

碲镉汞线性雪崩焦平面器件评价及其应用 (特邀)

张应旭, 陈 琥, 李立华, 赵 鹏, 赵 俊, 班雪峰, 李红福, 龚晓丹, 孔金丞, 郭建华, 李雄军*

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要: 碲镉汞线性雪崩焦平面探测器具有高增益、高带宽及低过剩噪声等特点, 在航空航天、天文观测、军事装备及地质勘探等领域展现了巨大的应用潜力。目前, 国内已经开展了碲镉汞线性雪崩焦平面器件的研制工作, 但缺乏评价其性能的方法及标准, 同时对其的应用仍然处于探索阶段。首先分析了表征线性雪崩焦平面器件性能的关键参数, 同时基于碲镉汞线性雪崩焦平面器件的特点, 探讨了雪崩焦平面器件在主/被动红外成像、快速红外成像等领域的应用, 最后对碲镉汞雪崩焦平面器件的未来发展进行了展望。

关键词: 碲镉汞; APD; 性能评价; 主被动双模成像; 快速红外成像

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220698

0 引言

雪崩光电二极管 (Avalanche photodiode, APD) 在像元内对信号电荷雪崩放大, 实现单光子级灵敏度、纳秒级时间分辨的信号探测, 在主/被动成像、3D 成像等领域具有巨大的应用潜力^[1]。线性模式 APD 器件工作在击穿电压之下, 生成的平均光电流与入射的光通量成线性关系。不同于盖革模式, 线性模式 APD 器件通过收集单帧回波信号即可获取目标的距离、强度等信息。碲镉汞 APD 器件因过剩噪声因子低、增益高、量子效率高、可工作在人眼安全激光波段而受到了广泛的关注^[2]。

碲镉汞 APD 器件的研究始于 20 世纪 80 年代, 进入 21 世纪后, 美国 Raytheon^[3]、DRS^[4]、英国 Leonardo (前身为 Selex)^[5] 和法国 Sofradir^[6] 等公司均在碲镉汞线性 APD 焦平面芯片研制中投入了巨大的精力, 制备得到的短波、中波碲镉汞线性 APD 器件展现出了接近于 1 的过剩噪声因子及高增益特性, 并同步开展了中波红外、短波激光主/被动双模及 3D 成像等验证, 取得了优异的成像效果。

国内外制冷型红外传感器研发机构基于自身掌握的技术体系, 设计了符合自身技术特点的线性 APD

焦平面器件研发路线。美国 DRS^[7] 和英国 Leonardo^[5,8] 等公司基于自身成熟的高密度垂直集成红外器件 (High-density vertically integrated photodiode, HDVIP) 研制的成功经验, 发展了环孔 APD 焦平面探测器制备工艺。该方案采用液相外延工艺在衬底上生长 p 型掺杂的碲镉汞薄膜 (浓度为 $8 \times 10^{15} \sim 1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 通过刻蚀/离子注入工艺使 p 型层改性为 n 型层, 注入/刻蚀过程形成的 Hg 填隙原子占据 Hg 空位形成 n⁻层。该结构为载流子横向扩散模式, p 区为吸收区, n⁻层为倍增区。Leonardo 公司研制的面阵规模为 320×256 的中波碲镉汞线性 APD 焦平面探测器实现了主/被动双模成像, 器件在 -7 V 偏压下增益达到了 100^[8]; DRS 研制的中波碲镉汞 APD 焦平面探测器增益可达 1 100@-12.9 V, 过剩噪声因子 1.2~1.3^[9]。

美国 Raytheon 公司采用分子束外延设备生长不同组分、不同厚度及掺杂浓度的吸收层、倍增层制备了 4 款碲镉汞线性 APD 焦平面探测器 (平面叠层结构): 工作于室温/近室温的短波红外面阵 APD 探测器、工作于室温/近室温的短波红外线列 LADAR 传感器、具有主/被动及 3D 成像功能的短波红外 APD 焦平面探测器及高灵敏度光子计数型 APD 探测器^[10]。

法国 Sofradir 公司制备的 APD 器件选用载流子

收稿日期: 2022-11-20; 修订日期: 2023-01-20

作者简介: 张应旭, 男, 工程师, 博士, 主要从事红外探测器材料、器件及其可靠性方面的研究。

通讯作者: 李雄军, 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外探测器材料与器件的研究。

纵向扩散方案,该方案采用液相外延生长的 p 型碲镉汞薄膜,通过注入及退火工艺制备倍增区及收集区。基于上述方案,Sofradir 制备得到了像元间距为 30 μm,面阵规模为 320×256 的 APD 焦平面器件,80 K 工作温度下截止波长为 4.6 μm,增益可达 174@-9 V,过剩噪声因子为 1.1~1.4^[11],该公司为航天应用开发的快速成像碲镉汞 APD 焦平面探测器帧频可达 2000 Hz,读出噪声不超过 2e^[12]。

国内中国科学院上海技术物理研究所采用平面型器件结构开展了 APD 焦平面探测器研究,制备得到过剩噪声因子为 1.2-1.45@增益 100,规模为 64×64 的焦平面芯片(像元间距 50 μm)^[13];昆明物理研究所采用平面型器件结构开展了 APD 焦平面芯片研究,制备得到了面阵规模为 256×256 的焦平面探测器,77 K 下芯片截止波长为 4.95 μm,平均增益超过了 100@-7 V。

英国 Leonardo、美国 Raytheon、DRS 以及法国 Sofradir 等基于自身所掌握的碲镉汞红外焦平面探测器技术先后研制出了不同规模的碲镉汞 APD 焦平面器件,并完成了主动门控成像、主/被动双模成像以及 3D 成像等演示验证,显示出碲镉汞 APD 十分诱人的应用前景。然而,对于碲镉汞 APD 探测器技术的研究国内才处于起步阶段,缺乏对器件性能的评价指标体系及方法,其应用仍然处于探索阶段。

文中首先分析讨论了表征 APD 焦平面器件性能的关键参数,同时基于碲镉汞线性 APD 器件的特点,讨论了碲镉汞线性 APD 焦平面器件在主/被动红外成像、快速红外成像等领域的应用,最后对其未来发展进行了展望。

1 碲镉汞 APD 器件性能评价

现有的制冷型碲镉汞红外焦平面阵列参数无法完全覆盖碲镉汞 APD 焦平面器件的性能表征。针对碲镉汞 APD 器件的特点及应用需求,为更准确地表征碲镉汞 APD 焦平面器件的性能特性,需要增加增益、过剩噪声因子、噪声等效光子数及时间分辨率等参数。

1.1 增益

APD 器件的增益 M 用于衡量器件对输入光信号的放大能力,定义为有增益时器件的响应电流与无增

益时器件响应电流之比为:

$$M = \frac{I_{\text{photo}}(V)}{I_{\text{photo}}(V = -50 \text{ mV})} = \frac{I_{\text{Illuminated}}(V) - I_{\text{Dark}}(V)}{I_{\text{Illuminated}}(V = -50 \text{ mV}) - I_{\text{Dark}}(V = -50 \text{ mV})} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{Illuminated}}(V)$ 为反偏电压为 V 时器件电流; $I_{\text{Illuminated}}(V=-50 \text{ mV})$ 为无增益时器件电流; $I_{\text{Dark}}(V)$ 为反偏电压为 V 时器件暗电流; $I_{\text{Dark}}(V = -50 \text{ mV})$ 为无增益时器件暗电流。

碲镉汞 APD 焦平面的增益测试可参照 GB/T 17444—2013 红外焦平面阵列参数测试方法开展。分别面对 20 °C 和 35 °C 的面源黑体,调节积分时间 $T_{\text{int}}(V)$ 使器件输出处于半阱状态测试获取焦平面器件不同偏置电压下对 15 °C 温差的响应信号 $V_S(V)$, 计算得到器件单位积分时间下响应信号 $R(V) = V_S(V)/T_{\text{int}}(V)$ 。无增益时 APD 器件单位积分时间响应信号为 $R(V=-50 \text{ mV}) = V_S(V=-50 \text{ mV})/T_{\text{int}}(V=-50 \text{ mV})$, 即可计算得到不同偏置电压下器件增益 M :

$$M = \frac{V_S(V)/T_{\text{int}}(V)}{V_S(V = -50 \text{ mV})/T_{\text{int}}(V = -50 \text{ mV})} \quad (2)$$

图 1 为根据公式 (2) 计算得到的昆明物理研究所制备的碲镉汞 APD 焦平面组件增益随偏置电压的变化情况, APD 焦平面的平均增益与反偏电压呈指数型关系,且在 -8 V 反偏下,器件平均增益即超过了 100。图 2 为芯片 -8.6 V 反偏电压下增益灰度图,焦平面平均增益可达 166,增益非均匀性不超过 3.4%。

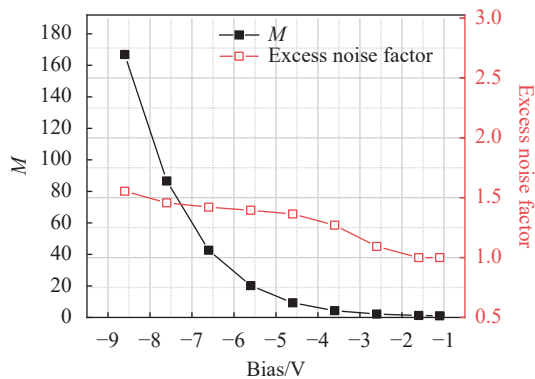


图 1 碲镉汞 APD 增益和过剩噪声因子随偏置电压的变化情况
Fig.1 Variation of gain and excess noise factor of the HgCdTe APD with bias

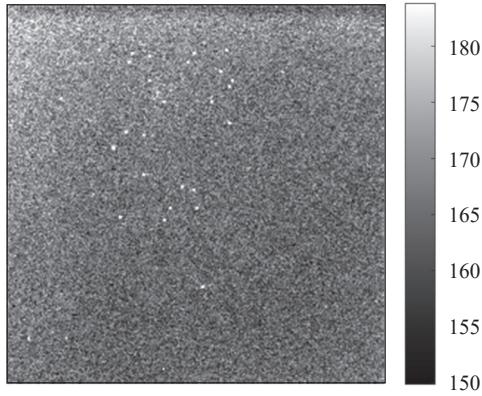


图 2 -8.6 V 电压下碲镉汞 APD 焦平面增益灰度图

Fig.2 Gain grayscale map of HgCdTe APD focal plane at -8.6 V

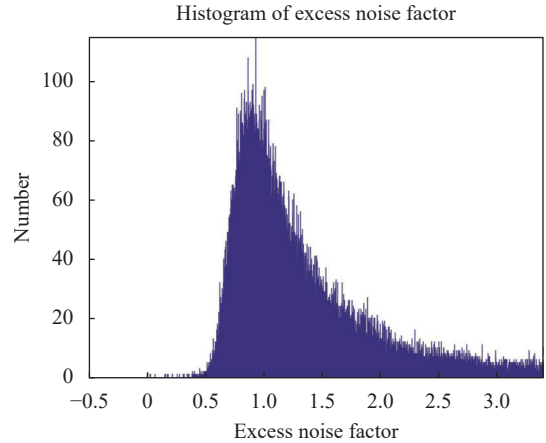


图 3 166 倍增益下碲镉汞 APD 焦平面过剩噪声因子直方图

Fig.3 Excess noise factor histogram of APD focal plane at $M=166$

1.2 过剩噪声因子

APD 器件载流子倍增的随机性引入了过剩噪声,使得输入器件信号被放大的同时器件输出信号的信噪比恶化,通常采用过剩噪声因子来描述 APD 器件增益过程对输入信号信噪比的恶化程度,可用无增益时器件输出信噪比与有增益时器件输出信噪比之比来计算 APD 器件的过剩噪声因子 (Excess noise factor, F)。

$$F = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (3)$$

式中: SNR_{in} 为器件无增益信噪比; SNR_{out} 为增益后的信噪比。测试时需要保持有、无增益条件下 APD 器件的积分时间一致,否则系统带宽的变化将会导致测试数据无法反映器件的过剩噪声因子水平。进行过剩噪声因子计算时,需扣除读出电路和测试系统的噪声 (该部分噪声可通过采集 APD 器件无响应时整个系统的输出噪声获取)。值得注意的是芯片动态范围的限制使得无增益或低增益时采集到的输出响应较小,因此要求测试系统和读出电路均具有较低的噪声水平。图 1 为根据公式 (3) 计算得到的昆明物理研究所制备的碲镉汞 APD 焦平面组件过剩噪声因子随偏置电压的变化情况。从图 1 中可以看出,随着器件增益快速增长,器件过剩噪声因子保持缓慢增长,器件增益超过 100 时过剩噪声因子仍小于 1.5,显示了器件优异的性能。图 3 为 166 倍增益下器件过剩噪声因子直方图。由于碲镉汞 APD 器件的量子效率会随着器件偏置电压变化,限制了采用该方法获取器件过剩噪声因子的精度。

另一种更加精确的获取 APD 器件过剩噪声因子的方法为观测单光子探测过程中光生载流子的增益概率分布,定义为^[14]:

$$F = 1 + (\sigma_M / M_{mean})^2 \quad (4)$$

式中: σ_M 为器件增益标准差; M_{mean} 为器件增益均值。通过重复测量单光子照射下器件的增益计算增益标准差获取器件的过剩噪声因子具有较高的精度,但测量值的准确性仍然会受到结区宽度变化、倍增区对光子吸收的影响,同时保证焦平面任一个像元都是单光子照射也是一个挑战。

1.3 噪声等效光子数

与被动红外成像噪声等效温差类似,噪声等效光子数 (Noise equivalent photons, NEPh) 用于评估主动成像模式下 APD 器件的灵敏度,其主要由器件的增益、暗电流水平、背景光通量及读出电路噪声水平等因素共同决定^[9]。

$$NEPh = \frac{\sqrt{\left[\sqrt{M^2 F (J_{dark} + J_{flux}) A_d \frac{\tau}{q}} \right]^2 + ROIC_{noise}^2}}{M \eta FF} \quad (5)$$

式中: M 为器件增益; F 为过剩噪声因子; J_{dark} 为增益归一化暗电流密度; J_{flux} 为增益归一化背景光电流密度; τ 为积分时间; A_d 为像元面积; η 为量子效率; FF 为占空比。

$$NEPh = \frac{\sqrt{\left[\sqrt{F (J_{dark} + J_{flux}) A_d \frac{\tau}{q}} \right]^2 + ROIC_{noise}^2 / M^2}}{\eta FF} \quad (6)$$

将公式 (5) 中的增益 M 乘进分子得到公式 (6)。主动成像应用中 APD 器件的积分时间较短, 在低增益状态下读出电路噪声对 APD 器件的 $NEPh$ 具有重要的影响。若 APD 器件的过剩噪声因子、量子效率、占空比等不随增益变化, 随着 APD 器件增益的增长, 器件的 $NEPh$ 将会逐渐减小至恒定值, 该恒定值由 APD 器件的积分时间、背景光通量及器件暗电流水平共同决定。通常 $NEPh$ 指的是器件本身的极限性能, 一般在非背景限下进行测试 (即要求背景光通量引起的光电流小于器件的暗电流)。在相同的测试条件下, 高增益状态下 APD 器件的 $NEPh$ 随积分时间缩短而减小, 如图 4 所示^[8]。通过降低器件的过剩噪声因子、提高器件的可用增益、降低器件暗电流水平、缩短积分时间及降低读出电路噪声等手段可以提高碲镉汞 APD 器件的灵敏度, 噪声等效光子数可通过入射到像元的光子数除以信噪比求得:

$$NEPh = \frac{Q}{SNR} \quad (7)$$

式中: SNR 为信噪比; Q 为积分时间内入射到像元的光子数。

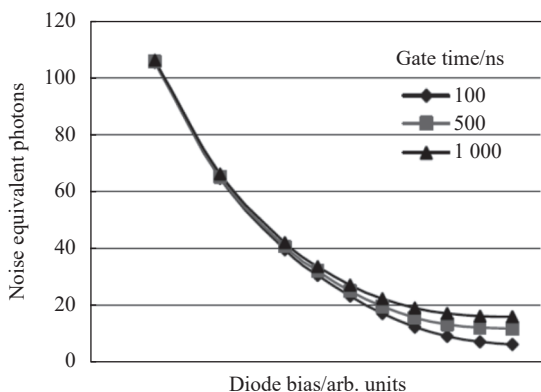


图 4 不同积分时间下 $NEPh$ 随偏压的变化

Fig.4 Variation of $NEPh$ with bias under different integration time

1.4 时间分辨率

APD 器件与具有计时功能的读出电路相耦合可实现距离信息的获取, 时间分辨率反映了 APD 焦平面组件能分辨的到达焦平面脉冲激光的最小时间间隔, 代表了探测器能识别的最小空间距离^[15]。碲镉汞线性 APD 器件采用模拟斜波记录激光脉冲飞行时间, 激光到达 APD 焦平面时采集到的信号电压为:

$$V_{3D} = \alpha \times t \quad (8)$$

式中: α 为计时参考信号的斜率; t 为激光脉冲飞行时间。若考虑计时参考信号和测试系统的噪声, 采集得到的激光飞行时间为:

$$t_{TOF} = \frac{V_{3D} + \Delta V + q}{\alpha} \quad (9)$$

式中: ΔV 为计时参考信号误差; q 为测试系统噪声。APD 组件的时间分辨率可表示为:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_{TOF}^2 + \frac{1}{\alpha^2} (\sigma_{\Delta V}^2 + \sigma_q^2)} \quad (10)$$

式中: σ_{TOF} 为组件飞行时间记录抖动, 由器件噪声水平、读出电路、背景及回波强度等共同决定; $\sigma_{\Delta V}$ 为计时参考信号噪声; σ_q 为采集系统噪声。

2 碲镉汞线性 APD 器件的应用

APD 器件的内增益来源于载流子在电场作用下的碰撞电离, APD 器件在放大输入信号的同时伴随着倍增噪声的引入, 通常将信号倍增过程中引入的噪声称为过剩噪声^[16]。APD 器件的这种特性, 使得器件输出噪声的增长速度快于输出信号, 因此, APD 器件更适用于噪声不是由焦平面芯片决定的系统 (如探测短激光脉冲信号的高带宽系统)。通过提升探测器的雪崩增益, 可以持续提升系统噪声限装备的信噪比, 当器件噪声与系统噪声相当时继续提升 APD 器件增益将会引起系统信噪比恶化, 如图 5 所示。

McIntyre 的经典场论模型认为 APD 器件的过剩噪声因子是器件平均增益和碰撞电离系数比的函数^[17]:

$$F = kM + (1 - k)(2 - 1/M) \quad (11)$$

式中: $k = \beta/\alpha$ 为半导体的碰撞电离系数比 (β 为空穴电离系数, α 为电子电离系数)。若碰撞电离系数为 0 或无穷大, 意味着只有一种载流子倍增, 此时 APD 器件输出的噪声将与信号同比例放大^[17]。图 6 为根据 McIntyre 公式计算得到的半导体器件过剩噪声因子随增益的变化情况。APD 器件引入的过剩噪声限制了其可用的最大增益, 理想的无倍增过程噪声的 APD 器件的灵敏度由光子噪声决定, 对于 $k \neq 0$ 或 ∞ 的 APD 器件, 倍增过程引入的噪声超过了光子噪声, 使得在使用 APD 器件过程中需要考虑器件的可用增益。

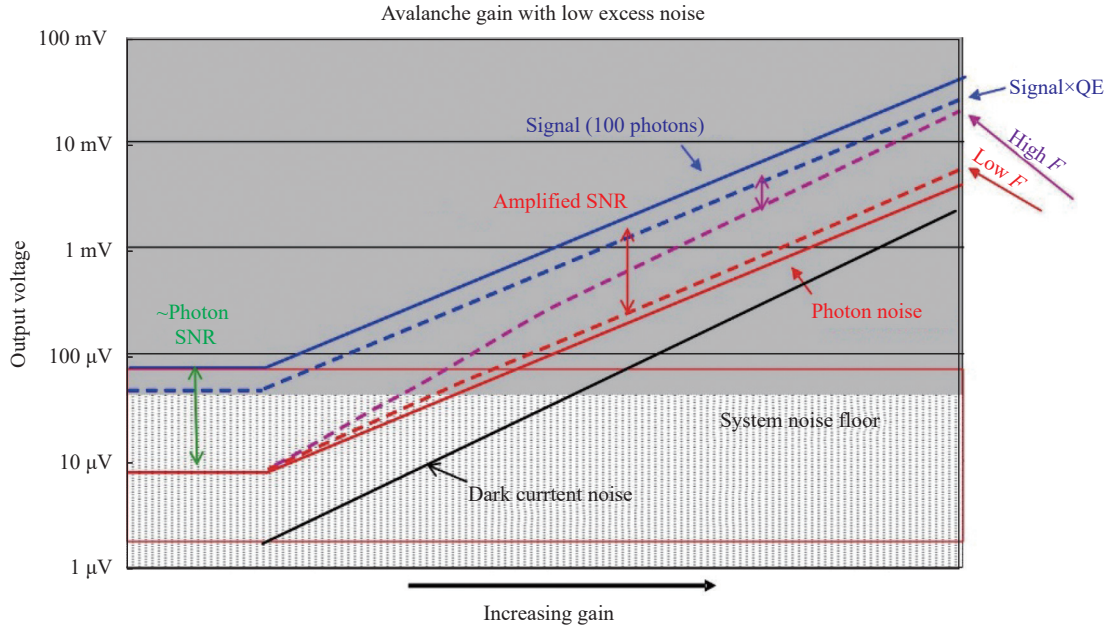


图 5 APD 器件噪声随增益变化示意图

Fig.5 Schematic diagram of the noise of a APD device versus its gain

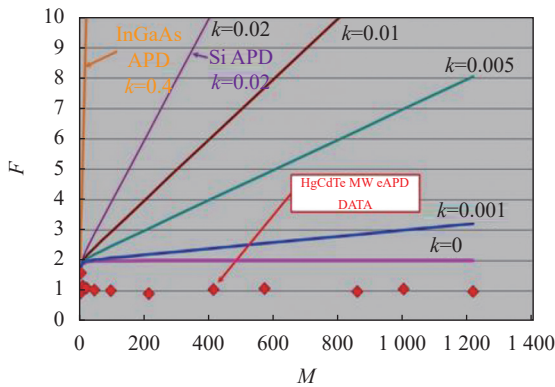


图 6 半导体 APD 器件过剩噪声因子随增益变化^[17]

Fig.6 Variation of excess noise factor of semiconductor APD devices with gain^[17]

InGaAs 线性雪崩器件和碲镉汞线性雪崩器件均工作于人眼安全的 1.55 μm 近红外波段, InGaAs 半导体的碰撞电离比系数为 0.4, 从图 6 可以看出, 随着增益的增长, 器件过剩噪声因子迅速增长, 输出信噪比快速恶化; 作为对比, 随着器件增益的增长, HgCdTe 雪崩器件的过剩噪声因子保持接近于 1, 意味着增益过程几乎没有引起信噪比的恶化。能带可调节的碲镉汞半导体是目前唯一一种碰撞电离系数比为 0 或无穷大的半导体, 其制备的 APD 器件的过剩噪声因子接近于 1, 工作波段范围覆盖 1.3~11 μm^[18], 表 1 为公开报道的不同材料制备的线性 APD 探测器性能

对比 (其中, hole-HgCdTe 为空穴倍增型碲镉汞 APD, e-HgCdTe 为电子倍增型碲镉汞 APD)。

表 1 公开报道的不同类型线性模式 APD 探测器性能对比

Tab.1 Performance comparison of different types of linear mode APD detectors reported publicly

Device parameter	Si ^[19]	hole-HgCdTe ^[20]	e-HgCdTe ^[21]	InGaAs ^[22]
QE	35%@ 1.06 μm	>90@ 1.06 μm	>83%@ 1.55 μm	80%@ 1.06 μm
Detector cutoff/ μm	1.1	SWIR	4.3	1.2
Bandwidth/ MHz	140	500	120	>1 000
k(ionization ration)	0.008	∞	0	0.15
Excess noise factor	3	~1	1.3-1.4	8@M=45
Gain M	120	200-350	468	45
Bias/V	-	16	13	71/82.5
NEP/ (fW/Hz ^{1/2})	30	7-25(@M=100)	0.5	150/250
Pixel format	Single	4×4	2×8/64×64	Single/ 16 channel
Pixel area/μm	700(dia.)	-	64×64	75/100(dia.)
Operating temperature/ K	300	101-120	84	300

2.1 主动成像

进行潜在目标成像时, 需要在宽视场下快速探测

目标,在窄视场下识别并辨识目标。由于激光发射功率的限制及对回波信号强度的要求,主动成像系统无法实现远距离宽视场成像,同时主动激光成像存在暴露系统位置的风险。通常采用被动红外与主动激光联合成像,被动红外成像系统用于潜在目标的探测,主动成像系统用于目标的辨识与锁定。被动成像系

统与主动成像系统为两套相互独立的光电系统,光学、低温封装、探测器、信号处理电子学及电源系统均相互独立,使得装置体积质量较大,需要专门的光路对准系统,传统的被动成像/激光门控成像联合系统原理如图 7 所示^[23]。

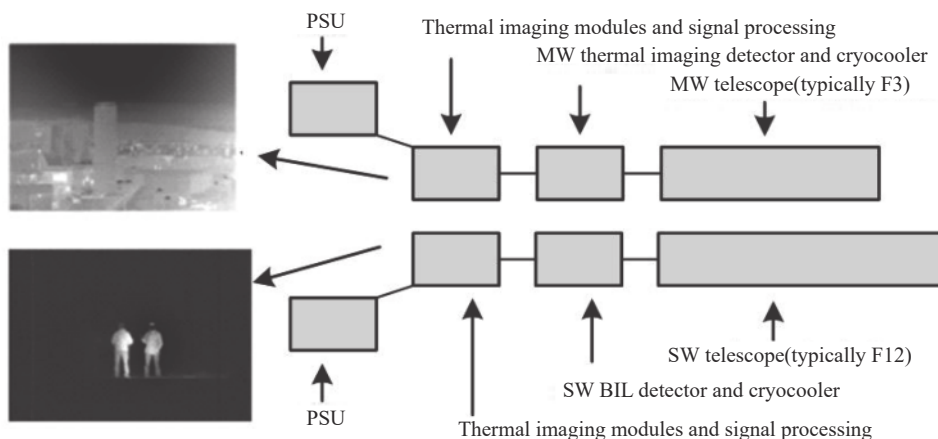


图 7 热成像/激光门控联合成像系统原理图

Fig.7 Schematic diagram of the thermal imaging/laser gating combined imaging system

将被动成像与主动成像整合进一个系统中,有望克服两套光电成像系统带来的问题。红外被动成像与主动激光成像整合需要解决以下问题:(1)探测器本身可实现主动短波成像、被动中波成像的切换;(2)光学系统需要支持不同成像模式下视场的切换。采用碲镉汞中波红外材料制备的焦平面探测器在低偏压下即具有较高的雪崩增益,调节所加偏压能实现从主动激光成像到被动中波红外成像的切换:高偏压下实现高增益短波激光成像,低偏压下实现被动中波红外成像,如图 8、图 9 所示^[24]。

短波红外激光作为光源,随着激光技术的发展及人眼安全的需求,其有向更长波长发展的趋势。表 2 为采用不同材料制备的线性 APD 器件性能对比,由此可以看出,采用碲镉汞材料制备的 APD 器件具有更高的量子效率,工作波段覆盖短波至中波红外,且采用碲镉汞中波红外材料制备的 APD 在较低的偏置电压下即可得到较高的雪崩增益。Leonardo 公司采用截止波长为 4.0 μm 的碲镉汞材料制备 APD 器件开展主/被动双模成像试验,主动成像时器件工作在高偏置电压下提升器件增益,被动模式下器件工作于低偏置电压,通过电子学切换即可实现传感器主/被动成像模式的切换,图 9 为采用该成像系统获得的目标图像。

主动成像通常采用波长为 1.55 μm 或 1.06 μm 的

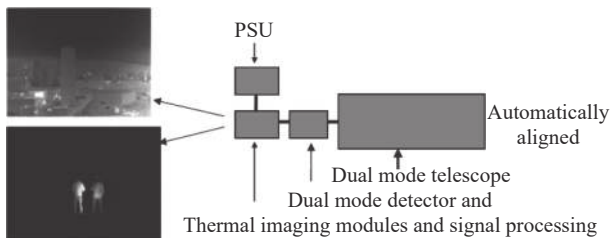


图 8 单传感器红外被动与主动激光联合成像系统

Fig.8 Infrared passive and active laser combined imaging system with one detector

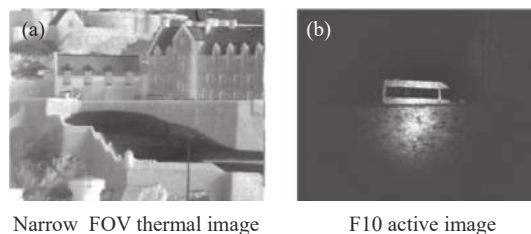


图 9 双模相机获取的图像

Fig.9 Images acquired by a dual-mode camera

DRS 公司采用中波碲镉汞 APD 器件为美国海军实验室搭建了一套主/被动成像系统,其面阵规模为 640×480,像元间距为 25 μm,被动成像模式下系统 NETD

为 18 mK (积分时间为 16 ms, F4 光学系统);主动门控成像模式下(带增益)噪声等效光子数为 2 (积分时间为 100 ns)^[20]。

表 2 不同材料制备的 APD 雪崩器件性能对比^[20]

Tab.2 Performance comparison of APD avalanche devices fabricated from different material^[20]

Array technology	FPA format and pitch/μm	Frame rate/Hz	Operating temperature	ROIC noise	Spectral range and QE
Intevac, InGaAs/InP EBCMOS	640×480/13.4	<30	-40-20 °C	1 e ⁻ /pixel@M=200	QE≥25%@1.55 μm 0.95-1.65 μm
CEA/Leti, HgCdTe APD	320×256/30	1 500	≤200 K	3-4 e ⁻ /pixel@M=10	QE>50%; 0.2-3.0 μm
DRS, HgCdTe APD	640×480/25	<120	80 K	1-2 e ⁻ /pixel@M=70	QE>50%; 0.5-4.5 μm

碲镉汞 APD 器件耦合具有计时功能的读出电路并结合脉冲激光即可实现目标距离信息的获取,法国 Sofradir 公司在设计的读出电路中加入 3D 功能,其原理如图 10 所示^[25]。该读出电路通过小电容充放电快速响应输入激光脉冲回波信号,采用模拟斜波电压作为计时信号,通过记录回波到达焦平面时斜波电压值来获取目标距离信息。碲镉汞 APD 器件的线性增益

使得在获取回波飞行时间的同时可以获取回波强度,并由读出电路中的积分电容记录。Sofradir 公司采用碲镉汞中波红外材料制备了面阵规模为 320×256 的 APD 焦平面组件(像元间距 30 μm),通过调节偏置电压可实现 20~100 增益的调节。搭配脉宽 8 ns 的激光(能量 8 mJ),Sofradir 公司开展了 40 m 景深下 3D/2D 成像演示^[11]。

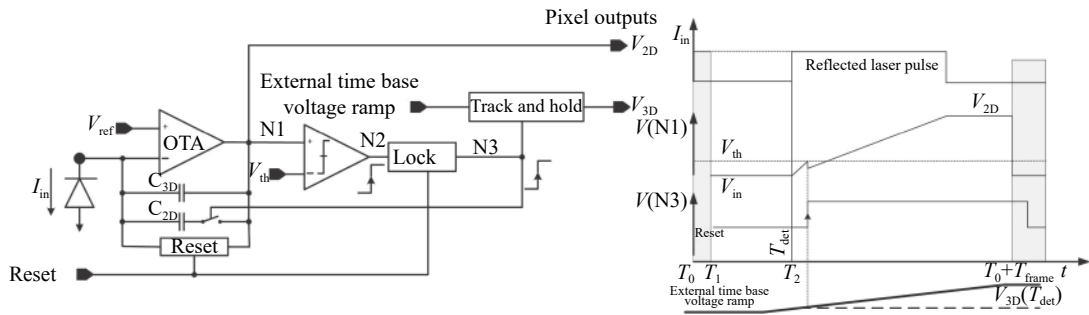


图 10 3D 成像用读出电路原理简图

Fig.10 Schematic diagram of readout circuit for 3D imaging

电子倍增碲镉汞雪崩 APD 器件采用中波红外材料制备,其能同时响应中波段红外信号和短波红外信号。室温环境下中波红外产生的器件注入电流接近 nA 量级,室温背景下的短波红外产生的注入电流在 fA 量级,当 APD 器件用于单模式成像时,不必考虑中波红外背景对成像的影响;但采用单传感器开展主/被动复合成像时,必须对光学系统进行优化,避免中波段红外背景干扰主动成像。

典型的 APD 探测器主动成像原理如图 11 所示。激光器发射的脉冲激光经扩束镜扩束后照射在目标

物体并反射至探测器收集,电子学系统处理后获得目标的距离等信息,回波激光脉冲强度可用公式(12)描述^[26]:

$$P_{det} = P_L \rho_t \tau_a^2 \tau_{opt} \frac{L_p^2 D_R^2}{\pi L_f^2 R^2 \theta_L^2} \quad (12)$$

式中: P_{det} 为 APD 焦平面接收到的激光功率; P_L 为激光出射功率; ρ_t 为目标反射率; τ_a 为空气透射系数; τ_{opt} 为透镜透射系数; L_p 为像元尺寸; D_R 为透镜直径; L_f 为透镜焦距; R 为目标与焦平面距离; θ_L 为出射激光发散角。假设照射激光波长为 1.55 μm,单个脉

冲能量为 10 mJ, 脉宽为 10 ns, 器件量子效率为 50%, 回波激光产生的注入电流(无增益)随距离的变化如图 12 所示(各参数取值如表 3 所示)。

从图 12 中可以看出, 回波激光强度引起的光电流随着作用距离的增加急剧减小, 接近甚至小于室温背景辐射引入的电流水平, 因此将碲镉汞 APD 焦平

面组件用于主/被动复合成像时必须考虑环境背景中红外辐射的屏蔽。Leonardo 公司和 DRS 公司基于中波碲镉汞 APD 焦平面组件搭建的主/被动双模成像系统均设计了红外屏蔽, 用于减少主动成像模式下中波红外背景带来的不利影响^[9,20,24]。

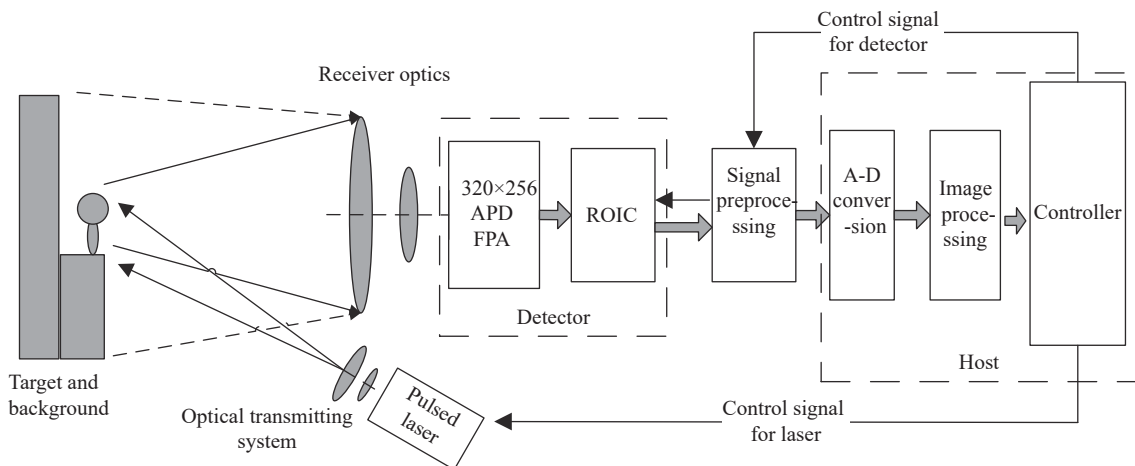


图 11 APD 器件主动成像原理图

Fig.11 Schematic diagram of an active imaging system with a APD device

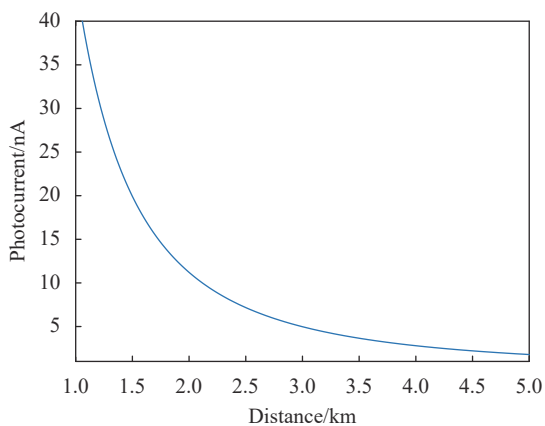


图 12 无增益时回波光电流随距离变化情况

Fig.12 Variation of photocurrent with distance without APD gain

表 3 系统参数

Tab.3 System parameters

ρ_t	τ_a	τ_{optic}	$L_p/\mu m$	D_R/mm	L_f/mm	R/km	$\theta_L/mrad$
0.1	0.97	0.6	30	28.3	85	5	5

2.2 被动成像

碲镉汞 APD 器件具有的几乎无雪崩噪声的线性

内增益特性给中波红外成像带来了新的应用场景, 通过调节器件内增益, 可以实现相同积分时间不同辐射强度目标的观察或对相同目标成像时间的调节。在快速搜索成像中要求积分时间内成像点在探测器焦平面上的移动距离不超过 1 个像元, 否则将导致图像模糊, 影响成像质量。对于面阵规模为 640×512 的焦平面组件(像元间距 $25 \mu m$, 积分时间取 $4 ms$), 若其视场角为 2° , 则其最大搜索角速度不能超过 $0.975 (^\circ)/s$, 若采用增益为 100 的 APD 焦平面组件, 则可将系统最大搜索速度提高至 $97.5 (^\circ)/s$, 完成 360° 的全方位搜索只需要不到 4 s 的时间。碲镉汞 APD 器件可实现扫描成像系统中复杂的二维光学或电子运动补偿系统的代替, 简化系统结构, 实现搜索/跟踪一体化。

红外图像的噪声主要来源于背景光子噪声、器件暗电流噪声、读出电路噪声及后续电子学系统噪声等, 从图 13 可以看出, 无增益时缩短积分时间获得的图像质量明显下降, 增加器件增益至一定水平, 图像质量有一定改善, 但无法恢复图 13(a) 的水平。若器件噪声主要为散粒噪声, 其噪声电流可表述为:

$$i_n = \sqrt{2qi\Delta f} \quad (13)$$

式中： i 为光生电流； Δf 为系统带宽。APD 器件的散粒噪声电流可表述为：

$$i_n = \sqrt{2qM^2iF\Delta f} \quad (14)$$

从公式 (13) 和公式 (14) 可以看出，相同的器件响应电流及带宽下，APD 过剩噪声的存在使得其输出信噪比产生 \sqrt{F} 倍的衰退。通过优化器件工艺降低过剩噪声因子能有效提升碲镉汞 APD 器件的可用增益。从图 5 可以看出，当电子学系统噪声水平高于器件噪声时，通过内增益能提高输出信号的信噪比。图 13 为法国 Sofradir 公司采用 320×256 面阵规模的碲镉汞 APD 器件获取的中波段红外图像。

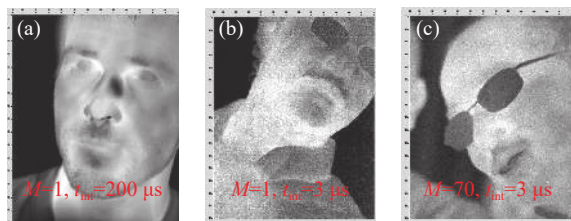


图 13 法国 Sofradir 公司采用面阵规模为 320×256(像元间距 30 μm) 的碲镉汞 APD 器件获取的被动中波段红外图像。(a) 常规成像，SNR=61 dB；(b) 短积分时间成像，SNR=39 dB；(c) 短积分时间高增益成像，SNR=42 dB

Fig.13 Passive mid-band infrared images obtained by Sofradir using a 320×256 (pixel spacing 30 μm) HgCdTe APD device. (a) Routine imaging, SNR=61 dB; (b) Image with short integration time, SNR=39 dB; (c) Image with high gain and short integration time, SNR=42 dB

目前，美国 Raytheon 公司、法国 Sofradir 公司及英国 Leonardo 公司等均已制备得到过剩噪声因子接近于 1 的碲镉汞线性 APD 器件。Leonardo 公司采用金属有机化学气相沉积 (Metal-organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 工艺制备的 320×256 面阵规模的碲镉汞 APD 焦平面芯片的灵敏度达到了单光子级，过剩噪声因子小于 1.25。配合 Flower 采样、相关采样等技术，法国 First Light imaging 公司采用该芯片生产的 C-RED one 碲镉汞 APD 机芯最大帧频可达 3500 FPS，读出噪声小于 1 个电子，响应波段覆盖 1.1~2.4 μm，已成功用于波前传感、低背景成像等领域^[27-28]。

被动成像中另一个值得注意的问题是随着器件

增益的增长，APD 器件的暗电流也随之放大，图 14 为昆明物理研究所制备的碲镉汞 APD 器件暗电流随偏置电压的变化情况，器件的暗电流随偏置电压线性增长，因此在 APD 制备中除了需要优化过剩噪声因子，还需要尽可能降低暗电流水平并减少缺陷的引入。采用制备的面阵规模为 256×256 的 APD 焦平面芯片，昆明物理研究所开展了 APD 成像验证，图 15 为不同增益下获取的中波段红外图像，从图中可以看出，制备的器件在小偏压下获取的图像与常规中波红外探测器相当，器件积分时间较短时，信号的雪崩增益明显提升了图像质量。

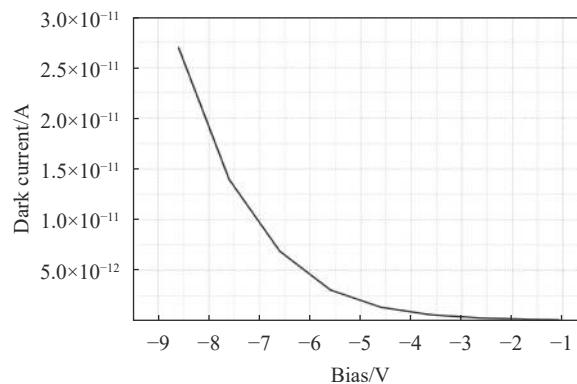


图 14 碲镉汞 APD 暗电流随偏置电压变化情况

Fig.14 Dark current variation of HgCdTe APD with bias

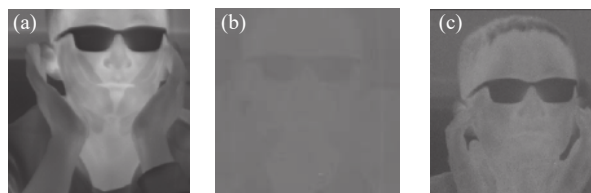


图 15 HgCdTe-APD 焦平面芯片在不同增益下获取的中波红外图像。(a) $M=1$ ，积分时长 800 μs；(b) $M=1$ ，积分时长 20 μs；(c) $M=19$ ，积分时长 20 μs

Fig.15 Passive mid-wave infrared images obtained under different gains by HgCdTe-APD. (a) $M=1$, the integration time is 800 μs; (b) $M=1$, the integration time is 20 μs; (c) $M=19$, the integration time is 20 μs

3 展 望

碲镉汞材料的光谱响应范围可覆盖短波、中波及长波红外，光子探测效率高，无后脉冲效应，单载流子雪崩增益的特性使其具有接近零过剩噪声放大的潜

力。高增益线性碲镉汞 APD 器件能够同时获取目标强度和距离信息,其在军事、天文、航天等领域显示了巨大的应用潜力。在军事应用需求及光电成像技术的发展牵引下,以碲镉汞线性雪崩焦平面器件为代表的 APD 器件受到越来越广泛的关注,并呈现出加快发展的态势。伴随着碲镉汞材料生长技术、器件制备工艺、读出电路设计加工技术和器件测试表征技术的发展,将会出现性能更好、面阵规模更大、像元中心距更小、帧频更高的碲镉汞线性 APD 焦平面产品,满足三维成像激光雷达、主/被动双模复合成像、单光子高灵敏探测等多种应用场景对高性能探测器的需求。

国内对于碲镉汞 APD 器件的研制处于起步阶段,其灵敏度等指标远低于国外报道水平。在碲镉汞 APD 焦平面器件的研制过程中,需要重点关注以下两个方面:(1)灵敏度提升。通过开展器件结构设计及制备工艺研究,将碲镉汞 APD 器件的灵敏度提升至单光子水平;(2)读出电路设计。读出电路在主动成像用焦平面器件中占据重要地位,计时精度的提升、读出噪声的降低及电路功耗的控制等将是一个巨大的挑战。

4 结 论

文中首先分析了表征碲镉汞 APD 焦平面芯片性能的关键参数;其次,基于碲镉汞线性雪崩焦平面器件的特点,展开了雪崩焦平面器件在主/被动成像、快速成像及 3D 成像等领域的应用;最后对碲镉汞雪崩焦平面器件的未来发展进行了展望。随着对碲镉汞 APD 器件研究的不断深入,相信该器件将会在军事应用和民用等领域发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] Singh A, Srivastav V, Pal R. HgCdTe avalanche photodiodes: A review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, 43(7): 1358-1370.
- [2] Reine M B, Marciniac J W, Wong K K, et al. Characterization of HgCdTe MWIR back-illuminated electron-initiated avalanche photodiodes [J]. *J Electron Mater*, 2008, 37: 1376-1386.
- [3] Jack M, Wehner J, Edwards J, et al. HgCdTe APD-based linear-mode photon counting components and lidar receivers[C]//Proceedings of SPIE, 2011, 8033: 80330M.
- [4] Sun X, Abshire J B, Beck J D. HgCdTe e-APD detector arrays with single photon sensitivity for space lidar applications[C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9114: 91140K.
- [5] Baker I, Maxey C, Hipwood L, et al. Leonardo (formerly Selex ES) infrared sensors for astronomy: Present and future[C]//High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy VII, 2016.
- [6] Rothman J, Perrais G, Ballet P, et al. Latest developments of HgCdTe e-APDs at CEA LETI-minatec [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(9): 1303-1310.
- [7] Beck J D, Wan C F, Kinch M A, et al. MWIR HgCdTe avalanche photodiodes[C]//Proceedings of SPIE, 2001, 4454: 188-197.
- [8] Baker I M, Duncan S S, Copley J W. A low-noise laser-gated imaging system for long-range target identification[C]//Proceedings of SPIE, 2004, 5406: 133-144.
- [9] Beck J, Woodall M, Scritchfield R, et al. Gated IR imaging with 128×128 HgCdTe electron avalanche photodiode FPA [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(9): 1334-1343.
- [10] Bailey S, Mckeag W, Wang J, et al. Advances in HgCdTe APDs and LADAR receivers[C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7660: 76603I.
- [11] Borniol E D, Castelein P, Guellec F, et al. A 320×256 HgCdTe avalanche photodiode focal plane array for passive and active 2D and 3D imaging[C]//Infrared Technology & Applications XXXVII, 2011.
- [12] Philippe Feautrier, Jean-Luc Gach, Sylvain Guieu, et al. Revolutionary visible and infrared sensor detectors for the most advanced astronomical AO systems[C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9148: 914818.
- [13] Guo H, Cheng Y, Chen L, et al. The performance of mid-wave infrared HgCdTe e-avalanche photodiodes at SITP[C]//Fourteenth National Conference on Laser Technology and Optoelectronics, 2019.
- [14] Rothman J. Physics and limitations of HgCdTe APDs: A review [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(10): 5657-5665.
- [15] Parahyba V E S, Borniol E D, Perrier R, et al. Time-of-flight calibration of an MCT-APD sensor for a flash imaging LiDAR system[C]//Proceedings of SPIE, 2018, 11180: 111802K.
- [16] Kinch M A, Beck J D, Wan C F, et al. HgCdTe electron avalanche photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(6): 630-639.
- [17] McIntyre R J. Multiplication noise in uniform avalanche diodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1966, 13(1): 164-168.
- [18] Beck J, Wan C, Kinch M, et al. The HgCdTe electron avalanche

- photodiode [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35: 1166-1173.
- [19] Krainak M A, Sun X, Yang G, et al. Photon detectors with large dynamic range and at near-infrared wavelength for direct detection space lidars[C]//Proceedings of SPIE, 2009, 7320: 732005.
- [20] National Research Council. Laser Radar: Progress and Opportunities in Active Electro-Optical Sensing[M]. Washington: The National Academies Press, 2014.
- [21] Beck J D, Scritchfield R, Mitra P, et al. Linear mode photon counting with the noiseless gain HgCdTe e-APD [J]. *Optical Engineering*, 2011, 53(8): 081905.
- [22] Bai X, Ping Y, McDonald P, et al. 16 channel GHz low noise SWIR photoreceivers[C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8353: 83532E.
- [23] Baker I, Thorne P, Henderson J, et al. Advanced multifunctional detectors for laser-gated imaging applications[C]//Proceedings of SPIE, 2006, 6206: 620608.
- [24] Baker I, Owton D, Trundle K, et al. Advanced infrared detectors for multimode active and passive imaging applications[C]//Proceedings of SPIE, 2008, 6940: 69402L.
- [25] Borniol E D, Guellec F, Rothman J, et al. HgCdTe-based APD focal plane array for 2D and 3D active imaging: First results on a 320×256 with 30 μm pitch demonstrator[C]//Proceedings of SPIE, 2010, 7660: 76603D.
- [26] Paul McManamon. Review of lidar: A historic, yet emerging, sensor technology with rich phenomenology [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(6): 060901.
- [27] Lake K, Isgar V, Baker I, et al. Developments in the SAPHIRA family of HgCdTe APD infrared arrays for low flux sensing: present and future[C]//Proceedings of SPIE, 2020, 11530: 115300H.
- [28] Goebel S B, Donald N B, Guyon O, et al. Overview of the SAPHIRA detector for adaptive optics applications [J]. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 2018, 4(2): 026001.

Evaluation and application of HgCdTe linear avalanche focal plane devices (*invited*)

Zhang Yingxu, Chen Xiao, Li Lihua, Zhao Peng, Zhao Jun, Ban Xuefeng, Li Hongfu,
Gong Xiaodan, Kong Jincheng, Guo Jianhua, Li Xiongjun*

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract:

Significance The HgCdTe linear avalanche focal plane detector has the characteristics of high gain, high bandwidth and low excess noise, and has shown great application potential in the field of aerospace, astronomical observation, military equipment and geological exploration. Based on their own HgCdTe infrared FPA detector technology, Leonardo, Raytheon, DRS and Sofradir have developed HgCdTe APD focal plane devices. The demonstration of active gating imaging, active/passive dual-mode imaging and 3D imaging have been completed, showing attractive application prospect of HgCdTe APD. However, the research on HgCdTe APD detector technology is still at the initial stage in China, and its application is still in the exploration stage due to the lack of evaluation method.

Progress The parameters of the HgCdTe infrared focal plane array cannot completely cover the characterization of HgCdTe APD. According to the characteristics and application requirements of HgCdTe APD, in order to accurately characterize the performance of HgCdTe APD focal plane devices, it is necessary to introduce parameters such as gain, excess noise factor, noise equivalent photon number and time resolution. The gain of the APD is used to measure the amplification ability to the input, which is defined as the ratio of the response of the device with gain to the response without gain. The test method of the gain is given and the gain for an APD FPA prepared by Kunming Institute of Physics is shown (Fig.1, Fig.2). The average gain of the APD FPA has an

exponential relationship with the bias. When the bias is -8 V, the gain of the FPA is 166 and the gain nonuniformity does not exceed 3.4%. The randomness of the carrier multiplication of the APD introduces excess noise, which makes the SNR of the output deteriorate when the input is amplified. Usually, excess noise factor is used to describe the deterioration of SNR, which can be calculated by the ratio of the device output SNR without gain to the device output SNR with gain. It's worth noting that the conditions need to be consistent during the test, otherwise, the change of the bandwidth will cause the test data not to reflect the true excess noise factor level of the device. The result is shown (Fig.1, Fig.3). Similar to noise equivalent temperature difference, noise equivalent photon number (NEPh) is used to evaluate the sensitivity of APD device in active imaging mode, which is mainly determined by the device gain, dark current level, background flux and readout circuit noise. Generally, NEPh refers to the limiting performance of the device, which is generally tested under the non-background limit (the optical current caused by the background flux should be less than the dark current). In the same conditions, the NEPh of APD device in high gain state decreases with the decrease of integration time (Fig.4). Coupling the APD device with the ROIC with timing function, the distance information can be obtained, which can be evaluated by time resolution. The time resolution reflects the minimum time interval of the pulse laser reaching the focal plane which can be distinguished by the APD, representing the minimum distance that can be distinguished. Finally, combined with the application of HgCdTe linear avalanche device and its characteristics, its application in active/passive infrared imaging and fast infrared imaging is discussed in detail, which can be used as a reference for the application of the HgCdTe APD FPA.

Conclusions and Prospects Firstly, the key parameters that characterize the performance of HgCdTe APD focal plane chip are analyzed. Secondly, based on the characteristics of HgCdTe linear avalanche focal plane devices, the applications of HgCdTe avalanche focal plane devices in active/passive imaging, fast imaging and 3D imaging are discussed. Finally, the future development of HgCdTe avalanche focal plane devices is prospected. With the development of HgCdTe material growth, fabrication of devices, readout circuit design and processing and testing technology, there will be HgCdTe APD focal plane products with better performance, larger area, smaller pixel center distance and higher frame rate, which meet the demands of high-performance detectors in various applications such as 3D imaging, active/passive dual-mode imaging and single-photon detection.

Key words: HgCdTe; APD; performance evaluation; active/passive dual-mode imaging; fast infrared imaging