

## 碲镉汞探测器的回顾与展望 (特邀)

蔡 毅

(深圳市北极星技术创新研究院, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 20 世纪 50 年代末, 碲镉汞 (HgCdTe) 合金半导体材料的发明, 奠定了热成像的技术和工程应用基础。1975 年, 美国提出基于第一代红外探测器的热成像通用组件概念——“模块化通用夜视热瞄镜”(Modular Common Thermal Night Sights, MCTNS), 从此 HgCdTe 材料和探测器被大规模应用于军事领域。从 HgCdTe 材料的基本物理性质出发, 分析了 HgCdTe 探测器的优点, 认为 HgCdTe 探测器依然是目前性能最好的红外探测器, 且正在向多元化方向发展, 包括 (但不限于) 大面阵、平面结和异质结、双波段、甚长波、150 K 级工作温度、雪崩探测器等。随着新结构、新模式、新机理、新方法、新工艺的进步, HgCdTe 材料和探测器必将达到一个新高度, 仍然是第四代主流的红外焦平面探测器。

**关键词:** HgCdTe; 红外探测器; 焦平面探测器

中图分类号: TN21 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20210988

## Review and prospect of HgCdTe detectors (*Invited*)

Cai Yi

(Shenzhen Polaris Innovation Research Institute, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** In the late 1950s, the invention of mercury cadmium telluride (HgCdTe) alloy semiconductor material built the foundation of thermal imaging technology and its engineering applications. In 1975, the United States put forward the concept of common thermal imaging modulars——Modular Common Thermal Night Sights based on the first-generation infrared detector. Since then, HgCdTe materials and detectors have been widely applied in the military field. In this paper, the advantages of HgCdTe detector were analyzed from the perspectives of the basic physical properties of HgCdTe material. It was convinced that HgCdTe detector was still the best infrared detector. Furthermore, diversified HgCdTe detector technologies had been developed, which including but was not limited to large area array, planar junction and heterojunction, dual band, very long wavelength, 150 K operating temperature, avalanche detector, etc. With the emerging of the new structure, new mode, new mechanism, new method and new technology, HgCdTe materials and detectors would be promoted to a new height and was the mainstream candidate of the fourth-generation infrared focal plane detector.

**Key words:** HgCdTe; infrared detector; focal plane array

收稿日期: 2021-12-20; 修订日期: 2022-01-28

作者简介: 蔡毅, 男, 研究员, 博士, 长期从事红外、光电、北斗卫星导航、信息系统方面的研究。

## 0 引言

红外探测器技术不仅是一个需要掌握材料与工艺的技术领域,而且是一个存在无数未知、但又充满活力的科学领域。

在光子型红外探测器发展历程中,1958 年英国人劳森 (Lawson) 与其合作者发明的窄禁带化合物半导体—— $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  三元合金半导体<sup>[1-2]</sup>,迄今为止仍然是最重要的红外探测器材料,具有下列突出优点:

(1) 红外“大气窗口”和甚长波红外全覆盖

对光子型红外探测器,截止波长  $\lambda_c$  与半导体材料禁带宽度  $E_g$  的关系为:

$$E_g (\text{eV}) \approx \frac{1.24}{\lambda_c (\mu\text{m})} \quad (1)$$

根据公式 (1),要探测“大气红外透射窗口”的长波红外 12  $\mu\text{m}$ 、中波红外 5  $\mu\text{m}$ 、短波红外 2.5  $\mu\text{m}$ ,需要禁带宽度分别为 0.10、0.25、0.50 eV 的窄禁带半导

体材料。因此,发明能“人工设计和控制窄禁带半导体的禁带宽度以响应指定红外波长”始终是红外探测器材料的发展方向之一。

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  是三元合金半导体材料,改变组份  $x$  能精确控制禁带宽度<sup>[3]</sup>:

$$E_g = -0.302 + 1.93x - 0.81x^2 + 0.832x^3 + 5.35 \times 10^{-4}(1-2x)T \quad (2)$$

式中:  $E_g$  的单位为 eV;  $T$  是绝对温度,单位 K。 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  禁带宽度覆盖短波、中波、长波红外和甚长波红外波段。表 1 展示了组份  $x$  与禁带宽度  $E_g$ 、截止波长  $\lambda_c$ 、本征载流子浓度  $n_i$  等材料物理参数的关系。 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料典型组分为 0.194、0.205、0.225、0.31、0.44、0.62,分别对应的截止波长为甚长波 16.9  $\mu\text{m}$ 、长波 13.6  $\mu\text{m}$ 、长波 10.1  $\mu\text{m}$ 、中波 4.6  $\mu\text{m}$ 、短波 2.6  $\mu\text{m}$  和 1.7  $\mu\text{m}$ <sup>[3]</sup>(1  $\text{\AA}$ =0.1 nm)。

(2) 直接带隙和本征吸收

$\text{HgCdTe}$  是直接带隙半导体材料,在主能带之间

表 1  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料的重要组分与物理参数表<sup>[3]</sup>

Tab.1 Important alloy compositions and physical parameters for  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

Property $x$	HgTe	$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$						CdTe
	0	0.194	0.205	0.225	0.31	0.44	0.62	1.0
$a/\text{\AA}$	6.461	6.464	6.464	6.464	6.465	6.468	6.472	6.481
	77 K	77 K	77 K	77 K	140 K	200 K	250 K	300 K
$E_g/\text{eV}$	-0.261	0.073	0.091	0.123	0.272	0.474	0.749	1.490
$\lambda_c/\mu\text{m}$	—	16.9	13.6	10.1	4.6	2.6	1.7	0.8
$n_i/\text{cm}^{-3}$	—	$1.9 \times 10^{14}$	$5.8 \times 10^{13}$	$63 \times 10^{12}$	$3.7 \times 10^{12}$	$7.1 \times 10^{11}$	$3.1 \times 10^{10}$	$4.1 \times 10^5$
$m_c/m_0$	—	0.006	0.007	0.010	0.021	0.035	0.053	0.102
$g_c$	—	-150	-118	-84	-33	-15	-7	-1.2
$\epsilon_s/\epsilon_0$	20.0	18.2	18.1	17.9	17.1	15.9	14.2	10.6
$\epsilon_v/\epsilon_0$	14.4	12.8	12.7	12.5	11.9	10.8	9.3	6.2
$n_r$	3.79	3.58	3.57	3.54	3.44	3.29	3.06	2.50
$\mu_c/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	—	$4.5 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$	$1.0 \times 10^5$	—	—	—	—
$\mu_v/\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	—	450	450	450	—	—	—	—
$b=\mu_c/\mu_v$	—	1 000	667	222	—	—	—	—
$\tau_R/\mu_s$	—	16.5	13.9	10.4	11.3	11.2	10.6	2
$\tau_A/\mu_s$	—	0.45	0.85	1.8	39.6	453	$4.75 \times 10^3$	—
$\tau_{\text{typical}}/\mu_s$	—	0.4	0.8	1	7	—	—	—
$E_p/\text{eV}$	—	—	—	19	—	—	—	—
$\Delta/\text{eV}$	—	—	—	0.93	—	—	—	—
$m_{\text{hh}}/m_0$	—	—	—	0.40-0.53	—	—	—	—
$\Delta/\text{eV}$	—	—	—	0.35-0.55	—	—	—	—

的本征吸收系数高达  $10^4/\text{cm}$  量级<sup>[4]</sup>, 因此能多吸收入射红外光子, 获得接近 100% 的量子效率, 在  $2\pi$  立体角视场即到达 300 K 背景限的理论探测极限。图 1 展示了不同红外探测器在 1~10 000  $\mu\text{m}$  波段范围内的

归一化探测率  $D^*$ 。在 77 K 温度时, HgCdTe 光伏 (Photovoltaic, PV) 和光导 (Photoconductive, PC) 型红外探测器在中波和长波红外波段就达到最高  $D^*$ , 在短波红外波段的性能也很好<sup>[4]</sup>。

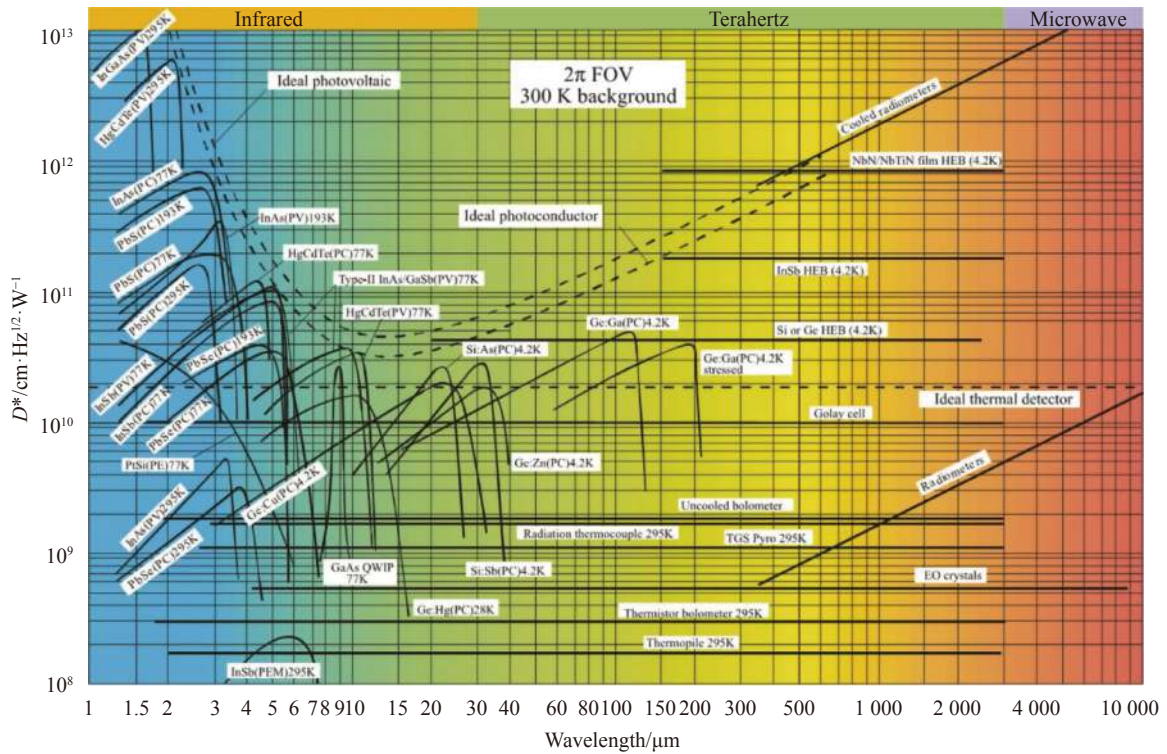


图 1 不同的红外探测器在 1~10 000  $\mu\text{m}$  波段范围内、在指定工作温度时的探测能力比较<sup>[4]</sup>

Fig.1 Comparison of the  $D^*$  of various available detectors when operated at the indicated temperature and in the region of 1–10 000  $\mu\text{m}$  waveband<sup>[4]</sup>

(3) 自由电子有效质量小、迁移率高

HgCdTe 材料的自由电子有效质量  $m_e/m_0$  小且与带隙相关。表 1 中, 组分  $x$  为 0.194、0.203、0.225、0.31、0.44、0.62 时, HgCdTe 的  $m_e/m_0$  分别为 0.006(77 K)、0.007(77 K)、0.010(77 K), 相应的自由电子迁移率为  $4.5 \times 10^5 \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 、 $3.0 \times 10^5 \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$  和  $1.0 \times 10^5 \text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ , 因此对入射红外光的响应速度快。

(4) 光生少数载流子寿命长

高质量 HgCdTe 材料光生少数载流子寿命的主要机制是本征复合, 少数载流子寿命长达微量量级 (数值详见表 1), 使 HgCdTe 探测器在液氮温度 (77 K) 即可达到理论背景限探测性能。工程上使用斯特林制冷机、脉管制冷机、节流制冷器等即能制冷到液氮温度, 大幅度降低了对制冷的要求。

(5) 可获得大尺寸 CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te 单晶衬底

现已获得大直径、高品质 CdTe/Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te 单晶衬底, 特别是精确控制 Cd<sub>1-x</sub>Zn<sub>x</sub>Te 晶体中镉的组分, 能满足晶格参数匹配的 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 薄膜材料外延生长, 极大降低失配位错密度; 另外还发展了 GaAs 替代衬底, 通过生长 CdTe 缓冲层实现与 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 的晶格匹配, 也能满足高质量 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 薄膜材料外延生长。

(6) HgCdTe 材料生长技术获得突破性进步

第一代 HgCdTe 探测器技术采用体材料生长技术, 第二代 HgCdTe 探测器技术采用液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE) 薄膜材料生长技术, 第三代和第四代 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 探测器技术采用金属有机物气相化学淀积 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 和分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 薄膜材料技术。从表 2 展示的体材料、LPE 和 MOCVD、

MBE 生长 HgCdTe 晶体参数表中<sup>[5]</sup>可看出, MOCVD 和 MBE 生长的 HgCdTe 晶体尺寸大, 组分均匀性高, 能在生长过程中掺杂直接形成 p-n 结和进行原位钝化, 将生长 HgCdTe 薄膜材料发展成“生长器件”, 既替代了第二代 HgCdTe 焦平面探测器阵列芯片制备的

离子注入成结工艺, 避免了离子注入造成 HgCdTe 晶格损伤在探测元中引入暗电流, 又能制备出 p-on-n 结构和双层异质结等, 为制备大规模、小像元、双色/双波段 HgCdTe 焦平面阵列芯片奠定了材料和器件基础(表中, 1 torr≈133.322 Pa)。

表 2 体材料、LPE 和 MOCVD、MBE 方法生长 HgCdTe 的对比<sup>[5]</sup>

Tab.2 Comparison of the various methods used to grow HgCdTe, including bulk, LPE, MOCVD, and MBE<sup>[5]</sup>

	Bulk			Liquid phase epitaxy		Vapour phase epitaxy	
	SSR	Travelling heater method		Hg melt	Te melt	MOCVD	MBE
		HCT melt	Te melt				
Temperature/°C	950	950	500	350-550	400-550	275-400	160-200
Pressure/torr	150 000	150 000	760-8 000	760-11 400	760-8 000	300-760	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>4</sup>
Growth rate/μm·h <sup>-1</sup>	250	250	80	30-60	5-60	2-10	1-5
Dimensions/cm	0.8-1.2 dia	0.8-1.2 dia	2.5 dia	5	5	7.5 dia	7.5 dia
l/cm	-	-	-	6	5	4	4
t/cm	15	15	5	0.000 2-0.003 0	0.000 5-0.012	0.000 5-0.001	0.000 5-0.001
Dislocations/cm <sup>-2</sup>	<10 <sup>5</sup>	-	<10 <sup>5</sup>	<10 <sup>5</sup>	<10 <sup>5</sup> -10 <sup>7</sup>	5 × 10 <sup>5</sup> -5 × 10 <sup>7</sup>	<5 × 10 <sup>4</sup> -5 × 10 <sup>6</sup>
Purity/cm <sup>-3</sup>	<5 × 10 <sup>14</sup>	<5 × 10 <sup>14</sup>	<5 × 10 <sup>14</sup>	<5 × 10 <sup>14</sup>	<5 × 10 <sup>14</sup>	<1 × 10 <sup>15</sup>	<1 × 10 <sup>15</sup>
n-type doping/cm <sup>-3</sup>	N/A	N/A	N/A	1 × 10 <sup>14</sup> -1 × 10 <sup>18</sup>	1 × 10 <sup>15</sup> -1 × 10 <sup>16</sup>	5 × 10 <sup>14</sup> -1 × 10 <sup>18</sup>	5 × 10 <sup>14</sup> -1 × 10 <sup>19</sup>
p-type doping/cm <sup>-3</sup>	N/A	N/A	N/A	1 × 10 <sup>15</sup> -1 × 10 <sup>18</sup>	1 × 10 <sup>15</sup> -1 × 10 <sup>16</sup>	3 × 10 <sup>15</sup> -1 × 10 <sup>17</sup>	5 × 10 <sup>16</sup> -1 × 10 <sup>18</sup>
X-ray rocking curve/(")	-	-	20-60	<20	<20	50-90	20-30
Compositional uniformity (Δx)	<0.002	<0.004	<0.005	<0.002	<0.002	±0.01-0.000 5	±0.01-0.000 6

(7) HgCdTe 材料的热膨胀系数与 Si 材料的很接近

HgCdTe 探测器阵列芯片通过 In 柱阵列倒装、环孔互连在 Si 基读出电路芯片上, 制备成混合式焦平面探测器。HgCdTe 材料的热膨胀系数为 5.0×10<sup>-6</sup>/K, Si 材料的为 2.8×10<sup>-6</sup>/K<sup>[5]</sup>, 两者很接近, 故能将大尺寸面阵(例如 4 096×4 096)HgCdTe 探测器阵列芯片互连在 Si 读出电路芯片上(图 2), 而不会在制冷过程中因热胀冷缩应力使探测器阵列芯片破裂。

20 世纪 60 年代末至 70 年代初, 研制成功 HgCdTe 长波红外线阵列探测器组件。1975 年, 美国提出基于第一代红外探测器的热成像通用组件(MCTNS), 从此 HgCdTe 材料和探测器大规模应用于军事领域至今。2017 年, Antoni Rogalski 提出了第四代红外焦平面探测器的概念, 并总结了第一代至第四代红外探测器发展路线图与大事记, 如图 3 所示<sup>[4]</sup>。

当单元探测器发展成线列/小面阵探测器——第

一代红外探测器时, 红外系统从点源探测仪发展成第一代热成像仪。

当第一代线列/小面阵探测器发展成从焦平面读出电信号的长线列/大面阵焦平面探测器——第二代红外探测器时, 第一代热像仪发展成第二代红外成像仪, 性能提高, 成本大幅度降低。

当第二代焦平面探测器发展成长线列/大面阵、双色/双波段焦平面探测器——第三代红外探测器时, 第二代热像仪发展成第三代红外成像仪, 实现高清晰红外成像(与高清晰电视成像技术兼容)、双色/双波段的高清晰红外成像(这终止了用户在哪个红外波段探测更好的纠结)。

随着红外探测器技术的发展, 在探测机理(例如雪崩模式、甚长波、双/多色、偏振、小尺寸像元等)、材料设计与制备(例如能带工程、MBE 和 MOCVD 等)、工作温度(例如 150 K、室温工作等)、信号处理(例如片上数字化等)、封装(例如组件级封装、片上封



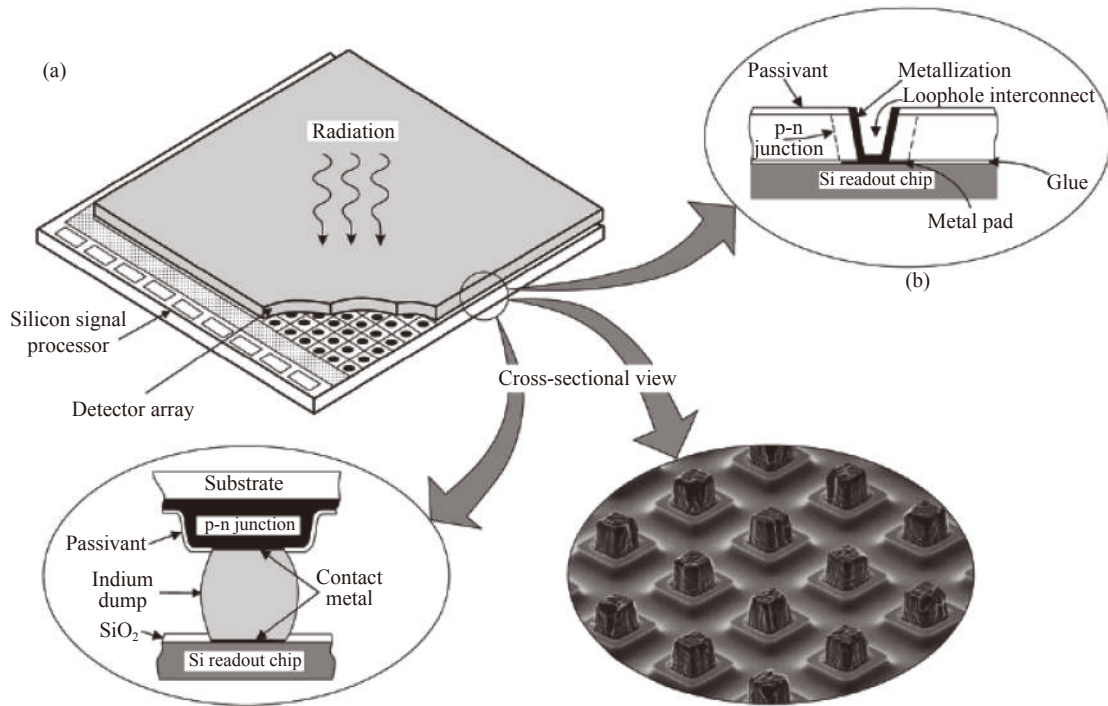


图 2 具有独立优化信号探测与读出的混合式 HgCdTe 红外焦平面探测器。(a) 钢柱倒装互连；(b) 环孔互连<sup>[5]</sup>

Fig.2 Hybrid HgCdTe IRFPA detector with independently optimized signal detection and readout. (a) Indium column flip chip interconnection; (b) Loophole interconnection<sup>[5]</sup>

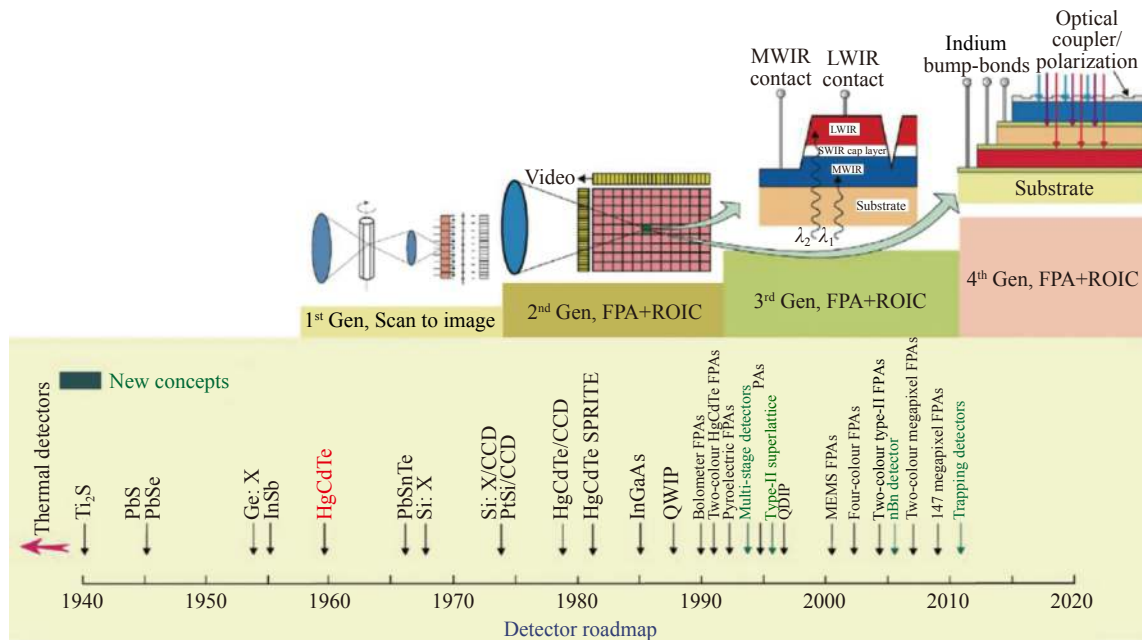


图 3 第一代至第四代红外探测器发展路线图与大事记<sup>[4]</sup>

Fig.3 Development roadmap and memorabilia for the first generation to the fourth generation of infrared detectors<sup>[4]</sup>

装等) 等环节均取得显著的技术突破, 红外焦平面探测器技术的多元化发展导致至今对第四代红外探测器的定义未形成统一观点。

作者认为第四代红外探测器有如下特征: 在像元规模、探测机理、探测器材料、工作温度、信号处理、封装等技术均取得台阶段性进步, 至少同时具有其中三

个技术特征的红外探测器即可视为第四代红外探测器——当然是焦平面探测器,比如同时具有 1 K 级像元+双色探测+150 K 工作温度技术特征的红外焦平面探测器。

HgCdTe 材料存在相对弱的汞-碲键,导致长波红外 HgCdTe 材料体内、表面和界面不太稳定,因此人们一直在努力寻找替代材料。尽管如此,到目前为止,HgCdTe 仍是性能领先的红外探测器材料。

## 1 HgCdTe 探测器新的发展方向

HgCdTe 探测器新的方向发展包括(但不限于)大面阵、小像元、平面结与异质结、双/多波段/波长、宽波段、甚长波、150 K 级工作温度、雪崩探测器、片上偏振探测等。

### 1.1 大面阵

因 HgCdTe 材料具有高量子效率和低暗电流,大面阵、高性能的红外焦平面探测器仍然首选 HgCdTe 红外焦平面探测器。例如用于 Euclid Specs、WFIRST、AVIRIS-NG、ECOSTRESS 和 NEOCam 等航天项目的 HAWAII-2 RG(H2 RG) 焦平面探测器组件(图 4 和图 5)<sup>[6]</sup>,像元采用 HgCdTe p-on-n 结构,规模 2 048×2 048,像元中心距 18 μm,像素率 10 MHz(快模式)、480 kHz(慢模式),最高帧频 74 Hz,输出端口 1、4 或 32(可选),通过背减薄去除 CdZnTe 衬底并镀制增透膜,使光谱响应从中波红外扩展至可见光(0.6~5 μm),光谱响应比带 CdZnTe 衬底的 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面探测器宽(黄色曲线);特别是在航天应用中,去除 CdZnTe 衬底后,消除了吸收宇宙射线产生的荧光效应,提高了 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面探测器在低辐射背景下的探测能力,还克服了窄带红外光入射进入 CdZnTe 衬底在光谱仪中引入的法布里-珀罗条纹(Fabry-Perot fringes)干扰;红外截止波长有 1.75 μm、2.5 μm、5.3 μm 可选,量子效率在 0.8~1.7 μm 范围均大于 80%(图 6)<sup>[7]</sup>,在 0.4 μm 处仍能达到 70%。

按模块化理念设计 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面阵列,输入-输出端口均全部设在阵列一边,另三边空置,可用多个 2 048×2 048 焦平面阵列拼装出更大马赛克阵列,例如用 16 个 H2 RG 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面探测器阵列拼成 8 k×8 k HgCdTe 焦平面阵列,如图 7 所示。

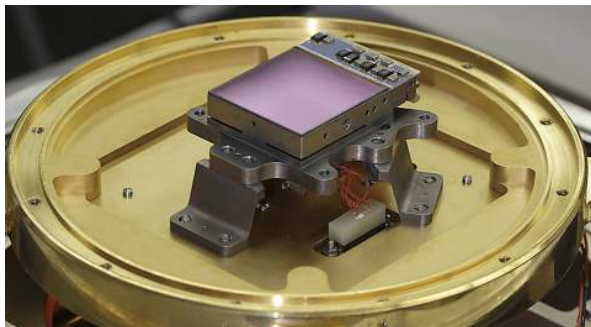


图 4 H2 RG 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面阵列探测器<sup>[6]</sup>

Fig.4 H2 RG 2 048×2 048 HgCdTe FPA detector<sup>[6]</sup>

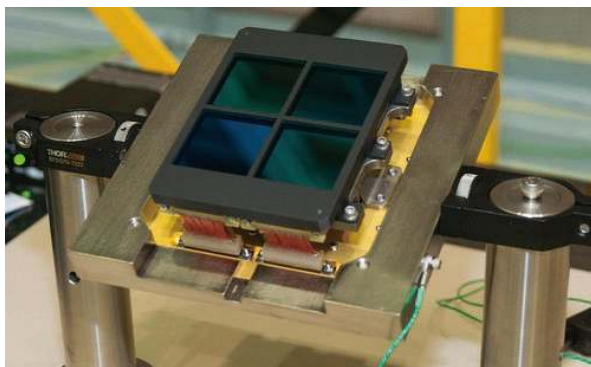


图 5 航天望远镜近红外相机采用的 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面阵列<sup>[6]</sup>

Fig.5 2 048×2 048 HgCdTe FPA used in the Space Telescope Near Infrared Camera<sup>[6]</sup>

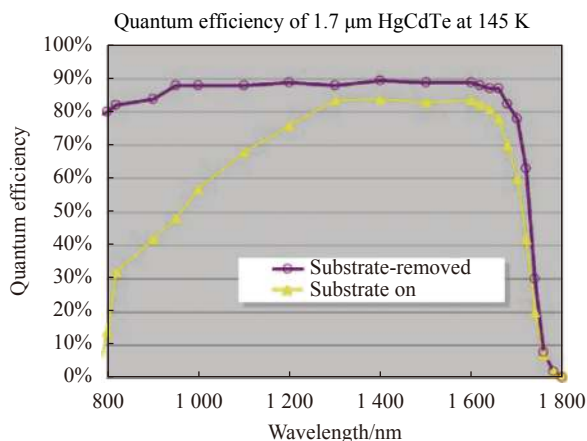


图 6 去除 CdZnTe 衬底的 H2 RG 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面阵列在 0.8~1.7 μm 范围的量子效率<sup>[7]</sup>

Fig.6 Quantum efficiency of the H2 RG 2 048×2 048 HgCdTe FPA with 0.8~1.7 μm cutoff which CdZnTe substrate was removed<sup>[7]</sup>

HAWAII-4 RG(H4 RG) 焦平面阵列结构与 H2 RG 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面阵列结构相同,但规模为

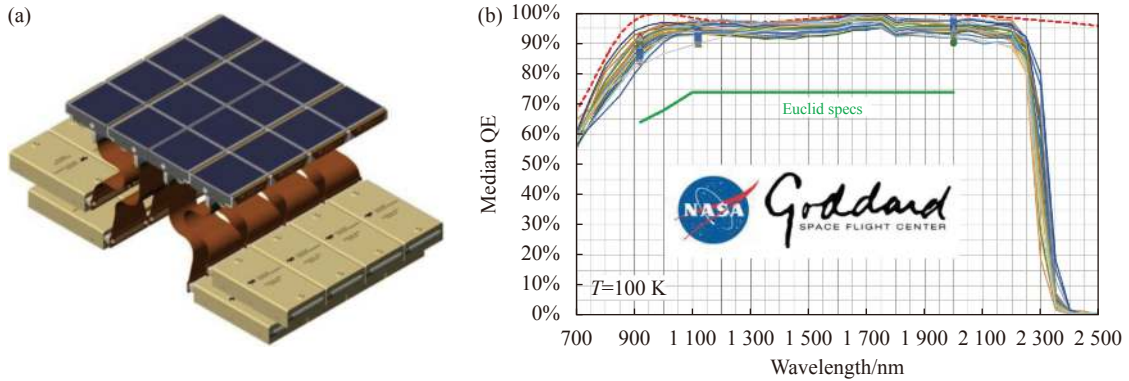


图 7 用 16 个 H2 RG 2 048×2 048 HgCdTe 焦平面阵列拼成的 Euclid 焦平面组件 (a) 及其量子效率测试结果 (b)<sup>[7]</sup>

Fig.7 Euclid focal plane assembly with 16 H2 RG FPA (2048×2048) (a) and the measured quantum efficiencies (b)<sup>[7]</sup>

4 096×4 096, 因像元中心距采用 10 μm(图 8) 和 15 μm 的小像元设计, 使阵列芯片的几何尺寸增加不太大, 输出端口为 1、4、16、32、64(可选), 在行、列设共模噪声抑制<sup>[8]</sup>。4 096×4 096 HgCdTe 焦平面阵列芯片按模块化理念设计, 输入-输出端口全部设在芯片一边, 另外三边空置, 因而可用多个 4 096×4 096 HgCdTe 焦平面阵列拼装出更大马赛克阵列, 例如用 4 个 4 096×4 096 HgCdTe 焦平面阵列拼成 1 个 8 192×8 192 HgCdTe 焦平面阵列。



图 8 H4 RG 4 096×4 096 HgCdTe 焦平面阵列组件<sup>[8]</sup>

Fig.8 H4 RG 4 096×4 096 HgCdTe FPA assembly<sup>[8]</sup>

## 1.2 平面结和异质结

采用 MOCVD 或 MBE 技术, 不仅能在大尺寸的 CdZnTe 衬底、GaAs、或 Si 替代衬底上直接将 p-n 结层生长出来<sup>[9]</sup>, 还能将响应两个红外波长的 HgCdTe 双层异质结层直接生长出来<sup>[10-12]</sup>, 极大简化了 HgCdTe p-n 结的制备工艺, 为大面阵 HgCdTe 焦平面

阵列、双色大面阵 HgCdTe 焦平面阵列的制备奠定可靠的基础, 而且突破了衬底尺寸对大规模制备 HgCdTe 焦平面阵列的制约, 是第三代、四代红外焦平面探测器的核心技术和工艺。

图 9 是美国雷神视觉系统 (Raytheon Vision Systems) 公司研制的中波/长波红外双波段 640×480 HgCdTe/Si 焦平面阵列台面结像元结构示意图<sup>[9]</sup>, 采用 MBE 技术在 Si 替代衬底上生长 ZnTe、CdTe 缓冲层, 直接生长响应波段 1 的 HgCdTe 掺 In 层、HgCdTe 掺 As 层、响应波段 2 的 HgCdTe 掺 In 层, 通过离子刻蚀形成一对重叠的台面 p-n 结, 再制备 CdTe 钝化层进行表面钝化, 防止台面和表面漏电, 焦平面阵列采用背照射结构台面 p-n 结, 在台面 p-n 结上制备 In 柱阵列, 实现与读出电路芯片的倒装互连。

图 10 展示了双色中波红外 HgCdTe 焦平面阵列结构示意图<sup>[10]</sup>, 采用 MBE 技术在 GaAs 替代衬底上生长 CdTe 缓冲层、组分 0.4 重掺杂 P<sup>+</sup>型层、组分 0.35 掺杂 P 型层、组分 0.29 的本征层、组分 0.35 重掺杂 N<sup>+</sup>型层、组分 0.25 掺杂 P 型层和组分 0.35 重掺杂 P<sup>+</sup>型层, 构成背照射结构的两个重叠的双层异质结, 在重掺杂 P<sup>+</sup>型层、重掺杂 N<sup>+</sup>型层上制备 In 柱阵列, 实现与读出电路芯片的倒装互连。

图 11 是采用 MBE 技术在 CdZnTe 衬底上生长 HgCdTe 双层异质结剖面、立体和扫描电镜照片<sup>[11]</sup>, 可看到如何从 p-n 结的台面结构引出 In 柱电极的结构细节。

采用 MBE 等技术制备基于 n<sup>+</sup>-B<sub>n</sub>-n 结能带势垒



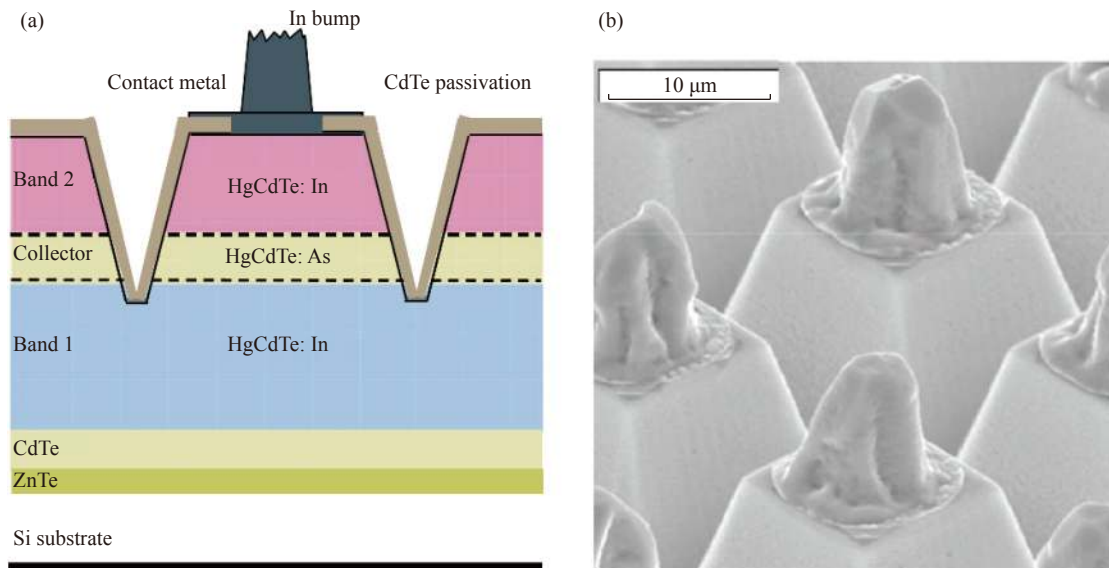


图 9 (a) 雷神公司采用 MBE 在 Si 衬底上生长的单台面双波段 HgCdTe 像元的剖面示意图; (b) 双波段像元扫描电镜图片<sup>[9]</sup>

Fig.9 (a) Cross-section of Raytheon's single-mesa dual-band pixel architecture applied to HgCdTe on Si grown by MBE; (b) Scanning electron micrograph of dual-band pixels<sup>[9]</sup>

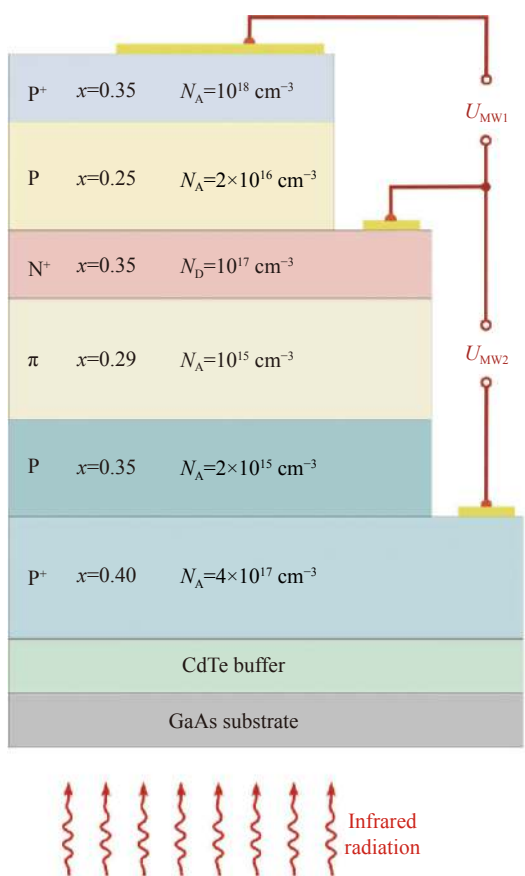


图 10 采用 MBE 在 GaAs 衬底上生长的双色 HgCdTe 红外探测结构<sup>[10]</sup>

Fig.10 Two-color HgCdTe IR detective structure on GaAs grown by MBE<sup>[10]</sup>

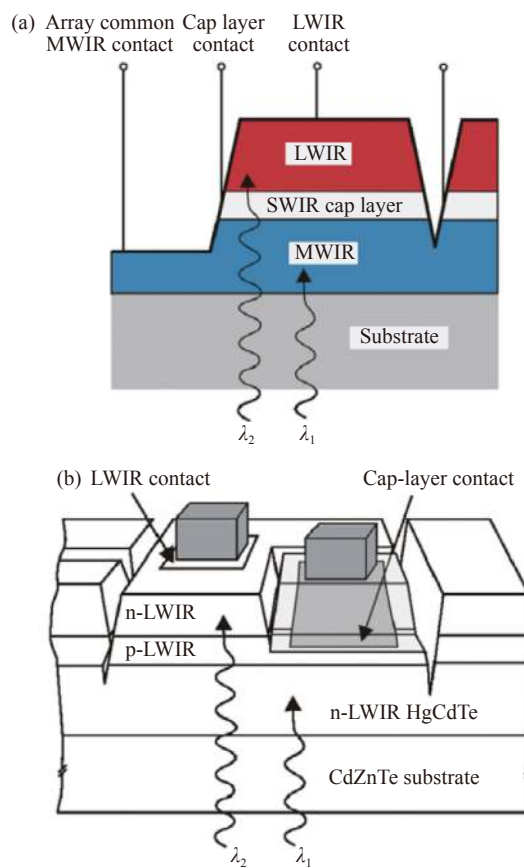


图 11 采用 MBE 在 CdZnTe 衬底上生长的双色 n-p-n HgCdTe 红外探测结构<sup>[11]</sup>。(a) 剖面图; (b) 立体图

Fig.11 Two-color n-p-n HgCdTe IR detective structure on CdZnTe grown by MBE<sup>[11]</sup>. (a) Side view; (b) Stereoscopic view



阻挡结构的高工作温度 HgCdTe 探测器,有效降低了暗电流,对提高中波红外 HgCdTe 焦平面探测器的工作温度有显著贡献。图 12(a) 为 HgCdTe p-n 结的能带示意图,暗电流机制主要是吸收区热激发电子和空

穴的扩散、空间电荷区隧道电流<sup>[12]</sup>;图 (b) 为 n<sup>+</sup>-B<sub>n</sub>-n 结能带与材料组成的示意图<sup>[13]</sup>,因在空间电荷区的导带制造一个不对称势垒,阻挡吸收区热激发电子和空穴的扩散,抑制隧道电流。

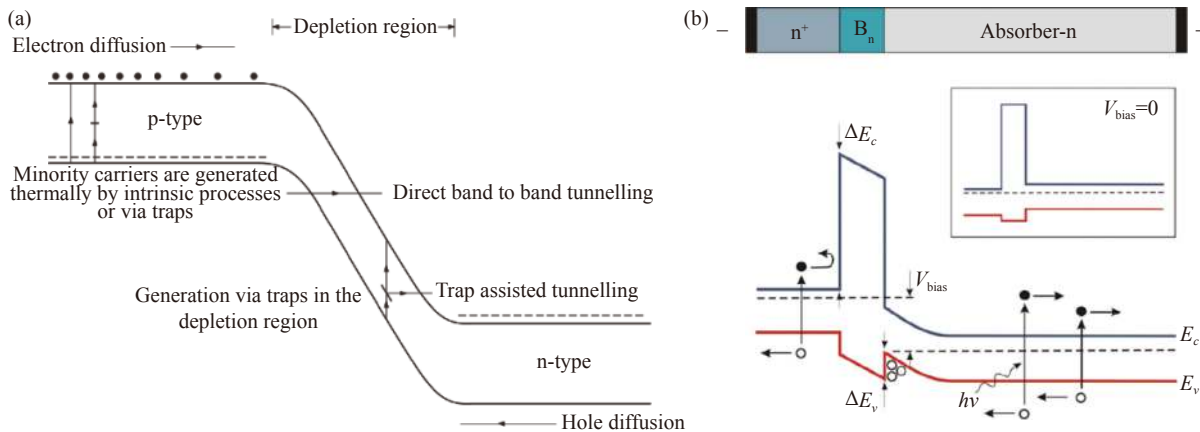


图 12 (a) HgCdTe p-n 结的能带图与主要暗电流机制示意图<sup>[12]</sup>; (b) n<sup>+</sup>-B<sub>n</sub>-n 结能带示意图<sup>[13]</sup>

Fig.12 (a) Energy band diagram illustrating the dark current mechanisms for a HgCdTe p-n junction<sup>[12]</sup>; (b) Energy band diagrams of HgCdTe n<sup>+</sup>-B<sub>n</sub>-n junction<sup>[13]</sup>

1.3 150 K 级工作温度

在高品质 HgCdTe 材料中,本征暗电流机制主要是:

- (1) 俄歇复合或辐射复合产生的扩散电流;
- (2) 空间电荷区的带间隧道电流。

在空间电荷区两侧扩散长度的体内杂质和缺陷、表面缺陷相关暗电流机制主要是:

- (1) 在 n-区和 p-区的肖克莱-里德(体内杂质和缺陷)复合产生的电流;
- (2) 在耗尽层内少数载流子的产生-复合电流;
- (3) 耗尽区陷阱辅助的隧道电流;
- (4) 表面态引起的表面产生电流。

决定 HgCdTe p-n 结优质因子 R<sub>0</sub>A 的三大要素是:

- (1) 耗尽区内少数载流子的产生-复合机制;
- (2) 耗尽区的隧道电流;
- (3) 表面漏电。

在 HgCdTe p-n 结耗尽区 n 侧的产生-复合机制包括扩散电流、俄歇复合、辐射复合和晶格缺陷。对截止波长 1.7 μm、2.5/2.7 μm 的高质量短波红外 HgCdTe 探测器,暗电流主要来源于材料晶格缺陷,因此可工作在较高温度(例如 180 K);对截止波长 4.7 μm 左右的高质量中波红外探测器可工作在 150 K 温度、且探

测率与低于 80 K 工作温度的探测率相同(图 13~15)。截止波长 10.0 μm、11 μm 长波红外和 14.5 μm 甚长波红外的高质量 HgCdTe 探测器,暗电流主要来源于俄歇复合,依然需要较低工作温度,为获得高探测率甚长波红外探测器需要工作在 40 K 低温(图 16),由此可见,长波和甚长波红外 HgCdTe 探测器的制作

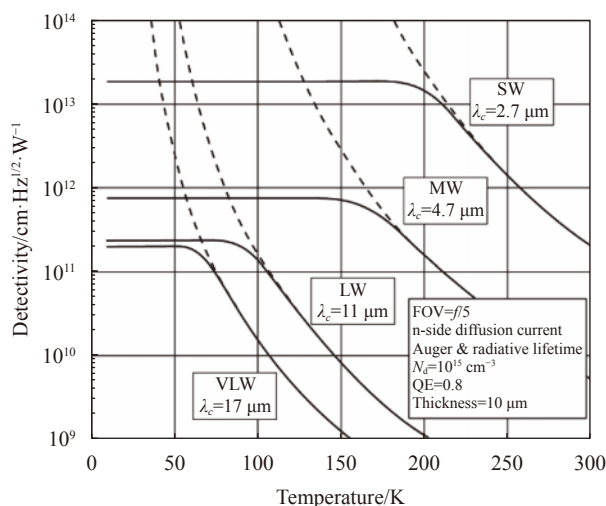


图 13 在四个重要波长计算所得的 p-on-n HgCdTe 探测器的工作温度与探测率关系<sup>[14]</sup>

Fig.13 Calculated detectivity for p-on-n HgCdTe detector plotted versus operating temperature for four important wavelength regions<sup>[14]</sup>

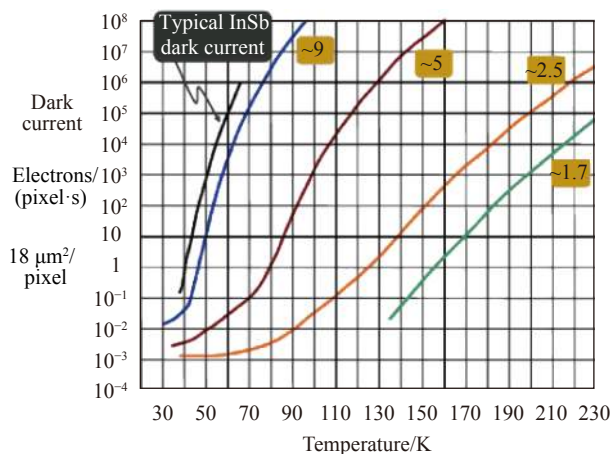


图 14 HgCdTe 焦平面探测器的温度、暗电流与截止波长的关系<sup>[7]</sup>

Fig.14 Dark current as a function of temperature and cutoff wavelength for HgCdTe focal plane detector<sup>[7]</sup>

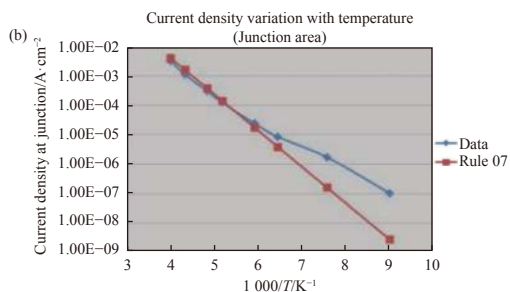
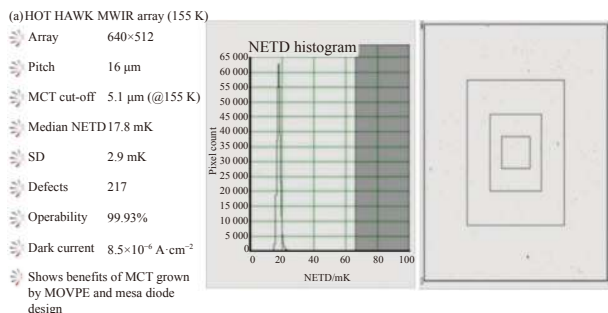


图 15 155 K 温度工作的“鹰”(HAWK)中波红外焦平面探测器的主要技术参数 (a) 和温度与暗电流密度的关系 (b)<sup>[15]</sup>

Fig.15 Main specifications of HAWK MWIR focal plane detector operated at 155 K (a) and relationship of temperature with current density (b)<sup>[15]</sup>

难度比中波和短波红外 HgCdTe 探测器大。提高 HgCdTe 探测器工作温度的主要工艺措施是降低耗尽区内材料的杂质和缺陷、提高表面钝化质量。

图 13 展示了耗尽区 n 侧扩散电流的复合机制为俄歇复合和辐射复合时, p-on-n 型 HgCdTe 探测器在短波 ( $\lambda_c=2.7 \mu\text{m}$ )、中波 ( $\lambda_c=4.7 \mu\text{m}$ )、长波 ( $\lambda_c=11 \mu\text{m}$ )

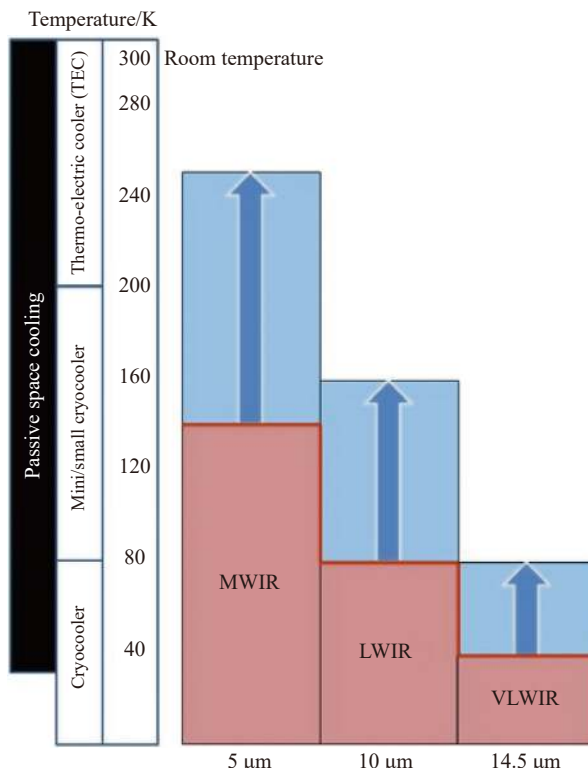


图 16 中波红外、长波红外和甚长波红外 HgCdTe 焦平面探测器工作温度与制冷方式的关系<sup>[7]</sup>

Fig.16 Relationship between operating temperature and cooling type of HgCdTe focal plane detector in MWIR, LWIR and VLWIR<sup>[7]</sup>

和甚长波 ( $\lambda_c=17 \mu\text{m}$ ) 红外波段计算所得的工作温度与探测率的关系<sup>[14]</sup>。

图 14 展示了 H2 RG 2 048x2 048 HgCdTe 焦平面探测器的温度、暗电流与截止波长的关系<sup>[7]</sup>, 以  $10 \text{ e}^-/\text{s}$  计 (CMOS 读出电路的典型噪声为  $100 \text{ e}^-/\text{s}$ ), 短波 ( $\lambda_c \sim 1.7 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_c \sim 2.5 \mu\text{m}$ )、中波 ( $\lambda_c \sim 5 \mu\text{m}$ ) 和长波 ( $\lambda_c \sim 9 \mu\text{m}$ ) 的 HgCdTe 探测器可以工作的温度分别为 170、140、80 K, 作为比较给出 InSb 探测器的温度-暗电流关系曲线 (黑色), 暗电流  $10 \text{ e}^-/\text{s}$  对应的工作温度约为 45 K。

图 15 展示了 155 K 温度工作的“鹰”(HAWK) 中波红外焦平面探测器的主要技术参数<sup>[15]</sup>, 截止波长  $5.1 \mu\text{m}$ , 平均噪声等效温差 17.8 mK, 标准偏差 2.9 mK, 可用像元数量高达 99.93%, 完全满足实际应用要求, 但斯特林制冷机因制冷工作负载小, 带来使用寿命增大至 10 000 h 数量级的收益。

美国 Teledyne 公司发展了轻掺杂的 HgCdTe 探测器技术, 能在 1~2 V 的反偏电压下实现 p-n 结空间

电荷区全部耗尽,从而抑制俄歇-1 复合引起的暗电流,使探测能力达到“背景限”。使用这种全耗尽工艺可以提高 HgCdTe 探测器的工作温度,见图 16,红色已经实现,蓝色是发展目标。工作温度在 80~200 K 时采用微/小型制冷机;工作温度提高到 200 K 以上,即可采用半导体制冷,使制冷寿命和成本呈数量级降低。

#### 1.4 雪崩探测

HgCdTe 雪崩模式焦平面探测器可用于低光子数红外探测<sup>[16]</sup>、遥感<sup>[17]</sup>、激光雷达<sup>[18]</sup>等,特别是与 0.9~4.3 μm 红外激光结合,用于测量地形地貌、大气光谱、气体浓度等。

HgCdTe 雪崩探测器的主要技术路线是液相外延+离子注入/刻蚀成结+平面钝化<sup>[16]</sup>,如图 17 所示,采用晶格匹配的碲锌镉衬底进行液相外延、离子注入形成平面结或离子刻蚀形成环孔结,空间电荷区在体内自然钝化,只需钝化平面/表面即可。制备的 HgCdTe 雪崩焦平面探测器具有雪崩击穿质量极好、雪崩增益高、光谱响应宽、响应速度快、增益色散低、暗电流低和像元可用性高等优点,主要不足是制

作大阵列雪崩模式焦平面探测器受 HgCdTe 材料尺寸限制。

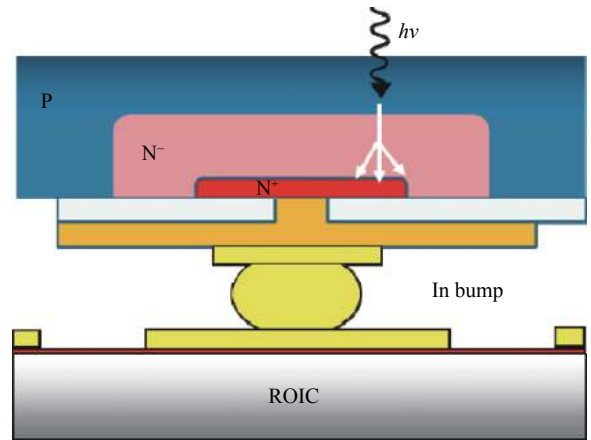


图 17 HgCdTe 雪崩探测器的结构示意图<sup>[16]</sup>

Fig.17 Schematic illustration of HgCdTe APDs architecture<sup>[16]</sup>

美国 DRS 公司研制成功了高密度垂直集成二极管 (High Density Vertically Integrated Photodiode, HDVIP) 的 HgCdTe 雪崩探测器<sup>[19-20]</sup>,如图 18 所示,在 p 型 HgCdTe 材料上通过离子刻蚀形成 n<sup>+</sup>-n-p 垂直结,通过中间的通孔金属化与其下方的读出电路输入端 (Readout Input) 实现高密度互连。

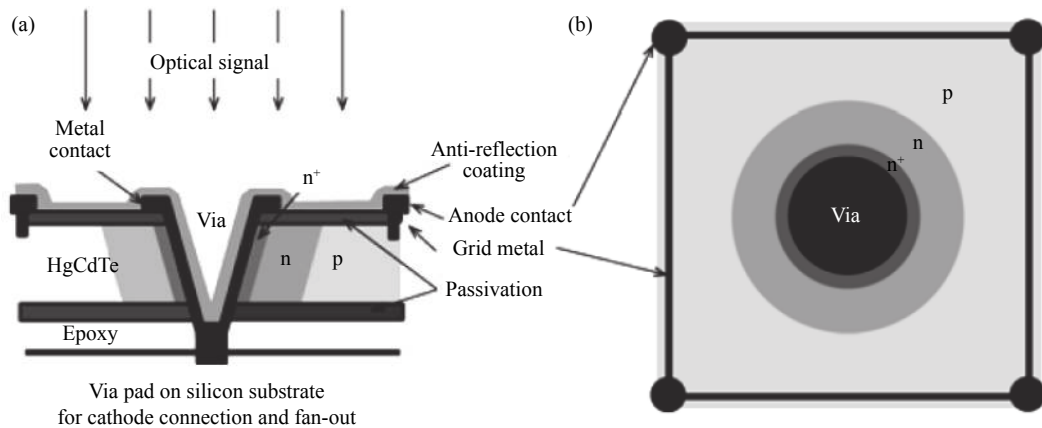


图 18 美国 DRS 公司研制的 HDVIP 结构 HgCdTe 雪崩探测器<sup>[19-20]</sup>。(a) 侧视图;(b) 俯视图

Fig.18 Schematic of the HDVIP structure HgCdTe APD of DRS Company<sup>[19-20]</sup>. (a) Side view; (b) Top view

2019 年,DRS 研制了 2×8 HDVIP 结构的 HgCdTe 雪崩探测器<sup>[18]</sup>,结构示意图如图 19 所示,图 (a) 为俯视图,像元尺寸 64 μm×64 μm,在其中均匀分布的 4 个环孔形成 4 个 n<sup>+</sup>-n-p 垂直结,中间为光子计数最佳入射区,图 (b) 为侧视图。雪崩探测器的增益区是环绕中心通孔的 n 区,因探测元垂直集成在其下方的硅读

出电路前置放大器上,减小了探测元和读出电路之间的分布电容。

据报道,DRS 研制的规模 2×8<sup>[18]</sup>和 4×4<sup>[20]</sup>HgCdTe 雪崩探测器组件,像元尺寸 64 μm×64 μm,表面安装一个 2×8 微透镜阵列将填充因子提高至接近 100%,封装在集成式杜瓦/制冷量 200 mW 的微型斯特林制

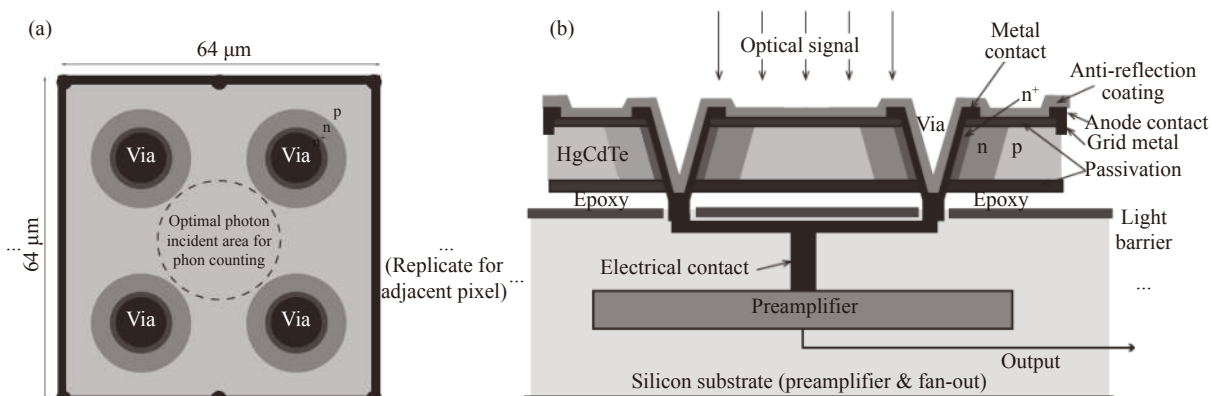


图 19 DRS 公司 2×8 HDVIP p-around-n 柱形结构的 HgCdTe 雪崩探测器示意图。(a) 平面结构示意图; (b) 剖面结构示意图<sup>[18]</sup>

Fig.19 Schematic of HgCdTe APDs by DRS using 2×8 HDVIP p-around-n cylindrical structure. (a) Top view; (b) Side view<sup>[18]</sup>

冷机中(图 20)。测试结果为: 光谱响应 0.9 ~ 4.3 μm, 量子效率 70%(暗计数率 250 kHz), 雪崩增益 1 900 (暗电流为每像素 3 万个电子), 单光子脉冲响应时间 6 ns, 时间抖动不大于 0.5 ns, 电压响应率达 10<sup>6</sup>~10<sup>8</sup> V/W, 噪声等效功率达 10<sup>-13</sup>~10<sup>-16</sup> W/Hz<sup>1/2</sup>(图 21), 接近量子探测极限, 同时提供模拟和数字输出, 具有较宽的动态范围, 工作温度 110 K, 质量 700 g, 功耗 7 W。

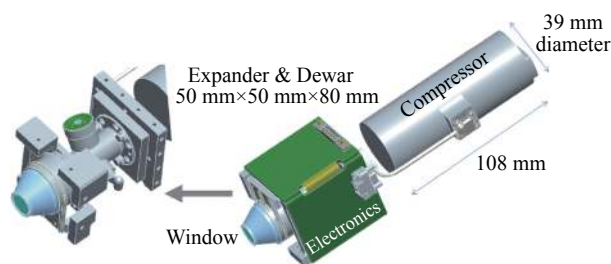


图 20 DRS 公司封装 2×8 HgCdTe FPA 雪崩探测器的微型斯特林制冷机的设计图<sup>[18]</sup>

Fig.20 DRS mini-Stirling cryocooler for the 2×8-pixel HgCdTe FPA<sup>[18]</sup>

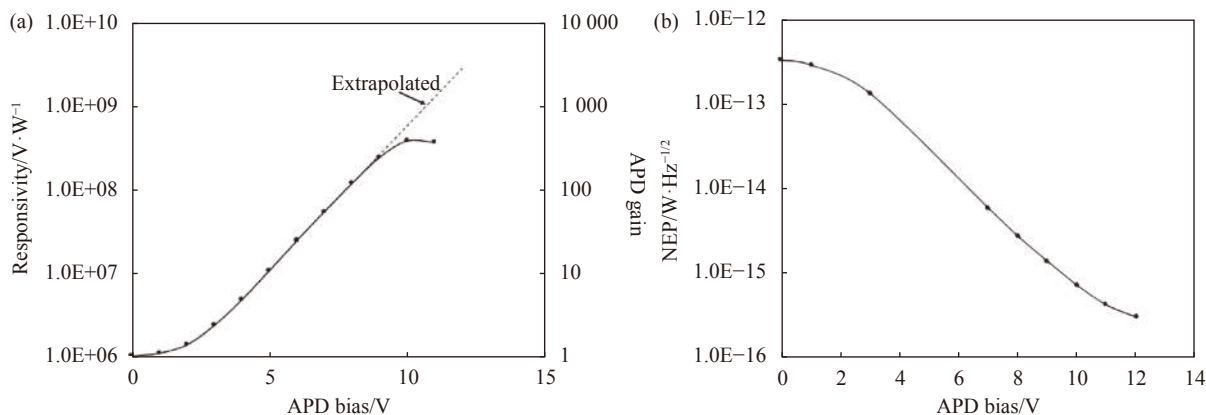


图 21 DRS 公司 HgCdTe 雪崩探测器的电压响应率 (a) 和噪声等效功率 (b) 与偏置电压的关系<sup>[18]</sup>

Fig.21 Measurement of the DRS HgCdTe APD responsivity(a) and NEP(b) as a function of the APD bias voltage<sup>[18]</sup>

2×8/4×4 线性模式光子计数 HgCdTe 雪崩焦平面探测器组件/斯特林制冷机通过了美国宇航局的振动、热循环、辐射等试验, 已用于机载 CO<sub>2</sub> 雷达 (波长 1.57 μm)、机载 CH<sub>4</sub> 激光雷达 (波长 1.65 μm)、NASA Langley 研究中心的空气/CO<sub>2</sub> 激光雷达 (波长 2.05 μm) 等。可以预期, HgCdTe 雪崩焦平面探测器将得到更快的发展。

## 2 结束语

本文在总结 HgCdTe 材料的基本物理性质的基础上, 分析了 HgCdTe 探测器的优点, 认为现在 HgCdTe 红外探测器依然是性能最好的红外探测器, 是第四代主流的红外焦平面探测器, 在新结构、新模式、新机理、新方法、新工艺的支持下, HgCdTe 材料



和大面阵、平面结和异质结、小像元、双波段、甚长波、150 K 级工作温度、雪崩探测器等方向或成为主流发展方向,预期未来还能达到新的高度。

### 致谢

中国科学院上海技术物理研究所何力研究员、中国电子科技集团有限公司第十一研究所喻松林研究员分别对文章提出了修改意见并指正,北京理工大学光电学院王岭雪副教授对全文进行了文字修改和编辑,在此一并表示感谢。

### 参考文献:

- [1] William Lawson Donald, Scott Young Alexander. Photosensitive cells, radiation filters and semiconductor materials for use in such cells and filters: US, 2953690[P]. 1960-09-20.
- [2] Lawson W D, Nielson S, Putley E H, et al. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1959, 9(3-4): 325-329.
- [3] Antoni Rogalski. Infrared Detectors[M]. 2nd ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2011.
- [4] Rogalski A. Next decade in infrared detectors[C]//Proc of SPIE, 2017, 10433: 104330 L.
- [5] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector array [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105: 091101.
- [6] NASA. About Webb Innovations' Infrared Detectors[DB/OL]. (2015-01-01) [2022-01-17]. [https://www.jwst.nasa.gov/content/about/innovations/infrared.html?utm\\_source=FBPAGE&utm\\_medium=NASA%27s+James+Webb+Space+Telescope&utm\\_campaign=NASASocial&linkId122682902](https://www.jwst.nasa.gov/content/about/innovations/infrared.html?utm_source=FBPAGE&utm_medium=NASA%27s+James+Webb+Space+Telescope&utm_campaign=NASASocial&linkId122682902).
- [7] Paul Jerram, James Beletic. Teledyne's high performance infrared detectors for Space missions[C]//Proc of SPIE, 2018, 11180: 111803 D.
- [8] Teledyne Imaging. HAWAII-4RG (H4RG) IR and Visible FPAs[EB/OL]. (2022-01-15) [2022-01-17]. <https://www.teledyneimaging.com/en/aerospace-and-defense/products/sensors-overview/infrared-hgdcde-mct/hawaii-4-rg/>.
- [9] Patten E A, Goetz P M, Vilela M F, et al. High-performance MWIR/LWIR dual-band 640×480 HgCdTe/Si FPAs [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(10): 2215-2219.
- [10] Madejczyk P, Gawron W, Keblowski A, et al. Higher operating temperature IR detectors of the MOCVD HgCdTe heterostructures [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49: 6908-6917.
- [11] Rogalski A. Material considerations for third generation infrared photon detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2007, 50: 240-252.
- [12] Wen Lei, Jarek Antoszewski, Lorenzo Faraone. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors [J]. *Applied Physics Reviews*, 2015, 2: 041303.
- [13] Małgorzata Kopytko, Artur Keblowski, Waldemar Gawron, et al. MOCVD grown HgCdTe barrier detectors for MWIR high-operating temperature operation [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(10): 105105.
- [14] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: History, status and outlook [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, 68: 2267-2336.
- [15] Lynne Patrick. Selex ES Detector Developments[EB/OL]. (2016-01-10) [2022-01-17]. <https://slideplayer.com/slide/4408122/>.
- [16] Rothman J, de Borniol E, Lasfargues G, et al. HgCdTe APDs for low-photon number IR detection[C]//Proc of SPIE, 2017, 10111: 1011119.
- [17] Rothman J, Foubert K, Lasfargues G, et al. High operating temperature SWIR HgCdTe APDs for remote sensing[C]//Proc of SPIE, 2014, 9254: 92540 P.
- [18] Sun Xiaoli, James B Abshire, Michael A Krainak, et al. HgCdTe avalanche photodiode array IR and visible FPAs lidar applications [J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(6): 067103.
- [19] Xiaoli Sun, James B Abshire, Jeffrey D Beck. HgCdTe e-APD detector arrays with single photon sensitivity for space lidar applications[C]//Proc of SPIE, 2014, 9114: 91140 K.
- [20] Sun X L, Abshire J B, Beck J D, et al. HgCdTe avalanche photodiode detectors for airborne and spaceborne lidar at infrared wavelengths [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16589-16602.