 InGaAs/InAlAs SPAD^[34]

Fig.20 InGaAs/InAlAs SPAD made by Huazhong University of Science and Technology^[34]

6.3 AlInAlAsSb 数字合金雪崩光电二极管

GaSb 基的 $Al_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ 数字合金材料通过调整 $Al_xIn_{1-x}As_ySb_{1-y}$ 中 Al、Sb 的成分可调整材料带隙,有望制成高性能的雪崩光电二极管。

2018 年,美国弗吉尼亚大学^[35]制造了分离吸收、电荷、倍增(SACM)型的 $Al_{0.7}In_{0.3}As_{0.3}Sb_{0.7}/Al_{0.4}In_{0.6}As_{0.3}Sb_{0.7}$ 雪崩光电二极管,结构图及内部电场分布图如图 21 所示。室温条件下器件处于 95% 击穿时,暗电流约为 120 nA,与 AlInAs/InGaAs APDs 相当。将吸收层厚度调整为 3 μm 并在顶部添加抗反射涂层,对于 1550 nm 的光实现了大于 80% 的量子效率。

2020 年,中国科学院半导体研究所^[36]设计并制备了分离吸收、渐变、电荷和倍增(SAGCM)型的 AlInAsSb

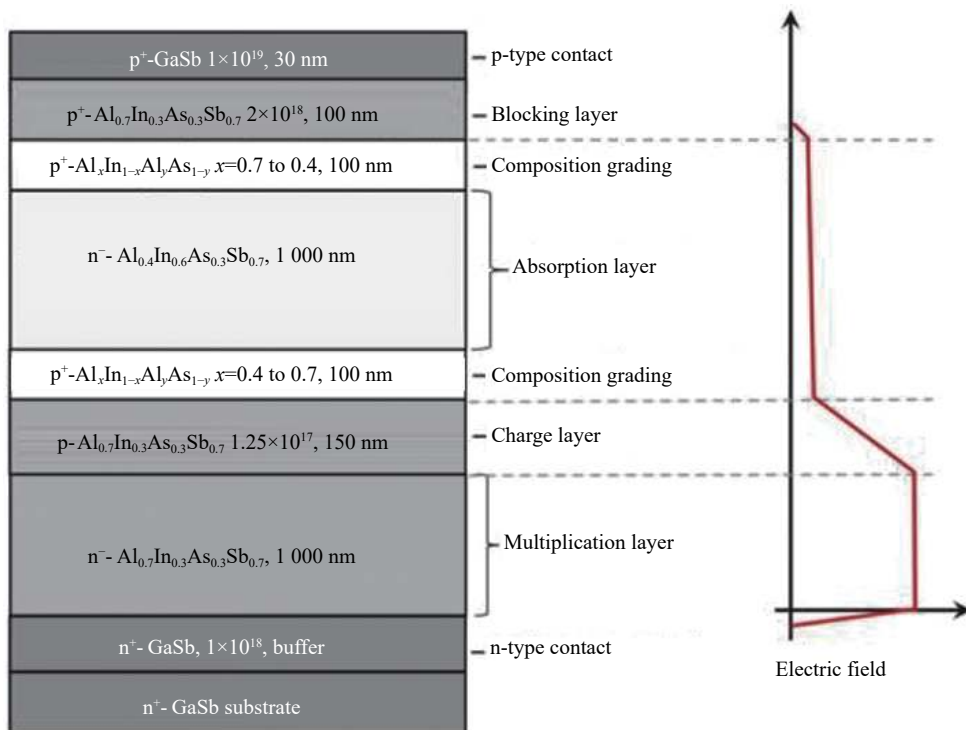


图 21 弗吉尼亚大学报道的 InAlAsSb 数字合金雪崩光电二极管材料结构^[35]

Fig.21 Material structure of InAlAsSb digital alloy avalanche photodiode from University of Virginia^[35]

数字合金雪崩光电二极管, 结构图如图 22 所示。在室温下, 该器件在击穿前获得的稳定增益高达 100, 95% 击穿电压时暗电流密度为 0.95 mA/cm²。

Sb 基 InAlAsSb 合金材料制备的雪崩光电二极管具有与 Si 相当的低过剩量噪声因子, 另外具有增益

稳定、带隙可调、室温下暗电流密度低等优势, 是发展高性能短波红外单光子探测器的一个重要材料选择。

7 结束语

近 10 年国内外研究团队通过优化器件结构、制备工艺以及雪崩信号提取电路显著提高了 InP/InGaAs SPAD 的性能, 高探测效率、低暗计数率、室温 InP/InGaAs 短波红外单光子探测器获得快速发展。提高工作温度到室温或零度以上高温, 是降低后脉冲的一个有效解决途径, 同时可显著减小封装体积、降低成本。具有更小温度系数、带隙更宽且与吸收层 InGaAs 晶格匹配的 InGaAs/In_{0.52}Al_{0.48}As SPAD, 其探测效率、暗计数率目前不如 InP/InGaAs SPAD, 需要进一步改进提高。随着对三维成像的巨大发展需求, 单光子焦平面阵列在规格和性能方面的提升是目前单光子探测器研究的一个重要工作。InAl-AsSb 合金材料制备的雪崩光电二极管显示了较高的量子效率和稳定的雪崩增益, 有望应用于高性能短波红外单光子探测器制备。

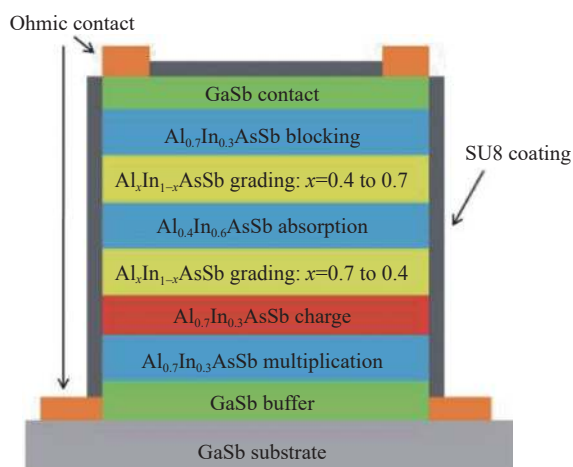


图 22 中国科学院半导体研究所研制的数字 InAlAsSb 合金雪崩光电二极管材料结构^[36]

Fig.22 Layer structure of InAlAsSb digital alloy avalanche photodiode from Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences^[36]

参考文献:

- [1] Zhang B, Yin S, Liu Y, et al. High performance InGaAs/InP single-photon avalanche diode using DBR-Metal reflector and backside micro-lens [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(12): 3832-3838.
- [2] Liu J, Xu Y, Li Y, et al. Ultra-low dead time free-running InGaAsP single-photon detector with active quenching [J]. *Journal of Modern Optics*, 2020, 67(13): 1184-1189.
- [3] Tosi A, Acerbi F, Anti M, et al. InGaAs/InP single-photon avalanche diode with reduced afterpulsing and sharp timing response with 30 ps tail [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(9): 1227-1232.
- [4] Tosi A, Calandri N, Sanzaro M, et al. Low-noise, low-jitter, high detection efficiency InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(6): 192-197.
- [5] Signorelli F, Telesca F, Conca E, et al. Low-noise InGaAs/InP single-photon avalanche diodes for fiber-based and free-space applications [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2021, 28(2): 1-10.
- [6] Fang Y, Chen W, Ao T, et al. InGaAs/InP single-photon detectors with 60% detection efficiency at 1550 nm [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2020, 91(8): 83102.
- [7] Wang S, Ye H, Geng L, et al. Design, fabrication, and characteristic analysis of 64×64 InGaAs/InP single-photon avalanche diode array [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51(5): 2692-2697.
- [8] Itzler M A, Entwistle M, Krishnamachari U, et al. SWIR Geiger-mode APD detectors and cameras for 3D imaging[C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9114: 91140F.
- [9] Beijing RMY Electronics Ltd. Pigtailed Coaxial Single Photon Avalanche Diode (SPAD) PGA-314-501. Product Description[Z], 2020.
- [10] Li Bin, Chen Wei, Huang Xiaofeng, et al. InP cap layer doping density in InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2017, 36(4): 420-424. (in Chinese)
- [11] Liu C, Ye H, Shi Y. Advances in near-infrared avalanche diode single-photon detectors [J]. *Chip*, 2022, 1(1): 100005.
- [12] Liang Y, Chen Y, Huang Z, et al. Room-temperature single-photon detection with 1.5-GHz gated InGaAs/InP avalanche photodiode [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(1): 142-145.
- [13] Baek S, Yang S, Park C, et al. Room temperature quantum key distribution characteristics of low-noise InGaAs/InP single-photon avalanche diode [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2021, 78(7): 634-641.
- [14] Kizilkan E, Karaca U, Pesic V, et al. Guard-ring-free InGaAs/InP single-photon avalanche diode based on a novel one-step Zn-diffusion technique [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2022, 28(5): 1-9.
- [15] Chen H, Jiang M, Sun S, et al. Room temperature continuous frequency tuning InGaAs/InP single-photon detector [J]. *AIP Advances*, 2018, 8(7): 75106.
- [16] Tada A, Namekata N, Inoue S. Saturated detection efficiency of single-photon detector based on an InGaAs/InP single-photon avalanche diode gated with a large-amplitude sinusoidal voltage [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2020, 59(7): 72004.
- [17] Comandar L C, Fröhlich B, Dynes J F, et al. Gigahertz-gated InGaAs/InP single-photon detector with detection efficiency exceeding 55% at 1550 nm [J]. *Journal of Applied Physics*, 2015, 117(8): 83109.
- [18] Park C, Cho S, Park C, et al. Dual anode single-photon avalanche diode for high-speed and low-noise Geiger-mode operation [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18201.
- [19] Namekata N, Sasamori S, Inoue S. 800 MHz single-photon detection at 1550-nm using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating [J]. *Opt Express*, 2006, 14(21): 10043-10049.
- [20] Namekata N, Adachi S, Inoue S. High-Speed Single-photon Detection Using 2-GHz Sinusoidally Gated InGaAs/InP Avalanche Photodiode[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 34-38.
- [21] Namekata N, Takesue H, Honjo T, et al. High-rate quantum key distribution over 100 km using ultra-low-noise, 2-GHz sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiodes [J]. *Opt Express*, 2011, 19(11): 10632-10639.
- [22] Jun Zhang, Patrick Eraerds, Nino Walenta, et al. 2.23 GHz gating InGaAs/InP single-photon avalanche diode for quantum key distribution[EB/OL]. (2010-02-17)[2022-12-30]. <https://arxiv.org/abs/1002.3240>.
- [23] Yuan Z L, Kardynal B E, Sharpe A W, et al. High speed single photon detection in the near infrared [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(4): 41114.
- [24] Baba T, Suzuki Y, Makino K, et al. Development of an InGaAs SPAD 2D array for flash LIDAR[C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10540: 105400L.
- [25] Zhang Xiuchuan, Jiang Liqun, Gao Xinjiang, et al. Fabrication of InGaAs/InP Geiger-mode avalanche focal plane arrays [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(3): 356-360. (in

- Chinese)
- [26] Aull B F, Duerr E K, Frechette J P, et al. Large-format Geiger-mode avalanche photodiode arrays and readout circuits [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(2): 1-10.
- [27] Albota M A, Gurjar R, Mangogna A, et al. The airborne optical systems testbed (AOSTB)[Z]. Lexington, Massachusetts, United States: MIT Lincoln Laboratory, 2017.
- [28] Chen Yongqiang, He Yan, Luo Yuan, et al. Pulsed three-dimensional imaging lidar system based on Geiger-mode APD array [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(2): 0210001. (in Chinese)
- [29] Ramirez D A, Hayat M M, Karve G, et al. Detection efficiencies and generalized breakdown probabilities for nanosecond-gated near infrared single-photon avalanche photodiodes [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, 42(2): 137-145.
- [30] Ferraro M S, Rabinovich W S, Mahon R, et al. Position sensing and high bandwidth data communication using impact ionization engineered APD arrays [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(1): 58-61.
- [31] Meng X, Xie S, Zhou X, et al. InGaAs/InAlAs single photon avalanche diode for 1550 nm photons [J]. *Royal Society Open Science*, 2016, 3(3): 150584.
- [32] Zhang J, Wang H, Zhang G, et al. High-performance InGaAs/InAlAs single-photon avalanche diode with a triple-mesa structure for near-infrared photon detection [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(11): 2670-2673.
- [33] Zhang Jishen, Xu Haiwen, Zhang Gong, et al. First InGaAs/InAlAs single-photon avalanche diodes (SPADs) heterogeneously integrated with Si photonics on SOI platform for 1550 nm detection[C]//2021 Symposium on VLSI Circuits, 2021.
- [34] Tian Y, Li Q, Ding W, et al. High speed and high sensitivity InGaAs/InAlAs single photon avalanche diodes for photon counting communication [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 5245-5253.
- [35] Bank S R, Campbell J C, Maddox S J, et al. Avalanche photodiodes based on the AlInAsSb materials system [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2018, 24(2): 1-7.
- [36] Zheng Danong, Su Xiangbin, Xu Yingqiang, et al. High gain and low dark current AlInAsSb avalanche photodiodes grown by quaternary digital alloys [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2021, 40(2): 172-177. (in Chinese)

Advancement of shortwave infrared single-photon detectors (*invited*)

Shi Yanli^{1,2*}, Li Yunxue^{1,2}, Bai Rong^{1,2}, Liu Chen^{1,2}, Ye Haifeng^{1,2}, Huang Runyu^{1,2}, Hou Zepeng^{1,2},
Ma Xu^{1,2}, Zhao Weilin^{1,2}, Zhang Jiaxin^{1,2}, Wang Wei^{1,2}, Fu Quan³

(1. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650000, China;

2. Key Lab of Quantum Information, Yunnan University, Kunming 650000, China;

3. Yunnan Precious Metals Laboratory Co. Ltd, Kunming 650000, China)

Abstract:

Significance InP/InGaAs shortwave infrared single-photon avalanche diodes (SPADs) have proved to be the most practical tool for the detection of near-infrared single-photon because of their small volume, near-room-temperature operation, and ease of integration and fabrication of a focal plane array based on the conventional semiconductor manufacturing process. They have achieved wide application including quantum secure communication, spectrum analysis, weak signal detection, Light Detection and Ranging (LiDAR), as well as self-driving vehicles considering the eye-safe laser requirement. etc. The further mass application depends on the performance and price of the SPADs, so the issues about the avalanche diode design and processing, as well as the solution are very important for accelerating the practical application. The review and analyses about the advancement of the shortwave infrared SPDs is very essential for both the academic research and application.

Progress The separate absorption, grading, charge, and multiplication (SAGCM) structure has been used for InP/InGaAs SPADs since it was designed. This ensures the low electrical field in InGaAs absorption layer and high field in multiplication layer, then tunnelling current arising from high electrical field in absorption layer is

remarkably suppressed, so the dark counts. Except for the essential material structure design, the electrical field uniformity in the multiplication layer also influences the performance such as the dark counts of the SPADs. The afterpulsing problem is another issue limiting the maximum count rate of the SPD in the current period. Focusing these issues of InP/InGaAs SPADs, solutions for them are concluded from the long-term study of InP/InGaAs SPADs.

The high detection efficiency SPADs, room-temperature SPADs, and high count rate SPADs reported in the past decade by various institutions at home and abroad are summarized in detail. The typical performance parameter detection efficiency is improved by increasing the quantum efficiency via integrated absorption enhancement structure, the reported maximum value for 1 550 nm is 60%. The room temperature operation SPADs was carried out by both decreasing dark counts and sine-wave gated-quenching technology. About 20% detection efficiency and kHz dark counts at 293 K are acceptable for the practical application. Besides, the especial promising result for the room temperature SPDs is the reduced afterpulsing owing to the shortened carrier lifetime under the high temperature. The GHz SPDs benefit from the high and narrow sine-wave gate, as well as the simple harmonic wave noise out of the sine-wave gated-quenching technology. The typical performance parameter of high detection efficiency, room-temperature and high count rate InP/InGaAs SPDs are shown (Tab.1-Tab.3).

Moreover, the InP/InGaAs SPAD focal plane arrays (FPAs) and the performance are concluded (Tab.4). The issues for the SPAD FPAs are mainly optical and electrical crosstalk between the adjacent pixels, solution such as mesa separation, microlens and optical filter, etc. are applied for decreasing the crosstalk. The clear three-dimensional image coded distance information was presented (Fig.13). The three-dimensional imaging with high sensitivity and long-distance detection ability attracts the enormous application requirement in both military and civil field. Finally, this paper introduces the novel SPDs technology including addition ionization engineering to the SPADs multiplication layer or using InAlAsSb digital alloys materials to further improve the performance. $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ with smaller noise factor, wider band gap and matching the InGaAs lattice of the absorbing layer is used as the multiplication layer for electron ionization. Multiple layer ionization is applied to SPADs for increasing the ionization rate and detection efficiency.

Conclusions and Prospects During the last decade the InP-based shortwave infrared single-photon detectors (SPDs) has gained the dramatic progress, the typical detection efficiency of the InP/InGaAs SPADs has been increased from 20% to 30%, and the dark count rate has been reduced to less than kHz. The high temperature SPADs up to room temperature operation, high speed SPADs up to GHz has appeared owing to the improvement of both avalanche diode and quench circuit. The single-photon focal plane arrays of 256×64 have also presented the clear three-dimensional image.

The foreign countries including the United States, Switzerland, Italy, South Korea and Japan, etc. have performed long-term research on InP/InGaAs SPADs, and developed commercial self-products. Domestic research groups have successively prepared InP/InGaAs SPAD chips, and the performance is comparable to foreign reports. Furthermore, single-photon detector arrays have made certain progress, but the device format and performance need to be improved. Novel SPDs technology such as low noise factor material and ionization engineering are expected to further improve the performance. The high performance and low cost shortwave SPDs will further facilitate the quantity application including weak signal detection, LiDAR and digital imaging etc.

Key words: shortwave infrared; single-photon detector; InP/InGaAs; high temperature; high speed; single-photon focal plane arrays

Funding projects: The Major Science and Technology Project of Yunnan Province under Grant (2018ZI002); Science and Technology Program of Yunnan Precious Metals Laboratory (YPML-2022050220)