

·光电器件与材料·

第三代碲镉汞器件的研发进展

王忆锋, 唐利斌

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要:通过对近年来部分英语文献的归纳分析,介绍了国外第三代碲镉汞(MCT)器件的研发现状,包括具有新颖器件结构的双色或三色探测器、雪崩光电二极管和多光谱阵列等.分析了三代 MCT 器件在阵列规模、光伏技术的甚长波应用、多色、读出电路等方面的研究进展.指出利用复杂可控的气相外延生长方法,例如分子束外延(MBE)和金属有机气相化学沉积(MOCVD)等,已可制备近乎理想设计的异质结光电二极管.随着基于 MBE 生长的 MCT 技术发展,法国和美国已分别可以制备 4 英寸以上的大尺寸锗基和硅基晶片,并在晶片上以可控厚度沉积光敏薄膜.依据目前的发展,三代 MCT 技术有望 3、5 年内达到量产的水平.

关键词:碲镉汞;pn 结;光电二极管;焦平面阵列器件;红外探测器

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)05-0017-06

Advances in Third-Generation HgCdTe Devices

WANG Yi-feng, TANG Li-bin

(Kunming Institute of Physics, Yunnan 650223, China)

Abstract: By summarizing and analyzing some related papers published in English over the last few years, the status of third generation Mercury Cadmium Tellurium (MCT) devices, including two-colour or three-colour detectors with novel device structure, avalanche photodiodes and multi-spectral arrays, were presented. The developments of third generation MCT devices in array size, very long wavelength application of photovoltaic technology, multi-colour, readout capability and etc were analyzed. It is pointed that the sophisticated controllable vapor phase epitaxial growth methods, such as Molecular Beam Epitaxy (MBE) and metal organic chemical vapour deposition (MOCVD), can be used to fabricate almost ideally designed heterojunction photodiodes. With the progress of MCT technology based on MBE, large wafers (4 inches and more) are available on germanium in France and on silicon in the USA. This enables larger wafer to have a sensitive thin film deposition, of which the thickness is controllable. Third generation MCT technology is hopeful of achieving the high-rate production in three or five years according to the related progress right now.

Key words: mercury cadmium tellurium; pn junction; photodiode; focal plane array device; infrared detector

红外成像系统的发展过程可划分为三代.第一代系统又称为通用组件系统,它由探测器阵列和扫描器等部分构成.20 世纪 80 年代后期至 90 年代初期,出现了第二代红外成像系统.二代系统仍是单波段系统,它与一代系统的主要区别是引入了时间延

迟积分(TDI)功能.以 320×256 面阵凝视阵列为成像器件的系统被称为 2.5 代.文献[1]将保持美国现有光电优势所需的各种技术定义为三代技术.

碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, 组分值 x 是 Cd 的摩尔分数,以下简称 MCT)一直是红外成像系统的主

收稿日期:2009-07-28

作者简介:王忆锋(1963-),男,湖南零陵人,工学士,高级工程师.曾赴美国内布拉斯加大学林肯分校计算机系做国家公派访问学者,目前主要从事器件仿真研究.

流探测器.其发展至今也可划分为三代.简单地说,一代为(一维)光导线列,其中有60、120或180元器件,8元SPRITE器件等;二代为(二维)光伏阵列器件,如 240×4 、 288×4 和 480×4 等.三代则为(二维、光伏)大面阵凝视器件,例如 640×480 、 640×512 (电视格式)等.二、三代器件以焦平面组件(FPA)为主.一般认为与二代器件相比,三代器件在像元数、帧速、温度分辨率等性能方面均应有较大提高,同时具有多色功能及其他芯片上处理的功能^[2,3].双色/多色探测器、雪崩光电二极管以及超光谱阵列等属三代器件^[4].通过对部分英语文献的归纳分析,介绍了国外近年来中有关三代MCT器件的研究进展.

1 光敏元中心间距

热灵敏度和空间分辨率是衡量红外成像系统性能的2个基本参数.为了识别距离更远,三代系统需要有较高的空间分辨率.空间分辨率的提高有2种途径,一种是现有光敏元尺寸不变,增大芯片尺寸;另一种是在一定尺寸的芯片内,通过缩小光敏元中心间距来增加光敏元数量.实际上这是一个两难的选择,第一种途径将提高对材料的要求.根据用户一般偏爱宽视场的特点,美国研究人员提出三代红外成像系统显示格式的长/宽比应为16:9,与未来的高清晰度电视显示标准相兼容^[5].以16:9格式的 1280×720 为例,如果芯片上各光敏元的中心间距为 $30 \mu\text{m}$,则芯片尺寸将大于 $38 \times 22 \text{ mm}$,每块材料晶片上只能制备几块芯片,而且为了适应这些大面阵芯片,要重新研发制冷系统.如果使光敏元中心间距缩小到 $20 \mu\text{m}$,不仅可以使成本大幅减少,现有的杜瓦设计也可以继续使用.但是这种方法将提高对器件制备工艺的要求.欧美选择通过缩小光敏元间距的方法来提高空间分辨率.几年前,法国Sofradir已将 $20 \mu\text{m}$ 中心间距的相关工艺和技术转移到标准生产线上,并且掌握了将光敏元中心间距减小到低于 $15 \mu\text{m}$ 的能力.据称,其他材料/技术要做到这一点可能非常困难^[6].

2 VLWIR 探测器

根据不同的响应波段,MCT器件大致可以分为短波红外(SWIR, $0.75 \sim 3 \mu\text{m}$)器件、中波红外

(MWIR, $3 \sim 5 \mu\text{m}$)器件、长波红外(LWIR, $8 \sim 12 \mu\text{m}$)器件和甚长波红外(VLWIR, $12 \sim 25 \mu\text{m}$)器件.有一种观点认为波长较长器件的制备难度要大于中波和短波器件^[4].

VLWIR探测器对于空间红外系统的研发具有关键作用^[7].导弹预警应用对于FPA像元均匀性的要求很高,因为性能衰减的像元或盲元可能完全错失目标.此时的背景经常是温度非常低的冷太空,背景噪声只有地面场景的千分之一到万分之一.这时为了从远距离冷弱目标中接收更多的光子,需要将探测器的截止波长 λ_{cutoff} 扩展到VLWIR波段.MCT的优势在于只要通过调节材料组分 x 即可做到这一点.

MCT是一种禁带宽度 E_g 可以根据不同的组分值 x 在 $-0.3 \sim 1.605 \text{ eV}$ 之间变化的半导体, x 与 E_g 之间有下列关系^[8]

$$E_g(x, T) = -0.302 + 1.93x + 5.35 \times 10^{-4} \times (1 - 2x)T - 0.810x^2 + 0.832x^3 \quad (1)$$

式中, T 为温度,这是一个对温度 T 为线性、对组分 x 是三次方的方程.另外截止波长 λ_{cutoff} 与禁带宽度 E_g 之间的关系为

$$\lambda_{\text{cutoff}}(x, T) = \frac{1.24}{E_g(x, T)} \quad (\mu\text{m}) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1),可得

$$\lambda_{\text{cutoff}} = 1 / [-0.244 + 1.556x + 4.31 \times 10^{-4} \times (1 - 2x)T - 0.65x^2 + 0.671x^3] \quad (3)$$

从式(3)可以看出,组分值 x 与截止波长 λ_{cutoff} 大体成反比, x 越小, λ_{cutoff} 越长.此外,在组分值不变的情况下,温度越低,截止波长越长.文献[9]报道LPE生长的Au掺杂MCT($x = 0.2067$)可制备VLWIR探测器,77 K时的截止波长 $13.2 \mu\text{m}$.文献[10]报道的VLWIR MCT探测器,当温度 T 分别为78、40和28 K时,截止波长分别为15.6、18.7和 $20 \mu\text{m}$;当 $T = 28 \text{ K}$ 时, $E_g = 0.0624 \text{ eV} = 62.4 \text{ meV}$.用MATLAB计算容易看出,这些结果基本满足上述数学模型.文献[11]报道的 320×256 VLWIR MCT探测器,像元中心间距为 $30 \mu\text{m}$, $\lambda_{\text{cutoff}} = 18 \mu\text{m}$,内量子效率高于50%.

对式(3)做全微分,可得 λ_{cutoff} 、 T 和 x 的变化量之间有如下关系

$$\Delta \lambda_{\text{cutoff}} = \lambda_{\text{cutoff}}^2 \cdot [(1.556 - 8.62 \times 10^{-4} T - 1.3x + 2.013x^2) \Delta x + 4.31 \times 10^{-4} (1 - 2x) \Delta T] \quad (4)$$

如果 $\Delta x = 0$ 或 $\Delta T = 0$, 则有

$$\Delta\lambda_{\text{cutoff}} = \lambda_{\text{cutoff}}^2 (1.556 - 8.62 \times 10^{-4} T - 1.3x + 2.013x^2) \Delta x \quad (5)$$

或为

$$\Delta\lambda_{\text{cutoff}} = \lambda_{\text{cutoff}}^2 \times 4.31 \times 10^{-4} (1 - 2x) \Delta T \quad (6)$$

从式(4)~式(6)可以看出,当 λ_{cutoff} 较大时,组分或温度的少量起伏均会造成 λ_{cutoff} 的较大变化.例如,若 $T = 77 \text{ K}$, $x = 0.196$, $\lambda_{\text{cutoff}} = 14 \mu\text{m}$, $\Delta x = 2\%$, $\Delta T = 0$, 则有 $\Delta\lambda_{\text{cutoff}} = 0.51 \mu\text{m}$; 若 $x = 0.1971$, $\lambda_{\text{cutoff}} = 20 \mu\text{m}$, $\Delta T = 5 \text{ K}$, $\Delta x = 0$, 则有 $\Delta\lambda_{\text{cutoff}} = 0.52 \mu\text{m}$. 可见在 VLWIR 波段,组分或温度不均匀性将产生较大的响应不均匀性,并且这种响应不均匀性不能用两点或三点校正完全解决. MBE 可以实现对组分值 x 的精确控制^[12]. 利用光电二极管的 IV 特性可以监测 x 或 λ_{cutoff} 的变化^[13]. 文献[14]分析了 VLWIR MCT 光电二极管的性能,指出由于光电二极管的零偏电阻、串联电阻等项电阻值的大小可以相比,故难以用简单的 pn 结模型去解释其 I-V 特性或 R-V 特性. 文献[10]分析了 VLWIR MCT 光电二极管的 IV 特性,指出限制电流的主要机制是工作温度和所加偏压,隧穿电流与电场强度之间呈指数关系. 文献[15]研究了位错对于 VLWIR MCT 光电二极管的影响,指出响应和暗电流与腐蚀坑密度相关.

3 双色/多色探测器

单色红外器件一般使用空间鉴别方法来分类目标,在背景复杂的环境下,这种工作方式会限制灵敏度,增加虚警率. 由于背景杂波在各波段上并不具有很好的相关性,而目标的相关特征则是可预测的,故利用双色/多色探测器实现多光谱融合,可以提高探测概率与虚警率之比^[16]. 现有导弹逼近告警系统一般使用红外/紫外探测器. 两者的组合主要是因为红外探测器存在着虚警率问题,而紫外探测器对地面热目标引起的虚警率不敏感. 但紫外辐射易被大气中的臭氧层吸收,因而降低了对来袭导弹的探测能力. 从理论上说, MWIR/LWIR 双色或多色器件要比紫外探测器更为有效.

红外多光谱成像可以有多种方式实现,例如,一个波段使用一个 FPA, 或者使用光束分离片, 或者使用带有分色滤光片的转动圆盘, 或者使用条带滤光片构成的颤动调谐系统等. 考虑到尺寸、复杂性和

制冷要求,这些方法均费用昂贵. 此外还有空间偏移和时间配准等问题需要解决. 单片双色/多色器件可以避免这些弊端.

单片 MCT 双色/多色器件的研发与 MCT 材料的性质密切相关. 根据式(1)和式(3), x 的变化将带来禁带宽度 E_g 和截止波长 λ_{cutoff} 的变化. 另外, MCT 的晶格常数与组分 x 的关系可以表示为: $(6.461 + 0.020x)$ ^[17], 由于 x 取值在 $0 \sim 1$ 之间, 可以认为 MCT 的晶格常数几乎为定值. 这些性质有利于生长由不同组分的 MCT 材料层构成的异质结, 其中各层对应于不同的截止波长, 这样制备的单片双色或多色 FPA 可以避免多片单色芯片带来的空间校正和时间配准问题, 简化光学设计, 减小尺寸、质量和功耗. 事实上, 在 MBE、MOCVD 生长过程中通过调节组分 x 和掺杂, 已可制备几乎理想设计的 MCT 多层异质结^[18], 例如双层异质结^[19,20]、三层异质结^[21-23]等.

双色器件的每个单元 (unit cell) 下包含 2 个不同截止波长的探测器. 2 个探测器的光电信号可以按顺序方式读出^[24], 也可以按同步方式读出^[25]. 在顺序读出方式下, 通过逐层顺序生长 n-p-n 或 n-p-p-n 异质结构形成 2 个背靠背的光电二极管 D_1 和 D_2 , 其中 D_1 的组分值 x_1 和 D_2 的组分值 x_2 可以任选, 只要满足 $x_1 > x_2$ 的条件, 根据式(3), 这时有 $\lambda_{\text{cutoff}1} < \lambda_{\text{cutoff}2}$, 如图 1 所示. 2 个光电二极管共用 1 个钢柱, 通过调节反偏电压轮流读出各波段的信号. 这一转换过程的时间相对较短(微秒量级), 于是可以通过对 D_1 和 D_2 的轮流快速选择来实现对于变化较慢目标的双色探测或成像. 因此 D_1 和 D_2 之间的横向距离为零, 故这种层叠设计的探测器结构具有优异的空间一致性. 每个单元 1 个钢柱是偏压选择探测器的一大优点, 此外它可以与硅基读出电路 (ROIC) 兼容. 但该结构有如下缺点, 即不允许为每个光电二极管独立地选择最优偏压, 并且在 D_1 中有明显的 D_2 串音; 由于是顺序读出, D_1 和 D_2 读



图 1 一个双色 MCT 光敏元的结构

出信号的时间一致性降低。

图 1 为一个双色 MCT 光敏元的结构,其中 2 个波段吸收层用 p 型势垒层隔离开. 波长较短(λ_1)的辐射在波段 1 吸收层被吸收; 波长较长(λ_2)的辐射透过波段 1 吸收层和 p 型势垒层到达波段 2 吸收层被吸收。

在同步工作方式中,每个探测器对应一个钢柱,同时从 D_1 和 D_2 中提取信号,从而在 2 个光谱波段实现真正的同步. 具体实现过程中,“同步”的含义必须由系统用户定义,因为经常每一个波段的信号积分时间长度可能不一样。

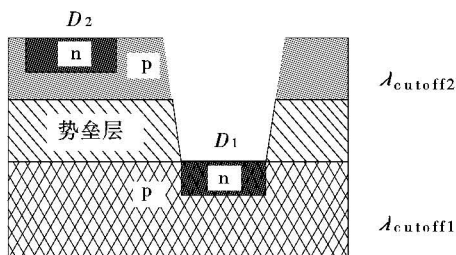


图 2 半平面双色 MCT 的几何结构示意图

同步双色 MCT 器件有多种结构形式. 图 2 是 Sofradir 公司提出的一种半平面双色 MCT 结构^[28],它是在三层异质结构材料的最上面一层制备一个平面结 D_2 ,然后暴露出下面的 p 型层,再形成一个平面结 D_1 . 这样设计的结构虽然在空间一致性上有所折衷,但是由于 2 个光电二极管之间的间距已知(例如,等于光敏元长度的四分之一),故空间一致性上的偏离可以通过系统级的信号处理予以校正. 其优点是可以使用类似于硅产业中的标准工艺,有利于提高产出、降低成本、实现量产. 此外, D_1 和 D_2 的结构参数可以分别优化,实现最小串音. 这种结构设计还具有引入雪崩光电二极管(APD)和极低噪声等效温差(NETD)结构的可能性,从而有望进一步提高探测器的热灵敏度. 2007 年, Sofradir 演示了中心间距为 $30 \mu\text{m}$ 的 256×256 MWIR/MWIR 和 MWIR/LWIR 双色器件. 2009 年 Sofradir 的目标之一是生产中心间距为 $20 \mu\text{m}$ 的 640×512 双色器件。

经过十多年的研发,单片双色 MCT 技术已取得显著进展,已有不同像元尺寸($20 \sim 61 \mu\text{m}$)、不同阵列规格($64 \times 64 \sim 640 \times 480$)和不同波段组合(MWIR/MWIR, MWIR/LWIR, LWIR/LWIR)的器件问世. 双色器件中的各光电二极管的 R_0A 值已与单色器件的 R_0A 值相当. 例如, Reytheon Vi-

sion Systems(RVS)制备的性能最好的双色 FPA,其波段外串音低于 10%, 互联可用率达 99.9%, 响应可用率 99%, 这是一组可与先进的单色器件相比的指标。

RVS 已为美国陆军第三代 FLIR 系统研制了大面阵双色 FPA^[27]. RVS 已可制备中心间距为 $20 \mu\text{m}$ 的 640×480 双色 FPA. 此外,还在研制 1280×720 双色 FPA. 78 K 时,高质量 MWIR/LWIR 640×480 双色 FPA 的截止波长可到 $11 \mu\text{m}$. 这些 FPA 均显示了出色的灵敏度,像元可用率超过 99%. 2 个波段同步工作时的 NETD 小于 25 mK. 文献[21]报道,将先进光刻工艺与 ICP 刻蚀制备台面结构,获得了光敏元大小为 $20 \mu\text{m}$ 的 640×480 和 1280×720 MCT 双色 FPA. 预计随着材料生长和制备工艺的进展,双色 FPA 的性能将会得到进一步改善。

单片双色器件成功应用的最大挑战之一是 ROIC 的设计. 以往为了降低成本,许多双色器件仍然使用原本为单色器件设计的单波段 ROIC. 于是焦平面只受限于一个积分时间常数,这对于充分利用双色器件的性能将有所影响. 因为对于 LWIR,最佳信噪比对应的积分时间可能小于 1 ms,而 MWIR 对应的积分时间可能为几毫秒. 单色 ROIC 配双色 FPA 难免顾此失彼. 国外已有可商业供货的双色 ROIC^[26].

多光谱阵列是指具有 10~20 个光谱通道的探测器,光谱分辨率 $\delta\lambda/\lambda \leq 0.1$; 超光谱阵列具有 100~200 个甚至更多的光谱通道,光谱分辨率 $\delta\lambda/\lambda \leq 0.01$. 通过对不同光谱通道中的信号进行比较分析,多光谱/超光谱成像系统可以识别像素级甚至亚像素级的目标,或者识别杂乱背景中的目标. 而宽波段成像系统由于没有这种光谱比较能力,对伪装或隐藏目标难以识别. 标准的二代 MCT 器件配以精细的光学镀膜和/或紧贴滤光片实现窄带滤波,即可实现多光谱/超光谱阵列. 由于 IR FPA 技术已由单色发展到双色,并向三色、四色的方向发展,预计 2020 年前将获得超光谱应用的能力。

4 雪崩光电二极管

与一般为被动工作的红外成像系统相对应的是,激光雷达(LADAR)属主动成像系统. LADAR 探测器通过对反射脉冲飞行时间的测量来获得深度信息,实现场景的三维成像. 考虑到成像场景中可能人

员活动,LADAR使用的是对人眼安全的激光源(波长在 $1.55\ \mu\text{m}$ 附近).再加上期望的作用距离较大(一般大于 $10\ \text{km}$),以及激光源功率受限等因素,LADAR探测器要求具有接近单光子探测的灵敏度.作为一个数量概念,可以指出的是,在带宽不太大的情况下,典型的可检测电流值大约为 $1\ \text{pA}$ 量级.假设每一个光子均能被光电器件吸收并激发出一个电子-空穴对,这意味着每秒钟至少要有 6×10^6 个光子照射到器件的光敏区^[17],才能产生可检测的光电信号.对于一般战术应用的红外成像系统,这一条件是容易满足的,因为仅从背景辐照到探测器上的光子数已在 10^{16} 量级^[6].

在光子数非常低、甚至是单光子的情况下,光子吸收后在空间电荷区产生的电子-空穴对远远不够.要实现光电探测,就需要引入一定的放大或内增益机制.pn结工作时通常会加反偏电压.在特定的反偏电压下,反偏电流会快速增大,这时的反偏电压称为击穿电压.将反偏电压调节到击穿电压附近,可以实现内增益机制,这就是雪崩光电二极管(APD).其原理是:载流子在被电场扫过空间电荷区时,不断与半导体晶格发生碰撞.当反偏电压接近击穿电压时,碰撞传递的能量足以使一个半导体原子电离化,释放出一个价带电子,或者说引起一个电子从价带跃迁到导带,从而产生出一个电子-空穴对,这种现象称为碰撞电离.随着碰撞电离连续不断地发生,出现类似于雪崩的载流子倍增,光生电流放大.圆柱几何结构提供了一种实现均匀较高击穿特性的最优方法^[29].

APD中电子-空穴对的产生以及电流增益可以用碰撞电离率来描述.设 α_h 是空穴碰撞电离率, α_e 是电子碰撞电离率.通常情况下 α_h 和 α_e 是不同的.根据它们的相对大小,电离系数 k 可以定义为

$$k = \begin{cases} \frac{\alpha_h}{\alpha_e}, & \alpha_h < \alpha_e \\ 0, & \text{只有一种载流子} \\ \frac{\alpha_e}{\alpha_h}, & \alpha_e < \alpha_h \end{cases} \quad (7)$$

电离系数 k 越小,噪声越低.电离系数 k 也可以不加区分地写为

$$k = \frac{\alpha_e}{\alpha_h} \quad (8)$$

在这种定义下, k 越大或越小,则器件的性能越好^[30].

APD中与增益过程相联系的噪声称为过噪声.过噪声造成的结果是噪声随增益的增加要快于信号随增益的增加,使得APD的信噪比衰减^[31].文献^[32]提出了一种弹道电离模型来定性和定量地解释增益和噪声特性.为了使过噪声最小,APD一般设计成使具有最高电离系数的载流子注入最大.具体而言就是尽可能选用 α_h 和 α_e 差别大的材料^[17].InGaAs APD是首先出现的LADAR探测器,其 k 值约为 0.45 ,这意味着InGaAs中的空穴和电子均有较显著的电离,故其过噪声相对较高;相比之下,Si的 k 值为 0.02 ,过噪声要小得多,但是Si对于波长大于 $1.1\ \mu\text{m}$ 的辐射不敏感,故不适于作为LADAR探测器^[31].

除了低过噪声外,高增益带宽也是描述APD性能的主要指标之一.MCT材料的能带结构表明,在禁带宽度 $E_g = 0.90\ \text{eV}$ ($\lambda_{\text{cutoff}} \approx 1.4\ \mu\text{m}$, $x \approx 0.7$)附近,电子从价带顶激发到导带顶所需的能量,与电子从分裂价带顶部激发到价带顶部所需的能量相等,这时出现共振现象.在共振区域及非共振区域,均可以获得比 1 小很多的 k 值^[29].在共振区域,空穴放大占主导地位,可以构成 λ_{cutoff} 较短的空穴雪崩光电二极管^[31];在非共振区域,电子放大占主导地位,可以构成较大截止波长($\lambda_{\text{cutoff}} > 1.3\ \mu\text{m}$)的电子雪崩光电二极管(EAPD).在EAPD中,由于MCT的电子迁移率高以及器件尺寸非常小,使得扩散长度只有几微米,故EAPD的带宽很大.蒙特卡罗仿真预测放大过程自身的带宽 $> 2\ \text{GHz}$ ^[31].这些性质使得MCT APD的性能要比InGaAs APD好 4 倍;其系统探测距离是III-V族器件的 2 倍^[4].另外,由于与其他APD器件材料相比,MCT有利于在阵列上获得均匀的雪崩增益,其增益随电场的相对变化要低于Si或InGaAs,换言之,MCT APD的增益稳定性较好.Sofradir公司制备的MCT EAPD在仅为 $10\ \text{V}$ 的反偏电压下可提供 $1\ 000$ 倍的放大增益,这一低偏压下的高增益,再加上低噪声的特点,使得MCT APD特别适于构成FPA器件.

通过优化器件的几何结构可以降低过噪声.例如,HDVIP(High Density Vertically Integrated Photodiode)就是一种很有吸引力的APD探测器结构方案.HDVIP基于环孔工艺制备的圆柱型二极管,最初用于IR FPA器件.当反偏电压从典型的 $50\ \text{mV}$ 增加到几伏时,HDVIP即为一种性能良好的APD.圆柱几何结构的特点有利于电子采集和放大.

微分面积随着半径增加的这一事实意味着进入放大区中的电子要远多于空穴。此外, HDVIP 的优点还包括材料生长和器件结构的简单性。早期的 MCT APD 使用 LPE 生长的结构, 近年来主要以 MBE 生长为主。利用与制备 IR FPA 相似的工艺, 美国 Raytheon 公司制备的线列及面阵 MCT APD 器件, 具有室温工作、低过噪声、高增益、高量子效率及人眼安全的特点, 已可实现一定距离内的场景成像^[33]。

5 结 束 语

1974 年, 曾有研究者预测 PbSnTe 将取代 MCT 用于 LWIR 探测, 因为 PbSnTe 具有晶体生长成本低、易于量产、在较高温度下性能更稳定等优点。但 4 年后, 人们发现 PbSnTe 还具有介电常数大、热膨胀系数高等缺点, 从而使 MCT 胜出至今发展了三代。尽管面临着其他材料例如相近的汞合金 HgZnTe 和 HgMnTe、硅测辐射热计、热释电探测器、SiGe 异质结、GaAs/AlGaAs 多量子阱、InAs/GaInSb 应变层超晶格、高温超导体等的有力竞争, MCT 仍然是制备第三代红外光子探测器最重要的材料。三代 MCT 涉及的关键技术包括: 大面阵 FPA 及降低成本所需要的大尺寸(10.16 cm 以上)晶片、MCT 材料的 MBE 生长、成结工艺、干法刻蚀、混成及读出电路。目前国外 MCT 材料的生长技术已经成熟, 即使在 VLWIR 波段也可以获得优异的组分均匀性。基于 MBE 生长的 MCT 材料已可获得大尺寸锗基晶片(法国)和硅基晶片(美国)。MBE 生长的 MCT 性能已经可与二代及二代半器件相比。依据目前的发展趋势, 三代 MCT 技术有望 3、5 年内达到量产的水平。

参 考 文 献

- [1] D Reago, S Horn, J Campbell, et al. Third generation imaging sensor system concepts[C]//SPIE Proceeding, 1999, 3701:108-117.
- [2] A Rogalski. Competitive technologies of third generation infrared photon detectors[J]. Opto-Electronics Review, 2006, 14(1):87-101.
- [3] A Rogalski, J Antoszewski, L Faraone. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9):1103.
- [4] P Norton. HgCdTe infrared detectors[J]. Opto-Electronics Review, 2002, 10(3): 159-174.
- [5] S Horn, P Norton, T Cincotta, et al. Challenges for third-generation cooled imagers [C]//SPIE Proceeding, 2003, 5074:44-51.
- [6] Philippe Tribolet, Philippe Chorier, Frédéric Pistone. Key performance drivers for cooled large IR staring arrays [C]//SPIE Proceeding, 2003, 5074:173-184.
- [7] M Z Tidrow, W R Dyer. Infrared sensors for ballistic missile defense [J]. Infrared Physics & Technology, 2001, 42(3/5):333-336.
- [8] G L Hansen, J L Schmit, T N Casselman. Energy gap versus alloy composition and temperature in $Hg_{1-x}Cd_xTe$ [J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(10):7099-7101.
- [9] H D Shih, M A Kinch, F Aqariden, et al. Development of gold-doped HgCdTe for very-long-wavelength infrared detectors[J]. Applied Physics Letters, 2003, 82(23): 4157.
- [10] Angelo Scotty Gilmore, James Bangs, Amanda Gerrish. VLWIR HgCdTe Detector Current-Voltage Analysis [J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(6):1403-1410.
- [11] O Gravrand, E De Borniol, S Bisotto, et al. From Long Infrared to Very Long Infrared Wavelength Focal Plane Arrays Made with HgCdTe n^+n^-/p Ion Implantation Technology[J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(8):981-987.
- [12] A L Betz, R T Boreiko. Space application for HgCdTe at FIR wavelengths between 50 and 150 μm [C]// SPIE Proceeding, 2001, 4454:1-9.
- [13] R K Bhan, S K Koul, V Gopal, et al. A new method to monitor composition or cut-off wavelength variations in HgCdTe photodiode arrays using current-voltage characteristics[J]. Semiconductor Science and Technology, 2001, 16(5):293-299.
- [14] J Wenus, J Rutkowski, A Rogalski. Analysis of VLWIR HgCdTe photodiode performance[J]. Opto-Electronics Review, 2003, 11(2):143-149.
- [15] T Parodos, E A Fitzgerald, A Caster, et al. Effect of Dislocations on VLWIR HgCdTe Photodiodes[J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(8):1068-1076.
- [16] John Lester Miller. Principles of infrared technology: A practical guide to the state of the art[M]. New York: Springer, 1994.
- [17] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

- [3] Pereira F, Torres L, Guillemot C, et al. Distributed video coding: selecting the most promising application scenarios[J]. Elsevier Journal Signal Processing: Image Communication, 2008, 23(1): 339 – 352.
- [4] Guillemot C, Pereira F, Torres L, et al. Distributed monoview and multiview video coding[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 67 – 76.
- [5] ISHWAR P, PRABHAKARAN V, RAMCHANDRAN K. Towards a theory for video coding using distributed compression principles[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Barcelona, Spain: IEEE Computer Society Press, 2003: 687 – 690.
- [6] ASCENSO J, BRITES C, PEREIRA F. Motion compensated refinement for low complexity pixel based distributed video coding[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Advanced Video and Signal Based Surveillance, Como, Italy: IEEE Press, 2005: 593 – 598.
- [7] F Bellifemine, A Capellino, A Chimienti, et al. Statistical analysis of the 2D – DCT coefficients of the differential signal for images[J]. Signal Process: Image Commun, 1992, 4(6): 477 – 488.
- [8] E Y Lam, J W Goodman. A mathematical analysis of the DCT coefficient distributions for images[J]. IEEE Trans. Image Process, 2000, 9(10): 1661 – 1666.
- [9] B Girod, A Aaron, S Rane. Distributed video coding[J]. Proc. IEEE, 2005, 93(1): 71 – 83.
- [10] A Aaron, S Rane, E Setton, et al. Transform-domain Wyner-Ziv codec for video [C]//in Proc. VCIP. San Jose, CA, 2004: 520 – 528.
- [11] A Avudainayagam, J M Shea, D Wu. Hyper-Trellis decoding of pixel-domain Wyner-Ziv video coding[J]. IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol, 2008, 18(5): 557 – 568.

(上接第 22 页)

- [18] Antoni Rogalski. Heterostructure infrared photovoltaic detectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2000, 41(4): 213 – 238.
- [19] E P G Smith, G M Venzor, M D Newton, et al. Inductively coupled plasma etching for large format HgCdTe focal plane array fabrication[J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 34(6): 746 – 753.
- [20] M Chu, H K Gurgonian, S Mesropian, et al. Advanced HgCdTe focal plane arrays [C]//SPIE Proceeding, 2003, 5074: 103 – 110.
- [21] E P G Smith, E A Patten, P M Goetz, et al. Fabrication and characterization of two-color midwavelength/long wavelength HgCdTe infrared detectors[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(6): 1145 – 1152.
- [22] E P G Smith, G M Venzor, Y Petraitis, et al. Fabrication and Characterization of Small Unit-Cell Molecular Beam Epitaxy Grown HgCdTe-on-Si Mid-Wavelength-Infrared Detectors[J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(8): 1045 – 1051.
- [23] E P G Smith, L T Pham, G M Venzor, et al. HgCdTe focal plane arrays for dual-color mid- and long-wavelength infrared detection[J]. Journal of Electronic Materials, 2004, 33(6): 509 – 516.
- [24] R D Rajavel, D M Jamba, J E Jenson, et al. Molecular beam epitaxial growth and performance of HgCdTe-based simultaneous-mode two-color infrared detectors [J]. Journal of Electronic Materials, 1998, 27(6): 747 – 751.
- [25] P Mitra, S L Barnes, F C Case, et al. MOCVD of bandgap-engineered HgCdTe p-n-N-P dual-band infrared detector arrays[J]. Journal of Electronic Materials, 1997, 26(6): 482 – 487.
- [26] Arnold Goldberg, et al. Large format and multi-spectral QWIP infrared focal plane arrays[C]//SPIE Proceeding, 2003, 5074: 83 – 94.
- [27] W A Radford, E A Patten, D F King, et al. Third generation FPA development status at Raytheon Vision Systems [C]//SPIE Proceeding, 2005, 5783: 331 – 339.
- [28] Philippe Tribolet. Sofradir backs a two-tone approach [J]. Compound Semiconductor, 2009(1): 29 – 31.
- [29] Jeffrey D Beck, Chang-Feng Wan, Michael A Kinch, et al. MWIR HgCdTe avalanche photodiodes[C]//SPIE Proceeding, 2001, 4454: 188 – 197.
- [30] F Emami, M Frdosiyani Tehrani. Noise Reduction and Simulation in Avalanche Photodiodes[J]. International Journal of Communications, 2008, 2(1): 17 – 26.
- [31] J Beck, C Wan, M Kinch, et al. The HgCdTe Electron Avalanche Photodiode [J]. IEEE LEOS NEWSLETTER, 2006(10): 8 – 12.
- [32] M Kinch, J Beck, C Wan, et al. Journal of Electronic Materials [J], 2004, 33(6): 630 – 639.
- [33] M Jack, J Asbrock, C Anderson, et al. Advances in linear and area HgCdTe APD arrays for eyesafe LADAR sensors [C]//SPIE Proceeding, 2002, 4454: 198 – 206.