

# InP 基近红外单光子雪崩光电探测器阵列

刘凯宝<sup>1,2</sup>, 杨晓红<sup>1,2\*</sup>, 何婷婷<sup>1,2</sup>, 王晖<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院半导体研究所集成光电子学国家重点实验室, 北京 100086;

<sup>2</sup>中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049

**摘要** 单光子雪崩光电探测器 (SPAD) 具有雪崩增益大、响应速度快、探测效率高、易于集成的特点。SPAD 阵列器件可进行弱光三维成像, 在生物化学、量子通信、激光雷达等领域具有重要应用。因此开展 SPAD 器件及阵列探测技术的研究具有非常重要的意义。给出了近红外 InGaAs/InP SPAD 单元工作原理和阵列结构性能, 对暗计数率、探测效率、后脉冲等主要影响因素和器件优化方向进行总结, 概述了近年来 SPAD 阵列器件的主要技术方案, 给出了串扰来源和消除方法, 并对相关研究单位的技术与结果进行对比。

**关键词** 探测器; 雪崩光电二极管; 阵列; 红外波段; 三维成像

中图分类号 TN36

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.220001

## Indium Phosphide-Based Near-Infrared Single Photon Avalanche Photodiode Detector Arrays

Liu Kaibao<sup>1,2</sup>, Yang Xiaohong<sup>1,2\*</sup>, He Tingting<sup>1,2</sup>, Wang Hui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Integrated Optoelectronics, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100086, China;

<sup>2</sup> Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A single photon avalanche photodiode detector (SPAD) has many advantages such as large avalanche gain, fast response, high detection efficiency, and easy integration. SPAD array devices can be used for low-light three-dimensional imaging; these devices have important applications in fields such as biochemistry, quantum communication, and lidar. Therefore, it is significant to study the detection technology of SPAD and its array. In this paper, we review and present the working principle and array structure performance of a near-infrared InGaAs/InP SPAD unit. We analyze the major influencing factors such as the dark counting rate, detection efficiency, and after pulses; moreover, we investigate the main direction for device optimization. Further, the main technical schemes of the SPAD array devices used in recent years have been summarized. We provide the sources of crosstalk and methods for eliminating crosstalk. In addition, we compare the technologies used and the results of relevant research institutions.

**Key words** detectors; avalanche photodiode; array; infrared band; three-dimensional imaging

**OCIS codes** 040.1345; 040.1240; 040.3060; 040.6808

## 1 引言

近红外波段的单光子探测器及其阵列在众多领域具有广泛应用, 例如光时域反射射<sup>[1-2]</sup>、量子通信<sup>[3]</sup>、激光探测及测距系统 (LADAR)<sup>[4]</sup>、生物学中

弱荧光研究、DNA 分析<sup>[5]</sup> 和半导体器件材料表征<sup>[6]</sup> 等。

目前已有的单光子探测器有很多种, 包括光电倍增管 (PMT)、单光子雪崩光电探测器 (SPAD)、超导纳米线单光子探测器 (SNSPD)、频

收稿日期: 2019-04-17; 修回日期: 2019-05-07; 录用日期: 2019-05-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0402404)、国家自然科学基金 (61774152)

\* E-mail: xhyang@semi.ac.cn

率上转换单光子探测器和可见光光子探测器(VLPC)等。PMT具有增益高、光敏面大和暗计数低的优点,在微弱光探测的众多领域中发挥了重要作用,但PMT体积庞大、量子效率低、反向偏压高、红外波段灵敏度差、抗外部磁场能力弱,不利于阵列扩展,在近红外和集成化要求较高的领域应用受限,因而各种新型光电探测器<sup>[7-9]</sup>不断涌现。其中SNSPD发展十分迅速,具有宽光谱、极低暗计数、低时间抖动、短恢复时间和无需门电路等优势,在量子光学和天文观测等科研领域有着重要应用,但SNSPD工作温度在10 K左右,面阵集成度较小。其他如Si-SPAD和VLPC由于在近红外波段缺乏足够的灵敏度,并不适合近红外波段的探测。频率上转换单光子探测器结构复杂,机械可靠性较低。相比之下,SPAD雪崩增益大、响应速度快、探测效率高、体积小、易于阵列集成、功耗低,其阵列器件可进行弱光信号3D成像,因此在众多应用领域具有重要研究价值。

本综述首先介绍了InP基近红外SPAD的工作原理,分析了阵列像元及整体性能的主要参数及其影响因素,然后列举了国内外在近红外SPAD阵列方面的研究进展,最后进行了总结和展望。

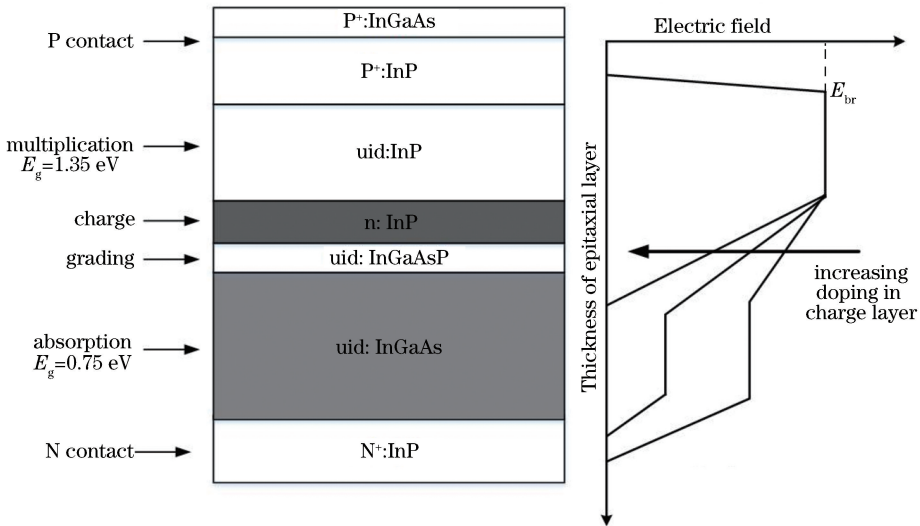


图1 SAGCM层叠结构和内部电场分布

Fig. 1 SAGCM laminated structure and internal electric-field distribution

APD根据工作状态的不同可以分为线性APD(LM-APD)和盖革APD(GM-APD)。当工作电压低于雪崩电压时,APD处于线性放大模式,这种模式的APD工作增益在10左右,在经典光通信<sup>[12]</sup>中有着广泛应用。当APD工作电压高于雪崩电压时,APD处于GM,可达到单光子<sup>[13]</sup>的探测灵敏度,此时GM-APD又称SPAD,增益往往大于 $10^6$ 。单个光子进入

## 2 InGaAs/InP单光子探测器及阵列

### 2.1 SPAD结构和基本工作原理

近红外 $1\sim 1.55\ \mu\text{m}$ 波段的雪崩光电二极管(APD)最早使用Ge材料<sup>[10]</sup>,但由于Ge器件的暗电流很大,在波长大于 $1.50\ \mu\text{m}$ 时,Ge的吸收效率明显降低<sup>[11]</sup>,而III-V族化合物 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (InGaAs)的带隙宽度为0.75 eV,在近红外波段具有很高的光吸收效率,因而InGaAs/InP单光子探测器在此波段具有较高的灵敏度。InGaAs/InP单光子探测器一般采用分离吸收渐变电荷倍增结构(SAGCM),典型的SAGCM和内部电场分布如图1所示,其中n:InP为本底n型的InP材料,P<sup>+</sup>为P型重掺杂,N<sup>+</sup>为N型重掺杂, $E_g$ 为带隙, $E_{br}$ 为雪崩电场。该结构采用窄带隙InGaAs材料作为吸收层,宽带隙的InP材料作为倍增层。通过控制电荷层掺杂密度,可以使倍增区域的电场强度足够大从而保证足够高的增益,同时使吸收区域的电场强度足够小以减少隧穿电流。InP衬底材料的宽带隙对于 $1\ \mu\text{m}$ 波段以上的光是透明的,因此SAGCM可以设计为背入射结构,这种材料及结构的使用也为其阵列化应用打下基础。

SPAD时,在吸收区被吸收并生成电子-空穴对,光生电子-空穴对能够以一定的概率触发雪崩击穿,电流会迅速增大,从nA或亚nA上升到mA量级,从而产生可探测的计数脉冲。LM-APD和SAPD的主要区别是LM-APD在光信号停止后可以迅速归零,而SPAD一旦发生雪崩,探测器就需要有外加干预将自持雪崩淬灭,从而恢复到探测等待状态,因此淬灭电

路是 SPAD 系统的一个重要部分。

## 2.2 SPAD 的性能参数及影响因素

SPAD 的性能参数主要有探测效率(PDE)、暗计数率(DCR)、后脉冲概率、死时间及时间抖动。

### 2.2.1 探测效率与暗计数率

PDE 是指一个光子入射到 SPAD 后产生一个能被检测到的雪崩电流信号的概率,可以描述为  $P_{\text{PDE}} = P_{\text{QE}} \cdot P_{\text{avl}} \cdot P_{\text{det}}$ ,其中,  $P_{\text{QE}}$  为器件的外量子效率,  $P_{\text{avl}}$  为雪崩概率,  $P_{\text{det}}$  为检测效率<sup>[14]</sup>。  $P_{\text{avl}}$  为一个载流子引发一次宏观雪崩的概率,其与倍增区的电场强度呈正相关,因此偏置电压是重要的控制变量<sup>[15]</sup>,在工作状态,提高 SPAD 的过偏压可以提高 PDE。  $P_{\text{det}}$  为宏观雪崩电流被检测电路鉴别的概率<sup>[16]</sup>,主要由外部电路决定。这些相关因素中,  $P_{\text{QE}}$  是一个相对稳定的常数,与吸收区材料及厚度相关。因此,在器件结构方面,使用高吸收系数材料作为吸收区,增大吸收区厚度、生长增透膜来减少光在器件表面的反射都可以提高器件的外量子效率,进而提高器件的 PDE。

DCR 是指在没有光子入射时由噪声载流子产生的雪崩计数几率。SPAD 工作在雪崩等待状态,当有光子入射时,产生雪崩电流。但在实际情况中,无入射光时,器件的倍增区和吸收区会存在其他途径产生的自由载流子,这些载流子也能触发雪崩倍增,从而产生暗计数。一般来说,引发暗计数现象的原因有两类,一是由热噪声产生的随机热电流引发的雪崩;二是由隧穿效应产生的隧穿电流引发的雪崩。两种产生暗计数的机理相同,都是诱发产生自由电荷,然后在倍增效应下产生宏观电流,和光子计数唯一不同点在于自由电荷的诱因不同,因此暗计数和光子计数从本质上无法区分。对 SPAD 暗计数而言,室温下热激发占主导地位,低温下隧穿为主要机制。热载流子浓度与载流子寿命  $\tau$  相关,热载流子产生速率取决于材料带隙和晶体质量。热载流子产生速率<sup>[17]</sup>可以写成

$$R_{\text{th}} = \frac{n_i}{\tau}, \text{ 其中 } n_i \text{ 是材料的本征载流子浓度, } n_i =$$

$$\sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \propto T^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2kT}}, \text{ 其中, } T \text{ 为温度、} N_c \text{ 为导带能态密度、} N_v \text{ 为价带能态密度、} E_g \text{ 为材料禁带宽度、} k \text{ 为玻尔兹曼常数,寿命 } \tau \propto T^{-1/2}。 \text{ 由此可以看出,热载流子的产生速率主要与器件工作的温度相关,会随温度上升呈指数增加,因而通常采用制冷的方法,降低由热噪声引起的暗计数}^{[17]}。 \text{ 隧穿几率是在高电场下价带电子跃迁到导带的量子隧穿几率,包括带间隧穿(BBT)和陷阱辅助隧穿(TAT),可描述为}$$

$$R_{\text{tun}}(x) = R_{\text{BBT}} + R_{\text{TAT}}, \text{ 其中 } R_{\text{BBT}} \text{ 和 } R_{\text{TAT}} \text{ 分别为带间}$$

隧穿产生率和陷阱辅助隧穿产生率。研究表明,BBT 并不是 SPAD 导致暗计数的主要来源,因为针对 SPAD 的 SAGCM, InGaAs 吸收区电场强度较小,即使其带隙窄也很难发生 BBT<sup>[17]</sup>。而 InP 倍增层本身带隙较大,倍增层较厚,产生雪崩倍增时的电场强度不足以引发 BBT。TAT 是一个复杂的过程,依赖于禁带中的陷阱能级位置、陷阱密度、陷阱被电子占据的情况和陷阱势能。在强电场作用下,原本难以发生隧穿的势垒被压缩变窄,其更易于隧穿。因此,在低温、偏压较高的情况下,由 TAT 导致的暗计数可能是 InGaAs/InP SPAD 产生暗计数的主要原因<sup>[17]</sup>。综上,降低器件暗计数的主要途径有:提高材料生长质量、降低工作温度、降低器件的过偏压。

噪声等效功率(NEP,  $P_{\text{NE}}$ )是综合评价 PDE 和 DCR 的一个指标<sup>[18]</sup>,通常描述为

$$P_{\text{NE}} = \frac{h\nu \sqrt{2P_{\text{DCR}}}}{P_{\text{PDE}}}, \quad (1)$$

式中,  $h\nu$  代表光子能量。SPAD 的暗计数和 PDE 相关,PDE 越高,暗计数越高,两者之间是非线性关系。通常在一定 PDE 的前提下比较 DCR 的不同来评估探测器的性能。总体而言,SPAD 的 PDE 和 DCR 与器件本身结构及工作状态相关,因此实际研究中对于二者的共同优化主要也是从这两方面出发。图 2(a)为 PDE 与温度和过偏压的关系,从实验结果可以看出 PDE 基本不受温度影响,而会随过偏压的增大而提高。图 2(b)为在 0.6~1.4  $\mu\text{m}$  的不同倍增区厚度下单位面积 DCR 与 PDE 的关系,该模型结构吸收区是厚度为 1  $\mu\text{m}$  的 InGaAs 材料<sup>[16]</sup>。可以看出在固定 PDE 下,倍增区厚度越大,单位面积 DCR 越小;在相同倍增区厚度下,单位面积 DCR 随 PDE 的提高而增大。

图 3(a)为不同倍增层厚度器件的 DCR 与过偏压的关系,可以看出在相同温度和相同倍增层厚度时,DCR 随过偏压的增大而提高。在相同温度和同一过偏压下,倍增层厚度越小,DCR 越高;倍增层厚度大于 2.0  $\mu\text{m}$  时,DCR 几乎全部由隧穿电流贡献,可以看出倍增区内缺陷辅助的隧穿是造成 DCR 的一个重要因素。图 3(b)为不同倍增层厚度时单位面积 DCR 与温度的关系,可以看出 DCR 随温度的升高而增加。

综上,器件优化的主要矛盾在于较高过偏压可以增大 PDE 但同时会带来 DCR 的增加。为进一步提高器件性能,在器件结构方面,当达到一定的 PDE 时,需在一定范围内增加倍增层厚度以减少暗计数而不增加后脉冲;在工作状态方面,在一定的工作温度范围内,可降低工作温度来降低 DCR 而不减小 PDE。

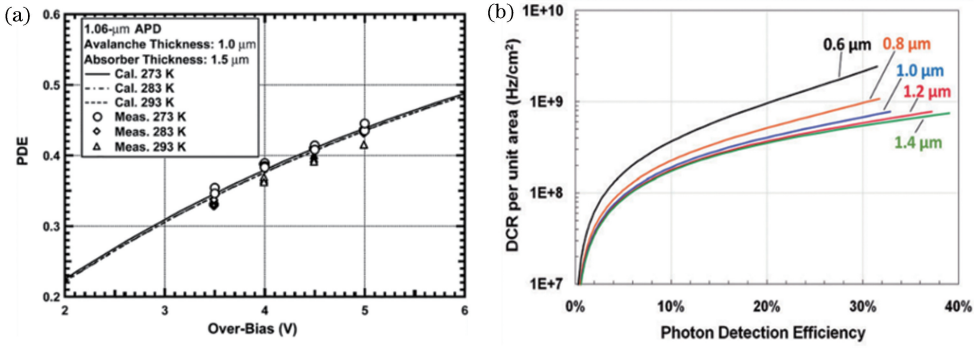


图2 参数关系。(a) PDE在不同温度下与过偏压的关系<sup>[15]</sup>；(b)固定PDE时，不同倍增层厚度下DCR与PDE的关系<sup>[16]</sup>  
 Fig. 2 Parameter relationships. (a) Relationship between PDE and over-bias at different temperatures<sup>[15]</sup>；(b) relationship between DCR and PDE for devices with different thicknesses of multiplication layers and fixed PDE<sup>[16]</sup>

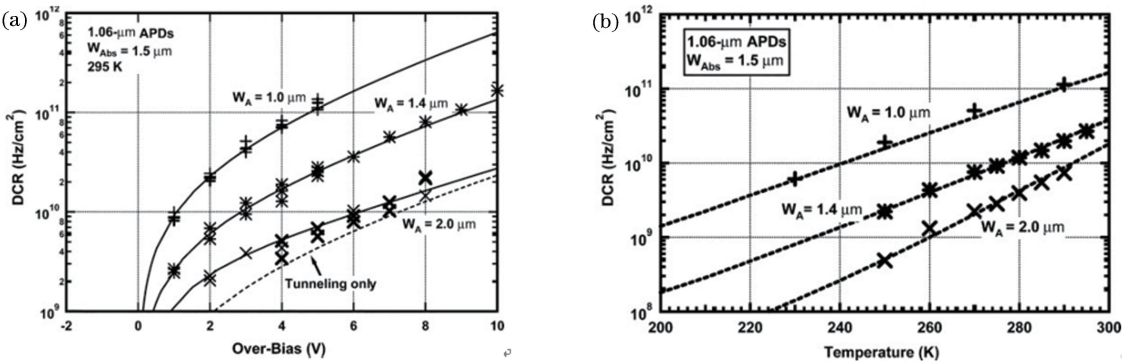


图3 参数关系。(a)不同倍增层厚度器件的DCR与过偏压的关系；(b)过偏压为4 V时，不同倍增层厚度器件的DCR与温度的关系<sup>[15]</sup>

Fig. 3 Parameter relationships. (a) Relationship between DCR and over-bias for devices with different thicknesses of multiplication layers；(b) relationship between DCR and temperature for devices with different thicknesses of multiplication layers at 4 V over-bias<sup>[15]</sup>

### 2.2.2 后脉冲概率

SPAD的材料中存在一些缺陷，在雪崩过程中，这些缺陷会俘获一些载流子，这些载流子会缓慢释放，在载流子释放完全之前，如果恢复高压等待状态，这些载流子也可能会引发雪崩效应，产生脉冲计数。后脉冲的释放时间通常在 $\mu\text{s}$ 量级，是影响探测速率的主要因素之一，在高重复频率及低温的情况下，后脉冲计数是主要的噪声来源。经典理论认为，从雪崩猝灭( $t=0$ )开始，后脉冲的发生率与时间的关系可以用被俘获载流子的释放过程描述<sup>[19]</sup>，即

$$R_{\text{ap}}(t) = \frac{P_{\text{avl}} N_{\text{ft}}}{\tau_{\text{d}}} e^{-t/\tau_{\text{d}}}, \quad (2)$$

式中， $N_{\text{ft}}$ 为被陷阱能级俘获的雪崩载流子数， $\tau_{\text{d}}$ 为被俘获载流子的平均释放时间，即被俘获载流子寿命。从(2)式可以看出，减轻后脉冲效应的根本方法是减少陷阱的数量和雪崩载流子总数<sup>[19]</sup>。对于InGaAs(P)/InP SPAD，由于后脉冲效应严重，当计

数率较高时，后脉冲可以导致比暗计数更多的误计数，且重复频率随时间呈指数衰减，因此在很多实际应用特别是激光雷达等应用中，后脉冲概率比暗计数更受关注<sup>[20]</sup>。后脉冲的概率与温度、材料的掺杂浓度及电场强度有关。温度越低，杂质浓度越高，电场越强，后脉冲的概率也就越高。改善材料生长质量、降低本底掺杂浓度、降低雪崩增益、减小雪崩幅度、增加死时间是减小后脉冲计数的有效方法。

### 2.2.3 死时间

为缓解后脉冲现象，可以加入一段死区时间(dead time, 很多情况下 dead time 也等于 hold-off time)，这段时间内偏置电压低于击穿电压，器件中的载流子得到充分释放，SPAD对光子无法响应，经过一段时间后偏压恢复至正常工作电压。如果在大部分被俘获的载流子尚未释放前阻止 SPAD 恢复，亦即延长死区时间使之大于 $\tau_{\text{d}}$ ，即可抑制后脉冲的发生，但是这会严重限制器件最高探测速率。通常，

探测器的死时间不仅取决于探测器的材料,与外置电子电路也密切相关。

#### 2.2.4 时间抖动

时间抖动是宏观雪崩被检测到的时间与入射光子时间之间的不确定性,表示探测器的时间分辨能力。该参数对一些应用至关重要,例如,在激光测距中,它直接决定测距的表面分辨率及精度。对 SPAD 自身而言,产生抖动的主要因素包括光子在吸收区的吸收位置不同,载流子在层界面传输的时间(尤其是过渡区空穴被俘获-释放的时间)不同,及雪崩幅度达到鉴别电平建立时间的差异<sup>[21-22]</sup>。在各种不同的时间抖动机制中,最主要的因素是低于过偏压下的雪崩建立时间,薄的倍增层厚度可以减少时间抖动。时间抖动由以上因素随机组成,常用时间响应的半峰全宽(FWHM)来表示。

综上,近红外 SPAD 相关的各种性能参数相互关联相互制约。提高材料生长质量、降低雪崩暗电流对于提高 SPAD 各种性能都是有益的。而倍增层厚度、掺杂浓度、工作温度、过偏压等对于器件各种性能是相互矛盾的。在优化器件结构和工作状态方面要综合考虑各项性能指标,以获取最优值,实现探测目的。

### 2.3 阵列相关参数

阵列探测器作为成像器件,除了具备单点像元的性能之外,还必须考虑作为成像器件的整体性能参数,主要包括阵列大小、盲元率、一致性、填充因子和串扰。

1) 阵列大小:其是成像能力的重要指标,阵列越大,成像的分辨率越好。

2) 盲元率:盲元又称失效元,是指探测器阵列中响应过高或过低的探测器像元。盲元的数量及分布对阵列性能的影响很大,如果盲元率过高,如在成像时不经相应的处理时,则会在图像中出现大量的亮点或暗点,严重影响成像质量。

3) 一致性:主要指击穿电压的一致性,当所有像元加在同一个偏置电压下时,击穿电压的不一致会导致暗计数和探测效率的不一致。必要时,需要增加偏置电压校正功能。

4) 填充因子:定义为像元的有效感光面积与整体面积的比值,是一个重要的参数。总体来说,填充因子受保护环结构、隔离结构、淬灭计数计时电路等限制。微透镜阵列(MLA)是一种能够提高填充因子的有效手段<sup>[23]</sup>,但会增加对准装配的复杂性,且会减小接受角。

5) 串扰:是指光子入射到一个 SPAD 像元,但会引起相邻像元的计数几率。串扰会减小成像传感

器的有效空间分辨率,造成模糊现象。串扰主要分为电串扰和光串扰。电串扰是指碰撞电离产生的大量载流子,若无像元隔离,会漂移或扩散至相邻像元,产生串扰脉冲计数。光串扰是指器件发生雪崩时,热载流子复合会发射光子。当光子触发另外一个像元时,即引发光串扰。串扰概率随像元之间的距离减小而增大,因此限制了阵列密度。目前光串扰被认为是阵列器件中的主要串扰因素。

## 3 近红外雪崩单光子探测器阵列研究进展

1985年,AT&T Bell 实验室的研究人员证明具有渐变、吸收倍增分区结构的 InGaAs/InP SPAD 能够实现 1330 nm 的单光子探测。1995年,Lacaita 等在近红外波段对这种 SPAD 的单光子计数性能进行更深入的研究,此后 InGaAs/InP 红外 APD 得到了更广泛的研究。InGaAs/InP SPAD 也因优越的阵列集成优势,引起了研究人员的兴趣。国内外 InGaAs/InP SPAD 阵列的研究机构主要包括麻省理工大学的林肯实验室(MIT)、普林斯顿光波公司(PLI)、意大利 Cova 小组、重庆光电技术研究所等。本节将对这几个机构所研制的 InGaAs/InP SPAD 阵列所使用的单元器件结构、单元性能参数和阵列性能等进行总结。

### 3.1 麻省理工大学林肯实验室(MIT)

2002年以来,麻省理工大学林肯实验室 McIntosh 等<sup>[15, 24]</sup>开始研究 InGaAsP/InP 的 1.06  $\mu\text{m}$ 和 InGaAs/InP 的 1.55  $\mu\text{m}$  SPAD 器件和阵列。图 4(a)为该实验室通过 SiO<sub>2</sub> 刻蚀掩模和湿法腐蚀得到的台面结构示意图,侧壁通过聚酰亚胺钝化,使用 InGaAsP 作为吸收层材料,设计了吸收带隙更宽的台面结构 InGaAsP/InP SPAD。这种方法虽然容易制造,但高电场区是暴露的,没有钝化好的侧壁,会导致大的漏电流和边缘击穿,可靠性差,因此此结构要求足够好的刻蚀和钝化工艺。表 1 是 MIT 研制的台面型 InGaAsP/InP SPAD 在不同规格下的性能参数对比。可以看出,低温和较厚的倍增层可以降低 DCR,提高 PDE。

MIT 成功地采用桥接互联技术将 SPAD 阵列与微电子(CMOS)电路集成在一起,可以实现连续的高速率光子检测,使探测器适用于有源光学应用,包括激光雷达<sup>[25]</sup>和通信。MIT 在单个像元结构基础上成功研制出 4×4 InGaAsP/InP SPAD 探测阵列,如图 4(c)所示,该阵列像元击穿电压差值小于

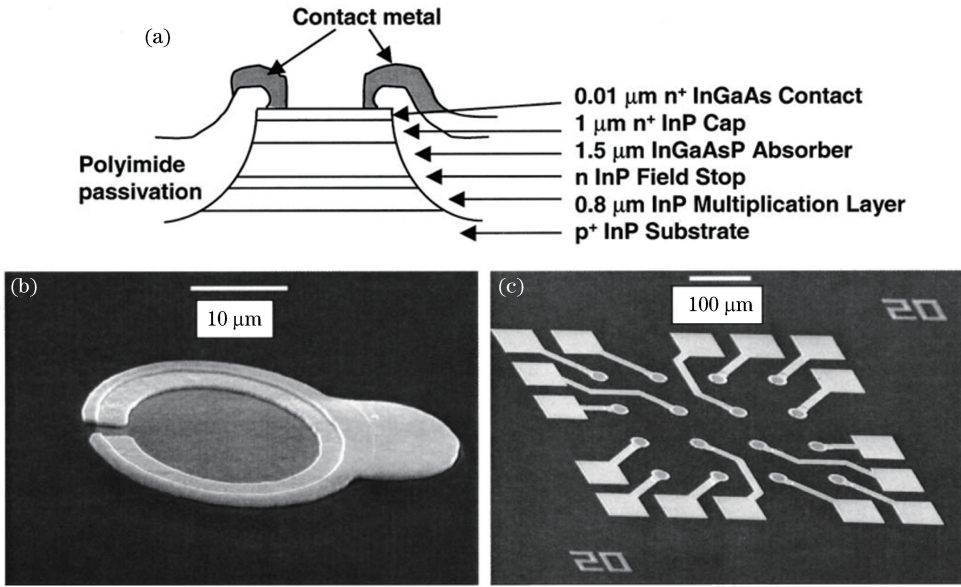


图4 InGaAsP/InP SPAD的器件平台设计和阵列图像。(a) MIT设计的InGaAsP/InP SPAD外延层和台面结构示意图；(b)单个像元的显微照片；(c)4×4阵列的显微照片<sup>[24]</sup>

Fig. 4 Device platform design and array image of InGaAsP/InP SPAD. (a) Schematic of epitaxial layer and mesa structure of InGaAsP/InP SPAD designed by MIT; (b) micrograph of individual pixel; (c) micrograph of 4×4 detector array<sup>[24]</sup>

表1 台面型InGaAsP/InP SPAD在不同条件下的性能参数

Table 1 Performance parameters of mesa-type InGaAsP/InP SPAD under different conditions

Multiplication zone thickness / μm	Over bias /V	Operating temperature /K	PDE /%	DCR / (10 <sup>9</sup> Hz · cm <sup>-2</sup> )
1.4	5	280	53	22
1.4	5	240	56	1.3
2.0	10	240	>70	1.3

0.2 V,较高的一致性允许其在同一偏置电压下工作,阵列像元的暗计数变化小于5%<sup>[24]</sup>。桥接互联技术将SPAD和CMOS集成电路对应粘合,然后将SPAD芯片的衬底刻蚀出与CMOS芯片SPAD对应的窗口,再将SPAD电极和CMOS焊盘通过桥接的方式实现电气连接。这种方式严重限制了光敏面的有效占空比<sup>[26]</sup>。为提高占空比,他们在2009年提出晶圆级3D集成互联方式,通过这种方式进行互联的SPAD阵列的占空比几乎可以达到100%<sup>[27]</sup>,但是工艺复杂。对于背入射InGaAs/InP SPAD阵列,应采用钢柱倒装焊的方式,实现钢柱倒装互连,首先在探测器芯片和读出集成电路(ROIC)或只在ROIC上制作钢柱,然后将SPAD阵列与ROIC点对点键合<sup>[28]</sup>。钢柱倒装互连对不同规模和材料的探测器具有较好的通用性,互联成功率高,因而成为大多数阵列器件制备的首选互联方法。

2007年以来,Glettler等<sup>[29]</sup>和Frechette等<sup>[30]</sup>发表了像元间距为100 μm的8×8和32×32阵列,间距为50 μm的128×32和256×64阵列。图

5为该实验室制备的32×32 SPAD/CMOS阵列和单个像元示意图。

MIT采用InP SPAD淬灭读出电路,使SPAD阵列具有帧读出和像素自动复位功能。其阵列像元实验结果如表2所示<sup>[31]</sup>。

表2所列阵列像元PDE和DCR的均值,对于1.06 μm和1.55 μm的探测波长,其PDE峰值分别为50%和45%。阵列像元的击穿电压要足够均匀,使阵列中每个像元能够有效地检测光子,并在整个阵列偏压为单一电压时有效地触发计时电路。通常,这需要阵列的击穿电压均差需小于1.5 V,其报道的256×64 GM-APD阵列具有良好的-一致性,均差约为1 V<sup>[31]</sup>。

2015年,MIT对GM-APD焦平面阵列中的光学串扰进行了表征,指出APD发生雪崩时,热载流子会发射光子,光子触发另一个像元时,会引发光学串扰,且串扰会随像元间距的缩小而增加<sup>[32]</sup>。图6(a)为PDE和串扰与过偏压的关系,可以看出串扰会随过偏压的增大而急剧增加,成为制约阵列

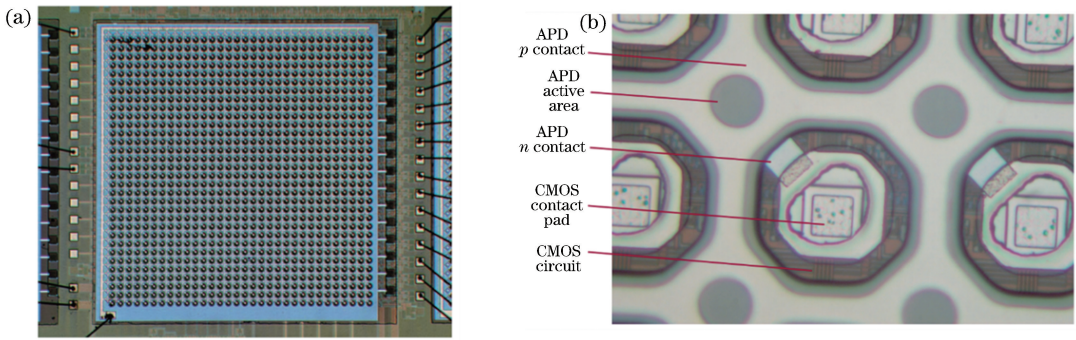


图5 MIT制备的APD/CMOS。(a) 32×32 APD/CMOS阵列桥接后的显微照片；  
(b) 高倍镜下APD/CMOS阵列中单个像元的显微照片<sup>[26]</sup>

Fig. 5 APD/CMOS prepared by MIT. (a) Micrograph of bridged 32×32 APD/CMOS array; (b) micrograph of individual pixel in APD/CMOS array at high magnification<sup>[26]</sup>

表2 Verghese等<sup>[31]</sup>在2007年发表的阵列像元实验结果

Table 2 Experimental results of array pixel published by Verghese *et al.*<sup>[31]</sup> in 2007

Absorption zone material	Operating temperature /K	Detection wavelength / $\mu\text{m}$	PDE /%	DCR /kHz	Dead time / $\mu\text{s}$
InGaAsP	298	1.06	50	<20	1
InGaAs	240	1.55	45	<20	6

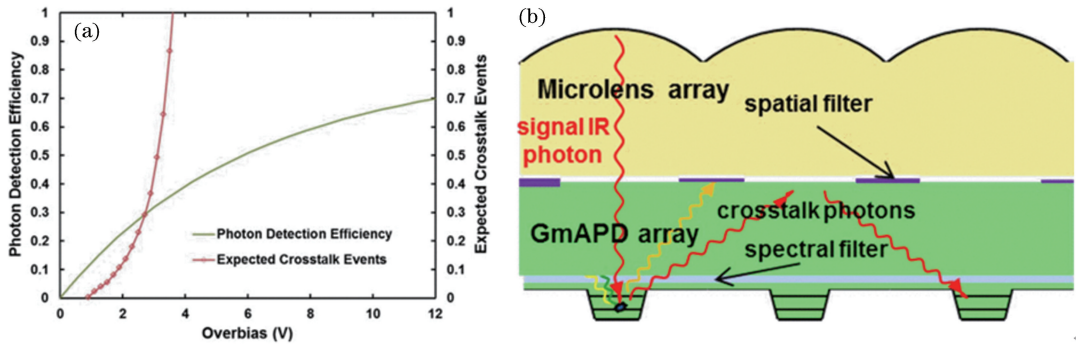


图6 GM-APD的相关参数和横截面示意图。(a) GM-APD的PDE和串扰与过偏压的关系；  
(b) 与MLA结合的InP GM-APD阵列的横截面示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 6 Related parameters and cross-sectional schematic of GM-APD. (a) PDE and crosstalk as functions of over-bias of GM-APD; (b) cross-sectional schematic of InP GM-APD array combined with MLA<sup>[33]</sup>

性能的主要影响因素,导致无法获得更高的PDE。因此消除InP GM-APD阵列中像元间的串扰具有重要的研究意义。MIT还介绍了一种通过与MLA结合并内置光谱滤波器<sup>[33]</sup>来减少串扰的方法,如图6(b)所示。MIT所研制的GM-APD阵列已应用于直接探测flash激光雷达、光子计数相干激光雷达<sup>[34]</sup>和通信等领域。

### 3.2 普林斯顿光波公司(PLI)

PLI继承MIT的技术,并开展了进一步的研发工作。2007年,该公司改进平面结构的背入射InGaAs/InP SPAD<sup>[21]</sup>,这种结构的高电场区在器件体内,能避免台面结构的侧壁问题,不需要对器件进行大量刻蚀,因此表面缺陷少,从而可以获得较低的

暗电流和较高的稳定性。其倍增层厚度和电场分布由Zn扩散决定,必须进行精确控制来获得较高的PDE和较低的DCR。同时报道了该背入射InGaAs/InP SPAD的最佳性能,在温度为200 K时,PDE为45%,DCR低于3 kHz,时间抖动低至30 ps。

2011年Itzler等<sup>[35]</sup>对InP GM-APD焦平面阵列研制方面的进展进行了报道。如图7(a)所示,其阵列像元采用背入射平面型结构。GM-APD焦平面阵列主要使用倒接焊的方法,主要结构如图7(b)所示,包括InGaAs(P)/InP GM-APD阵列、时间计数的硅CMOS的ROIC和MLA。使用高性能光学环氧树脂将MLA固定到GM-APD阵列上,固化速

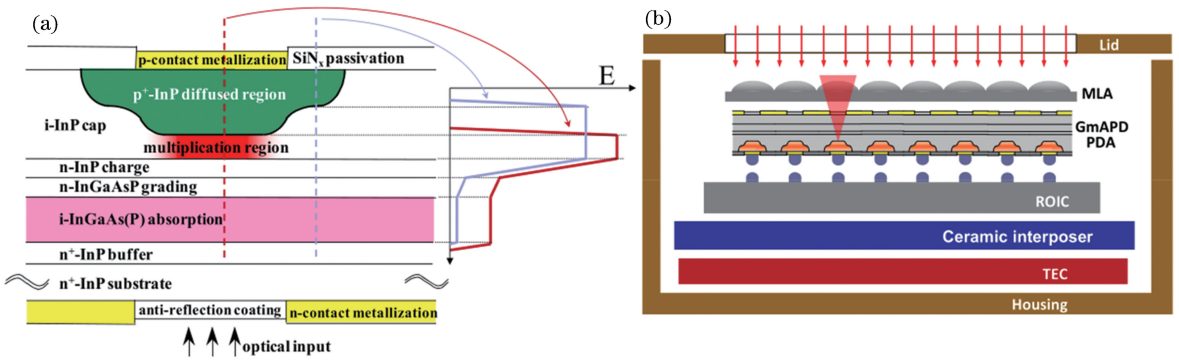


图7 InP GM-APD 焦平面阵列结构示意图。(a) InGaAs(P)/InP GM-APD 结构;(b)倒接焊 GM-APD 焦平面阵列  
Fig. 7 Schematic of focal plane array structure of InP GM-APD. (a) Structure of InGaAs(P)/InP GM-APD;

(b) reverse welding GM-APD focal plane array

度相对较快,并且该过程在消除 MLA 与 APD 的位置偏移方面是可靠的。表 3 为该公司报道的已研制成功的 InGaAs(P)/InP GM-APD 焦平面阵列的参数对比。

表 3 PLI 最新研制的 InP GM-APD 焦平面阵列参数

Table 3 Parameters of focal plane array of InP GM-APD developed by PLI

Array scale	32 × 32 <sup>[36]</sup>	32 × 128 <sup>[36]</sup>	32 × 32 <sup>[18]</sup>
Detection wavelength / μm	1.06	1.06	1.55
Operating temperature / K	253	248	248
Average DCR / kHz	14	3.7	17.9
Average PDE / %	39	34	19.7
PDE error / %	6	9	—

2015 年该公司 Jiang 等<sup>[18]</sup> 统计分析并报道了其阵列 DCR 和后脉冲概率与像元直径的关系,报道结果如表 4 所示。可以看出,器件直径减小到 16 μm 时可以大幅减小 DCR,器件直径对后脉冲概率影响不大,像元面积与 DCR 和后脉冲概率并不成正比。因此单元器件还有优化的余地,且在设计阵列器件时要权衡各项性能参数。

### 3.3 意大利 Cova 小组

2014 年,意大利 Cova 小组的 Tosi 等<sup>[37]</sup> 通过改进扩散条件来优化器件结构。采用两次扩散形成的平面型正入射 InGaAs/InP APD 结构,两次扩散包括中心深扩散和同心浅扩散,后者具有更大的半径,能减小有源区边缘电场强度,避免发生边缘击穿。该小组提出,两次扩散半径的差异是影响探测器性能的重要参数,因此需要对其进行适当调整以获得良好的电场均匀性和时间响应。Tosi 等<sup>[37]</sup> 报道的平面型正入射 InGaAs/InP APD 器件直径为 25 μm,在门控时间为几十纳秒的门控模式下,有着非常低的 DCR。在工作温度为 225 K、过偏压为 5 V、PDE 为 30% 时,其

表 4 PDE 为 20%,工作温度为 233 K 时,器件在不同尺寸下的 DCR 和后脉冲概率统计分布

Table 4 DCR and after-pulsing probability statistically distributed at different sizes when PDE is 20% and operating temperature is 233 K

Device diameter	16 μm	25 μm	40 μm
Maximum DCR / kHz	8.8	99.1	97.5
Minimum DCR / kHz	0.7	1.8	4.7
Mean DCR / kHz	3.5	29.7	40.7
Maximum after-pulsing probability	$2.85 \times 10^{-4}$	$9.76 \times 10^{-4}$	$5.26 \times 10^{-4}$
Minimum after-pulsing probability	$2.37 \times 10^{-5}$	$2.66 \times 10^{-7}$	$9.16 \times 10^{-6}$
Mean after-pulsing probability	$6.72 \times 10^{-5}$	$8.04 \times 10^{-5}$	$8.95 \times 10^{-5}$

DCR 为几千赫兹,时间抖动为 90 ps<sup>[37]</sup>。

2016 年,意大利 Cova 小组的 Calandri 等<sup>[38]</sup> 报道了一种通过聚焦离子束刻蚀沟槽来减少光串扰的方法,图 8 为该实验室人员设计的 1 × 16 InGaAs/InP SPAD 线阵,像元直径为 25 μm,间距为 60 μm。

像元之间的光学串扰有两条光路,一条是直接光路,光子通过 InP 层到达相邻像元的吸收层。另一条是间接光路,光子通过吸收层,被芯片背面的阴极金属反射并到达相邻像元。在像元之间通过聚焦离子束刻蚀沟槽可以完全抑制直接光路,如图 9(a) 所示。但是,间接光路并不能得到有效消除,如图 9(b) 所示<sup>[38]</sup>。

### 3.4 重庆光电技术研究所

2015 年重庆光电技术研究所张秀川等<sup>[39]</sup> 研制的 InGaAs/InP 雪崩光电二极管阵列作为背照入射平面结构,阵列规格为 8 × 8,像元中心距为 150 μm,采用分离吸收渐变电荷倍增的结构,如图 10(a) 所



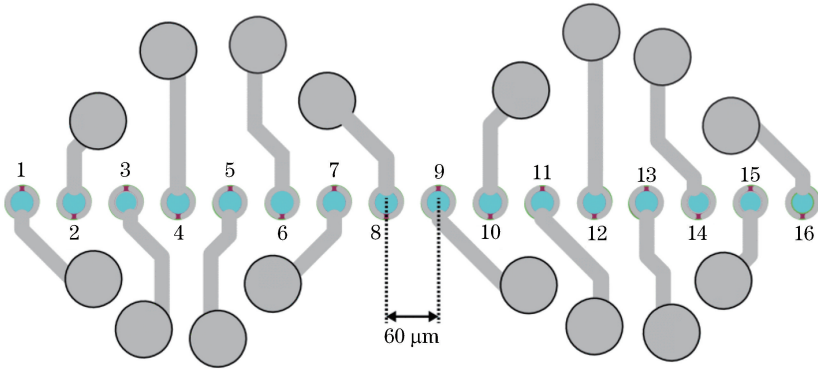


图 8 1×16 InGaAs/InP SPAD 线阵<sup>[38]</sup>

Fig. 8 1×16 InGaAs/InP SPAD line array<sup>[38]</sup>

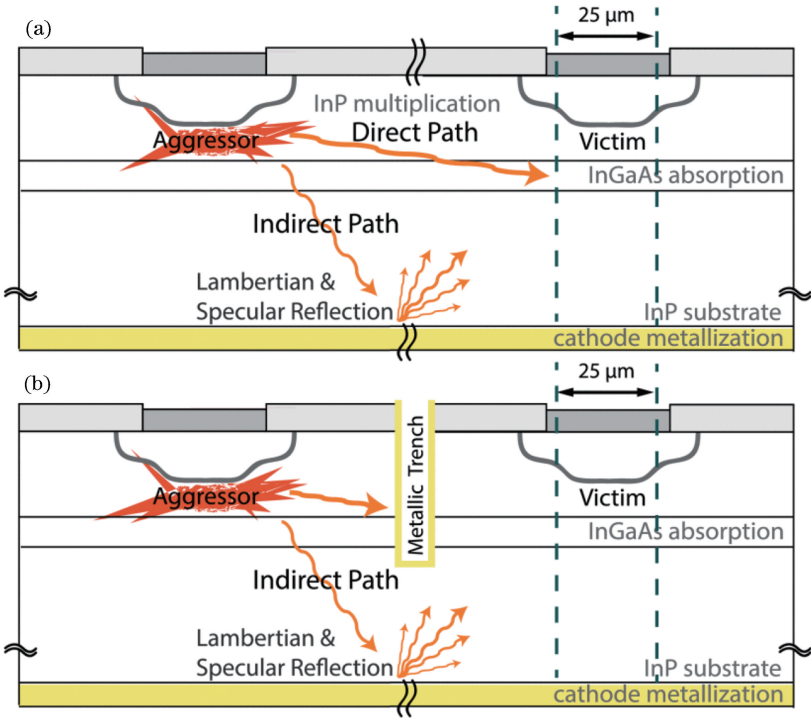


图 9 两个像元之间的光路简图。(a)没有金属沟槽;(b)有金属沟槽<sup>[38]</sup>

Fig. 9 Schematic of optical path between two pixels. (a) Without metal trenches; (b) with metal trenches<sup>[38]</sup>

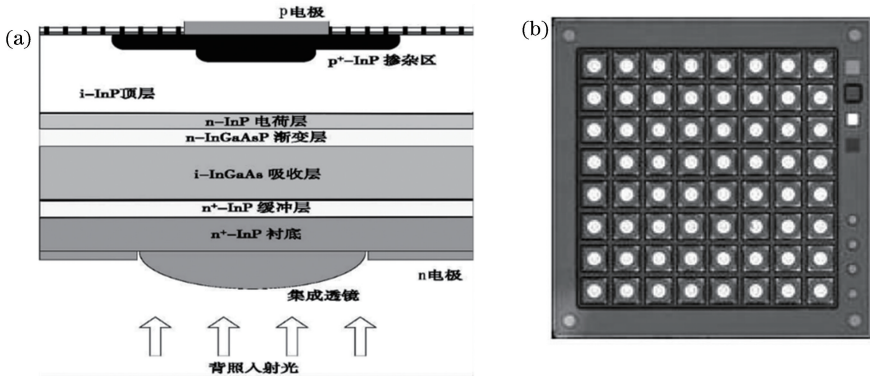


图 10 InGaAs/InP 雪崩光电二极管。(a)结构示意图;(b) 8×8 阵列照片<sup>[39]</sup>

Fig. 10 InGaAs/InP avalanche photodiode. (a) Schematic of structure; (b) photograph of 8×8 array<sup>[39]</sup>

示。其阵列芯片的优化主要体现在:为抑制像元间串扰,采用 ICP 刻蚀形成隔离槽,阻断相邻单元光电耦合通路;为增加光填充因子,在芯片背面 InP 衬底上采用光刻胶热熔法制作微透镜,实现 MLA 的单片集成。器件经 In 柱与时间计数型 CMOS 读出电路倒装互连组成 GM-APD FPA,图 10(b)为其  $8 \times 8$  InGaAs/InP 雪崩光电二极管阵列实物照片<sup>[39]</sup>。在工作温度为 235 K,过偏压为 3 V 条件下,该  $8 \times 8$  倒装混合集成的 GM 雪崩焦平面阵列的 DCR 均值为 32.5 kHz, PDE 均值为 19.5%,单元时间抖动为 465 ps<sup>[39]</sup>,这能代表目前国内阵列器件的研制水平。

### 3.5 中国科学院半导体研究所

中国科学院半导体研究所开展了 InGaAs/InP 单光子雪崩光电探测器阵列的研究。近年来致力于改进 InGaAs/InP SPAD 结构,优化工艺流程,对其进行平衡集成。采用 SAGCM 结构,直径为  $50 \mu\text{m}$  的单管器件在室温、门控重复频率为 20 MHz、工作温度为 257 K 下, PDE 为 20%, DCR 为 44 kHz。并成功制备出  $8 \times 8$  InGaAs/InP SPAD 阵列,阵列像

表 5 各机构在 InGaAs/InP SPAD 阵列领域研究进展对比

Table 5 Comparison of research progresses of various institutions in field of InGaAs/InP SPAD array

Institution	SAGCM	Device diameter / $\mu\text{m}$	Operating temperature /K	Array size	DCR /kHz	PDE /%
MIT	Mesa	20	240	$32 \times 32$	$<20$	45
PLI	Planar	25	248	$128 \times 32$	3.7	34
Chongqing	Planar		235	$8 \times 8$	32.5	19.5

## 4 总结与展望

首先给出几种常见的 APD 及其优缺点,说明近红外波段 InP 基的 InGaAs SPAD 可工作于半导体致冷器制冷温度下,具有探测效率高、易于平面集成的优势,具有巨大的应用价值;之后给出 InP 基的 InGaAs SPAD 阵列像元及整体的性能参数和影响因素,并给出部分优化方案,为进一步的完善和改进提供了依据;最后综述了近年来国内外几个研究机构在该领域的主要研究成果。随着单元器件的优化和阵列规模的增大,像元间的串扰问题成为制约大规模 SPAD 探测阵列分辨性能的关键因素。另外,专用集成电路技术和高效的数字读出方式也是 SPAD 探测阵列发展的重要因素。因此,降低像元间串扰、设计更加先进的专用集成电路、发现更好的探测芯片与集成电路的键合工艺是制造出更大规模、具有更高分辨率 SPAD 阵列的努力方向。目前,国外相关机构的 SPAD 探测阵列研究处于领先

元中心距为  $100 \mu\text{m}$ ,尚未与电路集成。初步测试结果显示,该阵列具有良好的击穿电压一致性,均差为 0.5 V,偏压为 0.9 V 时,暗电流小于 1 nA,盲元率低至 1.5%。

在电路研究方面,华东师范大学<sup>[40]</sup>、中国科学技术大学<sup>[41]</sup>等单位都有研究,大部分集中在高速门控和应用方面。东南大学吴金研究小组<sup>[42-44]</sup>对 InGaAs/InP SPAD 的集成读出电路方面作了一些研究工作。

表 5 为对 InGaAs/InP SPAD 阵列主要研究机构的研究进展进行对比,可以看出,平面型 SAGCM 因其较高的稳定性成为各机构采用的主要结构。PLI 在提高阵列大小,实现商用价值方面具有绝对优势,2015 年该公司报道的 GM 激光雷达传感器是第一个商用机载激光雷达系统, $128 \times 32$  的 SPAD 阵列是该系统的主要组成部分<sup>[45]</sup>,2018 年被 ARGO 收购之后更注重雷达在自动驾驶方面的应用;意大利在降低暗计数、提高 PDE、改进测试方法等方面作出贡献;我国已有相关产品,阵列器件的研制水平在阵列大小、DCR 和 PDE 等方面,还有待提升。

地位,国内研究水平与国外还存在一定差距。因此,开展 SPAD 器件及阵列探测技术的研究对提高国内研究水平和推进相关应用具有非常重要的意义。

### 参 考 文 献

- [1] Levine B F, Bethea C G, Campbell J C. Room-temperature  $1.3\text{-}\mu\text{m}$  optical time domain reflectometer using a photon counting InGaAs/InP avalanche detector [J]. Applied Physics Letters, 1985, 46(4): 333-335.
- [2] Legré M, Thew R, Zbinden H, *et al.* High resolution optical time domain reflectometer based on  $1.55 \mu\text{m}$  up-conversion photon-counting module[J]. Optics Express, 2007, 15(13): 8237-8242.
- [3] Quantum communications[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2016, 30(2): 87-90.
- [4] Browell E V, Vaughan W R, Hall W M, *et al.* Development of a high-altitude airborne dial system: the Lidar Atmospheric Sensing Experiment (LASE)[C]// In its 13th International Laser Radar

- Conference 4 p (SEE N87-10263 01-35), August 11-15, 1986, Toronto, Ontario. USA: NASA, 1986.
- [5] Cova S, Ghioni M, Rech I. Photon counting and timing detector modules for single-molecule spectroscopy and DNA analysis [C] // The 17th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-Optics Society, 2004. LEOS 2004., November 11-11, 2004, Rio Grande, Puerto Rico. New York: IEEE, 2004: 70-71.
- [6] Stellari F, Song P L, Weger A J. Single photon detectors for ultra low voltage time-resolved emission measurements [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(6): 841-848.
- [7] Hadfield R H. Single-photon detectors for optical quantum information applications [J]. Nature Photonics, 2009, 3(12): 696-705.
- [8] Buller G S, Collins R J. Single-photon generation and detection[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(1): 012002.
- [9] Eisaman M D, Fan J, Migdall A, *et al.* Invited review article: single-photon sources and detectors [J]. Review of Scientific Instruments, 2011, 82(7): 071101.
- [10] Melchior H, Lynch W T. Signal and noise response of high speed germanium avalanche photodiodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1966, ED-13(12): 829-838.
- [11] Dash W C, Newman R. Intrinsic optical absorption in single-crystal germanium and silicon at 77°K and 300°K [J]. Physical Review, 1955, 99(4): 1151-1155.
- [12] Chi N, Lu X Y, Wang C, *et al.* High-speed visible light communication based on LED [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(3): 0300001.  
迟楠, 卢星宇, 王灿, 等. 基于LED的高速可见光通信[J]. 中国激光, 2017, 44(3): 0300001.
- [13] Zhu F, Wang Q. Quantum key distribution protocol based on heralded single photon source [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0627002.  
朱峰, 王琴. 基于指示单光子源的量子密钥分配协议[J]. 光学学报, 2014, 34(6): 0627002.
- [14] 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): 083109.
- [15] Donnelly J P, Duerr E K, McIntosh K A, *et al.* Design considerations for 1.06- $\mu\text{m}$  InGaAsP-InP Geiger-mode avalanche photodiodes[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(8): 797-809.
- [16] Itzler M A, Jiang X D, Entwistle M, *et al.* Advances in InGaAsP-based avalanche diode single photon detectors [J]. Journal of Modern Optics, 2011, 58(3/4): 174-200.
- [17] Jiang X D, Itzler M A, Ben-Michael R, *et al.* InGaAsP-InP avalanche photodiodes for single photon detection [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2007, 13(4): 895-905.
- [18] Jiang X D, Itzler M, O'Donnell K, *et al.* InP-based single-photon detectors and Geiger-mode APD arrays for quantum communications applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(3): 5-16.
- [19] Jensen K E, Hopman P I, Duerr E K, *et al.* Afterpulsing in Geiger-mode avalanche photodiodes for 1.06  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(13): 133503.
- [20] Shangquan M J. Laser remote sensing with 1.5  $\mu\text{m}$  single photon detectors [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.  
上官明佳. 1.5  $\mu\text{m}$  单光子探测器在激光遥感中的应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [21] Itzler M A, Ben-Michael R, Hsu C F, *et al.* Single photon avalanche diodes (SPADs) for 1.5  $\mu\text{m}$  photon counting applications [J]. Journal of Modern Optics, 2007, 54(2/3): 283-304.
- [22] Liu J L. Design and performance study of single-photon detectors based on InGaAs(P)/InP PADs [D]. Jinan: Shandong University, 2018.  
刘俊良. 基于 InGaAs(P)/InP APD 的单光子探测器的研制和性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [23] Intermite G, McCarthy A, Warburton R E, *et al.* Fill-factor improvement of Si CMOS single-photon avalanche diode detector arrays by integration of diffractive microlens arrays [J]. Optics Express, 2015, 23(26): 33777-33791.
- [24] McIntosh K A, Donnelly J P, Oakley D C, *et al.* InGaAsP/InP avalanche photodiodes for photon counting at 1.06  $\mu\text{m}$  [J]. Applied Physics Letters, 2002, 81(14): 2505-2507.
- [25] Aull B F, Loomis A H, Young D J, *et al.* Geiger-mode avalanche photodiodes for three-dimensional imaging [J]. Lincoln Laboratory Journal, 2002, 13(2): 335-350.
- [26] Chen C L, Yost D R, Knecht J M, *et al.* Wafer-scale 3D integration of InGaAs image sensors with Si

- readout circuits [C] // 2009 IEEE International Conference on 3D System Integration, September 28-30, 2009, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE, 2009: 10943264.
- [27] Bu Y M, Zeng Z Y, Du X P, *et al.* Research progress of photoelectric mixing technology in laser three-dimensional imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(8): 080002.  
卜禹铭, 曾朝阳, 杜小平, 等. 激光三维成像中光电混频技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(8): 080002.
- [28] Schuette D R, Westhoff R C, Loomis A H, *et al.* Hybridization process for back-illuminated silicon Geiger-mode avalanche photodiode arrays [J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7681: 76810P.
- [29] Glettler J B, Hopman P, Verghese S, *et al.* InP-based single-photon detector arrays with asynchronous readout integrated circuits[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(10): 100502.
- [30] 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]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8375: 83750W.
- [31] 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.
- [32] Chau Q, Jiang X D, Itzler M A, *et al.* Analysis and modeling of optical crosstalk in InP-based Geiger-mode avalanche photodiode FPAs[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9492: 94920O.
- [33] 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 (IPC), October 2-6, 2016, Waikoloa, HI, USA. New York: IEEE, 2016: 260-261.
- [34] Jiang L A, Luu J X. Turbulence mitigation for coherent ladar using photon counting detector arrays [C] // *Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications*, June 25-30, 2006, Whistler, Canada. Washington, D.C.: OSA, 2006: CWB6.
- [35] Itzler M A, Entwistle M, Owens M, *et al.* Comparison of  $32 \times 128$  and  $32 \times 32$  Geiger-mode APD FPAs for single photon 3D LADAR imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2011, 8033: 80330G.
- [36] Itzler M A, Entwistle M, Krishnamachari U, *et al.* SWIR Geiger-mode APD detectors and cameras for 3D imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9114: 91140F.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Zhang X C, Jiang L Q, Gao X J, *et al.* Fabrication of InGaAs/InP Geiger-mode avalanche focal plane arrays [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2015, 36(3): 356-360, 391.  
张秀川, 蒋利群, 高新江, 等. InGaAs/InP 盖革模式雪崩焦平面阵列的研制 [J]. *半导体光电*, 2015, 36(3): 356-360, 391.
- [40] Wu G, Zhou C Y, Chen X L, *et al.* High performance of gated-mode single-photon detector at  $1.55 \mu\text{m}$  [J]. *Optics Communications*, 2006, 265(1): 126-131.
- [41] 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.
- [42] Zheng L X, Yang J H, Liu Z, *et al.* Design and implementation of Gm-APD array readout integrated circuit for infrared 3D imaging [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8907: 890744.
- [43] Zheng L X, Wu J, Zhang X C, *et al.* Sensing detection and quenching method for InGaAs single-photon detector [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10): 104216.  
郑丽霞, 吴金, 张秀川, 等. InGaAs 单光子探测器传感检测与淬灭方式 [J]. *物理学报*, 2014, 63(10): 104216.
- [44] Yang J H. The design of fully integrated readout circuit based on avalanche photon diode sensor array [D]. Nanjing: Southeast University, 2014.  
杨俊浩. 雪崩光电二极管阵列型全集成传感读出电路设计 [D]. 南京: 东南大学, 2014.
- [45] Clifton W E, Steele B, Nelson G, *et al.* Medium altitude airborne Geiger-mode mapping LIDAR system [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9465: 946506.