量子通信技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20251212001

InGaAs/InP单光子焦平面探测器研究进展

朱泓遐[1,2]，蔡竟宇[1,2]，李倩林[1,2]，雷久华[1,2]，胡志远[1,2]，叶海峰[1,2]，
赵华良[1,2]，刘　辰[1,2]，史衍丽[1,2]*
（云南大学1. 物理与天文学院；2. 量子信息重点实验室，昆明 650500）

摘　要： InGaAs/InP单光子焦平面探测器因在近红外波段具备单光子级探测灵敏度、易于集成及近室温工作等优势，已成为量子通信、三维成像、深空光通信及生物医学成像等领域的关键光电探测器件。随着单光子探测应用对空间分辨率与采样速率要求的不断提升，研制高密度、高填充因子、低串扰的单光子焦平面阵列已成为领域内的重要技术挑战与研究热点。文章系统综述了InGaAs/InP单光子焦平面阵列的研究进展，涵盖其工作原理、主要性能参数，以及国内外主要研究机构在关键技术方面取得的最新成果，并在此基础上展望了该领域未来的发展趋势与面临的主要挑战。

关键词： 焦平面阵列；单光子；InGaAs/InP；量子通信；SPAD
中图分类号： TN215　**文章编号：** 1001－5868(2026)02－0226－16

Research Progress in InGaAs/InP Single-Photon Focal Plane Arrays Detectors

ZHU Hongxia[1,2], CAI Jingyu[1,2], LI Qianlin[1,2], LEI Jiuhua[1,2], HU Zhiyuan[1,2], YE Haifeng[1,2],
ZHAO Hualiang[1,2], LIU Chen[1,2], SHI Yanli[1,2]
(1. School of Physics and Astronomy; 2. Key Lab of Quantum Information of Yunnan Province, Yunnan University, Kunming 650500, CHN)

Abstract: InGaAs/InP single-photon focal plane arrays (FPAs) are widely used as core optoelectronic detectors in various advanced technologies (including quantum communication, 3D LiDAR imaging, deep-space optical communication, and biomedical imaging) owing to their limited single-photon detection sensitivity in the near-infrared region, ease of integration, and near-room-temperature operation capability. Propelled by surging demand for higher spatial resolution and sampling rates in single-photon detection applications, the development of high-density, high-fill-factor, and low-crosstalk single-photon FPAs has become a key technological challenge and a major research focus. This paper provides a systematic review of the research progress in InGaAs/InP single-photon FPAs, covering their operating principles, key performance parameters, and the latest achievements in critical technologies by major research institutions worldwide. Furthermore, the future development trends and challenges in this field are discussed.

Key words: focal plane arrays; single-photon; InGaAs/InP; quantum communication; SPAD

收稿日期：2025－12－12.
基金项目：云南省重大科技项目(202402AC080001)；云南省贵金属实验室科技计划项目(YPML-2022050220).
* **通信作者：**史衍丽

0　引言

量子信息技术的发展高度依赖单光子信号的可靠捕获与解析。高性能单光子探测器作为信号探测的核心器件，其性能直接决定了量子信息系统实际应用的上限。目前，主流的单光子探测器包括：光电倍增管（PMT）[1-2]、超导纳米线单光子探测器（SNSPD）[3-4]及单光子雪崩二极管（SPAD）[5-7]。PMT 虽具备高增益和低暗计数的优点，但其体积庞大、工作电压高，难以满足现代量子系统小型化、集成化的需求。SNSPD 拥有极高的探测效率和极低的暗计数，但其必须依赖复杂的液氦制冷系统来维持几 K 的超低温运行，导致系统成本高昂、体积庞大，规模化应用受限。而 InGaAs/InP SPAD，不仅能够覆盖 1 550 nm 的光纤通信低损耗窗口，还可在约 240 K 的热电制冷温度下实现高性能单光子探测，兼具优异的探测效率与系统实用性。

随着三维成像、多通道并行探测需求的增加，InGaAs/InP SPAD 的发展正由单点探测向阵列化集成演进，通过将其阵列化可实现大规模、高密度的 InGaAs/InP 单光子焦平面阵列（Single-photon FPAs）探测器。然而，目前 InGaAs/InP Single-photon FPAs 的发展仍面临诸多技术瓶颈，如较高的暗计数率、有限的探测效率、较低的填充因子以及显著的像素间串扰等问题。

本文系统综述了 InGaAs/InP Single-photon FPAs 的最新研究进展。首先，介绍了其工作原理及关键性能参数；随后，重点分析了国内外主要研究机构在提升探测效率、扩大阵列规模、优化填充因子、抑制串扰、电气保护和读出电路（ROIC）等方面取得的最新成果；最后，总结了该领域当前的技术挑战，并对未来的发展方向进行了展望。

1　SPAD 结构及工作原理

SPAD 通常采用吸收层与倍增层分离结构（SAGCM）[8]，以实现内部电场的分区调控，图 1 为 SPAD 结构和电场分布图。其中，窄带隙材料构成吸收层（如：InGaAs，E_g≈0.75 eV，对应 1 550 nm 探测窗口），该层设计为低电场，在保障光生载流子高效输运至倍增层的同时，可有效抑制因带间隧穿引起的暗电流。宽带隙 InP 材料（E_g≈1.35 eV）作为倍增层，该层设计为高电场，使载流子有足够的能量发生碰撞电离。在吸收层与倍增层间引入渐变层有助于缓解异质结界面的载流子堆积，而薄电荷层则用于精确调控吸收层与倍增层的电场分布。

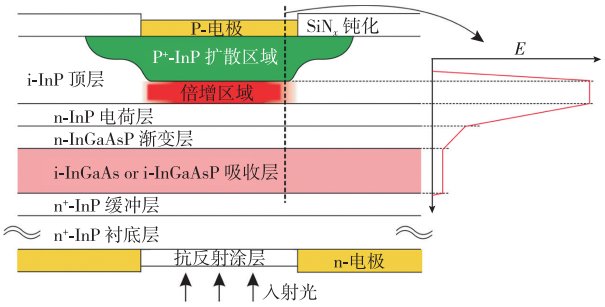


图 1　InGaAsP/InP SPAD SAGCM 结构和电场分布图[9]

InGaAs SPAD 工作原理如图 2 所示，其具有两种工作模式[10]。

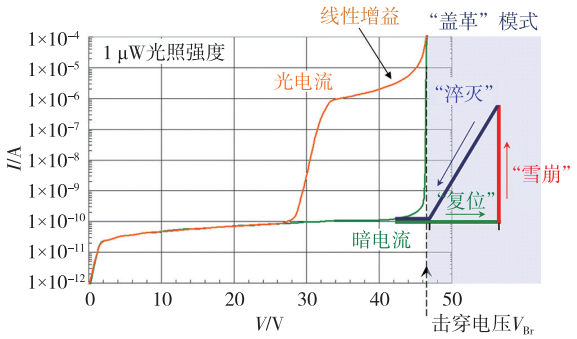


图 2　InGaAs/InP SPAD 的两种工作模式[11]

（1）线性模式：当 SPAD 工作电压 V 低于击穿电压 V_{Br}，即 $V<V_{Br}$ 时，其增益为 10^1～10^2 量级，与入射光功率成正比。此模式下需重点优化增益、暗电流及过剩噪声因子。

（2）盖革模式（Gm）：当 SPAD 工作电压高于 V_{Br}，$V>V_{Br}$ 时，倍增层处于高电场下，吸收层吸收单光子产生的光生空穴输运至倍增层后，在高场作用下与晶格碰撞电离，触发自持的雪崩效应，增益达 1×10^5～1×10^6。产生的电流信号无需放大即可直接被外部电路提取，实现光子信号数字化。需注意的是，自持雪崩一旦被触发，必须通过外部淬灭电路迅速将偏压降至 V_{Br} 以下以终止雪崩，随后电路将偏压重置至高于 V_{Br}，使 SPAD 复位至待探测状态。

2　Single-photon FPAs 及主要性能参数

2.1　Single-photon FPAs

Single-photon FPAs 结构示意图如图 3 所示，主要由光电二极管阵列（PDA）、读出电路、微透镜阵

列(MLA)三部分组成。通过把单个单光子探测器(称为像素)集成为PDA,与ROIC互联后PDA中的每个像素单元通过雪崩倍增效应将探测到的光子转化为宏观电流信号,并将信号输出至ROIC。MLA键合到PDA上,将入射光聚焦至每个像素的光敏区,在减小像素尺寸的同时,有效提升了阵列的填充因子。

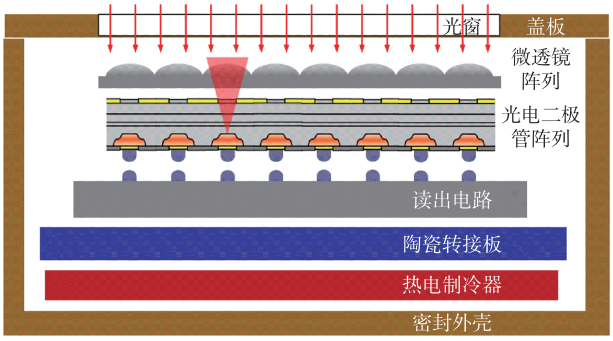


图3 Single-photon FPAs结构示意图[21]

ROIC为PDA上的每个像素提供独立偏置电压、信号提取及淬灭控制。ROIC主流架构分两类[12]:

(1)同步ROIC,全局时钟驱动所有像素同步工作,单周期每个像素仅一次探测机会,其雪崩后需等待整个FPAs探测周期结束,才可以进行下一次探测。每秒采样率低,但具备中等功耗与高集成优势,已在256×256阵列得到验证[13]。

(2)异步ROIC,事件驱动架构,支持像素级独立响应与快速复位,实现高频率探测与低延迟,主要应用于自由空间的脉冲位置调制(PPM)激光通信应用[14],但面临高功耗、像素数据量大的挑战,当前报道完成验证的最大阵列仅为32×32[15]。

Single-photon FPAs安装于半导体热电制冷器(TEC)上,并封装于带有抗反射涂层光窗的密封管壳内,以确保稳定的热管理与光学性能。目前的封装主要采用集成电路封装方式,包括针形引脚(PGA)或球状焊接(BGA),可灵活集成于多种应用系统,包括量子通信[16]、激光雷达[17]、深空光通信[18-19]及高分辨成像等系统[20]。

2.2 Single-photon FPAs主要性能参数

2.2.1 探测效率

SPAD的单光子探测效率(*PDE*)作为一项重要指标,表征了器件的单光子探测能力,定义为入射单个光子引发探测信号的概率。由多个效率共同决定,其中,η_{coup}是SPAD的耦合效率,η_{abs}是SPAD吸收层中的吸收效率,η_{inj}是从吸收层注入到倍增层的光生载流子的收集效率,η_{ava}是雪崩概率,η_{com}是由通过采样电阻(如R_S=50 Ω)的雪崩电流被比较器检测到的概率[21]。

$$PDE=\eta_{coup}\times\eta_{abs}\times\eta_{inj}\times\eta_{ava}\times\eta_{com} \tag{1}$$

门控模式下,*PDE*可以由公式(2)计算。其中,μ是每个光脉冲的平均光子数,R_d和R_l分别是不具有和具有激光照射的计数率,f_g是门控频率,f_l是激光频率[22]。

$$PDE=\frac{1}{\mu}\ln\frac{1-R_d/f_g}{1-R_l/f_l} \tag{2}$$

2.2.2 暗计数率

暗计数率(*DCR*)用于表征探测器系统的噪声情况,其定义为在没有照明的情况下,由暗载流子触发的归一化计数率。由于在门控模式下,在门外的芯片是不工作的,为方便对比不同门宽条件下的测试结果,需要用归一化*DCR*排除门宽占空比的影响。归一化的*DCR*可由公式(3)计算,其中*W*为门控宽度[23]。

$$DCR=\frac{R_d}{f_gW} \tag{3}$$

降低*DCR*的根本途径是减少器件缺陷密度,这在很大程度上依赖于InGaAs/InP材料的外延质量。在材料质量尚未取得突破的情况下,通常采用减小光敏面积、降低工作偏压以及制冷等措施来抑制暗计数。

2.2.3 后脉冲概率

后脉冲概率(P_{ap})是衡量SPAD后脉冲效应的重要噪声指标,多家机构对其展开了深入研究[24-27]。它是在一次有效的光子计数事件发生后的一定时间或门控周期内,由前一个雪崩过程中被缺陷俘获的载流子延迟释放所诱发的额外计数出现的概率。对于一个探测系统,后脉冲概率受器件结电容C_d、整个电路的寄生电容C_p、雪崩持续时间δ、器件过偏压V_{ex}、器件死时间τ_d、缺陷所捕获载流子的平均寿命τ等多个因素影响,可用以下模型粗略描述[16]:

$$P_{ap}\propto\left(C_d+C_p\right)\times\int_0^{\delta}V_{ex}(t)\,dt\times e^{-\tau_d/\tau} \tag{4}$$

2.2.4 阵列规模

阵列规模定义为像素的行数与列数的乘积,扩大阵列规模可有效增大成像视场、提高空间分辨率。然而,随着阵列规模增大,单元像素尺寸缩减,器件均匀性下降、串扰加剧等问题也随之显现。这

些由器件工艺与光电特性耦合产生的技术瓶颈，使得阵列规模的提升成为涉及器件结构创新、半导体工艺精细化控制及电气保护的系统性工程难题。

2.2.5　填充因子

填充因子（FF）指每个像素中光敏区域占像素总面积比例，反映了器件对入射光子的利用率。填充因子越高，单位面积内有效感光区域越大。

$$FF=\frac{A_{\mathrm{ph}}}{A_{\mathrm{pixel}}}\times 100\% \tag{5}$$

随着阵列向微型化方向发展，像素尺寸缩减导致光敏区域面积减小，填充因子显著降低。此外，保护环结构、隔离槽设计等非光敏区域占比的增加，也会进一步制约填充因子的提升。

2.2.6　串扰概率

当单个 SPAD 被目标光子触发雪崩时，倍增层产生的高能热载流子通过两种机制引发串扰。一是光串扰，它由热载流子弛豫复合辐射的二次光子直接耦合到邻近像素（直接光串扰），或经衬底、MLA 反射后被邻近 SPAD 吸收（间接光串扰）而触发干扰性雪崩信号；二是电串扰，它是由雪崩载流子通过漂移扩散侵入相邻像素有源区，引发雪崩而导致误计数。图 4 说明了其传播路径，两种串扰可独立或耦合发生[28]。

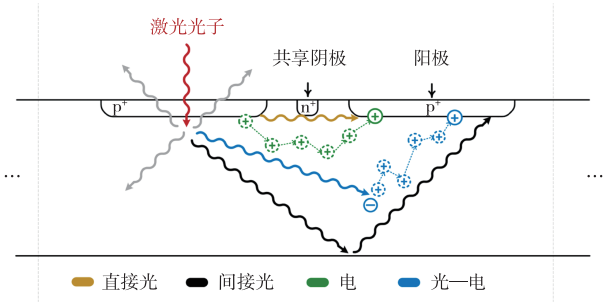


图 4　SPAD 串扰机制示意图[28]

串扰效应随 Single-photon FPAs 规模扩大、工作电压增加而显著增加，它不仅会降低器件动态范围，还会引发图像模糊等质量问题。其强度由串扰概率（P_{CT}）量化表征。

选择 Single-photon FPAs 上的两个像素 SPAD 进行测试，其中，$SPAD_1$ 的暗计数作为串扰源，$SPAD_2$ 作为探测器表征串扰。首先，在无光条件下，分别测试两个像素的暗计数 DCR_1 和 DCR_2。其次，在 $SPAD_1$ 工作的情况下，同步测量相邻 $SPAD_2$ 总计数率 C_2，C_2 包含 $SPAD_2$ 自身的 DCR_2 和由 $SPAD_1$ 的暗计数在一定 P_{CT} 下导致的串扰计数[29]。

$$C_2=DCR_2+P_{\mathrm{CT}}\cdot DCR_1 \tag{6}$$

则 P_{CT} 为：

$$P_{\mathrm{CT}}=\frac{C_2-DCR_2}{DCR_1} \tag{7}$$

3　InGaAs/InP Single-photon FPAs 研究进展

3.1　单个单光子芯片的性能提升

为提高器件的探测效率，近年来对 SPAD 的器件结构进行了不同的优化。Zhang 等采用 SiO_2/TiO_2 制作的分布式布拉格反射镜（DBR）以及微透镜，器件结构如图 5 所示。与无 DBR 及微透镜 SPAD 相比，器件吸收效率提升 58%，在 1 550 nm 波段，233 K 温度下，*PDE* 为 30% 时，*DCR* 为 665 Hz，比商业设备低近一个数量级[30]。

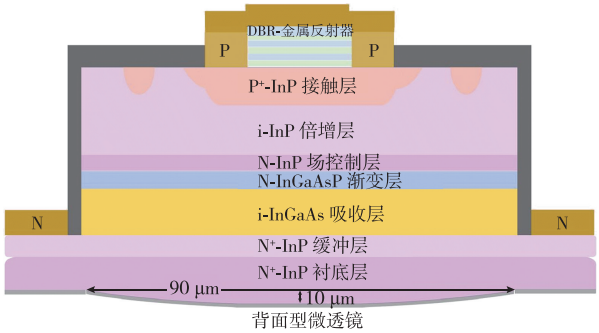


图 5　带 DBR 及微透镜的 SPAD 结构示意图[30]

此外，方余强等采用一种金属反射层，使入射光子的吸收效率相对提高约 20%。同时，利用 1.25 GHz 重复频率的正弦门读出电路在 300 K 时，实现了高达 60.1% 的 *PDE*，*DCR* 为 340 kHz，后脉冲概率为 14.8%[31]。Fabio 等采用较厚的吸收层，并通过对电荷层和 Zn 扩散的调节实现对电场的控制，在 225 K 温度下，实现了 51% 的 *PDE*，*DCR* 为 18 kHz，器件结构如图 6 所示[32]。

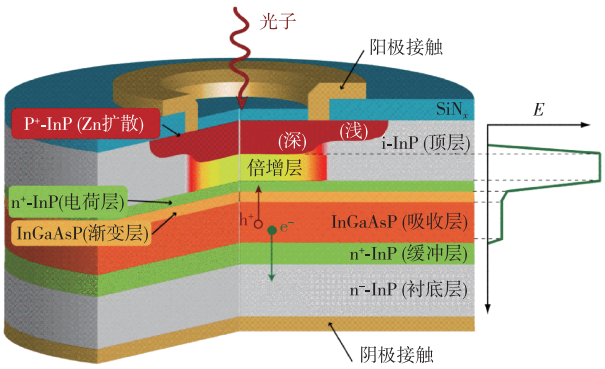


图 6　米兰理工设计的 SPAD 结构示意图[32]

云南大学叶海峰、史衍丽团队通过优化材料结构与创新制备工艺，成功开发出一种在室温下具有优越性能的InP/InGaAs SPAD[23]。采用单扩散工艺替代传统的双扩散方法，结合高掺杂浓度的电荷层与较厚的倍增层，有效降低了吸收区的电场强度，抑制了隧穿暗电流。图7给出了室温下器件性能测试结果，在1 550 nm波段*PDE*为20.1%时，*DCR*仅为6.82 kHz，后脉冲概率为0.15%。此外，团队基于该器件，研制了在器件表面溅射SiO_2/Cr薄膜集成电阻的NFAD。NFAD通过自淬灭在293 K温度下获得10.3%的*PDE*与32.6 kHz的*DCR*。当温度为271 K时，*DCR*进一步降至7.5 kHz。

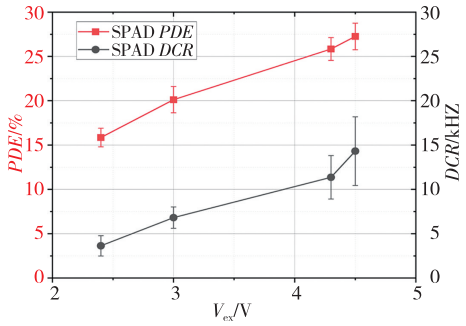


图7 室温下SPAD的*PDE*和*DCR*对V_{ex}的依赖关系[23]

3.2 阵列规模扩展

InGaAs/InP Single-photon FPAs的研制始于2001年，由美国麻省理工学院林肯实验室（MITLL）启动[16]。2002年报道的4×4阵列，像元间距为100 μm，单元直径为33 μm。在室温下，其击穿电压均匀性在±0.2 V以内，在1.06 μm波长、2.5～3 V过偏压下，*PDE*为33%，*DCR*约1 MHz；制冷至210 K后，*DCR*进一步降低到35 kHz[33]。在后续15年中，该实验室相继开发出8×8[33]，32×32[34]，128×32[35]及256×64[36]（见图8）规模的阵列，像元间距也从100 μm缩减至25 μm。其中，128×32 FPAs像元间距为50 μm，探测波段为1.55 μm，在*PDE*为23%，温度253 K下，*DCR*为2 kHz[35]。对256×64像元间距50 μm的Single-photon FPAs进行测试，在4 V过偏压下，其*PDE*达45%。考虑微透镜损耗后焦平面平均*PDE*保持30%，在240 K温度下，1.55 μm波段平均*DCR*为1 kHz，1.06 μm波段*DCR*低至250 Hz[36]。研制的128×32，256×64规格的Single-photon FPAs结构设计及制备工艺成熟稳定，已经搭载在机载三维激光雷达系统进行高空测绘实际作业[37]。截至2014年，MITLL成功研制了第一代高密度InGaAs/InP Single-photon FPAs，包括256×128[38]，中心距为50 μm的Single-photon FPAs，在1.06 μm波段，*PDE*为30%，以及目前最大规模256×256[39]，中心距为25 μm的Single-photon FPAs，*PDE*为35%。进一步计划开发256×256规格、具有大视场和高读出速率（帧频1 000 kHz）的异步InGaAs/InP Single-photon FPAs，用于小卫星激光雷达系统的探测器[13]。

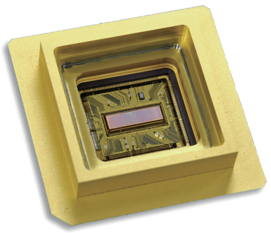


图8 256×64 Single-photon FPAs结构示意图[36]

2009年，美国Argo AI首次报道了探测波段为1.06 μm，中心距为100 μm，规格为32×32的InGaAs/InP single-photon FPAs。经过优化后其*PDE*提升至40%，248 K温度下的平均*DCR*为2 kHz[40]。2011年报道了128×32规格、50 μm中心距的Single-photon FPAs，光敏面直径为18 μm，像素良率99%，无微透镜结构。在1.06 μm波段，248 K温度，2.25 V过偏压下，表征了整个Single-photon FPAs的*DCR*、*PDE*性能图。为直观得到FPAs性能分布情况，Argo AI基于性能图汇总了如图9和10所示的直方图。结果显示，FPAs平均*DCR*为3.7 kHz，标准偏差为3.4 kHz；平均*PDE*为34%，标准偏差为9%，这种性能均匀性的分布依赖于外延生长特性[22]。同时，该研究团队基于32×32规格InGaAs/InP Single-photon FPAs开发了成熟的异步、同步即时可用的单光子相机产品，用于高速公路自主驾驶。其中，规格为32×32的同步相机采样频率每秒为200 M（samples/s），同规格异步模式相机达到每秒700 M，提升了3倍多[41]。

日本滨松公司研究起步较晚，在2018年初步研制了32×32，100 μm中心距的InGaAs/InP Single-photon FPAs，探测波长为1.55 μm。在20%*PDE*，243 K温度下，*DCR*为234 kHz[42]。德国弗劳恩霍夫协会海因里希·赫兹电信研究所（Fraunhofer HHI）在2024年报道了96×96规格InGaAs/InP Single-photon FPAs，像元中心距为25 μm。在室温295 K，1.55 μm探测波段下，*PDE*为15%，*DCR*为87 kHz[43]。图11和12为室温下6×24阵列的*DCR*统计分布图及SPAD的*PDE*和*DCR*的关系图。

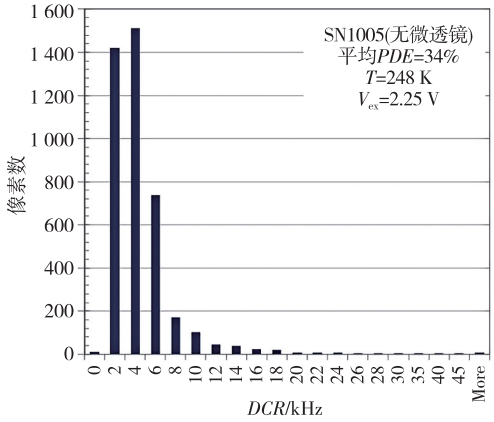


图 9　128×32 InGaAsP/InP FPA 在 248 K 下的像素 *DCR* 分布直方图，以上结果改编自参考文献[22]

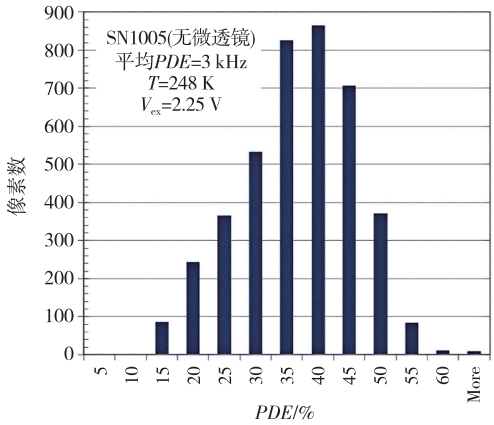


图 10　128×32 InGaAsP/InP FPA 在 248 K 下的像素 *PDE* 分布直方图[22]

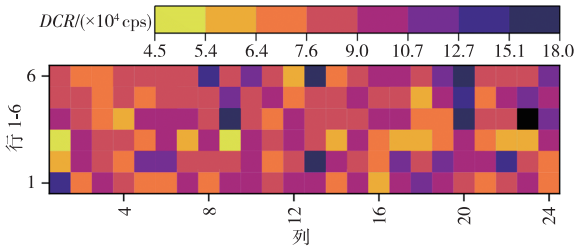


图 11　室温下，6×24 像素子集的 *DCR* 统计分布图[43]

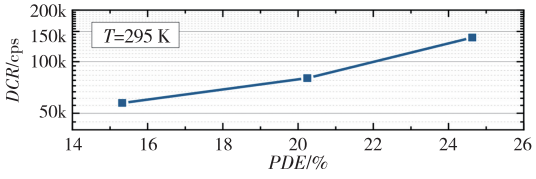


图 12　SPAD 在室温 295 K、1.55 μm 探测波段下，*PDE* 和 *DCR* 的关系[43]

中国在 InGaAs/InP Single-photon FPAs 领域的研制工作主要集中于中国电子科技集团公司第四十四研究所（Cetc 44th）、中国科学院半导体研究所及中国科学院上海技术物理研究所。其中 Cetc 44th 自 2015 年率先开展研究，其开发的 256×128 阵列代表当前中国最高水平。

2015 年，Cetc 44th 张秀川团队首次报道了集成微透镜的 8×8 InGaAs/InP Single-photon FPAs，像元中心距为 150 μm。在 1 550 nm 波段、3 V 过偏压、235 K 工作条件下，器件平均光子 *PDE* 达 19.5%（σ=4.1%），平均 *DCR* 为 32.5 kHz（σ=9.04 kHz），并通过飞行时间测试验证了其三维成像能力[44]。2018 年，研制出 32×32 阵列，在 5 V 过偏压、243 K 下，实现了平均 *PDE* 为 18.2%、平均 *DCR* 为 20.2 kHz，串扰概率为 15.6%。孙剑锋团队采用该阵列，成功获取了 3.9 km 外场目标的轮廓图像，其研制的 1 570 nm 激光主动成像装置，在运行中设定帧频为 1 kHz，每脉冲能量为 2 mJ[45]。2023 年，崔大健团队报道了像元间距为 50 μm 的 64×64 和 256×64 规格 InGaAs/InP Single-photon FPAs。其中，64×64 器件在 243 K 下，平均 *PDE* 提升至 20%，且 *DCR* 降至 10 kHz；256×64 器件在相同温度下平均 *PDE* 提高至 30%，而 *DCR* 为 20 kHz[46]。截止目前，Cetc 44th 已实现 256×128 Single-photon FPAs 的研制，2024 年哈工大团队基于该 FPAs 构建了一套 1.064 μm 激光主动成像实验系统，完成了对不同背景光强下 350 m 与 500 m 处建筑物的数据采集，并通过单光子回波信号检测方法重建了三维距离图像、强度图像和光子计数图像，测得系统距离分辨率为 0.3 m。该工作对比了不同背景光强度（强背景光、低背景光、近暗夜）下的成像结果，如图 13 所示。图中，左轴对应光子计数强度图像（PCINT）的对比度，右轴对应传统强度图像（INT）的对比度，横坐标表示背景光强度条件。结果证明光子计数强度图像的对比度高于强度图像，验证了国产 256×128 Single-photon FPAs 在远距离激光主动成像中的良好性能，能够有效检测遥感目标[47-48]。

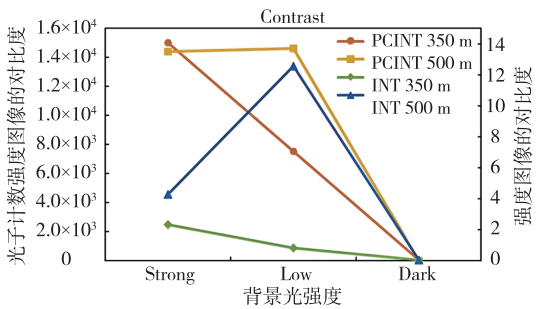


图 13　强度图像和光子计数强度图像的对比度随背景光强度变化的趋势[47]

中国科学院半导体研究所王帅、韩勤团队于2019年报道了波段为1 550 nm，8×8规格，中心距为250 μm的InGaAs/InP Single-photon FPAs。其成品率为95%，具备初步性能，击穿电压主要分布为65～70 V，90%击穿电压处的平均暗电流为3 nA[49]。该团队持续研发，提升规格优化间距，于2022年开发了像素间距为150 μm的64×64 InGaAs/InP Single-photon FPAs。其响应波段为1 550 nm，像元直径为25 μm。图14给出阵列像元*PDE*和*DCR*随温度的变化关系，当*PDE*为25.72%，温度为223 K时，*DCR*为9.09 kHz。击穿电压均匀性为±1.5 V，且击穿电压处的暗电流低于1 nA[50]。

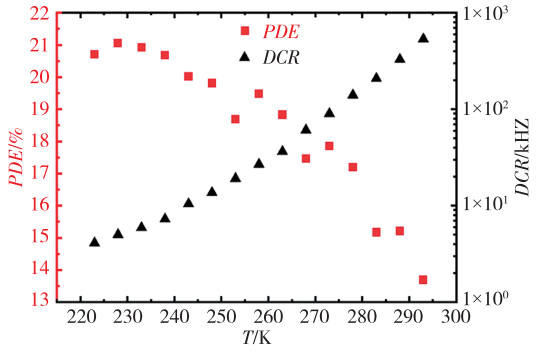


图14 25μm直径SPADs的*PDE*和*DCR*与温度的关系[50]

此外，该机构唐永生、杨晓红团队还研制了中心距分别为50/100 μm，对应像素单元有源区为10/20 μm的64×64规格的InGaAs/InP Single-photon FPAs。其中，100 μm中心距的平面型Single-photon FPAs击穿电压均匀性为±1.0 V，在235 K下，单光子性能抽样测试结果显示，*PDE*为20%，*DCR*为15.38 kHz[51]。

2025年，上海技术物理研究所马英杰等研制了探测波长为1.064 μm，256×2规格，50 μm中心距的InGaAsP/InP Single-photon FPAs。其单光子性能如图15和16所示，在253 K温度下，平均*PDE*为33.1%，*DCR*为2.5 kHz[52]。

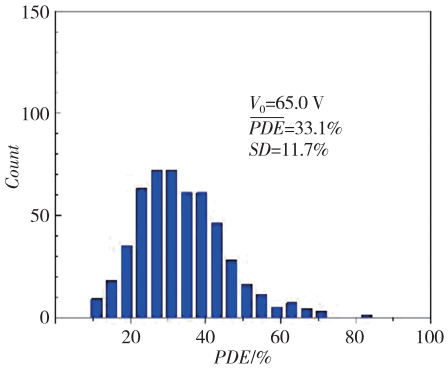


图15 在253 K，65.0 V下1.064 μm 256×2 InGaAsP/InP Single-photon FPAs的像素*PDE*测量统计直方图[52]

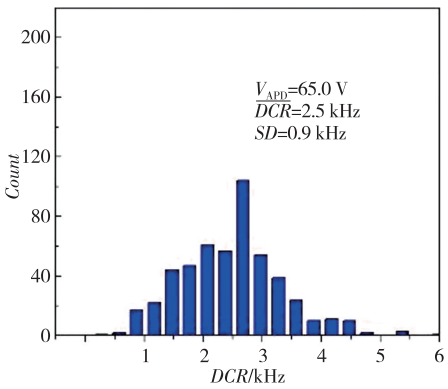


图16 在253 K，65.0 V下1.064 μm 256×2 InGaAsP/InP Single-photon FPAs的像素*DCR*测量统计直方图[52]

国内外各机构研制的InGaAs/InP、InGaAsP/InP Single-photon FPAs规格、性能参数如表1所示。

表1 各机构InGaAs/InP、InGaAsP/InP Single-photon FPAs参数对比

机构	规格	中心距/μm	λ/μm	*T*/K	*PDE*/%	*DCR*/kHz
MITLL	256×64	50	1.06	240	30	0.25
	256×64	50	1.55	240	30	1
Argo AI	32×128	50	1.06	248	34	3.7
Fraunhofer HHI	96×96	25	1.55	295	15	87
滨松	32×32	100	1.55	243	20	234
Cetc 44th	256×64	50	1.55	243	30	20
中科院半导体所	64×64	100		235	20	15.38
	64×64	150	1.55	223	25.7	9.09
上海技物所	256×2	50	1.064	253	33.1	2.5

3.3 填充因子的提升

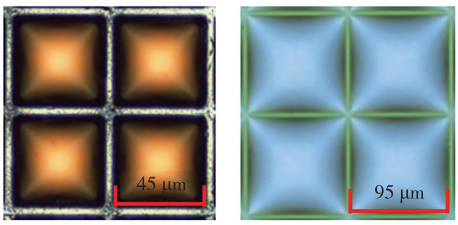
随着阵列向高密度、微型化发展，光敏面积减小，阵列的保护环、隔离槽和焊接电极等非光敏区域占比增加，导致填充因子下降。目前，主要通过在背入射结构的PDA上集成微透镜阵列（MLA）以提升*FF*。MLA的几何参数必须与PDA精确

匹配，以确保目标光子经 MLA 聚焦后准确入射至对应像素的光吸收层。焦距控制尤为关键，若焦距偏离，将降低光子吸收概率及触发雪崩的效率。

在未集成 MLA 的芯片中，任意角度入射的光子均可能引发响应，易造成背景光干扰。若光子入射至非光敏区域将无法诱发雪崩，导致漏计数。更重要的是，非光敏区所产生的载流子可能扩散至邻近像素，产生误计数与串扰，导致成像模糊或颜色污染。集成 MLA 可显著抑制非目标光输入、降低噪声并减轻串扰，从而明显改善成像质量。同时，入射光通过 MLA 后被聚焦为小光锥，还可有效缩小像素单元尺寸并提升光收集效率。

目前，MITLL、上海技术物理研究所及华中科技大学等均已报道用于 Single-photon FPAs 的 MLA。MITLL 早年开发了直径为 100 μm/50 μm 的 GaP MLA，通过角对准二极管光电流监测法、全阵列偏压光电流总和监测法，分别实现了 ±1 μm，±2 μm 对准精度。经抗反射涂层处理后，其光收集效率提升至 70%～80%，随后通过环氧树脂键合至 PDA[15]。MLA 最简单的结构为圆形，但最大占空比仅为 78.5%，存在收光面积浪费。方形透镜可实现 100% 占空比但加工难度较高。

2019 年，上海技物所提出基于光刻胶热回流法的非球面 MLA 设计方法，通过有限元光线追迹与拉格朗日乘子优化获得带圆角的方形透镜。该结构兼具高占空比与均匀曲率，可显著提升聚光性能。计算结果表明，焦距为 100 μm、圆角半径为 6 μm 的方形透镜可实现最高 96% 的能量集中度[53]。近年来该机构还研制了适用于 1 064 nm 波段 InGaAs/InP Single-photon FPAs 的 GaP 与 Si MLA 如图 17 所示，仿真结果显示，能量集中度分别为 83.71%，97.2%。并搭建了微透镜焦深测试台，对制作完成的 MLA 进行了形貌测试，得到两种微透镜阵列实际的结构参数，对比发现曲率偏差为 1.38% 和 3.44%，焦距偏差为 5.69% 和 2.76%，显示出较高制造精度，满足应用需求[54]。



（a）GaP 微透镜　　（b）Si 微透镜

图 17　Gap 微透镜和 Si 微透镜形貌图[54]

2022 年，华中科技大学黄鹰教授团队针对规模 128×32，基片厚度为 270 μm，像素光敏面直径为 40 μm、尺寸为 100 μm×100 μm 的红外焦平面探测器设计优化得到了焦距为 82 μm、矢高为 6.7 μm、曲率半径为 187.5 μm 的 MLA 结构。其响应波长为 1.064 μm，在 ±10° 视场角下的聚焦光斑 RMS 半径为 28.3 μm，能量收集效率达到 96.99%，满足聚焦光斑尺寸小于光敏面的设计要求。根据仿真得到的最佳结构参数进行工艺制备，测试制备出的 MLA 矢高为 6.72 μm，与设计值误差仅为 0.3%，单元边长为 95.4 μm，占空比达 91.01%，能量收集效率实测最高可达 80%[55]。

2023 年，Cetc 44th 构建了非球面方形的 MLA 仿真模型，并采用 ZEMAX 软件对其在 10° 视场、50 μm 周期下的面型参数进行了优化，实现了接近 100% 的填充因子。还开发了结合衍射调制动态曝光与 ICP 刻蚀误差补偿的制备工艺，成功制作出了表面粗糙度低于 2 nm、面型误差小于 1/4 工作波长的 InP MLA。同时，系统比较了集成传统圆形 MLA 与新型方形 MLA 对 FPAs *PDE* 的影响。在 1 064 nm 工作波长下，圆形微透镜对应的 *PDE* 测量值约为 19%，方形微透镜则达到约 25%，当工作波长切换至 1 550 nm 时，*PDE* 分别为 15% 和 21%。结果表明，采用方形结构收光效率更高，可使器件的探测效率平均提升约 6%[56]。表 2 给出了各研究机构研制的 MLA 参数对比。

表 2　各机构 MLA 参数对比

机构	材料及形状	像元间距/μm	边长/μm	衬底厚度/μm	工作波段/μm	填充因子	光敏面尺寸/μm	能量集中度
华中科技大学	InP 方形	100	95.4	270	1.064	91.01%	圆形 φ40	80%
上海技物所	GaP 方形	50	45	240	1.064	81%	圆形 φ10	83.71%
上海技物所	Si 方形	100	95	293	1.064	90.25%	正方形 25	97.21%
MITLL	GaP 圆形	50	Φ 50/100	—	1.06/1.55	—	—	光收集效率 70%～80%
Cetc 44th	InP 方形	50	50	—	1.064/1.55	100%	正方形 5	—

MLA与SPAD阵列的集成主要有两种方式[54-57]：直接在芯片上制备或分立制备后再与SPAD阵列键合。前者具有单片集成、工艺链简化等优点，对于InGaAs/InP Single-photon FPAs可直接利用其InP衬底加工MLA。然而，衬底减薄、光刻及刻蚀过程可能带来污染与器件损伤。分立制备方式则可避免直接加工芯片并拓展材料选择，如GaP和Si等，制备完成后通过环氧或光学胶键合至阵列表面，但其工艺更复杂，需特别关注微透镜与阵列的对准精度、材料失配引起的应力与热膨胀问题，以及MLA－FPAs间空气腔或填充介质的处理。

当前MLA的主流制备技术包括光刻胶热回流法[58]、聚焦离子束法[56]、压印法[59]及灰度掩模[60]。其中，光刻胶热回流法因成本低、工艺简单、适于大规模制备而应用广泛。其原理为在加热条件下利用光刻胶表面张力形成球冠结构，并通过干法刻蚀实现形貌转移，工艺步骤包括基底预处理、涂胶、曝光、热回流及刻蚀。未来微透镜的材料选择、形状设计、工艺优化以及与Single-photon FPAs阵列更优的键合工艺是进一步提升器件填充因子的研究方向。

3.4 串扰抑制

MITLL认为串扰主要是雪崩载流子复合发光导致的直接、间接的光串扰。该机构采用如图18所示的沟槽刻蚀、生长InGaAsP光谱滤波层、串扰阻挡层等串扰抑制结构研制了低串扰的Single-photon FPAs。并绘制了如图19所示的触发超800万次雪崩事件引发的平均串扰事件计数随过偏压变化的函数曲线。在4 V过偏压下，单次雪崩事件诱发的平均串扰事件数仅为0.006个，串扰几乎被完全抑制[61-63]。

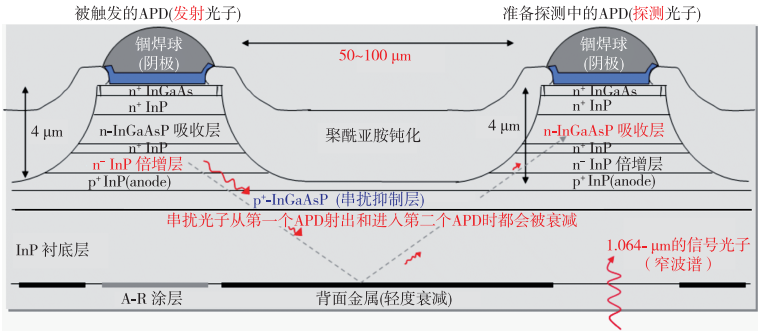


图18 有串扰抑制结构的Single-photon FPAs结构示意图[61]

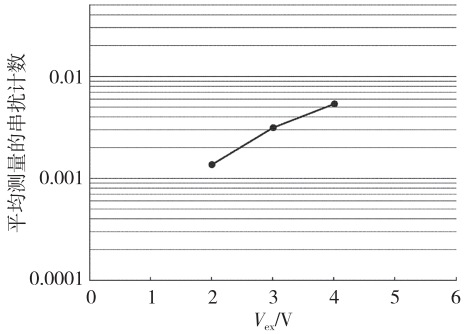


图19 平均测量的串扰计数和过偏压的关系[62]

2016年，米兰理工的报道也支持了该观点。该机构制备了像素间距为60 μm、有源区直径为25 μm的1×16 InGaAs/InP SPAD线列，系统研究沟槽结构对串扰的抑制效果。该团队采用聚焦离子束刻蚀在像素间形成沟槽，并设置三组对照：无沟槽、未金属化的空沟槽、铂金属化的沟槽，图20为带金属沟槽的阵列结构示意图。在3 V过偏压下测试，结果显示，无沟槽结构P_{CT}为88%，刻蚀空沟槽P_{CT}降至47%，再将沟槽金属化P_{CT}进一步降至37%。经分析认为残余37%的串扰源于Single-photon FPAs衬底部分的反射耦合[64]。

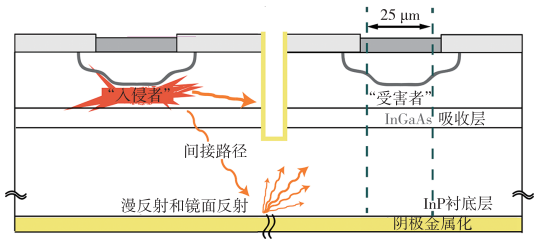


图20 有金属沟槽的Single-photon FPAs结构示意图[64]

中国中科院半导体所唐永生、杨晓红团队基于Jahromi等[28]的理论，认为造成Single-photon FPAs中的串扰以载流子扩散造成的电串扰为主，而通过刻蚀沟槽隔离串扰会引起损伤。因此，首次提出了如图21所示具有载流子提取结构(CES)的平面InGaAs/InP Single-photon FPAs结构，有效抑制了串扰。图22给出了有无CES结构及不同CES电压下串扰计数与发射电流的关系曲线。测试结果表明，对于间距100 μm阵列，在室温、0.5 V过偏压、

200 μA 发射电流下，引入 CES 结构使串扰较无 CES 阵列降低 90.47%；增加 CES 偏压至 10 V，抑制效果提升至 91.52%。对于间距为 50 μm 阵列，CES 偏压为 10 V 时，串扰抑制达 95.46%，偏压增至 30 V 时达 96.22%，表现出更优异的串扰抑制性能[65]。

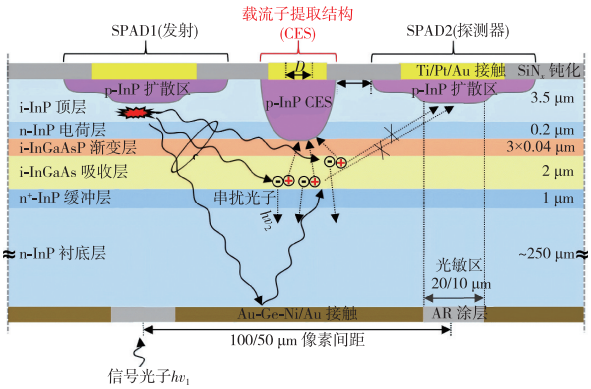


图 21　具有 CES 结构的 FPAs 结构示意图[65]

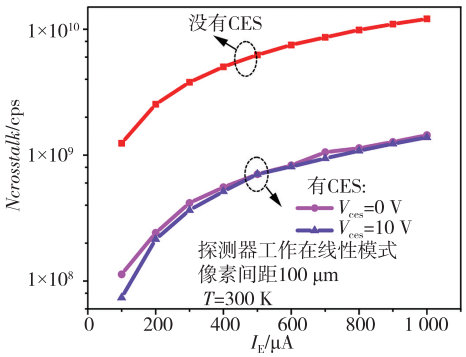


图 22　有无 CES 结构及不同 CES 电压下串扰计数与发射电流的关系曲线[65]

该结构在有效抑制串扰情况下，不引入刻蚀损伤，保证了平面器件的高可靠性和稳定性，为实现低串扰平面 InGaAs/InP Single-photon FPAs 提供了一条有效途径。但 CES 结构需要电路提供额外的电压，这会增加 ROIC 设计的复杂性，增加系统功耗。

3.5　电气保护

PDA 与 ROIC 通过铟柱倒装焊键合，阵列工作时产生的雪崩电流可直接驱动 ROIC 实现信号输出。若高密度阵列中存在未筛除的故障像素，键合后这些故障像素可能会与 ROIC 发生短路，几十伏电压将直接加到 ROIC 上，远超其十几伏的击穿阈值，最终导致芯片和 ROIC 烧毁或性能下降。即使经过筛查，辐射、操作电压脉冲或材料疲劳等仍可能引发短路风险，因此必须对阵列芯片与 ROIC 实施有效的电气保护。

目前，主要采用在 Single-photon FPAs 上制备像素级保险丝的方式实施电路保护，例如 2015 年 MITLL 提出在每个像素与电路间集成限流保险丝[66]。通过测试不同材料与几何形状，确定三层堆叠结构 Ti/Ni/Al 的效果最佳，其中 Al 层厚度控制熔断电流。并将尺寸为 8 μm×2 μm、Al 厚为 75 Å 的保险丝集成于 256×64 阵列中进行测试，图 23 表明其在过流时可靠熔断，成功实现了对 ROIC 的保护。

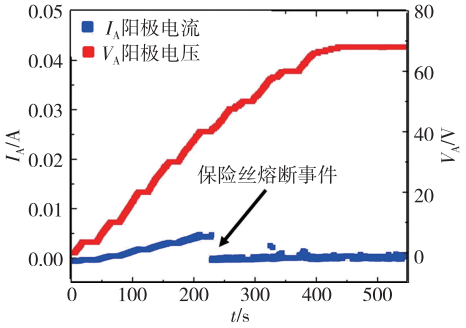


图 23　MITLL 制备的保险丝熔断电流测试和器件两端电压监测图[66]

Argo AI 于 2017 年报道了其设计的类似的三层保险丝结构[67]见图 24，强调保险丝应制备于平坦表面以保证厚度均匀。并通过等效电路模型建立了熔断电流与材料特性、几何参数的关系。该结构已成功应用于 50 μm 间距的 FPAs 中，经缩放后还可以放置到更小的 25 μm 间距的 FPAs 中。

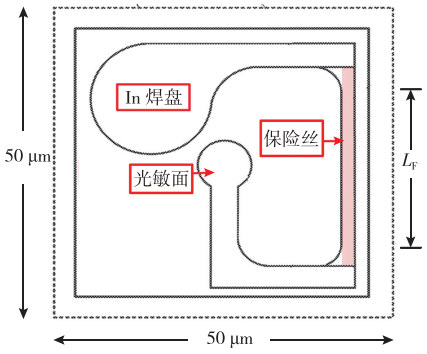


图 24　Argo AI 设计的保险丝结构示意图[67]

2021 年上海技术物理研究所从电路设计入手，开发了带保险丝的全 CMOS 混合淬灭电路[68]。仿真结果表明，保险丝熔断前电阻需低于 1 kΩ，以确保淬灭时间不受影响，熔断后电阻需高于 1 TΩ 才能有效隔离高压。基于仿真结果，该团队制备了直型与弯曲型金属保险丝。图 25 为烧断前、后的保险丝 SEM 图。测试发现，直型保险丝熔断前电阻为 10 Ω、熔断后电阻为 3.3×10^{11} Ω、熔断电流为 50 mA；弯曲型保

险丝对应参数为20 Ω、1.2×10^{12} Ω、23 mA，均满足熔断前电阻小于等于1 kΩ，且熔断后电阻大于1 TΩ的要求。制备的弯曲金属保险丝能有效保护ROIC，且对邻近像元性能无影响。

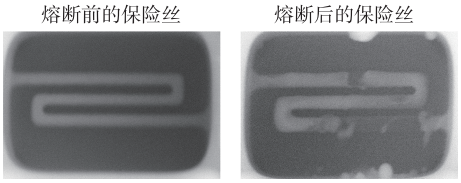


图25 上海技术物理研究所设计的保险丝熔断前后的SEM对比图[68]

在像素中集成保险丝结构是一种有效提升大规模Single-photon FPAs可靠性与成品率的重要技术途径。然而，该方案在保险丝阻值设计、材料选择、精细制备工艺及键合工艺等方面仍面临诸多挑战。例如，过高的保险丝阻值会引起信号增益下降，若保险丝未能按预期熔断，则可能导致整个单光子焦平面阵列烧坏等。

3.6 Single-photon FPAs的ROIC

单光子焦平面的ROIC是实现单光子探测信息提取的核心。随着InGaAs/InP PDA向大规模、微型化方向发展，国内外多家研究机构在与之相匹配的ROIC领域也取得了显著进展。根据读出与处理光子事件方式的不同，ROIC主要分为基于光子飞行时间（ToF）测量和基于光子计数的两大技术体系[69]。

基于ToF测量的ROIC主要应用于激光雷达，其采用光子事件驱动计时的方案。首先，由控制单元发出启动指令，ROIC进入待测状态，随后触发激光发射信号，使激光器向目标发射脉冲光，同时ROIC中的时间-数字转换器（TDC）开始计时[46]。当像素内探测器接收到目标反射光子后，TDC停止计时并将量化后的时间信息逐像素读出。其核心指标包括阵列规模、像素面积、时间分辨率、计时量程及帧频等。设计关键在于大规模、低功耗与高时间分辨率、宽计时量程之间的平衡[69]。

MITLL在2002年采用0.35 μm CMOS工艺与桥接集成技术，成功研制出4×4规模ROIC，实现了0.7 ns的系统时间分辨率，为像素级TDC的发展奠定了基础[70]。此后该实验室通过持续扩大阵列规模[71]，先后实现8×8，32×32，64×64，256×64及256×128规模，50 μm像素间距的ROIC，并计划向256×256，25 μm像素间距发展[72]。针对高速光子计时相关应用，该机构于2008年设计了首个8×8像元，中心距为100 μm的InGaAs/InP单光子焦平面异步读出电路[73]。2012年，其将阵列规模扩大至32×32，像元中心距缩小到50 μm，时间分辨率1 ns，并集成片上数据压缩电路，实现了高达8 Gbps的数据输出速率[74]，图26为32×32规格异步自由模式连续光子探测的Single-photon FPAs架构图。

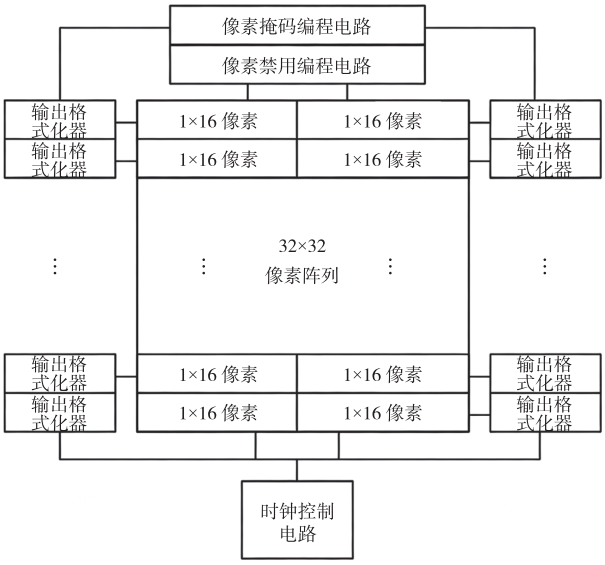


图26 MITLL 32×32规格异步自由模式连续光子探测的Single-photon FPAs架构图[74]

2017年，Argo AI公司在MITLL的研究基础上，设计了蜂窝状像素布局为32×32 InGaAs/InP异步的ROIC，使用抗反射涂层以降低串扰，同时通过提升时钟频率将计时精度优化至310 ps，单个通道带宽达0.8 Gbps，采样速率达到了700 M/s[41]。

瑞士洛桑联邦理工学院在2008年基于事件驱动架构，在128×128阵列中集成10 bit像素的TDC，在40 MHz时钟下分辨率为97 ps，计时量程为100 ns[75]。2012年，进一步采用0.13 μm CMOS工艺设计了32×32的ROIC，TDC采用周期计数和锁相环（PLL）分相时钟结合的两段式方案，获得了119 ps分辨率，功耗仅为90 mW[76]。

英国爱丁堡大学在2011年基于0.13 μm CMOS工艺实现了片内集成10 bit TDC的160×128规模ROIC，并提出快速启动的环形振荡器方案，实现55 ps时间分辨率和55 ns计时量程[77]。2019年，使用40 nm CMOS工艺设计了面向荧光寿命成像的192×168阵列ROIC，通过集成3 GHz门控环形振荡器提高时间分辨率至33 ps，计时量程135 ns[78]。2020年，提出一种运动触发与视觉-测距

融合架构，在像素面积为 40 μm×20 μm、规模为 128×128 的 ROIC 上，实现了 2～64 ns 可调的时间分辨率、500 fps 的帧频以及 85 mW 的功耗[79]。

国内东南大学吴金团队自 2012 年起系统性开展了与 InGaAs PDA 匹配的 ROIC 研究，完成了从 2×2，8×8，32×32，64×64 及 256×128 等多种规模的设计，推动了国内中大规模阵列技术的发展[80-82]。2019 年，基于 0.18 μm 工艺实现了 64×64 规模、50 μm 像素尺寸的 ROIC。该芯片内部时钟为 500 MHz，时间分辨率达 1 ns，测量范围长达 4 μs[83]。

天津大学于 2018 年基于同类工艺的单元电路，在 500 MHz 时钟下实现了 200 ps 的分辨率[84]。上海技术物理研究所于 2021 年报道了如图 27 所示，面向 64×64 InGaAs PDA 的像素级 TDC，采用 0.18 μm 工艺，在 250 MHz 时钟下分辨率达 0.5 ns，并具备 13 位有效量程，20 kHz 帧频功耗为 380.5 mW[85]。

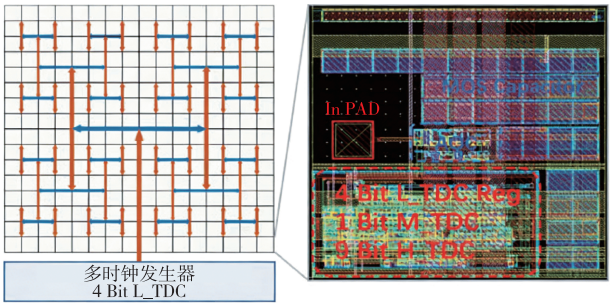


图 27　上海技术物理研究所 64×64 InGaAs Single-photon FPAs 三段式时间数字转换电路结构[85]

基于光子计数的 ROIC 中，每个像素都具有光子计数功能，可独立进行单光子探测。在预设的曝光时间窗口内，当像素探测到光子并触发雪崩后，器件进行淬灭与复位过程并恢复工作状态，以继续响应后续光子事件。通过对曝光期间产生的雪崩事件进行累加计数，最终输出的数字结果直接表征入射光强或对应的灰度信息。其关键性能指标包括阵列规模、像素面积及计数动态范围。在电路设计上需要权衡最大计数速率、动态范围、噪声抑制能力与功耗。同时，还需考虑两方面问题：一是受死区时间限制的最大计数率，二是过短的死区时间导致后脉冲概率、暗计数率显著增加等[69]。

对于光子计数的 ROIC 方面，MITLL 于 2015 年在 0.18 μm CMOS 工艺下研制出 256×256 超大面阵被动光子计数 ROIC，像素中心距为 25 μm，通过铟柱倒装焊与背照式 Single-photon PDA 集成，实现了 42 dB 的动态范围，并在单次事件读出模式下达到约 8 000 fps 的极高帧频[72]。

爱丁堡大学在 2020 年报道的 128×128 规模，像素面积为 40 μm×20 μm 的 ROIC 计数动态范围为 69 dB，帧频为 500 fps[79]。2022 年，其报道在 1.4 mm×1.4 mm 的面积内集成的规模 128×120、像素 8 μm 间距的 ROIC，计数动态范围为 126 dB[86]。

东南大学于 2021 年报道了一种自适应采样 ROIC，采用 0.18 μm 工艺实现了 1×128 规模、像素直径为 70 μm，间距为 80 μm 的线阵设计，计数动态范围达 60 dB[87]。

未来，随着工艺节点持续进步和三维集成技术的发展，ROIC 将面向大规模、低功耗、高速及多功能方向发展。

4　Single-photon FPAs 研究存在的技术挑战和发展趋势

随着阵列规模越来越大，在 Single-photon FPAs 研制中主要存在两方面的技术挑战。

一方面，大规模单光子焦平面探测器存在性能不均匀的问题。在追求单像素高性能的同时，受探测器材料和工艺不均匀的影响，像素之间的击穿电压存在差异，雪崩效应也不一致，甚至有的像素不产生雪崩或雪崩过大，形成阵列中的坏元（盲元）。这种不均匀性会严重影响计数和成像质量。

另一方面，单光子焦平面探测器成品率低。当焦平面探测器在工作时，如果有单个像素短路，产生的短路电流对读出电路是致命的，现在虽然采用了保险丝熔断的方法进行电气隔离保护，但也存在不同像素的电阻丝阻值不均匀，且阻值偏大无法熔断的问题。一个短路像素无法熔断即会烧毁读出电路，使整个读出电路无法工作。阵列规模越大，单光子探测器阵列成品率越低，制造成本越高。

未来的发展趋势：

（1）提高器件的规模：进一步提高焦平面探测器的规模和中心距，满足更大成像视场、更高分辨率的应用需求；

（2）降低成本：继续改进现有材料结构和制造工艺之间的匹配，在提高性能的同时，提高成品率；

（3）增加读出电路的功能：在读出电路单元里加入短路电流电气保护机制，简化探测器阵列工艺的同时大幅提高成品率、降低成本；同时，增加片上处理功能，提高芯片的智能化。

(4)开发新的读出电路计数方法:降低芯片读出的数据量和功耗。

(5)开发新材料及新的倍增机制:比如采用二维材料的单光子探测器;通过雪崩离化工程,引入新型倍增结构,提高探测效率,降低暗计数和后脉冲;

(6)提高芯片的光吸收:继续优化微透镜结构及制备方法,提高光吸收效率;在器件结构中引入超结构提升芯片的量子效率。

5 总结与展望

InGaAs/InP Single-photon FPAs凭借高灵敏度、高速、小体积与全固态等优势,已成为量子科技、激光雷达三维成像、深空通信和生物荧光成像等应用中的核心探测器。多年来,在MITLL等机构的推动下,其在性能提升与集成化方面取得了显著进展。性能方面,通过引入分布式布拉格反射镜、介电-金属反射层等光场调控结构优化吸收效率,并加强场调控、提高扩散控制精度,显著提升了光子探测效率。阵列化方面,通过集成微透镜阵列,有效改善了光收集能力与填充因子;引入深沟槽隔离、集成光谱滤波层、串扰阻挡层以及载流子提取结构等方法,有效抑制了串扰;通过制备像素级保险丝,实现了对单光子焦平面阵列的电气保护;此外,还发展了大规模、多功能的读出集成电路。这些关键技术为阵列高密度化发展提供了核心支持。随着器件性能与集成工艺的持续进步,InGaAs/InP Single-photon FPAs有望在更广泛的领域中实现大规模应用。

参考文献:

[1] Wang Y, Qian S, Zhao T, et al. A new design of large area MCP-PMT for the next generation neutrino experiment[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, 695: 113-117.

[2] Giordano F, Breton D, Beigbeder C, et al. A Front-End electronics board for single photo-electron timing and charge from MaPMT [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2013, 718: 208-210.

[3] Perrenoud M, Caloz M, Amri E, et al. Operation of parallel SNSPDs at high detection rates[J]. Superconductor Science and Technology, 2021, 34(2): 024002.

[4] Li M, Wu Y, Yuan J, et al. Stratospheric aerosol lidar with a 300 μm diameter superconducting nanowire single-photon detector at 1064 nm[J]. Optics Express, 2023, 31(2): 2768.

[5] Shi Y, Li Y, Bai R, et al. Advancement of shortwave infrared single-photon detectors (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3):20220908.

[6] 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): 3803406.

[7] Zhang J, Thew R, Gautier J D, et al. Comprehensive characterization of InGaAs-InP avalanche photodiodes at 1550 nm with an active quenching ASIC [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, 45(7): 792-799.

[8] Dolphin J A, Scowen R O E, Wells L M, et al. Hybrid-integrated InGaAs/InP SPAD arrays for quantum communications[J]. arXiv preprint arXiv:2509.05134, 2025.

[9] Itzler M A, Ben-Michael R, Hsu C F, et al. Single photon avalanche diodes (SPADs) for 1.5 μm photon counting applications[J]. Journal of Modern Optics, 2007, 54(2/3): 283-304.

[10] Zhang J, Itzler M A, Zbinden H, et al. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication[J]. Light: Science Applications, 2015, 4(5): e286.

[11] Itzler M A. Single-photon LiDAR imaging: from airborne to automotive platforms [EB/OL]. (2020-4-27) [2025-11-05]. https://image-sensors-world.blogspot.com/2020/04/argoai-keynote-on-swir-spad-lidar.html.

[12] Clifton W E, Steele B, Nelson G, et al. Medium altitude airborne Geiger-mode mapping LIDAR system[J]. Proc. of SPIE, 2015, 9465: 946506.

[13] Primmerman C A. Small-Sat-Ladar Final Report: FY18 Integrated Systems Line-Supported Program[R]. Cambridge: MIT Lincoln Laboratory, 2019.

[14] Pestana N, Clark H, MacDonald J, et al. Evaluation of asynchronous geiger-mode avalanche photodiode arrays for deep-space optical communications [J]. Proc. of SPIE, 2021, 11721: 117210Q.

[15] Verghese S, Donnelly J P, Duerr E K, et al. Arrays of InP-based avalanche photodiodes for photon counting[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(4): 870-886.

[16] Zhang J, Eraerds P, Walenta N, et al. 2.23 GHz gating InGaAs/InP single-photon avalanche diode for quantum key distribution[J]. Proc. of SPIE, 2010, 7681: 76810Z.

[17] Heinrichs R, Aull B F, Marino R M, et al. Three-dimensional laser radar with APD arrays[J]. Proc. of SPIE, 2001, 4377: 106-117.

[18] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.

[19] Ivanov H, Mejri S, Di Mira A, et al. Review of deep space optical communications[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2025, 43(3): 193-209.

[20] Yuan P, Sudharsanan R, Bai X, et al. 32 × 32 geiger-mode ladar camera[J]. Proc. of SPIE, 2010, 7684: 76840C.

[21] Liu C, Ye H F, Shi Y L. Advances in near-infrared avalanche diode single-photon detectors[J]. Chip, 2022, 1(1): 100005.

[22] Itzler M A, Entwistle M, Owens M, et al. Comparison of 32 × 128 and 32 × 32 Geiger-mode apd FPAs for single photon 3d ladar imaging[J]. Proc. of SPIE, 2011, 8033: 80330G.

[23] Ye H, Wang W, Zhu H, et al. High-performance room temperature InP/InGaAs single-photon detector made by a single diffusion process[J]. Applied Physics Letters, 2025, 126(26): 262108.

[24] Cova S, Lacaita A, Ripamonti G. Trapping phenomena in avalanche photodiodes on nanosecond scale [J]. IEEE Electron Device Letters, 1991, 12(12): 685-687.

[25] Itzler M A, Jiang X, Entwistle M. Power law temporal dependence of InGaAs/InP SPAD afterpulsing[J]. Journal of Modern Optics, 2012, 59(17): 1472-1480.

[26] Wang F X, Chen W, Li Y P, et al. Non-Markovian property of afterpulsing effect in single-photon avalanche detector[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(15): 3610-3615.

[27] Ziarkash A W, Joshi S K, Stipčević M, et al. Comparative study of afterpulsing behavior and models in single photon counting avalanche photo diode detectors [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 5076.

[28] Jahromi S, Kostamovaara J. Timing and probability of crosstalk in a dense CMOS SPAD array in pulsed TOF applications [J]. Optics Express, 2018, 26(16): 20622-20632.

[29] Kindt W J, van Zeijl H W, Middelhoek S. Optical cross talk in geiger mode avalanche photodiode arrays: modeling, prevention and measurement[C]//28th European Solid-State Device Research Conference, 2005: 192-195.

[30] 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.

[31] Fang Y Q, Chen W, Ao T H, et al. InGaAs/InP single-photon detectors with 60% detection efficiency at 1 550 nm[J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91(8): 083102.

[32] Telesca F, Signorelli F, Finazzi L, et al. Low-noise InGaAs/InP SPAD with photon detection efficiency exceeding 50% at 1 550 nm[C]//Conference proceedings of International SPAD Sensor Workshop 2024, 2024: 1-3.

[33] McIntosh K A, Donnelly J P, Oakley D C, et al. Development of Geiger-mode APD arrays for 1.06/spl mu/m[C]//The 15th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2003: 760-761.

[34] Aull B F, Loomis A H, Young D J, et al. Three-dimensional imaging with arrays of Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. Proc. of SPIE, 2004, 5353: 105-116.

[35] Verghese S, McIntosh K A, Liau Z L, et al. Arrays of 128x32 InP-based geiger-mode avalanche photodiodes [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7320: 73200M.

[36] Smith G M, McIntosh K A, Donnelly J P, et al. Reliable InP-based Geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7320: 73200M.

[37] Khan M J, Skelly L, Vasile A, et al. Remote sensing impact of single-photon sensitive airborne lidar systems based on geiger-mode avalanche photodiode arrays[C]//IGARSS 2024 - 2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2024: 2455-2459.

[38] 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): 3800510.

[39] Younger R D, Donnelly J P, Goodhue W D, et al. Crosstalk characterization and mitigation in Geiger-mode avalanche photodiode arrays [C]//2016 IEEE Photonics Conference, 2017: 260-261.

[40] Itzler M A, Entwistle M, Owens M, et al. InP-based Geiger-mode avalanche photodiode arrays for three-dimensional imaging at 1.06 μm [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7320: 73200O.

[41] Itzler M, Salzano G, Entwistle M, et al. Asynchronous Geiger-mode APD cameras with free-running InGaAsP pixels (Conference Presentation)[J]. Proc. of SPIE, 2017, 10212: 102120K.

[42] Makino K, Fujita T, Hashi T, et al. Development of an InGaAs SPAD 2D array for flash LIDAR [J]. Proc. of SPIE, 2018, 10540: 105400L.

[43] Rustige P, Runge P, Schell M. Room temperature 96x96 InGaAs/InP SPAD array for SWIR imaging [J]. Proc. of SPIE, 2024, 13192: 131920V.

[44] Zhang X, Jiang L, Gao X, et al. Fabrication of InGaAs/InP geiger-mode avalanche focal plane arrays[J]. Semiconductor Optoelectronics. 2015: 114676232.

[45] Sun J, Jiang P, Zhang X, et al. Experimental research of 32 × 32 InGaAs Gm-APD arrays laser active imaging[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12): 1206006.

[46] Cui D, Ao T, Xi S, et al. Research progress of InGaAs single-photon avalanche focal plane arrays (Invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3):9-19.

[47] Yang X, Ma L, Sun J, et al. Experimental research of 256 × 128 InGaAs Gm-APD arrays laser imaging [J]. Proc. of SPIE, 2024, 13155: 131550P.

[48] Ma L, Sun J, Yang X, et al. Reconstruction method of 128 × 256 array single photon Lidar based on multi-domain stability feature fusion[J]. Optics Laser Technology, 2025,

181: 111970.

[49] Han Q, Ye H, Hou L, et al. 8 × 8 format InGaAs/InP avalanche photodiode plane array for 3D imaging laser radar system[J]. Proc. of SPIE, 2019, 10843: 1084304.

[50] 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.

[51] Tang Y. Study on InP-based single-photon avalanche diode and array pixel crosstalk [D]. Beijing: Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, 2024.

[52] Ma Y, Bao J, Liu M, et al. 256×2 InGaAsP/InP geiger-mode avalanche photodiode arrays with a triple-stage timing to digital converter [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2025, 31(5): 3801611.

[53] Liu X. Design of aspheric microlens made by photoresist reflow method [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(2): 0208001.

[54] Zhang C, Mo D, Xu H, et al. Design and characterization of microlens arrays for InGaAs single photon detectors [J]. Optics and Precision Engineering, 2024, 32(11): 1667-1675.

[55] Wang Y. Study on condensing microlens array for infrared focal plane arrays [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2025.

[56] 柳 聪, 张为国, 刘 锋, 等. InP基连续面型方形微透镜设计与制作技术研究[J]. 半导体光电, 2023, 44(6): 883-888.
Liu Cong, Zhang Weiguo, Liu Feng, et al. Research on the design and manufacturing technology of InP-based continuous square microlens[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(6): 883-888.

[57] 雷呈强, 汪岳峰, 殷智勇, 等. 微透镜阵列误差对半导体激光匀化性能的影响[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(9): 19-25.
Lei Chengqiang, Wang Yuefeng, Yin Zhiyong, et al. Effects of microlens array positon error on diode laser beam homogenization[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(9): 19-25.

[58] Yuan X. Monolithically integrated refractive microlens array to improve imaging quality of an infrared focal plane array[J]. Optical Engineering, 2004, 43(11): 2589.

[59] Ong N S, Koh Y H, Fu Y Q. Microlens array produced using hot embossing process [J]. Microelectronic Engineering, 2002, 60(3/4): 365-379.

[60] Peng Q J, Guo Y K, Zeng Y S, et al. Real-time grey-tone mask technique for fabrication of microlens array[J]. Chinese Journal of Lasers, 2003.

[61] Younger R D, McIntosh K A, Chludzinski J W, et al. Crosstalk analysis of integrated Geiger-mode avalanche photodiode focal plane arrays [J]. Proc. of SPIE, 2009, 7320: 73200Q.

[62] Donnelly J P, McIntosh K A, Duerr E K, et al. Photodiode array structure for cross talk suppression: US10109671[P]. 2018-10-23.

[63] Finkelstein H, Gross M, Lo Y H, et al. Analysis of hot-carrier luminescence for infrared single-photon upconversion and readout[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(4): 959-966.

[64] Calandri N, Sanzaro M, Motta L, et al. Optical crosstalk in InGaAs/InP SPAD array: analysis and reduction with FIB-etched trenches [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(16): 1767-1770.

[65] Tang Y, Wang R, Yang X, et al. High crosstalk suppression in InGaAs/InP single-photon avalanche diode arrays by carrier extraction structure [J]. Nature Communications, 2024, 15: 593.

[66] Grzesik M, Bailey R, Mahan J, et al. Development of fuses for protection of geiger-mode avalanche photodiode arrays[J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(11): 4187-4190.

[67] Piccione B, Jiang X, Slomkowski K, et al. Article comprising a photodiode-side integrated fuse for avalanche photodetector focal plane array pixels and method therefor: US20170250209[P]. 2025-11-18.

[68] Li Y, Ye L, Liu X, et al. A full CMOS quenching circuit with fuse protection for InGaAs/InP single photon detectors [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021, 68(10): 3224-3228.

[69] 郑丽霞, 吴 金, 孙伟锋, 等. SPAD阵列读出电路关键技术与发展趋势[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(3): 51-59.
Zheng Lixia, Wu Jin, Sun Weifeng, et al. Key technologies and development trends of SPAD array readout circuit [J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(3): 51-59.

[70] Albota M A, Aull B, Fouche D G, et al. Three-dimensional imaging laser radars with geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13(2): 351-370.

[71] Marino R M, Stephens T, Hatch R E, et al. A compact 3D imaging laser radar system using Geiger-mode APD arrays: system and measurements[J]. Proc. of SPIE, 2003, 5086: 501581.

[72] Aull B F, Schuette D R, Young D J, et al. A study of crosstalk in a 256×256 photon counting imager based on silicon geiger-mode avalanche photodiodes[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(4): 2123-2132.

[73] Glettler J B. InP-based single-photon detector arrays with asynchronous readout integrated circuits [J]. Optical Engineering, 2008, 47(10): 100502.

[74] Frechette J, Grossmann P J, Busacker D E, et al. Readout circuitry for continuous high-rate photon detection with arrays of InP Geiger-mode avalanche photodiodes [J]. Proc. of SPIE, 2012, 8375: 83750W.

[75] Niclass C, Favi C, Kluter T, et al. A 128 × 128 single-

photon image sensor with column-level 10-bit time-to-digital converter array [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2008, 43(12): 2977-2989.

[76] Gersbach M, Maruyama Y, Trimananda R, et al. A time-resolved, low-noise single-photon image sensor fabricated in deep-submicron CMOS technology [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2012, 47(6): 1394-1407.

[77] Veerappan C, Richardson J, Walker R, et al. A 160 × 128 single-photon image sensor with on-pixel 55ps 10b time-to-digital converter [C]//2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference, 2011: 312-314.

[78] Henderson R K, Johnston N, Chen H, et al. A 192×128 time correlated single photon counting imager in 40nm CMOS technology [C]//ESSCIRC 2018-IEEE 44th European Solid State Circuits Conference, 2018: 54-57.

[79] Mattioli Della Rocca F, Mai H, Hutchings S W, et al. A 128 × 128 SPAD motion-triggered time-of-flight image sensor with in-pixel histogram and column-parallel vision processor [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2020, 55(7): 1762-1775.

[80] 傅胡叶. GM-APD 64×64阵列型全集成传感读出电路设计[D]. 南京:东南大学, 2015.
Huye Fu. The design of fully integrated readout circuit based on GM-APD 64x64 arrays[D]. Southeast University, 2015.

[81] 郑丽霞, 杨俊浩, 吴　金, 等. 一种Gm-APD阵列型读出电路的设计与实现[J]. 微电子学, 2014, 44(1): 51-54, 58.
Zheng Lixia, Yang Junhao, Wu Jin, et al. Design and implementation of gm-APD array readout IC [J]. Microelectronics, 2014, 44(1): 51-54, 58.

[82] Wang Jiaqi. Design of array readout circuit based on asynchronous-free mode[D]. Southeast University, 2023.

[83] Wu J, Qian Z, Zhao Y, et al. 64 × 64 GM-APD array-based readout integrated circuit for 3D imaging applications [J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(6): 62407.

[84] Zhao Jiaheng. The research on key technology of readout circuit based on single-photon APD array detector [D]. Tianjin University, 2017.

[85] 刘　煦, 李云铎, 叶联华, 等. 单光子探测InGaAs雪崩焦平面像素级高分辨率低误码时间数字转换电路[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210009.
Liu Xu, Li Yunduo, Ye Lianhua, et al. Pixel-level high resolution and low error rate time-to-digital converter circuit of single photon detection InGaAs avalanche focal plane array [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20210009.

[86] Erdogan A T, Al Abbas T, Finlayson N, et al. A high dynamic range 128 × 120 3-D stacked CMOS SPAD image sensor SoC for fluorescence microendoscopy [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2022, 57(6): 1649-1660.

[87] Zheng L, Guo P, Lu H, et al. An ultraviolet photon counting imaging system based on a SiC SPAD array [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2021, 33(21): 1213-1216.

作者简介：

朱泓遐(1996—),女,云南省人,博士研究生,主要研究方向为半导光电探测器;

史衍丽(1969—),女,山东省人,博士,研究员,主要研究方向为半导体光电探测器及器件物理研究。