

## 碲镉汞光子计数型线性雪崩探测器 (特邀)

郭慧君 陈路 杨辽 沈川 谢浩 林春 丁瑞军 何力

### Linear-mode HgCdTe avalanche photodiode detectors for photon-counting applications (invited)

Guo Huijun, Chen Lu, Yang Liao, Shen Chuan, Xie Hao, Lin Chun, Ding Ruijun, He Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230036>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 温度对碲锌镉光子计数探测器计数性能的影响及机理研究

Effect and mechanism of temperature on photon counting performance of CdZnTe detectors

红外与激光工程. 2019, 48(10): 1016001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1016001>

#### 碲镉汞高工作温度红外探测器

HgCdTe high operation temperature infrared detectors

红外与激光工程. 2021, 50(4): 20200328 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200328>

#### 星载微脉冲光子计数激光雷达的探测性能仿真分析

Analysis of the detection performance of spaceborne micropulse photon-counting lidar

红外与激光工程. 2021, 50(11): 20200502 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200502>

#### 用于1 550 nm光子检测的InGaAs/InP 单光子雪崩二极管的温度相关性

Temperature dependency of InGaAs/InP single photon avalanche diode for 1 550 nm photons

红外与激光工程. 2021, 50(11): 20210453 <https://doi.org/10.3788/IRLA20210453>

#### 线性模式主被动碲镉汞APD探测器测试研究

Research on testing of active and passive HgCdTe APD detector in linear mode

红外与激光工程. 2021, 50(6): 20200460 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200460>

#### 光子计数激光测深系统

Photon counting laser bathymetry system

红外与激光工程. 2019, 48(1): 106002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0106002>

## 碲镉汞光子计数型线性雪崩探测器 (特邀)

郭慧君<sup>1</sup>, 陈路<sup>1\*</sup>, 杨辽<sup>1</sup>, 沈川<sup>1</sup>, 谢浩<sup>1</sup>, 林春<sup>1,2</sup>, 丁瑞军<sup>1,2</sup>, 何力<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;  
2. 上海科技大学 信息科学与技术学院, 上海 201210)

**摘要:** 单光子计数技术在弱信号探测和时间测距中具有重大的应用前景。自从 20 世纪 70 年代可见光的光子计数系统研发以来, 国际上该领域内的研发小组在不断地发展完善光子计数技术, 充分放大光子信号, 以降低电子设备的读出噪声。电子倍增电荷耦合器件 (Electron Multiplying Charge Coupled Devices, EMCCDs) 具有更高的量子效率, 可替代传统的可见光光子计数系统, 但较大的雪崩噪声阻碍了倍增下入射光子数的准确获取。碲镉汞线性雪崩器件 (HgCdTe APD) 的过剩噪声因子接近 1, 几乎无过剩噪声; 相对于盖革模式的雪崩器件, 没有死时间和后脉冲, 不需要淬灭电路, 具有超高动态范围, 光谱响应范围宽且可调, 探测效率和误计数率可独立优化, 开辟了红外波段光子计数成像的新应用领域, 在天文探测、激光雷达、自由空间通信等应用中具有重要价值。美国雷神 (Raytheon) 公司和 DRS 技术公司、法国 CEA/LETI 实验室和 Lynred 公司、英国 Leonardo 公司先后实现了碲镉汞线性雪崩探测器的单光子计数。文中总结了欧美国家在碲镉汞光子计数型线性雪崩探测器研究方面的技术路线和研究现状, 分析了吸收倍增分离型 (Separation of Absorption and Magnification, SAM)、平面 PIN 型和高密度垂直集成型 (High Density Vertically Integrated Photodiode, HDVIP) 三种结构的 HgCdTe APD 器件性能、光子计数能力以及制备优缺点。雷神公司采用分子束外延 (Molecular-Beam Epitaxy, MBE) 方式制备了空穴倍增机制的 SAM 型短波 HgCdTe APD 器件, 增益可达 350, 光子探测效率达 95% 以上, 工作温度达 180 K 以上。DRS 技术公司采用液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE) 碲镉汞材料制备了电子倍增机制的 HDVIP 型中波 HgCdTe APD 器件, 在 0.4~4.3  $\mu\text{m}$  的可见光到中红外波段都能响应, 最高增益可达 6 100, 光子探测效率大于 70%, 可实现 110 Mbps 的自由空间通信。CEA/LETI 实验室和 Lynred 公司采用分子束外延或液相外延制备了电子倍增机制的 PIN 型短波和中波 HgCdTe APD 器件, 短波器件增益达 2 000, 中波最高增益可达 13 000, 内光子探测效率达 90%, 实现了 80 Mbps 的自由空间通信, 在 300 K 和增益为 1 时, 带宽最高达 10 GHz。英国 Leonardo 公司采用金属有机气相沉积 (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) 方式制备了电子倍增机制的 SAM 型短波 HgCdTe APD 器件, 命名为 Selex Avalanche Photodiode HgCdTe Infrared Array (SAPHIRA), 器件增益可达 66@14.5 V, 单光子探测率达 90% 以上, 中心距为 24  $\mu\text{m}$  的 320×256 阵列的 SAPHIRA 器件供给法国 First Light Imaging 公司, 研发出了 C-RED ONE 相机, 相机成功应用于美国天文探测的密歇根红外组合器 (Michigan Infrared Combiner, MIRC), 将 MIRC 的系统噪声降低了 10~30 倍, 大大提高了条纹探测的信噪比。国内碲镉汞雪崩探测器研究起步比较晚, 主要研究机构有中国科学院上海技术物理研究所、昆明物理研究所和 华北光电技术研究所, 受限于芯片制备技术和电路技术, 目前没有实现光子计数方面的应用, 但在焦平面研制上取得了一定进展。中国科学院上海技术物理研究所研制了 PIN 结构的单元、128×128 阵列、320×256 阵列中波 HgCdTe APD 器件, 器件增益可达 1 000 以上, 增益 100 以内, 增益归一化暗电流密度低于  $1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , 增益 400 以内的过剩噪声因子小于 1.5,

收稿日期: 2023-01-29; 修订日期: 2023-02-23

基金项目: 国家自然科学基金 (62104240, 62204248)

作者简介: 郭慧君, 男, 副研究员, 博士, 主要从事碲镉汞雪崩探测器 and 高温器件的物理机理、设计、制备和表征方面的研究。

通讯作者: 陈路, 女, 研究员, 博士, 主要从事分子束外延碲镉汞材料的结构设计、生长和碲镉汞器件工艺方面的研究。

增益 133 时的噪声等效光子数为 12,进行了短积分快速成像演示;单元器件带宽可达 300~600 MHz。昆明物理研究所研制了 PIN 结构的单元和 256×256 阵列的中波 HgCdTe APD 器件,单元器件增益可达 1000 以上;在偏压 8.5 V 以内,焦平面平均增益归一化暗电流为  $9.0 \times 10^{-14} \sim 1.6 \times 10^{-13}$  A,过剩因子  $F$  介于 1.0~1.5 之间。国内主要是研制平面 PIN 结构的 HgCdTe APD 器件,技术路径与法国基本相同。因而,我国可借鉴 CEA/LETI 实验室成功经验和 Lynred 公司的运营模式,持续推进 HgCdTe APD 器件的研究,以早日达到国际先进水平,实现单光子探测和光子计数应用。

关键词: 碲镉汞; 光子计数; 线性雪崩; 光子探测效率; 器件结构; 过剩噪声

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20230036

## 0 引言

光子计数技术能将光子信号充分放大以克服电子器件的读出噪声,利用弱光照射下探测器输出电信号自然离散的特点,记录一定时间内探测器输出的光子数,根据光子计数值推算出被测目标的信息。为了实现极微弱的光探测,各国先后研究了多种不同种类的具有光子探测能力的仪器。早期的光子计数成像系统(Intensified Photon Counting Systems, IPCS)于 20 世纪 70 年代由英国率先研制,是将四级级联磁聚焦像增强器通过光导摄像管电视摄像机与光学系统耦合而成。随后在 80 年代英国采用微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)像增强器作为核心探测器构建出新型光子计数成像系统(MCP Intensified CCD, MIC)。同一时期,日本滨松公司以三级微通道板像增强器作为光子计数成像头,成功研制出与四象限光子位敏传感器组合而成的光子计数图像采集系统(Photon-Counting Image Acquisition System, PIAS)。80 年代后期,美国开发了一种基于新型多阳极微通道板阵列(Multi-Anode Microchannel Array, MAMA)的光子计数成像系统,该系统尺寸小、功耗低、可靠性高,非常适用于空间技术研究,但量子效率低、光谱适应范围较窄,主要工作在紫外和可见光波段,对红外光谱响应较低<sup>[1]</sup>。在总结了早期微弱光环境下单光子成像技术的优缺点基础上,2001 年,由 Andor Technology Ltd 公司首先将片上增益的电子倍增电荷耦合器件(Electron Multiplying Charge Coupled Devices, EMCCD)用于 i-Xon 系列高端超高灵敏度相机上<sup>[2]</sup>。虽然 EMCCD 具有体积小、量子效率高、增益可达 1000 倍以上等优势,但 EMCCD 在对信号增强的同时也放大了暗电流噪声,其暗电流噪声水平对探测灵敏度及信噪比的影

响较大。固态雪崩光电二极管(Avalanche Photodiode, APD)是利用内光电效应探测光信号的器件。与真空器件相比,固态器件在响应速度、暗计数、功耗、体积和对磁场敏感性等方面具有明显的优势,国外先后开展了基于固态 APD 光子计数成像技术的研究<sup>[3-4]</sup>。

APD 器件有盖革模式(Geiger Mode, GM)和线性模式(Linear Mode, LM)两种工作模式,目前 APD 光子计数成像技术主要采用盖革模式 APD 器件<sup>[5-6]</sup>。盖革模式 APD 器件具备单光子级别的高灵敏度、达数十纳秒的高速响应速度,可获得高时间精度。但盖革模式 APD 存在探测器死时间、探测效率低、光串音大、空间分辨率不高等问题,很难优化折中高探测率和低虚警率的矛盾。而基于近无噪声高增益 HgCdTe APD 器件的光子计数器工作于线性模式,没有死时间和光串音限制,没有与盖革模式相关的后脉冲,不需要淬灭电路,具有超高动态范围,光谱响应范围宽且可调,探测效率和误计数率可独立优化,开辟了红外波段光子计数成像的新应用领域,是光子计数器件的重要发展方向,在天文观测、自由空间通信、主被动成像、条纹跟踪等方面有广阔的应用前景<sup>[7]</sup>。

## 1 HgCdTe APD 器件光子计数原理

### 1.1 HgCdTe APD 器件基本特性

基于 HgCdTe 材料的 APD 器件可覆盖波长范围广,电子和空穴的离化系数差异大(见图 1(a)),在截止波长 1.3~11  $\mu\text{m}$  内表现了单载流子倍增机制<sup>[8-9]</sup>,近乎无过剩噪声(相比于 Si APD 器件的过剩噪声因子  $F_{\text{Si}} \sim 2-3$ , III-V 族器件  $F_{\text{III-V}} \sim 4-5$ (见图 1(b)),使得器件信噪比随增益增加几乎不发生衰退<sup>[10-11]</sup>,是比较理想的雪崩红外探测器。

表 1 比较了盖革模式(GM)和线性模式(LM)的

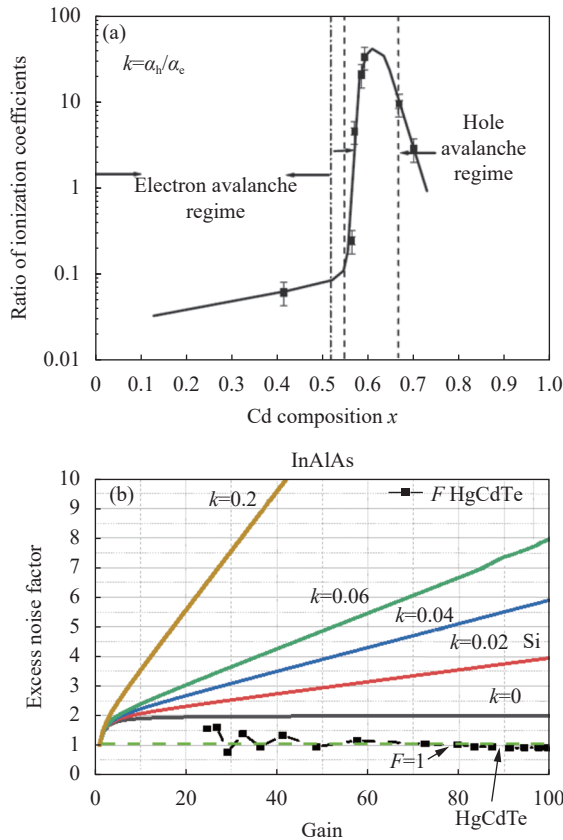


图 1 (a) 碲镉汞材料碰撞电离系数比与 Cd 组分  $x$  的关系; (b) 不同材料体系的 APD 器件的过剩噪声因子  $F$  对比

Fig.1 (a) Relationship between impact ionization coefficient ratio and Cd component  $x$  of HgCdTe materials; (b) Comparison of excess noise factor  $F$  for various APD materials

光子计数技术。两者都能探测单光子事件,但是线性模式可以确定每个脉冲返回的光子数量,动态范围可以是几百到上千。另一个关键的区别是,盖革雪崩器件能产生几十万上百万的倍增载流子实现高的增益,而线性雪崩器件只需要 100~200 的增益。盖革雪崩击穿一旦触发,除非淬灭,否则雪崩将一直持续。淬灭雪崩的时间为死时间,在死时间内,盖革雪崩器件不能探测信号光子。盖革雪崩器件的另一个问题是光学串扰。线性雪崩器件没有持续的雪崩发生,雪崩的自然淬灭时间不到 1 ns,因此,没有后脉冲或辐射复合引起的光学串扰,可以实现脉冲间隔 1 ns 的时间分辨率。通过定量测试信号强度,可以实现: (1) 区分表面暗电流和雪崩暗电流; (2) 区分伽玛或质子辐射和信号引起的事件; (3) 区分暗计数和少量光子返回的信号。对于线性雪崩器件,光子探测效率 (PDE) 可以接近大于 90% 的光学量子效率。而盖革雪崩器件光子探测效率通常为 30%~50%。为了弥补死时间问题,盖革雪崩器件通常使用多次激光拍摄 (通常为 100 次或更多) 来获取信号的场景信息,以提供强度以及两个物体之间的距离信息。然而,使用没有死时间的线性雪崩器件,可以优化利用激光能量,并 10 倍以上减少获取图像信息所需的时间<sup>[4]</sup>。

表 1 线性模式和盖革模式技术比较

Tab.1 Comparison of linear and Geiger mode technology

Parameters	Linear mode	Geiger mode
Able to sense single photon event	Yes	Yes
Single event dynamic range	>1 000 : 1	1 photon same as 2 or 1 000
APD gain	>60	$10^5$ - $10^6$
ROIC front end	High gain, low noise	Low gain, high noise
Repetitive pulse resolution	1-2 ns	100-1 000 ns <sup>(1)</sup>
Optical crosstalk	Minimal	Significant radiative recombination of a large number of carriers
Range resolution (pulse-to-pulse)	~20 cm	1 500-15 000 cm <sup>(2)</sup>
Discriminate gained signal from ungained surface dark current	Yes, by thresholding	Yes, by thresholding
Discriminate gained signal from gained radiation ( $\gamma, p$ )	Yes, by amplitude	No, Can't discriminate with single pulses <sup>(3)</sup>
Discriminate gained "few" photon signal from gained bulk $J_{dark}$	Yes, by amplitude	No, can't discriminate with single pulses returns <sup>(3)</sup>
Photon detection efficiency	Optical QE>90%	Geiger efficiency ~30%–50%

备注: (1) 由于后脉冲的捕获和再发射大量载流子导致的死时间限制了脉冲间隔分辨率。  
 (2) 多脉冲盖革统计能达到 10 cm 的距离分辨率。  
 (3) 通过多次事件符合过滤可以区分倍增的光子信号和倍增的体暗电流。

### 1.2 光子计数成像原理<sup>[1,12]</sup>

光电探测器接收单个光子后会激发出光电子脉冲,光子计数技术即是通过分辨这些光子激发脉冲,把光信号从热噪声中以数字化方式提取出来的一种新技术。由于微弱光信号在时间域上表现的较为分散,因此探测器输出的电信号也是自然而离散的。根据微弱光的这一特点,通常采用脉冲放大,脉冲甄别以及数字计数技术来对极弱光进行探测。现代光子计数技术具有信噪比高、区分度高、测量精度高、抗漂

移性好、时间稳定性好等诸多优点,并且可以将数据以数字信号的形式输出给计算机进行后续的分析处理,这是其他探测方法所不能比拟的。目前,光子计数系统在工业测量领域以及微光探测领域有了广泛的应用,例如非线性光学、分子生物学、超高分辨率光谱学、天文测光、大气测污等,都与微弱光号的采集检测有关。图 2 为光子计数系统的结构图,可以看出系统主要由光电探测器、前置放大器、脉冲幅度甄别器和计数器这四个部分组成。

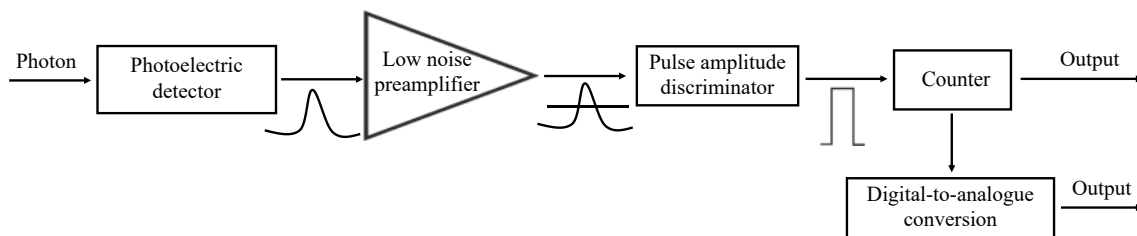


图 2 光子计数系统原理框图

Fig.2 Diagram layout of photon counting system

对于成像来说,一幅图像实际上是一种二维空间的光强或光场的分布,光经过不同物体、不同表面反射后产生的非均匀光信号在探测器的不同像元进行能量积分,产生的光电流经过倍增、处理后得到不同灰度等级像素单元组成的图像。这幅图像可以被视为一个二维函数  $F(x,y)$ ,  $x$  和  $y$  为空间坐标,  $(x,y)$  对应图像中任意一个像素,  $F(x,y)$  则为该像素处图像的亮度或灰度。

若采用单个光电探测器进行扫描探测,从理论上讲对二维图像进行采样时只要满足奈奎斯特抽样定理,便可以恢复出图像。因此,可以预先设计好待测目标的采样范围和采样间隔,利用光电探测器获取每一个采样点处的光子计数值便能对应到该点的亮度信息,通过数据反演即可恢复出被测目标的图像。

## 2 国外机构研究进展

国际上对 HgCdTe APD 的研究开始于 20 世纪 70 年代末,主要集中在美、英、法、德等国,已经形成了各自的特点和研究成果,并实现了一定的产品化。主要有美国的雷神公司 (Raytheon) 和 DRS 技术公司、法国的 CEA/LETI 实验室和 Lynred 公司(前身为 Sofradir

公司)、英国的 Leonardo 公司(前身为 Selex 公司)、德国 AIM 公司等致力于线性模式 HgCdTe APD 焦平面的研发。其中,美国雷神公司和 DRS 公司、法国 CEA/LETI 实验室和 Lynred 公司和英国的 Leonardo 公司先后开展了 HgCdTe APD 器件的光子计数探测应用研究。

### 2.1 美国雷神公司 (Raytheon)

#### 2.1.1 HgCdTe APD 器件技术路线

雷神公司在碲锌镉 (CdZnTe) 衬底上采用分子束外延 (Molecular-Beam Epitaxy, MBE) 技术生长多层异质结的 HgCdTe APD 结构,即吸收区和倍增区分离 (Separate Absorption and Multiplication, SAM) 的结构<sup>[13]</sup>,如图 3(a) 所示。该结构一般为台面结构,它的吸收区用于吸收光子而产生光生载流子,光生载流子在电场作用下进入倍增区发生碰撞电离,吸收层为 N 型层,倍增层 Cd 组分为 0.73,是利用空穴电离谐振引发雪崩增益的短波器件<sup>[14]</sup>,如图 3(b) 所示。SAM 结构的优点在于可设计各层材料的组分、厚度、浓度等参数以获得高增益、高量子效率和低过剩噪声;缺点是多层结构的设计和材料生长是一项工作量极大的任务,工艺复杂性高。

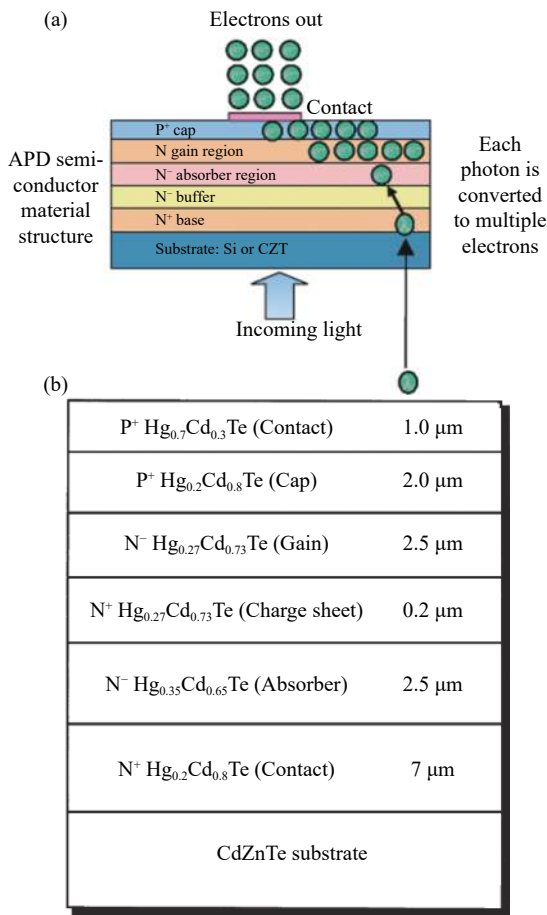


图 3 (a) SAM 型 HgCdTe APD 器件结构示意图; (b) 分子束外延生长的 SAM 型 HgCdTe APD 外延结构

Fig.3 (a) Diagram of HgCdTe SAM-APD structure; (b) Epitaxial structure of HgCdTe SAM-APD grown by molecular-beam epitaxy

2.1.2 HgCdTe APD 器件光子计数性能

为解决远距离(百万米距离)探测和卫星跟踪的信号脉冲衰减严重的问题,雷神公司 2007 年开发了具有单光子探测能力的 4×4 阵列规模的 HgCdTe APD 器件(见图 4),读出电路带宽达 1~3 GHz,在增益 50~200 时输出信号,实现了近无噪声的单光子探

测<sup>[15]</sup>。如图 5 所示,在每脉冲的平均照明强度为 1 个光子时,器件能探测分辨出 0、1 和 2 个光子(见图 5(a)),分辨单光子的两个脉冲间隔时间小于 6 ns(见图 5(b))。2010 年,通过进一步优化电路,限制热载流子发出的辉光,实现了信噪比大于 10,探测率大于 95%,虚警率小于 1%,性能指标见表 2<sup>[16]</sup>,并将开发 256×256 阵列规模的 HgCdTe APD 光子计数器件。

2.2 美国 DRS 公司

2.2.1 HgCdTe APD 器件技术路线

DRS 技术公司基于早期的 N/P 环孔器件结构开发出了高密度垂直集成器件 (high density vertically integrated photodiode, HDVIP) 结构,成功研制出高性能的 HgCdTe e-APD 器件,其结构示意图如图 6 所示<sup>[17]</sup>。这种结构的器件大多采用 IB 族掺杂的 P 型材料<sup>[18]</sup>,通过刻蚀工艺形成通孔用于芯片和读出电路间的连接,刻蚀或注入形成的 Hg 填充向内部扩散过程中, P 型掺杂由于 knock-out 效应会一起迁移,有助于低掺杂的 N<sup>-</sup>区的形成。因此, HDVIP 的单元结构是横向的 N<sup>-</sup>-N<sup>-</sup>-P 结,与平面 PIN 型 APD 有很大的相似之处。这种结构的优点在于: (1) 器件上下表面都进行了 CdTe 钝化,并进行了互扩散退火工艺,有效降低 1/f 噪声; (2) 器件的电流信号通过刻蚀后的 N 区和 Si 读出电路的电极直接相连,不需要通过 In 柱进行互联,因此器件的热循环稳定性得到很大提高,并且与像元尺寸及面阵大小无关; (3) 其结构的取向使得 PN 结界面与外延材料中的穿越位错接近平行,有效降低了从 PN 结中穿越的位错密度,这有助于器件漏电流的减小; (4) HDVIP 为正入射器件,有利于探测率 D\*、量子效率和调制传递函数 MTF 的提高; (5) 外延材料的衬底全部去除后,衬底与读出电路间的热失配问题可以得到解决。但制备技术比较复杂,难度高,尤其是需要完整去除碲镉镉衬底,同时不对碲镉

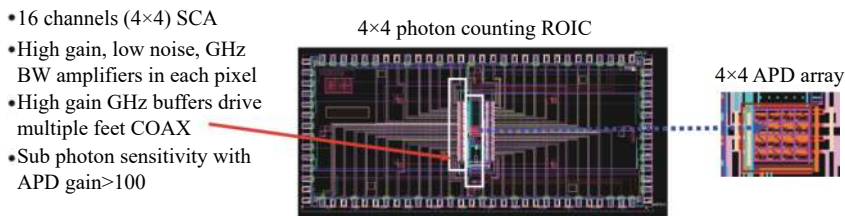


图 4 4×4 阵列规模的 HgCdTe APD 光子计数芯片组件

Fig.4 HgCdTe APD 4×4 photon counting sensor chip assembly

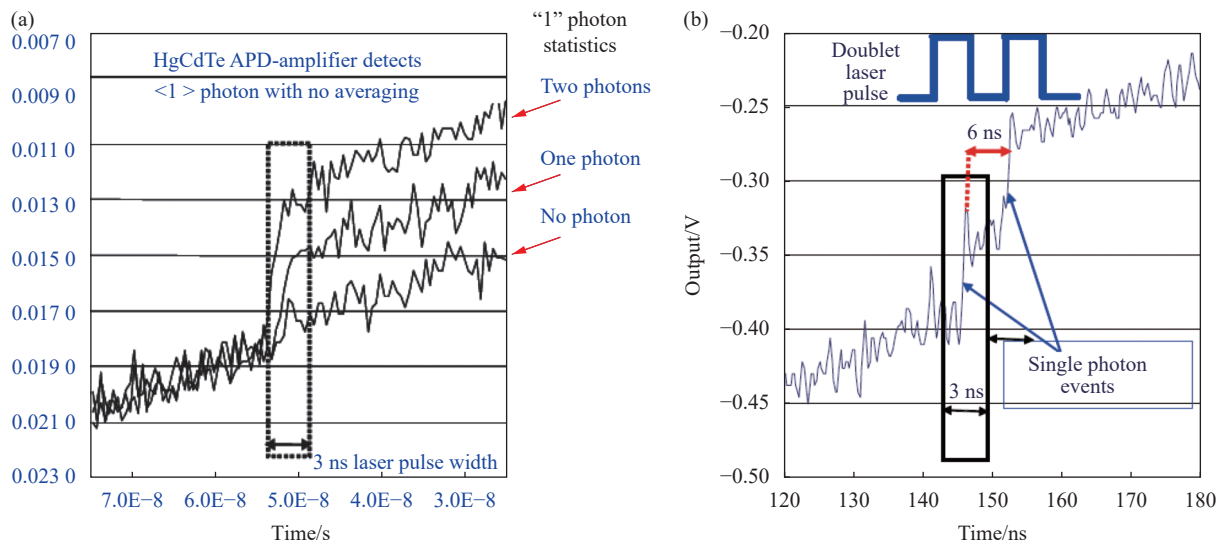


图 5 (a) 平均照明强度为 1 个光子, 多次采集显示探测出 0、1 和 2 个光子; (b) 获得小于 6 ns 的紧密双脉冲间隔时间的单光子, 且观察不到后脉冲  
 Fig.5 (a) Multiple acquisitions showing detection of 0, 1 and 2 photons with average illumination of one photon; (b) Single photon acquisition with double pulses closely spaced time (<6 ns) without afterpulsing observed

表 2 4×4 阵列规模的 HgCdTe APD 光子计数组件性能

Tab.2 Performance of HgCdTe APD 4×4 photon counting sensor chip assembly

Parameters	Results
Response waveband	1.55 μm
Operating voltages	<20 V
Operating temperature	80-180 K or greater
Maximum gain	200-350
Dark count rate (DCR) (counts/s) at M>100	<10 <sup>4</sup> (80-160 K), <10 <sup>5</sup> (180 K)
Surface dark current	<10 <sup>-13</sup> A
Max reset time	10 ms
Operability	>90%
Probability of detection	>95%
False alarm rate	<1%

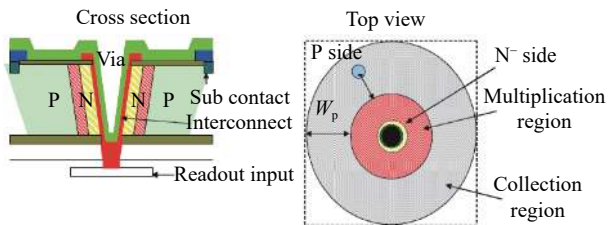


图 6 HDVIP 型 HgCdTe APD 结构截面图和俯视图

Fig.6 Cross section and top view of HDVIP HgCdTe APD structure

汞薄膜造成损伤, 因此限制了该技术方案的应用。

### 2.2.2 HgCdTe APD 器件光子计数性能

2011 年, DRS 首次报道了 2010 年研制的 2×8 阵列规模的中波 HgCdTe APD 光子计数器件 (见图 7)<sup>[7]</sup>,

器件光谱响应范围从可见光到中波红外, 为 0.4~4.3 μm, 是响应光谱最宽的光子计数器件, 过剩噪声接近于 1, 在增益 500~1000 之间可以稳定探测光子; 13 V 偏压下, 增益为 500, 暗电流约 1 pA, 暗计数率低于 20 kHz; 光子脉冲信噪比为 13.7, 实现了单光子探测; 光背景限制的光子探测假事件率 (False Event Rate, FER) 为 1 MHz 时, 光子探测效率为 50%, 分辨单光子的两个脉冲间隔时间小于 10 ns。此处的假事件率是指与目标信号无关的任何光子探测, 是在没有任何有意的光子通量入射到探测器时测量的值, 杜瓦光泄露、热背景、暗电流和读出电路的辉光都会影响

假事件率的值。相对于短波 HgCdTe APD 器件,中波 HgCdTe APD 有几个重要的优点:(1)增益大于 1000 时,产生复合和扩散暗电流可以忽略不计;(2)实现所需雪崩增益的 APD 偏置电压要低得多,简化了读出电路的设计,大大提高了 APD 的可靠性;(3)能够在更宽的光谱范围内检测光子,具有高且几乎均匀的量子效率。

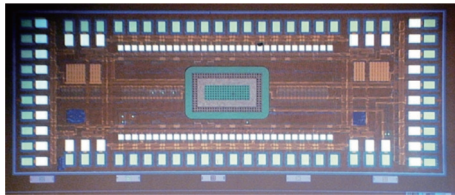


图 7 2×8 线列的中波 HgCdTe APD 光子计数焦平面

Fig.7 2×8 linear middle wave HgCdTe APD photon counting focal plane array

为了进一步提升光子探测效率和降低光子探测假事件率,DRS 于 2013 年改善了设计和工艺条件,获得了性能更好的两款器件 A8237-8-2 和 A8237-14-1<sup>[19]</sup>,器件性能对比见表 3。相对于 2010 年的器件,光子探测效率提升至 60% 以上,增益可达到 1 900,假事件率降至 150 kHz。并于 2018 年研发了应用于空间雷达的单光子计数 HgCdTe APD 组件,在 0.9~4.3 μm

表 3 2010 年与 2013 年研制的 2×8 线列的 HgCdTe APD 光子计数阵列性能对比

Tab.3 Comparison of performance of 2×8 linear HgCdTe APDs photon counting arrays in 2010 and 2013

Parameters	Array in 2010	Two arrays in 2013	
		A8327-8-2	A8327-14-1
P-type doping	V <sub>Hg</sub>	Cu+V <sub>Hg</sub>	V <sub>Hg</sub>
Cd composition	0.33	0.33	0.33
Gain	470@13 V	1910@12.9 V	1100@12.9 V
	Maximum Photon Detection Efficiency(PDE)	50%@14 V	72%@12.9 V
FER@PDE=50%	>1 MHz	151 kHz	158 kHz
Mean single photon SNR	13.7	21.9	12.3
Excess noise factor, F	1.3-1.4	1.25	1.20
Measured RMS jitter	632 ps	2370 ps	1570 ps
Minimum time between events	8 ns	No measured	9 ns

间光子探测效率大于 60%,暗计数率低于 250 kHz<sup>[20]</sup>。2022 年,通过进一步优化电路,降低了电路辉光诱导的暗计数,假事件率降至 35 kHz,并研制了 4×4、2×30、7×8 阵列规模的光子计数器件,4×4 阵列器件的平均增益可达 6100<sup>[21]</sup>。

采用 2013 年研发的 2×8 阵列规模的光子计数器件,DRS 于 2016 报道了 HgCdTe APD 器件在自由空间通信上的应用性能,器件搭载 CubeSat 卫星进行了通信验证,在 1550 nm 激光波段可实现 50 Mbps 的数据传输,通过高通滤光片和多像素阵列组合,在 8×10<sup>-8</sup> 的误码率下可实现 110 Mbps 的数据传输<sup>[22]</sup>。

### 2.3 法国 CEA/LETI 实验室和 Lynred 公司

#### 2.3.1 HgCdTe APD 器件技术路线

法国 CEA/LETI 实验室和 Lynred 公司(前身为 Sofradir 公司)采用平面 PIN 型结构制备 HgCdTe e-APD 器件,结构示意图如图 8 所示<sup>[23]</sup>。这种结构是在普通 PN 结器件中间加入一个本征层 I,人为地增大空间电荷区的宽度,用于载流子的雪崩倍增。不过,由于本征型和浅掺的 P-型的 HgCdTe 很难获得,实际中一般用浅掺的 N-型代替。这种结构的优点在于工艺简单成熟、步骤简单、成品率高和 N<sup>+</sup>-N<sup>-</sup>-P 结可控性好。其缺点也是所有平面 N-on-P 器件存在的问题,其产生复合电流和漏电流的水平都会比 P-on-N 器件大;另外器件的占空比无法继续提升,当焦平面器件往更小像元、更高密度的方向发展时,由于非平衡载流子的横向扩展或者表面漏电的原因会使得平面结器件的电学串音随之增加。

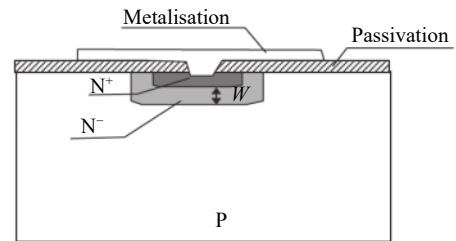


图 8 平面 PIN 型 HgCdTe APD 结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of planar PIN HgCdTe APD structure

#### 2.3.2 HgCdTe APD 器件光子计数性能

CEA/LETI 实验室和 Sofradir 公司于 2010 年报道了应用于低光通量和光子计数的 HgCdTe APD 器件<sup>[24]</sup>,Cd 组分为 0.3~0.41,器件增益如图 9 所示,短波和中



波器件典型性能见表 4, 最大增益带宽积达 2.1 THz, 脉冲响应时间几乎不随增益变化。图 10 展示了探测到 1 个光子和 2 个光子时的概率分布以及倍增层中均匀分布的暗电流。从图可知, 探测到 1 个光子事件和探测到 2 个光子事件的概率分布被很好的分离开了。因而, HgCdTe e-APD 探测器可以分辨出 1 个光子或者 2 个光子探测事件, 可实现比例光子计数。受残余热光子限制, 中波器件的暗计数率 (DCR) 约为 1 MHz; 受隧穿暗电流噪声限制, 短波器件高增益下的 DCR 为 100 kHz; 器件的内光子探测效率 (PDE) 可达 90%<sup>[23]</sup>。

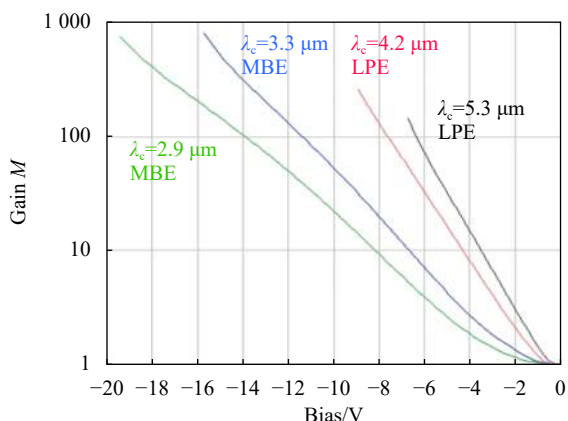


图 9 截止波长 2.9~5.3 μm、80 K 的 HgCdTe e-APD 器件的增益曲线  
Fig.9 HgCdTe e-APD gain curves measured at  $T=80\text{ K}$  for  $\lambda_c=2.9\ \mu\text{m}$  to  $5.3\ \mu\text{m}$

表 4 短波和中波红外 HgCdTe APD 器件在 80 K 时的典型性能

Tab.4 Typical performance of SWIR and MWIR Hg-CdTe APDs at  $T=80\text{ K}$

Parameters	SWIR	MWIR
Quantum efficiency (QE)	60%-80%	
Max gain	2 000	13 000
Bias at $M=100$	12-14 V	7-10 V
$F$	1.1-1.4	
QE to $F$ ratios	40%-70%	
Typical response time	0.5-20 ns	
Maximum gain-bandwidth product	2.1 THz	

2015 年, 法国 CEA/LETI 公司报道了 80~200 μm 的大面积单元器件, 器件带宽在 20~100 MHz 之间, 噪声等效功率 NEP 为  $20\sim70\text{ fW}/\sqrt{\text{Hz}}$ , 成功进行了月球激光通信演示, 在环月球运行的 LADEE 太空船和位

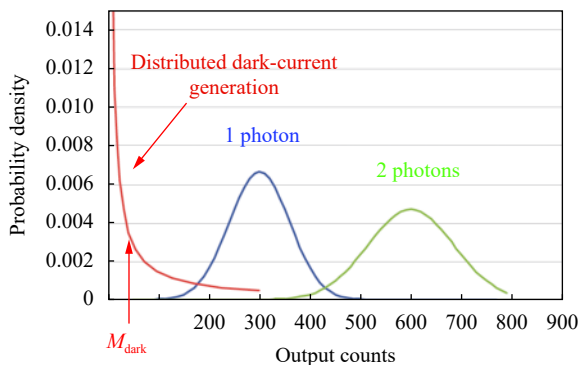


图 10 探测到 1 个光子事件和 2 个光子事件时的概率分布和倍增层均匀分布的暗电流

Fig.10 Probability distributions for detecting 1 and 2 photons events and uniformly distributed dark current generation in the multiplication layer

于特内里费 (Teneriffe) 的 ESAs 光学地面站之间可以实现 80 Mbps 的数据传输<sup>[25]</sup>。通过结构优化, 设计了吸收区组分梯度 (见图 11), 在增益 100 时, 芯片带宽达到 80 K 下 4 GHz 和 273 K 下 3 GHz<sup>[26]</sup>。于 2021 年实现 300 K 下增益为 1 时带宽达 10 GHz、更大增益时带宽达 3 GHz, 并应用于大动态范围空间激光雷达, 其指标要求见表 5<sup>[27]</sup>, 实现了 GHz 单光子探测速率<sup>[28]</sup>。

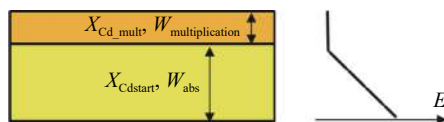


图 11 HgCdTe APD 快速响应器件结构示意图: 吸收区和倍增区分离、变化吸收区组分

Fig.11 Illustration of a fast response HgCdTe APD architecture with separate absorption and multiplication layer, the corresponding band gap variation

表 5 应用于空间激光雷达 HgCdTe APD 器件性能指标  
Tab.5 HgCdTe APD performance index for space lidar application

Parameters	Objective
Response waveband	0.3-3 μm
$F$	1.2
Quantum efficiency (QE)	90%
Temporal resolution	5 ns-10 μs
Photon noise limited dynamic range	60 dB
Detector noise	<1 photon
Minimum detected photon noise limited signal	<1 photon

## 2.4 英国 Leonardo 公司

### 2.4.1 HgCdTe APD 器件技术路线

英国 Leonardo 公司开发了金属有机气相外延 (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy, MOVPE) 生长 HgCdTe 薄膜技术, 采用低成本化的 GaAs 衬底, 制备了中心距为 24  $\mu\text{m}$  的异质结 HgCdTe APD 320 $\times$ 256 阵列器件, 命名为 Selex Avalanche Photodiode HgCdTe Infrared Array (SAPHIRA), 器件结构图和能带结构图如图 12 所示。器件结构包含吸收区、倍增区和两者之间的缓冲层。吸收区的截止波长为 2.5  $\mu\text{m}$ , 倍增区的截止波长为 3.5  $\mu\text{m}$ , 倍增区采用窄带隙可有效提高增益, 吸收区和倍增区之间的缓冲层为 HgTe 和 CdTe, 用以减少陷阱辅助隧穿电流 (TAT) 和陷阱相关的热电流, 以及减缓 GaAs 衬底引起的晶格失配。采用 MOVPE 外延异质结 HgCdTe APD 器件的优点在于能大尺寸批量生产, 成本低; 缺点在于位错密度难以降低, 制备的 APD 器件受吸收层中陷阱载流子限制, 响应时间较慢, 带宽限制在 kHz 范围<sup>[29-30]</sup>。

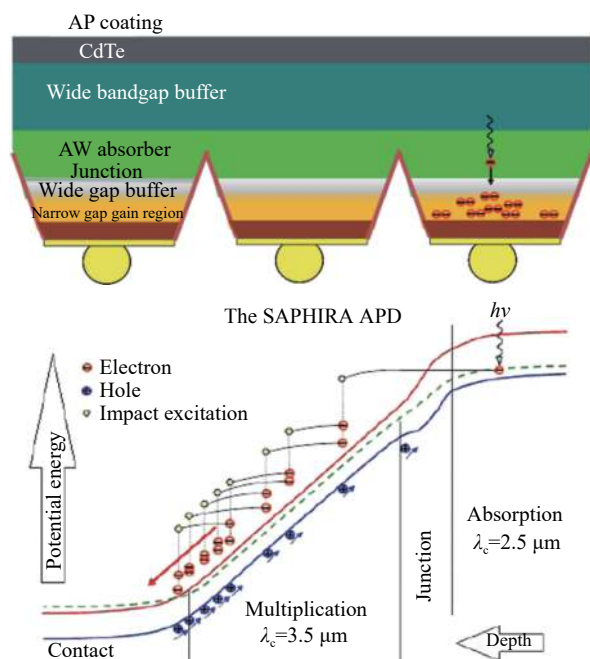


图 12 MOVPE 异质结 HgCdTe APD 器件 (a) 阵列结构和 (b) 能带结构  
Fig.12 (a) Structure schematic and (b) band structure of MOVPE heterostructure HgCdTe APD array

### 2.4.2 HgCdTe APD 器件光子计数性能

Leonardo 公司 2018 年报道了 SAPHIRA 器件的

光子计数性能<sup>[31]</sup>, 器件能够探测到单个光子, 但吸收了两个或多个光子, 在一次读取中是不能分辨的; 器件的单光子探测率大于 90%, 时间分辨率为 125  $\mu\text{s}$ , 暗电流为 21  $\text{e}^- \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{pixel}^{-1}$ , 对应暗计数率为 21  $\text{Hz}/\text{pixel}$ 。器件具备近红外光子计数能力, 并应用于天文探测, 探测器性能将进一步优化。

法国 First Light Imaging 公司 2016 年基于 SAPHIRA 320 $\times$ 256 HgCdTe APD 短波器件, 研发出了 C-RED ONE 相机 (见图 13)<sup>[32]</sup>, 在 3500 帧频下, 读出噪声小于一个电子, 过剩噪声因子小于 1.25, 有效像元率达 99.3%, 可应用于自适应光学、空间碎片跟踪和条纹跟踪等天文应用, 并成功应用于美国天文探测的密歇根红外组合器 (Michigan Infrared Combiner, MIRC) (见图 14), 将 MIRC 的系统噪声降低了 10~30 倍, 大大

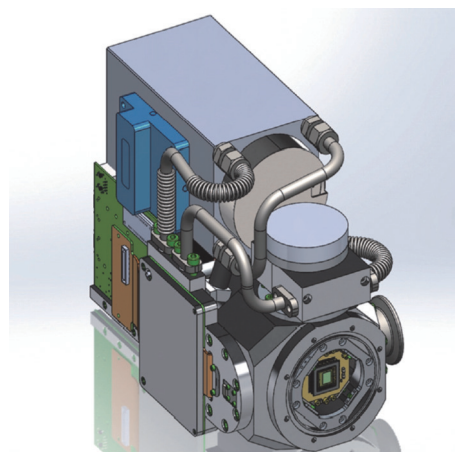


图 13 C-RED ONE 相机  
Fig.13 C-RED ONE camera

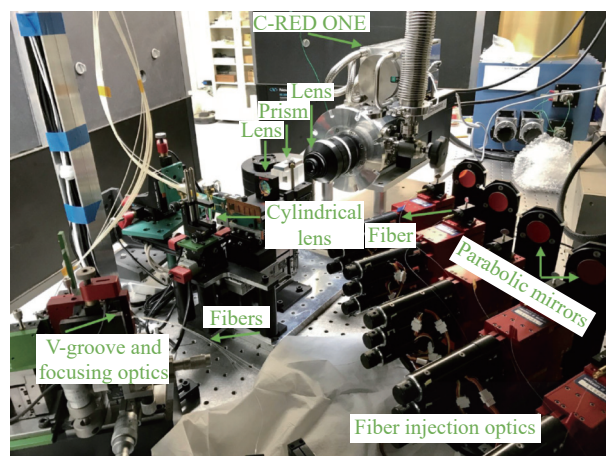


图 14 C-RED One 相机安装在 MIRC 光学系统中  
Fig.14 Installation of C-RED ONE at MIRC optics

提高了条纹探测的信噪比<sup>[33]</sup>, C-RED ONE 相机性能见表 6。这也极大促进了 HgCdTe APD 器件产品化和商业化进程。

表 6 C-RED ONE 相机性能

Tab.6 C- RED ONE camera performances

Parameters	Results
Maximum frame frequency	3 500 fps
Mean dark + readout noise at 3 500 fps and Gain~30	<1 e <sup>-</sup>
Quantization	16 bit
Operating temperature	80 K
Peak quantum efficiency from 0.8 μm to 2.5 μm	>70%
Operability	99.30%
Image full well capacity at gain 1, 3 500 fps	50 000 e <sup>-</sup>
<i>F</i>	<1.25

### 3 国内研究进展

国内对 HgCdTe APD 器件的研究开始于 2010 年左右, 研究机构主要有中国科学院上海技术物理研究所 (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, SITP)、昆明物理研究所 (Kunming Institute of Physics, KIP) 和华北光电技术研究所, 主要集中在平面 PIN 结的中波 HgCdTe APD 器件的研究, 近五六年在 HgCdTe APD 器件的研制上取得了一定进展, 但未形成光子计数应用的能力。

中国科学院上海技术物理研究所采用液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE) 生长的中波碲镉汞材料, 制备了平面 PIN 结构单元器件和中心距为 50 μm 的 128×128 阵列中波 HgCdTe APD 焦平面器件, 单元器件增益可达 1000 以上<sup>[34]</sup>, 焦平面器件性能如图 15(a)~

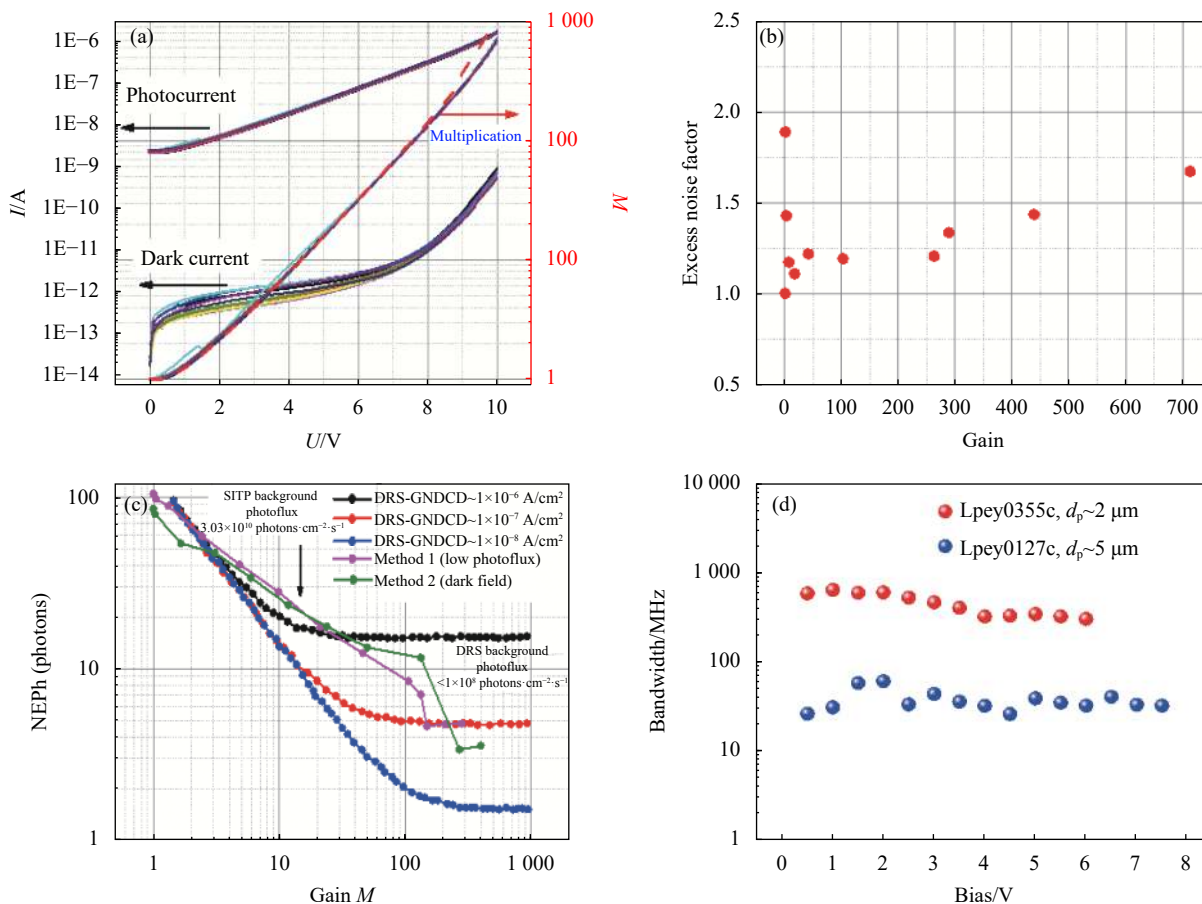


图 15 80 K 下中波红外 HgCdTe APD 的性能。(a) 光电流、暗电流和增益; (b) 过剩噪声因子 *F* 随增益 *M* 的变化; (c) 噪声等效光子数 (NEPh) 与 DRS HgCdTe APD 的 NEPh 对比; (d) 带宽

Fig.15 Performances of MWIR HgCdTe APD at 80 K. (a) Photocurrent, dark current and gain; (b) Variation of excess noise factor *F* with gain *M*; (c) Noise equivalent photon (NEPh) compared with DRS HgCdTe APD detectors; (d) Bandwidth

(c) 所示<sup>[35-36]</sup>, 在反偏-10 V 下器件增益达到 728, 反偏 -8 V 以下增益归一化暗电流密度  $GND_{CD} < 1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ , 过剩噪声因子  $F < 1.5$  @增益  $M < 400$ , 噪声等效光子数 NEPh 约为 12 @增益  $M = 133$ , 与 DRS 的  $GND_{CD} \sim 1 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$  水平下的 NEPh 相当。设计了带宽结构的单元器件, 通过减薄 P 区厚度, 实现了器件带宽从 30~60 MHz 提升至 300~600 MHz<sup>[36]</sup>, 如图 15(d) 所示。此外, 还制备了中心距 30  $\mu\text{m}$  的 320 $\times$ 256 阵列的中波 HgCdTe APD 焦平面器件, 对焦平面器件进行了成像演示, 表明 HgCdTe APD 器件适合应用短积分快速成像<sup>[36]</sup>。

昆明物理研究所采用 LPE 生长的中波碲镉汞材料, 通过 B 离子注入 N-on-P 平面结技术制备了单元器件和规模为 256 $\times$ 256、像元中心距为 30  $\mu\text{m}$  的碲镉汞 APD 焦平面探测器芯片。单元器件的增益可达 1000 以上<sup>[37]</sup>。焦平面芯片在 -8.5 V 反偏下平均增益达到 166.8, 增益非均匀性为 3.33%; 在 0~-8.5 V 反向偏置下, APD 器件增益归一化暗电流为  $9.0 \times 10^{-14} \sim 1.6 \times 10^{-13} \text{ A}$ , 过剩因子  $F$  介于 1.0~1.5 之间。对碲镉汞 APD

焦平面进行了成像演示, 并获得了较好的成像效果, 如图 16 所示<sup>[38]</sup>。

表 7 对比了不同研究机构的光子计数 HgCdTe APD 器件的性能。相比于国际先进水平, 国内碲镉汞雪崩器件的暗电流要高出一两个量级, 其中一个原因是抑制器件表面漏电的表面钝化工艺需要进一步完善。国内碲镉汞雪崩器件集成时间计数信号的高速读出电路尚处于研制当中, 未见主被动双模成像报道。总体上, 国内雪崩器件的制备技术及其读出电路

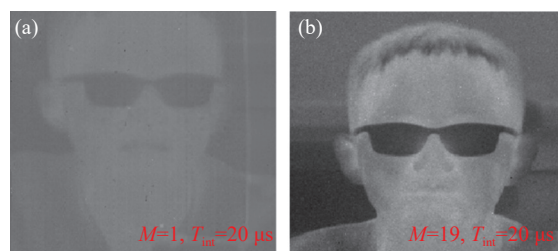


图 16 20  $\mu\text{s}$  积分时间下不同增益状态碲镉汞 APD 焦平面成像演示。(a)  $M=1$ ; (b)  $M=19$

Fig.16 Imaging demonstration of a HgCdTe APD focal plane under different gains with  $T_{int}=20 \mu\text{s}$ . (a)  $M=1$ ; (b)  $M=19$

表 7 不同研究机构的光子计数 HgCdTe APD 器件性能

Tab.7 Performances of HgCdTe APD for photon-counting application from different research institutes

Parameters	Raytheon	DRS	CEA/TETI	Leonardo	SITP	KIP
Able to sense single photon event	Yes	Yes	Yes	Yes	No	No
APD structure	SAM	HDVIP	PIN	SAM	PIN	PIN
Epitaxial technique	MBE	LPE	MBE/LPE	MOVPE	LPE	LPE
Cut-off wavelength @77 K	1.55 $\mu\text{m}$ at absorption region, 1.27 $\mu\text{m}$ at gain region	4.3 $\mu\text{m}$	2.5-5.3 $\mu\text{m}$	2.5 $\mu\text{m}$ at absorption region, 3.5 $\mu\text{m}$ at gain region	4.7-5.2 $\mu\text{m}$	4.6 $\mu\text{m}$
Multiplication mechanism	Hole multiplication	Electron multiplication	Electron multiplication	Electron multiplication	Electron multiplication	Electron multiplication
Maximum gain	350	6 100	2 000 for SW 13 000 for MW	66@14.5 V	>1 000	>1 000
$F$	$F \sim 1$	1.2	1.1-1.4	<1.25	<1.5@ $M < 400$	<1.5@<8.5 V
Bandwidth (BW)	1-3 GHz of ROIC BW	No given	Max BW 10 GHz@ $M=1$ 300 K	No given, low BW	300-600 MHz	No reported
Dark count rate (DCR)	<10 kHz(80-160 K); <100 kHz (180 K)	<20 kHz	100 kHz for SW 1 MHz for MW	21 Hz/pixel	Calculated by dark current: 100 kHz-3 GHz	Calculated by dark current: 560 kHz- 170 MHz
Photon detection efficiency (PDE)	>95%	72%	~90%	>90%	No reported	No reported
Minimum time between events	<6 ns	8 ns	5 ns-10 $\mu\text{s}$	125 $\mu\text{s}$	No reported	No reported

技术落后国际先进水平 10 来年。

#### 4 结束语

碲镉汞雪崩探测器几乎无过剩噪声,随着增益增加,信噪比不发生衰减,没有盖革雪崩器件相关的死时间和后脉冲限制,非常适合应用于光子计数,是未来光子计数器件的重要发展方向。文中介绍了线性模式相对于盖革模式光子计数的优势,总结了美国雷神和 DRS 公司、法国 CEA/LETI 实验室和 Lynred 公司、以及英国 Leonardo 公司的 HgCdTe APD 器件在光子计数应用方面的技术路径和发展现状。各公司根据自身技术水平选择了不同的技术路线,并且根据结构需要选择不同的制备技术生长碲镉汞材料,成功制备了高性能线性雪崩器件并实现了单光子探测,将应用于天文探测、空间雷达、自由空间通信、条纹跟踪等方面。

国内碲镉汞雪崩探测器研究起步比较晚,虽然在 HgCdTe APD 单元器件和焦平面研制上取得了一定的进展,但与国际先进水平仍存在一定差距,在光子计数应用方面未见到有关的进展情况。目前国内主要是研制平面 PIN 结构的 HgCdTe APD 器件,技术路径与法国 CEA/LETI 实验室相近。因而,我国可借鉴 CEA/LETI 实验室成功经验和 Lynred 公司的运营模式,持续推进 HgCdTe APD 器件的研究,以早日达到国际先进水平,实现单光子探测和光子计数应用。

#### 参考文献:

- [1] 龚思夏. 基于 APD 的光子计数成像系统研究与设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
- [2] Denvir D J, Conroy E. Electron multiplying CCD technology: The new ICCD [C]//Proceedings of SPIE, 2002, 4796: 164-174.
- [3] Stewart A G, Greene-O'Sullivan E, Herbert D J, et al. Study of the properties of new SPM detectors [C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6119: 61190A.
- [4] John Degnan, David Wells, Roman Machan, et al. Second generation airborne 3D imaging lidars based on photon counting [C]//Proceedings of SPIE, 2007, 6771: 67710N.
- [5] Ge Peng, Guo Jingjing, Chen Cong, et al. Photon-counting 3D imaging based on Geiger-mode APD array [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 49(3): 0305007. (in Chinese)
- [6] Shi Zhu, Dai Qian, Song Haizhi, et al. Low dark count rate InGaAsP/InP SPAD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(12): 1220001. (in Chinese)
- [7] Beck J D, Scritchfield R, Mitra P, et al. Linear mode photon counting with the noiseless gain HgCdTe e-APD [C]//Proceedings of the SPIE, 2011, 8033: 80330N.
- [8] Leveque G. Ionization energies in Hg<sub>x</sub>Cd<sub>1-x</sub>Te avalanche photodiodes [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 1993, 8: 1317-1323.
- [9] Derelle S, Bernhardt S, Haidar R, et al. Experimental performances and Monte Carlo modelling of LWIR HgCdTe avalanche photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(8): 1628-1636.
- [10] Rothman J, de Borniol E, Gravrand O, et al. HgCdTe APD-focal plane array development at DEFIR [C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7834: 78340O.
- [11] Jack M, Wehner J, Edwards J, et al. HgCdTe APD-based Linear-Mode photon counting components and LADAR receivers [C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8033: 80330M.
- [12] 陈博. 基于 APD 的光子计数成像系统的开发与实验研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [13] Asbrocka J, Bailey S, Baleya D, et al. Ultra-High sensitivity APD based 3 D LADAR sensors: linear mode photon counting LADAR camera for the ultra-sensitive detector program [C]//Proceedings of the SPIE, 2008, 6940: 69402O.
- [14] De Lyon T J, Baumgratz B, Chapman G, et al. MBE growth of HgCdTe avalanche photodiode structures for low-noise 1.55 μm photodetection [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1999, 201-202: 980-984.
- [15] Bryan M L, Chapman G, Hall D N B, et al. Investigation of linear-mode, photon-counting HgCdTe APDs for astronomical observations [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8453: 84532F.
- [16] Michael Jack, George Chapman, John Edwards, et al. Advances in LADAR components and subsystems at Raytheon [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8353: 83532F.
- [17] Beck J, Wan C, Kinch M, et al. The HgCdTe electron avalanche photodiode [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35(6): 1166-1173.
- [18] Singh A, Srivastav V, Pal R. HgCdTe avalanche photodiodes: A review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(7): 1358-1370.
- [19] William Sullivan III, Jeffrey Beck, Richard Scritchfield, et al. Linear-Mode HgCdTe avalanche photodiodes for photon-counting applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(9): 3092-3101.

- [20] Sun Xiaoli, Abshire James, Krainaka Michael, et al. Single photon HgCdTe avalanche photodiode and integrated detector cooler assemblies for space lidar applications [C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10659: 106590C.
- [21] Duke A P, Beck J D, Sullivan III W, et al. Recent advancements in HgCdTe APDs for space applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2022, 51: 6803-6814.
- [22] Krainak M A, Yanga G, Sun X, et al. Novel photon-counting detectors for free-space communication [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9739: 97390T.
- [23] Gautier Vojetta, Fabrice Guellec, Lydie Mathieu, et al. Linear photon-counting with HgCdTe APDs [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8375: 83750Y.
- [24] Johan Rothmana, Eric de Borniol, Sylvette Bisotto, et al. HgCdTe APD-focal plane array development at DEFIR for low flux and photon-counting applications [C]//Quantum of Quasars Workshop, December 2-4, 2009, Grenoble, France, 2009: 1-14.
- [25] Rothman J, Lasfargues G, Abergel J. HgCdTe APDs for free space optical communications [C]//Proceedings of SPIE, 2015, 9647: 96470N.
- [26] Johan Rothman, Pierre Bleuet, Luc Andre, et al. HgCdTe APDs for free space optical communications [C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10524: 1052411.
- [27] Rothman J, De Borniol E, Pes S, et al. HgCdTe APDs detector developments for high speed, low photon number and large dynamic range photo-detection [C]//Proceedings of SPIE, 2021, 11852: 118520F.
- [28] Pes S, Rothman J, Bleuet P, et al. Reaching GHz single photon detection rates with HgCdTe avalanche photodiodes detectors [C]//Proceedings of SPIE, 2021, 11852: 118525S.
- [29] Dani Atkinson, Donald Hall, Sean Goebel, et al. Observatory deployment and characterization of SAPHIRA HgCdTe APD arrays[C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10709: 107091H.
- [30] Johan Rothman. Physics and limitations of HgCdTe APDs: A Review [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(10): 5657-5665.
- [31] Dani Atkinson, Donald Hall, Shane Jacobson, et al. Photon-counting properties of SAPHIRA APD arrays [J]. *The Astronomical Journal*, 2018, 155: 220.
- [32] Timothée Greffe, Philippe Feautrier, Jean-Luc Gach, et al. C-RED One: The infrared camera using the Saphira e-APD detector [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9907: 99072E.
- [33] Anugu N, Le Bouquinb J-B, Monnier J D, et al. MIRC-X/CHARA: sensitivity improvements with an ultra-low noise SAPHIRA detector [C]//Proceedings of SPIE, 2018, 10701: 1070124.
- [34] Guo Huijun, Cheng Yushun, Chen Lu, et al. The performance of Mid-Wave Infrared HgCdTe e-Avalanche photodiodes at SITP [C]//Proceedings of SPIE, 2019, 11170: 111702M.
- [35] Guo Huijun, Chen Lu, Yang Liao, et al. The latest developments of HgCdTe e-APDs at SITP [C]//Proceedings of the SPIE, 2020, 11717: 1171736.
- [36] Guo Huijun, Yang Liao, Shen Chuan, et al. Developments and characterization of HgCdTe e-APDs at SITP [C]//Proceedings of SPIE, 2023, 12505: 125050C.
- [37] Li Xiongjun, Han Fuzhong, Li Lihua, et al. Gain characteristics of MW HgCdTe avalanche photodiodes [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2019, 38(2): 175-181. (in Chinese)
- [38] Li Xiongjun, Zhang Yingxu, Chen Xiao, et al. Study on HgCdTe APD focal plane technology [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2022, 41(6): 965-971. (in Chinese)

## Linear-mode HgCdTe avalanche photodiode detectors for photon-counting applications (*invited*)

Guo Huijun<sup>1</sup>, Chen Lu<sup>\*</sup>, Yang Liao<sup>1</sup>, Shen Chuan<sup>1</sup>, Xie Hao<sup>1</sup>, Lin Chun<sup>1,2</sup>, Ding Ruijun<sup>1,2</sup>, He Li<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China)

### Abstract:

**Significance** Single-photon counting has great application prospects in weak signal detection and time ranging. Since the first photon counting system in the visible spectrum was developed in the 1970s, in order to fully amplify the photon signal and reduce the readout noise of electronic equipments, many groups in the research field are constantly developing and improving the photon counting techniques. Electron multiplying charge coupled devices (EMCCDs) can replace the traditional visible light photon counting system and have higher quantum efficiency. While due to large avalanche noise, accurate acquisition of incident photon number under multiplication is difficult. The excess noise factor of mercury cadmium telluride avalanche photodiode (HgCdTe APD) is close to 1, there is almost no excess noise. Compared with the Geiger mode avalanche photodiodes, the linear mode HgCdTe APD has no dead time and after pulse, does not need to quench the circuit, has ultra-high dynamic range and adjustable spectrum with wide response range. Its detection efficiency and false count rate can be independently optimized. It opens up a new infrared photon band counting imaging application. It is of great value in astronomical exploration, laser radar, free space communication and other applications.

**Progress** Raytheon and DRS Technologies in the United States, CEA/LETI Laboratory and Lynred in France, and Leonardo in the United Kingdom have successively realized single photon counting of linear HgCdTe APD detectors. This paper summarizes the technical routes and research status of linear mode photon counting HgCdTe APD detectors in Europe and America. The performance of HgCdTe APDs, photon counting ability and the advantages and disadvantages of detector preparation with three structures, namely, separation of absorption and amplification (SAM), planar PIN type and high density vertically integrated photodiode (HDVIP), are analyzed. Raytheon Company has prepared SAM short-wave HgCdTe APD detectors with hole multiplication mechanism by molecular beam epitaxy (MBE), with gain of 350, photon detection efficiency of more than 95% and operating temperature of more than 180 K. DRS Technologies has prepared an electron-multiplication HDVIP medium wave HgCdTe APD detector using liquid phase epitaxy (LPE) material. The detector can respond in the visible to mid-infrared band from 0.4  $\mu\text{m}$  to 4.3  $\mu\text{m}$ , with the highest gain up to 6 100 and the photon detection efficiency greater than 70%. It can realize free space communication of 110 Mbps data transfer. CEA/LETI Laboratory and Lynred Company have prepared PIN-type short-wave and medium-wave HgCdTe APD detectors with electron multiplication mechanism by molecular beam epitaxy or liquid phase epitaxy. The gain of short-wave detector is up to 2 000, the maximum gain of medium-wave is up to 13 000, the internal photon detection efficiency is up to 90%, the free space communication of 80 Mbps data transfer is realized, and bandwidth up to 10 GHz is achieved at 300 K and gain of 1. British Leonardo Company has prepared SAM type HgCdTe APD detector with electron multiplication mechanism by metal organic vapor deposition (MOVPE). The detectors were named Selex Avalanche Photodiode HgCdTe Infrared Array (SAPHIRA), the device gain can reach 66@14.5 V, single photon

detection efficiency is more than 90%. A 24  $\mu\text{m}$  pitch  $320\times 256$  array SAPHIRA detectors were supplied to First Light Imaging Company in France to develop a C-RED ONE camera. The C-RED ONE camera was successfully applied to the Michigan Infrared Combiner (MIRC) for astronomical exploration in the United States, which reduced the system noise of MIRC by 10 to 30 times and greatly improved the signal-to-noise ratio of fringe detection. The research on HgCdTe APD detectors started relatively late in China. The main research institutions include Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Kunming Institute of Physics and North China Research Institute of Electro-Optics. Limited by chip preparation technology and circuit technology of HgCdTe APDs, the ability of photon counting has not been realized at present, but some progress has been made in the development of focal plane at home. The single element,  $128\times 128$  array and  $320\times 256$  array medium wave HgCdTe APD detectors with PIN structure are developed by Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences. The gain of the detectors can reach more than 1 000, the gain normalized dark current density is less than  $1\times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup> within the gain of 100, and the excess noise factor is less than 1.5 within the gain of 400. At the gain of 133, the noise equivalent photon number is 12, and the short integration time fast imaging is demonstrated. Bandwidth of single element detector is up to 300-600 MHz. The single element and  $256\times 256$  array medium wave HgCdTe APD device with PIN structure are developed in Kunming Institute of Physics. The gain of the single element detector can reach more than 1 000. When the bias voltage is less than 8.5 V, the average gain normalized dark current of focal plane is  $9.0\times 10^{-14}$ - $1.6\times 10^{-13}$  A, and the excess noise factor  $F$  is between 1.0 and 1.5.

**Conclusions and Prospects** In China, HgCdTe APD devices with planar PIN structure are mainly developed, and the technical path is basically the same as that of France. Therefore, our country can learn from the successful experience of CEA/LETI Laboratory and the business model of Lynred Company, and continue to promote research on HgCdTe APD detectors in order to reach the international advanced level as soon as possible, and realize single-photon detection and photon counting application.

**Key words:** HgCdTe; photon counting; linear-mode avalanche; photon detection efficiency; device structure; excess noise

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (62104240, 62204248)