

文章编号: 1672-8785(2014)10-0007-07

论高工作温度碲镉汞红外探测器 (下)

王忆锋 刘萍

(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

摘要: 与用其他材料制备的红外光子探测器相比, 碲镉汞红外探测器具有带隙灵活可调、量子效率较高以及 $R_o A$ 接近理论值等优点。碲镉汞探测器的主要缺点是需要低温制冷, 以抑制引起噪声的热生自由载流子。期望碲镉汞探测器在具有高工作温度 (High Operating Temperature, HOT) 的同时而又无需牺牲性能。HOT 碲镉汞探测器的设计目标主要是抑制俄歇过程, 从而降低探测器噪声和低温制冷需求。从相关基本概念出发, 讨论了对 HOT 碲镉汞物理机制的理解以及近年来 HOT 碲镉汞技术的发展状况。

关键词: 高工作温度; 碲镉汞; 红外探测器; HOT 探测器

中图分类号: TN305 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.10.002

On the High Operating Temperature Mercury Cadmium Telluride Infrared Detector (II)

WANG Yi-feng, LIU Ping

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: Compared with the infrared photon detectors fabricated from other materials, the infrared detectors fabricated from mercury cadmium telluride (MCT) have several advantages of highly tunable bandgap, high quantum efficiency and $R_o A$ approaching the theoretical limit. The main drawback of the MCT detectors is that they have need to use cryogenic cooling to suppress the thermal-induced free carriers resulting in noise. It is desirable that the MCT detectors can operate at high operating temperatures (HOT) without sacrificing their performance. The HOT/MCT detectors are designed mainly to suppress Auger processes so as to reduce noise and degrade cryogenic cooling requirement. Starting from related basic concepts, the understanding of the physical mechanism of HOT/MCT is discussed and the development of HOT/MCT detection technology in recent years is presented.

Key words: high operating temperature; mercury cadmium telluride; infrared detector; HOT detector

7 MCT/pn 结构类型对工作温度的影响

MCT 无论是 p 型还是 n 型, 均与所用的生长工艺有关。例如, 利用液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE) 技术从富 Te 溶液中生长的 MCT 材料为 p 型^[14], 而利用 LPE 技术从富 Hg 溶液

中生长的 MCT 材料则通常呈 n 型^[31]; 利用分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 技术生长的 MCT 材料一般为 n 型^[14]。

MCT 的热稳定性较差, 其中 Hg 原子比 Cd 原子及 Te 原子更容易挥发。当温度达到 50 °C 时, MCT 中的 Hg 原子即会逸出^[32]; 在 100 ~

收稿日期: 2014-05-08

作者简介: 王忆锋 (1963-), 男, 湖南零陵人, 工学士, 高级工程师, 主要从事器件仿真研究。

E-mail: wangyifeng63@sina.com

200 °C 温度(真空)下, Hg 原子只需几分钟便可从表面扩散出来; 在室温(真空)下, Hg 耗尽也会以一个较慢的速率发生^[33]。这些特性容易使 MCT 在制备过程中形成 Hg 空位, 这是 MCT 材料的特征之一。Hg 空位的作用类似于受主^[34]。当 Hg 空位的浓度在 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 之间时, MCT 呈 p 型导电^[35]; 当 Hg 空位的浓度大于 10^{17} cm^{-3} 时, 则成为强 p 型^[36]。由于 Hg 空位较多, 利用 LPE 技术从富 Te 溶液中生长的 MCT 材料表现为强 p 型。强 p 型需要经过退火处理而变为弱 p 型, 这样才能用于制作光电探测器^[14]。从 HOT 器件的角度去看, 随着工作温度的不断升高, 原本已是弱 p 型的器件可能又会变回强 p 型, 这显然并非我们所望。

由 pn 结两边的扩散长度所定义的区域称为扩散区。通过减小扩散区的体积可以提高工作温度, 为此可以在像元级使用微透镜技术^[9,37-38]。耗尽区和扩散区合称为吸收区。最先进的 MCT 技术致力于通过将 n 型 MCT 作为吸收层来提高工作温度^[8]。光子入射到 MCT 上之后, 可能要历经多次反射才会被吸收。如果光子被反射出吸收区, 那么它就会成为对量子效率没有贡献的无效光子。为此可以构造一个光子陷阱, 将光子反射控制在吸收区内, 直至其被吸收。这就是光子陷阱探测器, 该方法有助于实现 HOT/MCT 器件^[39]。

由于 pn 结的耗尽区主要在低掺杂一侧扩展^[16], 重掺杂一侧的耗尽区厚度可以忽略不计^[28], 故吸收区主要位于 pn 结的低掺杂一侧。因此, 收集光电流实际上仅需 pn 结的一侧就够了^[8], 而另一侧的主要作用则是构成 pn 结。

7.1 p-on-n 结构(吸收区位于 n 区)

吸收区位于 pn 结的 p 区还是 n 区, 是半导体教科书中的常见表述。在 MCT 领域, 流行的说法是 p-on-n 或者 n-on-p。文献中常用大写字母 P 或 N 表示 E_g 较大的材料^[16](也有文献用 P 或 N 表示^[3,40])。若是宽禁带材料, 则有 P-on-n 的说法。文献[8]有这样一句话: “Upper case P and N denote wider-gap layers, for example,

‘P-on-n’ denotes a wider-gap p-type layer grown onto a narrow-gap n-type absorber layer”。由此可以清楚地看出这类表述的内涵。再以 p-on-n 为例, 所谓 p-on-n 就是指一个吸收区位于 n 型 MCT 中的 pn 结。至于引入宽禁带材料, 则主要是基于半导体的一般特点: 暗电流会随着 E_g 的减小而增大, 这是由于在这种情况下电子能够更方便地跃过较窄的禁带宽度^[11]; 反之, 暗电流会随着 E_g 的增大而减小, 因此使用 E_g 较大的材料可以减少热生载流子的数量^[8]。另外, 宽禁带半导体材料的本征载流子浓度 n_i 极低, 所以用此类材料制造的半导体器件在高温下的漏电流很小, 热稳定性很高^[21]。由禁带宽度不同的 MCT 构成的 pn 结属于异质结(构)。除了使用宽禁带材料以外, 有的还使用重掺杂的宽禁带材料, 于是就出现了 P^+n 和 P^+n^- 等形式的 MCT 异质结。

n 型 MCT 只有施主掺杂一种。由于 n 型 MCT 的复合中心相对较少, 并且易于控制在较低的载流子浓度下^[8], 故 p-on-n 材料相对来说易于生长。与 n-on-p 技术相比, p-on-n 二极管在 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 波段的暗电流要低两个数量级^[41]。在 1995 年之前, p-on-n/MCT 很少受到关注^[23]。时至 1999 年, 大多数美国公司均使用 p-on-n 异质结^[42]。近年来, 法国也对 p-on-n 结构寄予厚望^[43-44]。法国 Sofradir 公司已将 CEA/LETI 的 p-on-n/MCT 技术用于制作长波红外器件, 其代表性产品是像元间距为 $15 \mu\text{m}$ 的 640×512 元 Scorpio 型红外探测器。其中, 长波红外器件(截止波长为 $9.5 \mu\text{m}$)的工作温度可以提高到 90 K ^[45], 而中波红外器件(截止波长为 $5.3 \mu\text{m}$)的工作温度则可提高到 140 K ^[46]。

p-on-n 技术可以在得到高性能、较低暗电流特别是较低缺陷像元率的同时具有较高的工作温度, 因此是下一步研究发展中的优秀候选者^[46]。该技术兼容 150 K 工作温度, 截止波长超过 $4.8 \mu\text{m}$; 与 90 K 参照系统相比, 其灵敏度没有很大的衰减。另一种进一步增加工作温度的方法是将截止波长减小到 $4.2 \mu\text{m}$ 。这样一个探测器在 160 K 工作温度下仍可具有良好的性能^[46]。但是从概念上讲, 通过缩短截止波

长来实现 HOT 器件可能不是一个较好的选择, 因为这种方法实际上会降低原本可用的信号光子数。

7.2 n-on-p 结构(吸收区位于 p 区)

p 型 MCT 可分为空位掺杂和受主掺杂两类^[36]。利用 MCT 材料中 Hg 空位较多($>10^{17} \text{ cm}^{-3}$) 的特点来获得 p 型 MCT 材料的方法称为空位掺杂^[47]; 由于空位是在材料生长过程中“自然”引入的, 该方法又称为非故意掺杂。因为 MCT 材料的体积越大, 空位越多, 所以经常通过促使 p 区的体积最小化来减少热生载流子的数量^[8]。

在空位掺杂 p 型 MCT 材料上制备 n-on-p 结构是一种标准工艺^[6,48]。基于此技术制备的探测器已实现量产。根据截止波长的不同, 这些探测器的工作温度在 80 ~ 130 K 范围内变化。通常, 截止波长为 10 μm 的长波红外器件工作在 80 K 左右, 而截止波长在 12 μm 左右的长波红外器件的工作温度则较低。基于截止波长约为 5.3 μm 的中波红外器件的便携式系统工作在 90 ~ 110 K 下。截止波长在 4.2 μm 左右的中波红外器件的工作温度约为 120 ~ 130 K^[45]。

文献[6]指出, 空位掺杂 LPE/n-on-p/MCT 技术无法实现新型 MCT 焦平面阵列所需的极低暗电流。这一问题的根源主要被认为是与空位掺杂 MCT 相关的间接复合过程^[49]。在 p 型 MCT 材料中, 复合中心会限制其少数载流子寿命^[8]。常规 n-on-p/MCT 在室温下的性能要衰减一个数量级^[25]。

在 MCT 中掺入除 Hg、Cd、Te 以外的杂质原子称为非本征掺杂, 如掺 Au^[50]、掺 As^[51]和掺 In^[50]等。在实验室中, 掺杂浓度可以做到 $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, 工业上的典型值一般为 $3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ^[23]。用非本征掺杂替代空位掺杂, 可使暗电流降低一个数量级^[52]。文献[50]介绍了一款利用 LPE 技术制备的高性能中波红外 HOT/MCT 器件。他们通过掺 In(约为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) 和掺 Au(约为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) 获得了 n-on-p 结构; 在 130 K 下, 其暗电流为 $5 \times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。采用非本征 p 型掺杂的长波红外 MCT 焦平面阵列可以工作在 80

K 以上的温度下, 同时又没有发生明显的性能衰减^[6]。下一步工作将会使中波红外器件的工作温度提高到 150 K, 并使长波红外器件的工作温度提高到 90 K^[6]。文献[51]介绍了利用 MBE 技术生长的低浓度 As 掺杂 p 型 MCT ($x \approx 0.3$, 载流子浓度 $\approx 1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$) 材料的电学性质。该材料适于制作 HOT/MCT 器件。

通过增大探测器电阻与面积的乘积 $R_o A$ 可以提高工作温度^[11]。将探测器厚度减薄到小于少数载流子扩散长度的水平便可增大 $R_o A$ ^[11]。文献[53]介绍了一款用于解释 n-on-p 长波红外器件 IV 特性的计算机程序。该程序基于非线性连续性方程和泊松方程求解。作为光电二极管性能的潜在限制机制, 这个程序考虑了理想二极管的扩散、产生-复合、带间隧穿、陷阱辅助隧穿和碰撞电离等因素。在一个较宽的温度和波长范围内, 解释了 Hg 空位掺杂和非本征掺杂对暗电流特征和 $MCT/R_o A$ 的影响。通过不断改进, n-on-p 技术可以在得到较高性能特别是较低缺陷像元率的同时具有较高的工作温度^[46]。德国 AIM 公司研制的 n-on-p 中波红外 MCT 器件已可工作在 120 K^[54]。近年来, 法国 n-on-p/MCT 器件的工作温度已经提高了几十开^[55]。

7.3 三层结构

设想一个 p⁺v 器件结构。作为本征层, v 区本身已是轻掺杂(在数量上有 $|N_D - N_A| \approx 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ^[25], 极高质量的材料掺杂可以控制在 $|N_D - N_A| < 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 的水平^[23])。如前所述, 轻掺杂层在近室温下的平衡状态有两个特点: 一是本征化($n \approx p \approx n_i$); 二是载流子浓度高于掺杂水平($n_i > |N_D - N_A|$ 或者 $n_i \gg |N_D - N_A|$)。

在 v 区中, 空穴是少数载流子, 电子是多数载流子, $p < n$, 因此更容易有 $p \approx 0$ 。要实现 $p \approx 0$, 显然应做到以下两点:

(1) 要把已有的空穴抽取干净, 而 pn 结本身就具有这种功能。反偏下 pn 结的耗尽区犹如一个少数载流子的“抽取器”, 用于从附近的准中性区域中吸收少数载流子, 因此又称为“抽取结”^[8]。 $p \approx 0$ 意味着要有强耗尽。

(2) 除了强耗尽以外, 显然还要做到不能再有空穴流入才能实现 $p \approx 0$, 为此需要引入某种

阻挡机制，而高低结便可做到这一点。由掺杂浓度不同、导电类型相同的两种材料构成的结称为轻重 (light-heavy) [13] 结或者高低结 (high-low junction) [56] 或者 hi-lo junction [57]，比如 n^+n 结、 p^+p 结和 Pp 结 [58] 等。高低结与常规 pn 结的最大不同点是，高低结不具有整流性能，即为一种欧姆接触，并且通过的电流是漂移电流而不是扩散电流 [56]。换言之，高低结可以挡住少数载

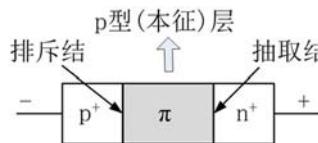


图 1 非平衡 (模式) 光电二极管

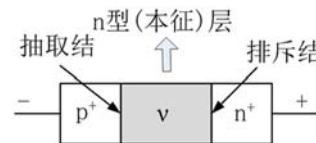
(3) 一旦 $p \approx 0$ ，根据式 (12)，则有 $n \approx |N_D - N_A|$ ，由此可实现从 $n \approx p$ (本征) 到 $n \neq p$ (非本征) 的转变。另外， $n \approx |N_D - N_A|$ 意味着多数载流子浓度在本征水平上是饱和的 [13] (这里所说的“本征”是从材料纯度的意义上来讲的，即指极低的杂质浓度，不同于 $n = p$ 所指向的“本征”)。

(4) $p \approx 0$ 是一种理想化的简单描述。要做到这一点需要有强耗尽。一般讲法是使少数载流子浓度降至比热平衡态下的数值小几个数量级的水平 [2]。从总体上来说，半导体是电中性的。为了维持电中性，多数载流子浓度也要降至明显低于热平衡态时的水平。具体说来，可以是接近 [24] 甚至是达到 [2] $|N_D - N_A|$ 的水平。这一结果对器件性能具有以下几点重要影响 [23]：(a) 俄歇产生得到抑制；(b) 噪声电流减小；(c) 器件的微分电阻增加，因此可与电路系统进行更好的匹配。

MCT 的俄歇过程可分为 10 种。在 HOT 条件下，占主导地位的热产生机制分别为俄歇 1 和俄歇 7 [24]。俄歇产生通常会主导暗电流的大小 [29]。文献 [2] 分析了 MCT 器件中的俄歇抑制，确定了实现俄歇抑制后所期望的工作温度改善。另外，他们还确定了最优性能特征所需的关键材料参数 (吸收层的掺杂浓度、少数载流子寿命等)，并通过数值仿真拟合了 120 ~ 300 K 之间的 IV 特

流子 (构成的扩散电流)，并通过多数载流子 (构成的漂移电流)，故又称为排斥结。

通过在 v 区一侧增加一个 n^+ 层可构成 $v n^+$ 高低结。利用高低结对少数载流子的阻挡作用可使得 v 区中所流失的空穴数量无法得到补充，这样便可形成图 1 所示的 $p^+ v n^+$ 结构，称为非平衡器件 (non-equilibrium device [24]) 或者排斥/抽取二极管 (excluded/extracted diode)。



性试验数据。他们以此为基础，将从试验数据中观察到的负微分电阻 (Negative Differential Resistance, NDR) 归于对俄歇 1 过程的完全抑制以及对俄歇 7 过程的部分抑制，并对实现俄歇抑制以后的试验结果与理论值进行了比较和分析。文献 [29] 对比了 MCT/ $p^+ v n^+$ 结构与 MCT/ $p^+ - v$ 结构的性能。非平衡器件具有无需制冷即可实现 BLIP 性能的潜力，但是做到这一点需要掌握可实现三维带隙调节的外延生长技术 [23]。文献 [4] 介绍了组分梯度分布对 HOT/MCT 性能的影响。在利用金属有机化学汽相沉积 (Metal-Organic chemical vapour deposition, MOCVD) 和 MBE 技术制备 HOT/MCT 器件时，通过精确的掺杂和组分梯度控制，可以减小来自缺陷和位错的产生 – 复合对暗电流的贡献，从而实现俄歇抑制的优点 [25]。

非平衡器件的实现受到以下几个重要因素的限制 [23]：

(1) 排斥区的电场必须足够小，以免在整体上使器件加热。通过适当的热沉设计可以避免器件受热。这一点似乎不是一个严重的限制因素。电子受热会限定最大电场：在非致冷 5 μm 器件材料中，约为 1000 V/cm；对于工作在 180 K 的 10 μm 器件，约为数百 V/cm。在中波红外波段，电子受热不是一个严重的限制因素；但是在长波红外波段，电子受热对于排斥的可利用性则可能会有所限制。

(2) 对于有效排斥, 需要浓度非常低的掺杂 ($< 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) , 但是 $3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 是典型的工业水平。

(3) 排斥可能来自任何一种非俄歇产生, 比如 Shockley–Read 产生或表面产生。

(4) 在排斥器件中存在较大的闪烁噪声。

p-on-n 或 n-on-p 为双层结构。一个高低结和一个常规 pn 结便可形成三层(或多层)结构。除了 p^+vn^+ 以外, 非平衡三层器件结构还有 $\text{p}^+\pi\text{n}^+$ 。如将重掺杂层换成宽禁带材料, 则可获得 $\text{P}^+\pi\text{N}^+$ [59] 和 P^+vN^+ [29] 结构。

三层结构一般有 $\text{N}^+\text{N}^-\text{P}^+$ [60]、 $\text{N}^+\text{P}^-\text{P}^+$ [60] 和 N^+PP^+ [61] 等形式, 其特点是中间层仍为低掺杂, 但没有低到本征的程度(例如 10^{15} cm^{-3} 左右^[9])。对于 MCT 的外延生长来说, 在适当条件下, CZT(211)B 面(B 表示阴离子面)的台阶密度高, 生长速率快, 并且还能抑制孪晶和缺陷的产生, 因此是一种较为理想的晶面取向。文献[62]介绍了一种利用 MOVPE 技术在 CZT(211)B 衬底上制备的中波红外 MCT/PnN 三层结构。结果表明, 该器件可以工作在 $120 \sim 180 \text{ K}$ 。文献[3]介绍了一种基于利用金属有机汽相外延(Metal-Organic Vapour Phase Epitaxy, MOVPE)技术生长的 P^+pN^+ 结构制备的中波红外 HOT/MCT 器件。文献[40,63]对 $\text{n}^+\text{pp}^+/\text{HOT}$ 长波红外 MCT 器件的光电性质进行了优化计算。文献[64]介绍了一种工作温度高于 200 K 的 $\text{p}^+\text{pn}^+/\text{HOT}$ 中波红外 MCT 器件。通过让此器件工作在零偏附近, 可以使其 $1/f$ 噪声减至最小。文献[60]研究了 $\text{N}^+\text{N}^-\text{P}^+$ 和 $\text{N}^+\text{P}^-\text{P}^+$ 结构中的暗电流、表面钝化和 $1/f$ 噪声问题。

8 非平衡光电二极管与 PIN 光电二极管的区别

由非平衡光电二极管的结构很容易想到 PIN 光电二极管。如果简单地从形状上来看, 两者并无差异。它们之间的本质差异或在于各自耗尽区的大小。为了增加灵敏度, PIN 光电二极管的耗尽区宽度应尽可能大^[16]。加反偏时, PIN 光

电二极管的耗尽区将会伸延至整个本征区。一个硅 PIN 光电二极管的本征区宽度可以做到 $20 \mu\text{m}$ 。

少数载流子在湮灭之前在大量多数载流子内扩散的平均距离称为扩散长度^[20]。在 p 型 MCT 中, 电子扩散长度可以很大。例如, 对于 $x=0.30$ 、掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \sim 2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的 p 型 MCT, 电子扩散长度可以达到数百微米^[3]。文献[23]在分析 $\text{p}^+\pi\text{n}^+$ 器件结构时指出, π 层的厚度要小于少数载流子扩散长度。文献[29]在分析 p^+vn^+ 器件结构时指出, 当载流子离开排斥结时, 由于产生机制的存在, 载流子浓度再次开始增加。因此, 为了让 v 区中的载流子浓度保持在低于平衡时的水平, 需要使一个抽取结足够靠近排斥结, 这样可以避免在该区域中产生载流子补充和抽取。“足够靠近”意味着非平衡光电二极管的本征区应该做得尽可能小。文献[23]介绍了一种总长度只有 $8 \mu\text{m}$ 的 $\text{p}^+\pi\text{n}^+$ 器件, 其中 π 层的厚度为 $4 \mu\text{m}$, 两端重掺杂层的厚度各为 $2 \mu\text{m}$ 。

另外, 如果仔细推敲, 非平衡光电二极管可能并不是一个较准确的名称或术语。对于半导体来说, (热) 平衡是指半导体在没有外界作用(如电压、电场、磁场、热场和光场等)下的状态^[16]。器件在工作时是非平衡的^[20], 并没有所谓的“equilibrium photodiode”。事实上, 非平衡特指器件的载流子浓度受到人为降低时的情况(Non-equilibrium heterojunctions, i.e. where the carrier concentrations are reduced artificially, …)^[24]。

9 结束语

人们通常认为高性能 MCT 焦平面阵列必须采用制冷装置^[65], 其典型的工作温度在 77 K 左右^[3]。但是另一方面, MCT 也具有在较高的工作温度下获得高性能的潜力^[66]。在 MCT 器件的工作温度方面, 文献中有 80 K ^[6]、 95 K ^[6]、 120 K ^[6,54,66]、 150 K ^[6]、 175 K ^[67]、 200 K ^[66-67]、 210 K ^[68] 和 250 K ^[69] 等报道。与非制冷型探测器相比, 制冷型探测器的所有其他选项(例如读出电路或者处理电子学功耗等)在很大程度上是

相同的。影响制冷功耗的主要因素是焦平面阵列的工作温度^[6]。当工作温度提高以后，制冷系统也相应需要更新换代。文献[70]介绍了一种与HOT器件配套的紧凑型高效线性制冷机中的单活塞动磁设计。文献[71]介绍了用于工作温度为100~200 K的HOT焦平面阵列的旋转制冷机的研发与优化情况。如果工作温度可以增至210 K以上，那么就可考虑使用成本明显小于低温制冷装置的热电制冷机^[3]，以获得较轻和较紧凑的整机^[2]。

从根本上来讲，MCT焦平面阵列是否需要制冷以及制冷需要做到何种程度取决于探测器的暗电流大小^[29]。自研发至今，MCT所适用的半导体理论体系基本上没有什么变化。基于pn结的HOT/MCT器件在结构上的变化其实也非常有限。在把有关概念梳理清楚以后，我们不妨可以认为，HOT/MCT与其说是一个理论问题，还不如说是一个实践性极强的工艺问题，提高MCT材料的质量或许是其中的重中之重。

参考文献

- [1] Singh A, Srivastav V, Pal R. HgCdTe Avalanche Photodiodes: A Review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2011, **43**: 1358–1370.
- [2] Velicu S, Grein C H, Emelie P Y, et al. Non-cryogenic Operation of HgCdTe Infrared Detectors [C]. SPIE, 2010, **7608**: 760820.
- [3] Gordon N T, Jones C L, Lees D J, et al. High Performance, 2D MWIR Hg_{1-x}Cd_xTe Array Operating at 220 K [C]. SPIE, 2004, **5406**: 145–151.
- [4] Piotrowski J, Gawron W, Orman Z, et al. Dark Currents, Responsivity, and Response Time in Graded Gap HgCdTe Structures [C]. SPIE, 2010, **7660**: 766031.
- [5] Kinch M A. High Operating Temperature (HOT) Detector Requirements [C]. SPIE, 2001, **4454**: 168–179.
- [6] Breiter R, Wendler J, Lutz H, et al. High Operating Temperature IR-modules with Reduced Pitch for SWaP Sensitive Applications [C]. SPIE, 2011, **8012**: 80122V.
- [7] Madejczyk P, Gawron W, Piotrowski A, et al. Improvement in Performance of High-operating Temperature HgCdTe Photodiodes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54**(3): 310–315.
- [8] Capper P, Garland J. *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications* [M]. London: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [9] Wijewarnasuriya P S. Nonequilibrium Operation of Long Wavelength HgCdTe Photo Detectors for Higher Operating Temperatures [C]. SPIE, 2010, **7780**: 77800A.
- [10] Hansen G L, Schmit J L, Casselman T N. Energy Gap Versus Alloy Composition and Temperature in Hg_{1-x}Cd_xTe [J]. *Journal of Applied Physics*, 1982, **53**(10): 7099–7101.
- [11] Miller J L. *Principles of Infrared Technology: A Practical Guide to the State of the Art* [M]. New York: Chapman and Hall, 1994.
- [12] 虞丽生. *半导体异质结物理(第二版)* [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [13] Piotrowski J, Gawron W, Djuric Z. New Generation of Near-room-temperature Photodetectors [J]. *Optical Engineering*, 1994, **33**(5): 1413–1421.
- [14] 褚君浩. *窄禁带半导体物理学* [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [15] 汪志诚. *热力学·统计物理(第三版)* [M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
- [16] Donald A N 著. 赵毅强, 姚素英, 解晓东, 等译. *半导体物理与器件(第三版)* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [17] 马声全, 陈贻汉. *光电子理论与技术* [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [18] 犬石嘉雄, 滨川圭弘, 白藤纯嗣著. 周绍康, 鄒小林, 雷京贵, 等译. *半导体物理* [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [19] 刘树林, 张华曹, 柴常春. *半导体器件物理* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [20] Pierret R F 著. 黄如, 王漪, 王金延, 等译. 韩汝琦校. *半导体器件基础* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [21] 陈治明, 王建农. *半导体器件的材料物理学基础* [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [22] 王忆锋. 用MATLAB求解一般形式的电中性方程 [J]. 红外, 2009, **30**(9): 46–48.
- [23] Rogalski A. *Infrared Photon Detectors* [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1995.
- [24] Capper P. Narrow-gap II–VI Compounds for Optoelectronic and Electromagnetic Applications [M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [25] Srivastav V, Pal R, Venkataraman V. Modeling of Room Temperature Current-voltage Measurements on Homo-junction HgCdTe Diodes Exhibiting Nonequilibrium Effects [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **111**(3): 033112.

- [26] White A M. Auger Suppression and Negative Resistance in Low Gap Diode Structures [J]. *Infrared Physics*, 1986, **26**(5): 317–324.
- [27] White A M. Generation-recombination Process and Auger Suppression in Small-bandgap Detectors [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, **86**(1/4): 840–848.
- [28] 孟庆巨, 刘海波, 孟庆辉. **半导体器件物理** [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [29] Velicu S, Grein C H, Emelie P Y, et al. MWIR and LWIR HgCdTe Infrared Detectors Operated with Reduced Cooling Requirements [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, **39**(7): 873–881.
- [30] Boieriu P, Velicu S, Bommena R, et al. High Operation Temperature of HgCdTe Photodiodes by Bulk Defect Passivation [C]. *SPIE*, 2013, **8631**: 86311J.
- [31] Henini M, Razeghi M. **Handbook of Infrared Detection Technologies** [M]. London: Elsevier Science, Ltd, 2002.
- [32] 傅英, 陆卫. **半导体量子器件物理** [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [33] Nitz H M, Ganschow O, Kaiser U, et al. Quasi-simultaneous SIMS, AES, XPS, and TDMS Study of Preferential Sputtering, Diffusion, and Mercury Evaporation in $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [J]. *Surface Science*, 1981, **104**(2/3): 365–383.
- [34] 王忆锋, 刘黎明, 余连杰, 等. 碲镉汞材料非本征掺杂研究的发展 [J]. **红外**, 2012, **33**(1): 1–16.
- [35] Rutkowski J. Planar Junction Formation in HgCdTe Infrared Detectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2004, **12**(1): 123–128.
- [36] 王忆锋, 余连杰, 胡为民. 碲镉汞材料导电类型转换研究的发展 [J]. **红外**, 2011, **32**(12): 1–9.
- [37] Ashley T, Gordon N T. Higher-operating-temperature High-performance Infrared Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2004, **5359**: 89–100.
- [38] Roush F M, Shih H, Orent T W, et al. High-operating-temperature Infrared Detectors Based on HD-VIP [C]. *SPIE*, 2004, **5563**: 7–12.
- [39] Smith K D, Wehner J G A, Graham R W, et al. High Operating Temperature Mid-wavelength Infrared HgCdTe Photon Trapping Focal Plane Arrays [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83532R.
- [40] Karimi M, Kalafi M, Asgari A. Numerical Optimization of an Extracted HgCdTe IR-photodiodes for 10.6 μm Spectral Region Operating at Room Temperature [J]. *Microelectronics Journal*, 2007, **38**(2): 216–221.
- [41] Baier N, Molland L, Rothman J, et al. Status of p-on-n HgCdTe Technologies at DEFIR [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 729823.
- [42] Tidrow M Z, Beck W A, Clark W W, et al. Device Physics and Focal Plane Applications of QWIP and MCT [J]. *Opto-Electronic Review*, 1999, **7**(1): 283–296.
- [43] Gravrand O, Chorier P. Status of Very Long Infrared-wave Focal Plane Array Development at DEFIR [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 729821.
- [44] Terrier B, Delannoy A, Chorier P, et al. LWIR and VLWIR Detectors Development at SOFRADIR for Space Applications [C]. *SPIE*, 2010, **7826**: 78261J.
- [45] Vuillermet M, Tribollet P. Operating Temperature: A Challenge for Cooled IR Technologies [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 76602U.
- [46] Vuillermet M, Rubaldo L, Chabuel F, et al. HOT Infrared Detectors Using MCT Technology [C]. *SPIE*, 2011, **8012**: 80122W.
- [47] 王忆锋, 刘黎明, 余连杰, 等. 碲镉汞材料非本征掺杂研究的发展 [J]. **红外**, 2012, **33**(1): 1–16.
- [48] Wollrab R, Bauer A, Bitterlich H, et al. Planar n-on-p HgCdTe FPAs for LWIR and VLWIR Applications [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, **40**(8): 1618–1623.
- [49] Kinch M A, Aqariden F, Chandra D, et al. Minority Carrier Lifetime in p-HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, **34**(6): 880–884.
- [50] Shih H D, Kinch M A, Aqariden F. Development of High-operating-temperature Infrared Detectors with Gold-doped $\text{Hg}_{0.70}\text{Cd}_{0.30}\text{Te}$ [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(8): 1263–1265.
- [51] Aqariden F, Shih H D, Kinch M A, et al. Electrical Properties of Low-arsenic-doped HgCdTe Grown by Molecular Beam Epitaxy [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **78**(22): 3481–3483.
- [52] Ziegler J, Eich D, Hanna S, et al. Recent Results of 2-dimensional LW- and VLW- HgCdTe IR FPAs at AIM [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 766038.
- [53] Jozwikowski K, Kopytko M, Rogalski A, et al. Enhanced Numerical Analysis of Current-voltage Characteristics of Long Wavelength Infrared n-on-p HgCdTe Photodiodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(7): 074519.
- [54] Breiter R, Ihle T, Wendler J, et al. MCT IR Detection Modules with 15 μm Pitch for High Reliability Applications [C]. *SPIE*, 2010, **7660**: 766039.
- [55] Vuillermet M, Lanfrey D B, Reibel Y, et al. Status of MCT Focal Plane Arrays in France [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83531K.
- [56] Warner R M, Grung B L. **Semiconductor-device Electronics** [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [57] Willardson R K, Beer A C. **Semiconductors and Semimetals** (Vol.18): Mercury Cadmium Telluride [M]. New York: Academic Press, 1981.
- [58] Vasiliev V V, Remesnik V G, Dvoretsky S A, et al. MCT Infrared Photodiodes on the Basis of Graded Gap P-p Heterojunction Grown by MBE HgCdTe Epilayers on GaAs [C]. *SPIE*, 2006, **6189**: 61892A.

(下转第 32 页)