

高工作温度红外探测器的研究进展及趋势

张坤杰

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 基于高工作温度探测器的热成像系统的典型特征是体积小、重量轻、功耗低, 其性能在降低成本的同时与低温制冷型热成像系统的性能相当, 有着重要的应用价值和批量生产的前景。本文介绍势垒型探测器的结构特点, 阐述构建势垒型探测器的材料结构类型与其对系统性能的影响, 总结其他相关技术实现的高温探测器。最后对势垒型探测器目前的研究进展进行归纳, 提出了几个高温探测器技术未来的研究方向。

关键词: 势垒型结构; 高工作温度探测器; 材料制备; 热成像系统; 光电器件

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)08-0766-07

Research Progress and Trends of High Operating Temperature Infrared Detectors

ZHANG Kunjie

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Low SWaP (size, weight, and power) applications are typical features of thermal imaging systems based on HOT (high operating temperature) detectors. The system performance is comparable to that of a cooled infrared system, with reduced manufacturing costs. They have important application value and are promising prospects for high volume production. The structural features of barrier detectors are introduced, and the structures of the materials used for the barrier detectors and their impact on system performance are analyzed. Other technologies used for HOT detectors are also summarized. Finally, the current research progress on barrier infrared detectors is summarized. Additionally, several future research directions for HOT detector technologies are presented.

Key words: barrier structure, HOT detectors, material preparation, thermal imaging system, photoelectric device

0 引言

与传统的光电系统相比, 现代化光电系统逐渐向着体积更紧凑、功耗更低、成本更低的方向设计, 也就是低 SWaP (size, weight and power) 应用。对于固态探测器来说, 低 SWaP 指标的需求通常与每个像元中暗电流的显著减少相对应。因为暗电流指数一般依赖于探测器工作温度, 所以在暗电流与光电流可比之前, 暗电流越低, 越可提高更多的工作温度。当探测器达到背景限性能 (background limited performance, BLIP) 温度时, 温度的再升高会导致图像质量的大幅衰减。基于上述考量, 焦平面工作温度实际上被定义为暗电流比光电流低一到两个数量级的温度, 因此使得探测器对任何微小的温度变化都不敏感, 从而实现

探测器的高工作温度环境^[1-2]。这有助于降低制冷机的制冷功率、增加工作寿命、最终降低红外系统的整体尺寸、重量和功耗, 符合低 SWaP 指标。因此, 高温 (high operating temperature, HOT) 探测器一方面具有与非制冷型探测器可比的尺寸、体积和重量, 另一方面, 也满足在节约成本的同时具有与传统制冷型红外系统可比的光电性能^[3]。目前, 国外一些公司, 如 Leonardo DRS 公司、美国 Raytheon 公司、美国 Teledyne 公司、法国 Lynred 公司、Selex Galileo 公司、德国 AIM 公司和以色列 SCD 公司都已陆续推出 HOT 探测器, 应用领域多样, 如卡装式武器热瞄镜、便携式手持战术热像仪、小型无人机、遥控狙击手和遥控武器站、导弹导引头等空间受限的红外系统。

收稿日期: 2020-08-03; 修订日期: 2020-09-02.

作者简介: 张坤杰 (1986-), 女, 硕士, 主要从事国外科技信息研究等工作。E-mail: kunjie.zhang@aliyun.com.

1 基于势垒型结构的 HOT 探测器

1.1 nBn 势垒型结构特点

异质结 nBn 单极势垒型探测器在 2006 年被提出, 单极势垒这一词就是描述能阻挡一个载流子类型(电子或空穴)同时保持其他载流子自由通过的一个势垒层^[4]。n 代表同一窄禁带半导体中的掺杂, B 代表无掺杂的中心势垒层^[4]。这种结构与传统的 PN 结有些类似, 结(空间电荷区)被电子阻挡单极势垒层 B 所替代, p 型接触层被 n 型接触层所替代, 所以 nBn 探测器也可以被理解为光导器件与光伏器件的混合^[4]。

nBn 探测器通过排除窄禁带光子吸收层材料中的耗尽电场来完全抑制大量的产生-复合(generation-recombination, G-R)电流, G-R 电流对来自光子吸收层的暗电流的贡献受到全部抑制, 以此呈现出较低的暗电流, 所以 nBn 探测器又被称作没有耗尽区的器件^[4-10]。

图 1 所示的是 nBn 结构禁带图, 在势垒层一侧的 n 型半导体形成一层接触层用于偏压器件, 同时势垒层另一侧的 n 型窄禁带半导体是一层光子吸收层, 其厚度应与光在器件中的吸收长度可比, 典型值为几微米。为了避免势垒层阻挡光生少数载流子(又称光生空穴)穿过器件, 其位置的准确性很重要, 势垒层应该接近少数载流子接触层, 且距离光学吸收区域较远, 这种势垒型结构的安排允许光生少数载流子流向接触层的同时阻挡住多数载流子暗电流、再次注入的光电流和表面漏电流^[4,11]。因此, 以图 2 为例, nBn 结构允许光生少数载流子即使在非常低的偏压下也能流向未受阻的接触层, 同时使导带中大量的势垒阻挡住与 SRH (Shockley-Read-Hall) 过程相关的暗电流^[4,10]。换句话说, 多数载流子(电子)的扩散被耗尽区的势垒阻挡, 同时热产生或光吸收产生的光生少数载流子实现了相对自由地穿过器件, 这样可确保一个高的内部量子效率^[5-6,12]。

1.2 XBn 结构特点

以 nBn 结构为基础衍生出 XBn、XB_nn 等多种势垒型结构^[13]。其中, XBn 结构又被称为 Bariode (势垒型二极管)^[5-7,12,14], X 表示 n 型或 p 型接触层, B 表示 n 型宽禁带势垒层, n 表示 n 型窄禁带吸收层, 也就是光子吸收层和势垒层被掺杂了电子施主^[6,8]。如果是 XBp 结构, 则表示掺杂了电子受主^[6]。

XBn 探测器的耗尽区是由带有大的导带偏移的宽禁带势垒材料制成, 又因为只有宽禁带势垒层材料被耗尽才会对 G-R 电流产生贡献, 但因禁带太大, 所以其贡献比来自吸收层的扩散电流的贡献小。因此,

XBn 探测器的电子性质就像一个宽禁带器件, 但光学性质像一个窄禁带器件^[8,14]。

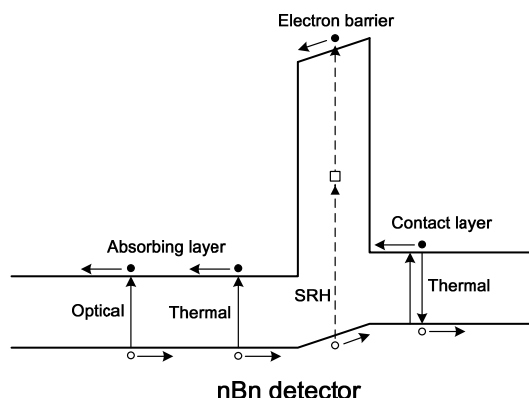


图 1 nBn 势垒型结构的禁带示意图

Fig.1 Bandgap diagram of nBn barrier

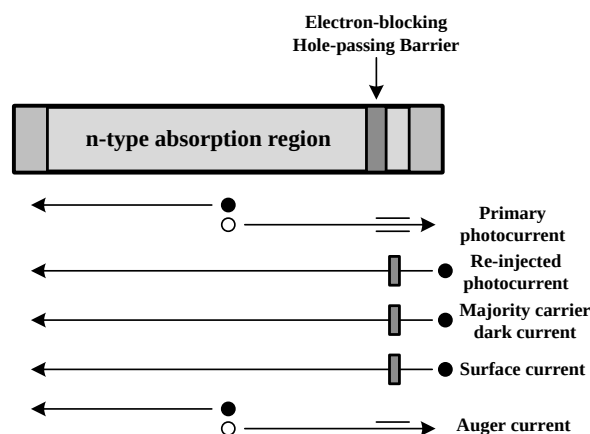


图 2 nBn 结构的各电流成分的空间构成和势垒阻挡

Fig.2 Spatial makeup of the various current components and barrier blocking

红外探测器的最大工作温度通常由随温度呈指数增长的暗电流决定^[5-7]。基于异质结材料的 XBn 探测器具有与标准同质 PN 结探测器相似的能带形状, 但区别是 XBn 探测器的任意窄禁带区都不存在耗尽区, 耗尽区被限制在一个宽禁带势垒材料内, 因此, G-R 电流对暗电流的贡献几乎被完全抑制, 暗电流由此变为扩散限的。与相同材料的传统 PN 结探测器相比, XBn 探测器中以扩散限为主导的暗电流可实现工作温度的升高, 且性能基本没有损失^[5,8,14]。另外, 因为宽禁带耗尽的势垒层可为相邻台面提供隔离, 同时窄禁带吸收层的任意部分都没有暴露在空气中, 所以 XBn 探测器的制备更简单, 更有可能实现较好的焦平面均匀性^[5]。

如图 3 所示, 黑色实线代表标准 PN 结探测器中的暗电流, 其下部的斜率约为上部斜率的一半, 它们分别对应 G-R 电流和扩散限电流的激活能。黑色虚线代表 XBn 探测器中的暗电流, 是高温扩散限电流向

温度在 T_0 以下的延伸,表示 XBn 探测器中不包含 G-R 电流的暗电流的变化过程^[5-6]。图中探测器暗电流的温度依赖性与温度的导数成正比。

假设 T_0 被定义为扩散电流和 G-R 电流相等时的交叉点温度(如图 3 灰色垂直虚线所示)。根据文献[4-5,7]的研究结果,在标准 PN 结探测器中,当工作温度低于 T_0 时,对暗电流的贡献来自耗尽层的 G-R 中心。在 XBn 探测器中,温度在 T_0 以下时,它呈现出两个趋势,一是当温度相同时,XBn 探测器呈现出高于标准 PN 结探测器工作时的信噪比(如图 3 黑色垂直箭头所示)。二是当暗电流相同时,根据文献[5-6,15]的观点,假设将 G-R 电流的激活能抑制为扩散电流的一半,也就是 G-R 斜率是扩散电流的一半,焦平面工作温度向左水平移动(如图 3 黑色水平箭头所示),说明 XBn 结构焦平面工作温度高于标准 PN 结焦平面的工作温度。这是因为 XBn 探测器的窄禁带半导体没有耗尽区,所以可忽略 G-R 电流对暗电流的贡献,在高于或低于 T_0 时,XBn 探测器中的暗电流都以扩散限为主导进行工作(如图 3 黑色实线和虚线所示),这一性质使其对反向偏压更不敏感,有助于降低焦平面的空间噪声^[7,14]。

根据图 3 的解释,文献[6]提到的 XBn 探测器(截止波长为 $4.1\ \mu\text{m}$) 在光学参数为 $F/3$ 、焦平面工作温度为 $160\ \text{K}$ 的条件下具有良好的背景限性能,与标准探测器焦平面相比,其工作温度提升两倍,所需制冷功率降低了 50%以上,同时大幅减小集成式探测器制

冷机组件(integrated detector cooler assembly, IDCA)的尺寸和重量。

2 基于多种材料的势垒型 HOT 探测器

从探测器材料的角度来讲,势垒型探测器可在不同的半导体材料中实现,它的实际应用已经在碲镉汞(HgCdTe)三元合金材料和 HgCdTe 的替代材料,如 InAs 、 InAsSb 和 InAs/GaSb 二类超晶格材料中实现^[3-4]。

2.1 基于 HgCdTe 材料的势垒型中波红外 HOT 探测器

在势垒型结构探测器中,因为在吸收层与势垒层交界处存在一个价带不连续性(势垒),所以势垒型结构不能在 HgCdTe 三元合金材料体系中直接实现^[11]。基于 HgCdTe 的势垒型中波红外探测器中的非零价带偏移是限制其性能的关键因素,尤其在低温条件下,由光学吸收产生的低能量少数载流子不能克服价带能量势垒,所以器件呈现较低的灵敏度和探测率。但是,根据文献[11]的分析,通过 MOCVD (metalorganic chemical vapor deposition, 金属有机化合物化学气相沉淀)生长的势垒型 HgCdTe 探测器可以提供零价带偏移,由于势垒层的作用,暗电流被有效减小的同时保持了高灵敏度和探测率。MOCVD 技术的优点是可以选用传统衬底的替代材料,如 GaAs 或者 Si 衬底,它们可以替代非常昂贵的碲镉汞(CdZnTe)衬底^[4,11]。

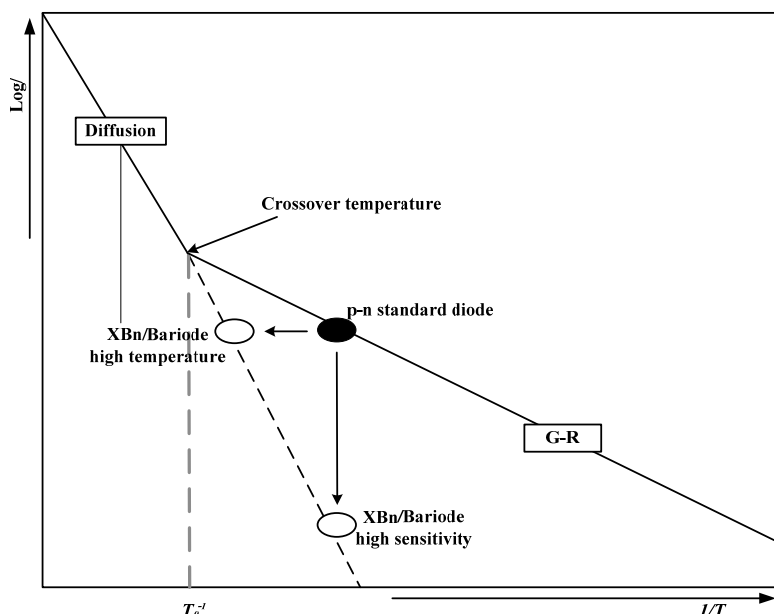


图 3 标准 PN 结探测器和 XBn 探测器中暗电流温度依赖性的对比,标准 PN 结探测器暗电流的扩散限和产生-复合限部分做了标记

Fig.3 A comparison of temperature dependence of the dark current in standard p-n detector and XBn detector, the diffusion and G-R limited portions of the dark current in p-n detector are labeled

波兰Vigo系统公司目前已经实现了HgCdTe探测器势垒型结构的研发,该公司选用典型的5.08 cm GaAs作为其生长衬底,为了减小晶格失配引起的应力作用,在HgCdTe的生长之前、在GaAs衬底和HgCdTe外延层结构之间沉积一层3~4 μm厚的CdTe薄膜作为缓冲层^[11]。文献[4]认为对于HgCdTe势垒型中波红外探测器来说,未来的研制工作应集中在减少甚至消除势垒层中的价带偏移,以使其具备在较低工作偏压、较低暗电流和较高温度下工作的性能。

2.2 基于III-V族材料的势垒型中波红外HOT探测器

在XBn势垒型探测器材料的制备中,III-V族材料起到决定性作用,它具备较高的设计灵活性、直接的能隙和较稳固的光学吸收等优点^[4]。以InAs、GaSb和AlSb三种材料为例,当室温能量在0.36 eV(InAs)~1.61 eV(AlSb)范围内时,3种材料形成的晶格匹配组合约为6.1 Å, XBn探测器目前采用了6.1 Å III-V族材料^[4, 16-17]。

以色列SCD公司是生产基于III-V族材料的XBn探测器的典型代表,其XBn探测器生产线的主要程序包括晶片生长;晶圆级蚀刻和金属/介质沉积;切割和反装晶片混合;背面抛光和蚀刻;防反射镀膜;安装和引线连接^[14]。该公司一般采用一个7.62 cm的晶片来制备XBn结构焦平面,在该晶片上需要进行的步骤多于生产一个平面注入型焦平面所需的步骤,但其XBn生产线的成品产量与其更成熟的平面注入型InSb生产线的成品产量相当^[14]。两种结构的主要区别是,平面注入工艺的主要损失来源于生产工艺过程中造成的缺陷,而XBn工艺损失的根本原因与具有衬底缺陷和其它晶片缺陷的晶片生长有关。

SCD公司研制的第一款满足低SWaP应用的III-V族XBn探测器是Kinglet(640×512, 15 μm)中波红外IDCA组件,其晶片主体层是一层厚的n型InAsSb光子吸收层、一层薄的n型AlSbAs势垒层和一层薄的n型InAsSb接触层,焦平面工作温度为150 K,功耗3 W,重量小于300 g^[14]。另外,该公司研制的百万像元级(1280×1024, 15 μm)XBn-InAsSb IDCA组件的工作温度可达150 K^[1,12,18]。

在SCD公司的XBn中波红外探测器中,器件的接触层材料X不是n-InAsSb就是p-GaSb,势垒层材料Bn由n型AlSbAs制成,吸收层材料由n型InAsSb制成。这些探测器的像元间距为15 μm或30 μm,光电性能类似,也较充分地说明XBn结构的通用性^[6, 14]。以其XBn探测器Blue Fairy(320×256)和Pelican(640×512)为例,它们的生长衬底是GaSb或GaAs,

两种探测器都呈现出一个4.1 μm的禁带波长,且在光学参数为F/3时,通过分子束外延(molecular beam epitaxy, MBE)生长的两种探测器的性能一直到160 K都是背景限的^[6, 10, 14]。

为了满足市场需求,该公司还研制了Blackbird系列中波红外数字探测器,像元间距为10 μm,基于1920×1536, 1280×1024和640×5123种不同的读出电路格式,都使用了0.18 μm CMOS技术,且都呈现出具有较低功耗和较高光电性能的特点。Blackbird系列支持两种10 μm像元间距的焦平面类型,一种是基于SCD公司平面结技术的中波红外InSb焦平面,工作温度为77 K。另一种是XBn-InAsSb势垒型探测器,其光电性能等同于平面结InSb探测器,但工作温度达150 K^[19]。

另外,斯洛文尼亚DAT-CON公司也研制了基于XBn-InSb探测器的CLRT系列中波红外(640×512, 15 μm)和CLRT高清系列中波红外热像仪(1280×1024, 10 μm),其中,CLRT系列的热灵敏度为23 mK, CLRT高清系列的热灵敏度为25 mK,两种系列的制冷机平均故障时间均为20200 h^[20]。

与HgCdTe材料相比,一方面,III-V族材料比HgCdTe更能提供较强的化学键,而且能带边缘对组分的依赖性较弱,所以比HgCdTe的化学稳定性更高^[4]。另一方面,从探测器材料成本的角度讲,因为CdZnTe衬底对于大面阵探测器的制备非常昂贵,而InSb的生长晶片可用直径达到10.16 cm,所以InSb比HgCdTe更易生成较大面积和较高均匀性,从而提高制造大面阵探测器的经济规模^[4,6,14]。

2.3 基于III-V族二类超晶格材料的势垒型中长波红外HOT探测器

使用内在固有的较低俄歇(Auger)G-R速率的材料来设计探测器材料能够抑制俄歇G-R,以此可以实现探测器较大范围内的稳定性、电子和空穴的更高迁移率等,III-V族InAs/GaSb二类超晶格材料较符合上述要求^[4]。在这种III-V族二类超晶格材料的二元化合物中,一般使用带有AlAsSb势垒层的InAs外延层来制备势垒型探测器,因为InAs/GaSb二类超晶格相对于AlAsSb势垒几乎接近于零的价带偏移,所以它们较适合势垒型结构^[4]。以中波红外InAs/GaSb二类超晶格为例,当生长晶格与GaSb衬底相匹配时,截止波长为4.1 μm时,通过MBE生长的势垒型探测器材料的质量更好^[4]。

在波兰Vigo系统公司的中波红外势垒型HOT探测器中,其研制的InAs/GaSb二类超晶格材料结合了通过MBE生长的III-V族材料和人工合成材料二类超

晶格的物理性质。与其研制的中波红外 HgCdTe 材料相比,因为超晶格的有效质量不直接依赖于禁带能量,而是减小超晶格中的隧道电流,电子和空穴的空间分离会引起二类超晶格材料中俄歇复合速率的抑制^[4],所以,根据文献[4]的观点,与具有类似禁带的 HgCdTe 材料相比,InAs/GaSb 超晶格的俄歇复合速率可被抑制若干个数量级。换言之,超晶格的电子性质可能会超越 HgCdTe 合金材料的电子性质^[4]。文献[21]提出采用热电制冷的 InAs/GaSb 二类超晶格焦平面(截止波长约为 10 μm)工作温度可达 200 K,当焦平面工作温度为 195 K 时,其峰值光谱探测率大于 $6 \times 10^9 \text{ cmHz}^{0.5} \text{ W}^{-1}$,性能上接近商用 HgCdTe 探测器。SCD 公司也已经对 InAs/GaSb 二类超晶格探测器结构进行了建模、生长、工艺处理和表征,有望用 III-V 族二类超晶格材料替代 HgCdTe 来制造势垒型探测器^[22]。

然而,尽管二类超晶格的物理性质重点强调其相对于体晶材料的潜在优势,但高温条件下的俄歇 G-R 导致少数载流子寿命缩短,以文献[21, 23]的观点为例,当焦平面工作温度为 77 K 时,InAs/InAsSb 二类超晶格势垒型探测器在长波红外波段内对应的载流子寿命是 400 ns,当焦平面工作温度提高到 300 K 时,载流子寿命小于 100 ns。这也是制约 III-V 族二类超晶格势垒型探测器性能的主要因素^[4]。

2.4 基于 III-V 族二类超晶格材料的势垒型扩展短波红外探测器

扩展短波红外(extended-short wave infrared, e-SWIR)探测器的波长范围覆盖 1.7~2.5 μm 。文献[24]提出基于 AlAsSb/GaSb 超晶格的势垒型 nBn e-SWIR 探测器,使用 GaSb 作为生长衬底,AlAsSb/GaSb 超晶格与 GaSb 衬底晶格匹配,且都拥有 Sb 原子,在超晶格的设计中可以提供极大灵活性。因为这种超晶格中的电子量子阱较深,所以可将其调整为 nBn e-SWIR 探测器所必需的宽禁带电子势垒,这种设计也叫 H 型结构超晶格,在一层 n 型接触层和一层 n 型 e-SWIR 吸收区域之间加入 H 型结构超晶格作为电子势垒层,以此构成 nBn e-SWIR 探测器^[24]。

根据文献[24]的研究结果,当焦平面工作温度为 150 K 时,nBn e-SWIR 探测器暗电流密度为 $9.5 \times 10^{-9} \text{ A/cm}^2$ (使用 -400 mV 偏压);同质结 p-i-n e-SWIR 探测器暗电流密度为 $4.7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (使用 -50 mV 偏压)。当工作温度等于室温 300 K 时,nBn e-SWIR 探测器暗电流密度为 $8 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$ (使用 -400 mV 偏压);同质结 p-i-n e-SWIR 探测器暗电流密度为 $6.6 \times 10^{-2} \text{ A/cm}^2$ (使用 -50 mV 偏压)。由此可以看出,工作温

度越高,基于 nBn 结构的 e-SWIR 探测器呈现出越低的暗电流密度。当工作温度在 180 K 以上时, nBn e-SWIR 探测器的暗电流是扩散限的,150 K 时,为 G-R 限^[24]。当工作温度为室温 300 K 时, nBn 势垒型 e-SWIR 探测器能实现单个人体的成像。根据文献[24]的实验结果,利用 nBn 势垒型结构有望将 e-SWIR 探测器的工作温度提升至室温。

3 基于其他技术的 HOT 探测器

目前,除了上述势垒型探测器的研究,国外一些公司,如 DRS 公司和 Selex 公司使用了基于带有特殊像元结构的 n-on-p/HgCdTe 技术来提升焦平面工作温度。美国 Teledyne 公司利用 p-on-n/HgCdTe 技术实现了中波红外探测器工作温度的升高。

图 4 为法国 Lynred 公司研制的中波红外 Daphnis IDCA 组件(1280×720, 10 μm),采用 n-on-p/HgCdTe 同质结技术将焦平面工作温度提升至 120 K, NETD 值为 20 mK (293 K@70%势阱填充)^[25-27]。



图 4 Lynred 公司研制的 Daphnis 高清中波红外 IDCA 组件^[25]

Fig. 4 Daphnis-HD MWIR IDCA developed by the Lynred^[25]

德国 AIM 公司研制的带有空位掺杂的标准 n-on-p/HgCdTe 技术可使中波红外探测器(标清格式)在 120 K 时保持良好的光电性能,通过引入金作为受主杂质的非本征 p 型掺杂来替代空位掺杂,掺杂水平为中等范围的 10^{16} cm^{-3} ,实现了焦平面工作温度提升至 140 K,也是该公司一代 HOT 探测器。将探测器吸收层水平从中等范围的 10^{16} cm^{-3} 降至较低范围的 10^{15} cm^{-3} ,焦平面在 160 K 的温度下呈现出接近背景限性能温度的 NETD 值,同时保持较低噪声缺陷,这是该公司二代 HOT 探测器,其工作温度最高可达 180 K^[3]。

图 5 为 AIM 公司研制的百万级像元(HgCdTe, 1280×1024, 15 μm)中波红外 IDCA 组件,其在 120 K 条件下呈现出良好的光电性能,与该公司原来的标清格式(640×512)中波红外探测器性能相似^[3, 28]。图

6 为该公司研制的 HiPIR 紧凑型 HOT 中波红外 IDCA 组件 (HgCdTe, 1024×768 , $10 \mu\text{m}$), 焦平面工作温度可达 160 K, NETD 值小于 25 mK ($300 \text{ K}@50\%$ 势垒填充)^[29]。目前, 除了基于液相外延 (liquid phase epitaxy, LPE) 生长的 HOT 探测器, 该公司研制的通过 MBE 生长在 10.16 cm GaAs 衬底上的光伏型探测器的工作温度主要在 $80 \sim 100 \text{ K}$ 之间^[3]。未来, 其 HOT 探测器技术的发展还将基于通过 LPE 生长的中波红外探测器, 通过使用更低水平的 p 型掺杂和进一步优化的钝化工艺, 暗电流存在进一步减小的可能, 工作温度将进一步提升至 180 K 以上或等于 180 K^[3]。

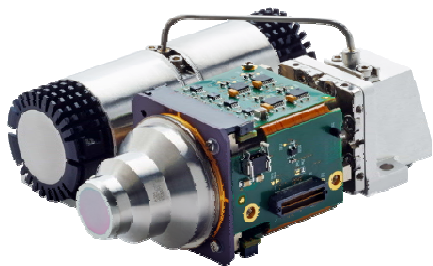


图5 AIM公司研制的HiPIR-1280M中波红外IDCA组件^[28]

Fig.5 HiPIR-1280M MWIR IDCA developed by the AIM^[28]

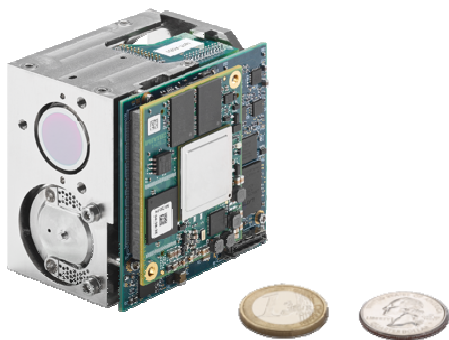


图6 AIM公司研制的紧凑型高温HiPIR HgCdTe IDCA组件^[29]

Fig.6 HiPIR HOT HgCdTe compact IDCA developed by the AIM^[29]

4 结束语

HOT 探测器在中波和长波红外波段内都已实现应用, 目前, 国外基于异质结势垒型结构的中波红外探测器工作温度范围主要在 $150 \sim 195 \text{ K}$, 同质结中波红外探测器的工作温度在 $120 \sim 180 \text{ K}$ 的范围内。对于工作波段在 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 的长波红外探测器来说, 目标是将其工作温度提升至大于等于 100 K 。另外, 异质结势垒型结构在波段扩展后的 $1.7 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 的短波红外探测器中也已实现研究成果, 有望实现 e-SWIR 探测器在 300 K 条件下的室温性能。

随着势垒型探测器技术在中波、长波和短波红外波段内的研究发展, 加之基于该技术的热成像系统在

尺寸、重量和体积方面与非制冷型热成像系统相当, 使得 HOT 探测器在军用和民用领域的应用空间广泛提升。对于中波红外 HOT 探测器来说, 势垒型 HOT 探测器的制备普遍采用 III-V 族材料或 III-V 族二类超晶格材料, 但目前波兰 Vigo 系统公司实现了 HgCdTe 探测器的势垒型结构; 欧美一些企业一般采用其他技术制备 HOT 型 HgCdTe 探测器, 这些中波红外 HOT 探测器都适用于空间极为受限的军事平台, 如导弹导引头、武器热瞄镜、小型无人机等。对长波红外 HOT 探测器来说, 其军事应用更多的需要高可靠性, 如车辆和旋翼领航机的 24h 全天候监视工作等。在扩展短波红外波段内, 经过试验研究, 采用势垒型结构的 e-SWIR 探测器有望将工作温度提升至室温, 在低照度应用中更具有优势。

另外, 国外一些制造商致力于研究利用 III-V 族二类超晶格材料制备 HOT 探测器, 以实现与碲镉汞可比的光电性能。由于 III-V 族二类超晶格材料的光生少数载流子寿命受高温环境的影响较大, 所以这也是国外一些公司对 HOT 探测器技术的重点研究方向之一。同时, 采用热电制冷的 HOT 探测器目前也在初步发展阶段。

参考文献:

- [1] Lior Shkedy, Maya Brumer, Philip Klipstein, et al. Development of $10 \mu\text{m}$ pitch XBn detector for low SWaP MWIR applications[C]//Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XLII, 2016, **9819**: 98191D(doi: 10.1117/12.2220395).
- [2] Lutz H, Breiter R, Eich D, et al. High operating temperature IR-modules with small pitch for SWaP reduction and high performance applications[C]//Proc. of SPIE, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications VIII, 2011, **8185**: 818504(doi: 10.1117/12.900347).
- [3] Lutz H, Breiter R, Figgemeier H, et al. Improved high operating temperature MCT MWIR modules[C]//Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XL, 2014, **9070**: 90701D(doi: 10.1117/12.2050427).
- [4] Rogalski A, Martyniuk P. Mid-Wavelength infrared nBn for HOT detectors[J]. Journal of Electronic Materials, 2014, **43**(8): 2963-2969.
- [5] Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, et al. "XBn" barrier detector for high operating temperatures[C]//Proc. of SPIE, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices VII, 2010, **7608**: 1-10.
- [6] Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, et al. High operating temperature XBn-InAsSb barrier detectors[C]//Proc. of SPIE, Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX, 2012, **8268**: 1-8.
- [7] Philip Klipstein. "XBn" Barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature infrared sensors[C]//Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXIV, 2008, **6940**: 1-12.
- [8] Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, et al. MWIR InAsSb XBn

- detectors for high operating temperatures[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVI*, 2010, **7660**: 76602Y(doi: 10.1117/12.849503).
- [9] David Z Ting, Alexander Soibel, Cory J Hill, et al. High operating temperature midwave quantum dot barrier infrared detector (QD-BIRD)[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVIII*, 2012, **8353**: 835332 (doi: 10.1117/12.920685).
- [10] David Z Ting, Alexander Soibel, Arezou Khoshakhlagh, et al. Carrier transport in nBn infrared detectors[C]// *Proc. of SPIE, Infrared Remote Sensing and Instrumentation XXIV*, 2016, **9973**: 997304 (doi: 10.1117/12.2238853).
- [11] Kopytko M, Jóźwikowski K, Martyniuk P, et al. Status of HgCdTe barrier infrared detectors grown by MOCVD in military university of technology[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, **45**(9): 4563-4573.
- [12] Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, et al. MWIR InAsSb XB_n detector (bariodes) arrays operating at 150 K[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXVII*, 2011, **8012**: 80122R(doi: 10.1117/12.883238).
- [13] 邓功荣, 赵鹏, 袁俊, 等. 碲基高工作温度红外探测器研究进展[J]. *红外技术*, 2017, **39**(9): 780-784.
- DENG Gongrong, ZHAO Peng, YUAN Jun, et al. Status of Sb-based HOT infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2017, **39**(9): 780-784.
- [14] Philip Klipstein, Gross Y, Aronov D, et al. Low SWaP MWIR detector based on XBn Focal plane array *Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXIX*, 2013, **8704**: 1-12.
- [15] Philip Klipstein, Olga Klin, Steve Grossman, et al. XBn barrier photodetectors based on InAsSb with high operating temperatures [C]//*Optical Engineering*, 2011, **50**(6): doi: 10.1117/1.3572149.
- [16] Amy W K, LIU Dmitri Lubyshev, QIU Yueming, et al. MBE growth of Sb-based bulk nBn infrared photodetector structures on 6-inch GaSb substrates[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XLI*, 2015, **9451**: 94510T(doi: 10.1117/12.2178122).
- [17] Dmitri Lubyshev, Joel M Fastenau, QIU Yueming, et al. MBE growth of Sb-based nBn photodetectors on large diameter GaAs substrates[C]// *Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XXXIX*, 2013, **8704**: 870412(doi: 10.1117/12.2019039).
- [18] Yoram Karni, Eran Avnon, Michael Ben Ezra, et al. Large format 15μm pitch XBn detector[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XL*, 2014, **9070**: 90701F(doi: 10.1117/12.2049691).
- [19] Gershon G, Avnon E, Brumer M, et al. 10μm pitch family of InSb and XBn detectors for MWIR imaging[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XLIII*, 2017, **10177**: 101771I(doi: 10.1117/12.2261703).
- [20] DAT-CON Defence. Multi-sensor-units[M/OL]. [2019-03-06]. https://www.dat-con-defence.com/wp-content/uploads/2020/01/Multi-sensor-units_2020_compressed.pdf.
- [21] Müller R, Gramich V, Wauro M, et al. High operating temperature InAs/GaSb type-II superlattice detectors on GaAs substrate for the long wavelength infrared[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2019, **96**: 141-144.
- [22] Philip Klipstein, Avnon E, Benny Y, et al. InAs/GaSb Type II superlattice barrier devices with a low dark current and a high-quantum efficiency[C]//*Proc. of SPIE, Infrared Technology and Applications XL*, 2014, **9070**: 90700U(doi: 10.1117/12.2049825).
- [23] Martyniuk P, Hackiewicz K, Rutkowski J, et al. Ultimate performance of IB CID T2SLs InAs/GaSb and InAs/InAsSb longwave photodetectors for high operating temperature condition[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, **48**(10): 6093-6098.
- [24] Manijeh Razeghi. Sb-based 3rd generation imagers at center for quantum devices[C]//*Proc. SPIE, Infrared Technology and Applications XLVI*, 2020: doi:10.1117/12.2564813.
- [25] 周立庆, 宁提, 张敏, 等. 10 μm 像元间距 1024×1024 中波红外探测器研制进展[J]. *激光与红外*, 2019, **49**(8): 915-920.
- ZHOU Liqing, NING Ti, ZHANG Min, et al. Developments of 10 μm pixel pitch 1024×1024 MW infrared detectors[J]. *Laser and Infrared*, 2019, **49**(8): 915-920.
- [26] 张坤杰. 国外三代红外探测器制冷机的研究现状[J]. *云光技术*, 2020, **52**(1): 28-37.
- ZHANG Kunjie. The research status of the third generation infrared detectors in foreign countries[J]. *YUN GUANG JI SHU*, 2020, **52**(1): 28-37.
- [27] Lynred. DAPHNIS-HD MW[M/OL][2019-11-20]. <http://www.lynnred.com/sites/default/files/2019-10/Daphnis-HD-MW-datasheet.pdf>.
- [28] AIM Infrarot-Module GmbH. HiPIR-1280M-MCT MWIR 1280×1024 15 μm Pitch IDCA[M/OL][2019-03-09]. http://www.aim-ir.com/fileadmin/files/Data_Sheets_Security/Modules/02_MWIR_IDCA/HiPIR_1280M/2018_AIM_datenblatt_A4_HiPIR-1280M_engl.pdf.
- [29] AIM Infrarot-Module GmbH. HiPIR-Engine HOT MCT 1024×768 10μm PITCH IR ENGINE[M/OL][2019-03-09]. http://www.aim-ir.com/fileadmin/files/Data_Sheets_Security/Modules/01_Hot_Cube/2018_AIM_datenblatt_A4_HOT-MCT-1024_engl.pdf.