

文章编号: 1672-8785(2021)12-0006-09

## 碲镉汞红外探测器性能 调控技术研究

何 温 王 丛 田 震 王 鑫  
高 达 杨海燕 柏 伟

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 对影响  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  红外探测器性能的不同调控技术——包括材料调控(组分及温度、掺杂浓度、压强及应力等材料性能的调控)、器件结构调控(n-on-p、p-on-n、p-i-n、n-B-n 等器件结构的调控)和工艺调控(各种工艺调控对材料制备和器件制备等的影响)等——进行了简单介绍, 以合理调控器件性能、有效降低器件暗电流、提高器件工作温度等, 从而促进  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  红外探测器在降低成本、减小功耗、提高可靠性等方面的发展。

**关键词:** 红外探测器;  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ; 调控技术

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.12.002

## Research on Performance Regulation Technology of $\text{HgCdTe}$ Infrared Detector

HE Wen, WANG Cong, TIAN Zhen, WANG Xin, GAO Da, YANG Hai-yan, BAI Wei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** Different regulation technologies that affect the performance of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  infrared detectors are briefly introduced, including material regulation (composition and temperature, doping concentration, pressure, and stress, etc.), device structure regulation (n-on-p, p-on-n, p-i-n, n-B-n, etc.), and process regulation (the influence of various process regulation on material preparation and device preparation). This research aims to properly regulate device performance, effectively reduce the dark current of the device, and improve the operating temperature of the device, so as to promote the development of  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  infrared detectors in reducing costs, decreasing power consumption, and improving reliability.

**Key words:** infrared detector;  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ; regulation technology

收稿日期: 2021-09-10

作者简介: 何温(1981-), 女, 河北石家庄人, 博士, 主要从事红外材料研究。

E-mail: sunny\_\_cloud@sina.com

## 0 引言

红外探测器是现代红外技术的核心, 其应用覆盖了工业生产、资源调查、农业检测、军事侦查、环境分析、气象环境监测、空间遥感、生产监控、医疗卫生等多个军民两用领域<sup>[1]</sup>。Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 三元晶系是迄今为止最好的一种红外探测器材料。目前, 科研人员已进入了深入研究 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 薄膜材料和大规模红外焦平面阵列探测器的阶段<sup>[1-5]</sup>。

Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 是 1959 年报道的一种 II-VI 族化合物晶体, 是制作红外探测器最重要的半导体材料。它具有带隙可灵活精确调节、吸收系数和量子效率高、可探测光谱范围广、工作温度较高、载流子寿命长、电子迁移率高等优异物理特性, 能够很好地满足红外探测器的需要。目前, 各种新方法(如液相外延法、分子束外延法、金属有机物化学气相沉积法等)已被成功用来制备 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料<sup>[1-5]</sup>。

近年来, 通过合理调控 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料性能、探测器结构以及制备工艺等, 可以有效降低器件暗电流和提高器件工作温度及探测率等, 从而促进红外探测器向降低器件成本、减小器件功耗、提高器件可靠性等方向发展。因此, 这成为了红外探测器领域的研究热点。本文就材料调控(包括组分及温度、掺杂浓度、压强及应力等对材料性能的调控)、器件结构调控(包括 n-on-p、p-on-n、p-i-n、n-B-n 等器件结构的调控)和工艺调控(包括材料制备工艺调控和器件制备工艺调控)等技术对 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 红外探测器的影响进行简单介绍, 以促进 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 红外探测器更好地服务于各个军民两用领域。

## 1 光电探测器的主要性能参数及工作原理

光电探测器的主要性能参数包括截止波长、光电流、暗电流和量子效率等<sup>[6]</sup>。其中, 截止波长用于描述相应带隙能量  $E_g$  的入射波长  $\lambda_0$ 。

$$h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = E_g \quad (1)$$

式中,  $h$  为普朗克常数,  $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ;  $c$  为真空中的光速。将  $h$  和  $c$  代入式(1), 可得截止波长(单位为 nm):

$$\lambda_0 = \frac{hc}{E_g} = \frac{1240.68}{E_g} \quad (2)$$

由式(2)可知, 通过调控 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料的带隙, 可以调整器件的吸收截止波长。

暗电流是指在无光照条件下流过光电探测器的电流。它是 Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 红外探测器的关键性能参数, 其主要组成部分可以表示为

$$I_{\text{dark}} = I_{\text{SRH}} + I_{\text{diff}} + I_{\text{tun}} + I_{\text{surf}} \quad (3)$$

式中,  $I_{\text{SRH}}$  为与耗尽层载流子的产生复合有关的产生复合电流;  $I_{\text{diff}}$  为与非本征区俄歇、辐射过程有关的扩散电流;  $I_{\text{tun}}$  为与载流子有效质量、界面处势垒高度有关的隧穿电流;  $I_{\text{surf}}$  为主要与器件表面态相关的表面电流<sup>[7-8]</sup>。

在外界光的照射下, 流过光电探测器的电流称为光电流; 光电探测器相同电压下光电流与暗电流的比值称为器件的光暗比。高的光电流、低的暗电流和高的光暗比是高性能探测器的发展方向。

量子效率是描述光电探测器光电转换能力的参数之一, 包括内量子效率和外量子效率。材料产生的电子-空穴对数量与吸收的入射光子数的比值称为内量子效率(一般接近 1)。光电探测器能收集到的电子-空穴数与吸收的入射光子数的比值称为外量子效率。外量子效率  $\eta$  可表示为

$$\eta = \frac{I}{q\Phi} \quad (4)$$

式中,  $I$  为光生电流, 在数值上等于光照下总电流与暗电流之差;  $\Phi$  为入射光通量<sup>[9]</sup>。

## 2 调控技术方式

### 2.1 材料性能调控

Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te 材料性能(如带隙、光吸收效率、电子迁移率等)对红外探测器的光吸收截止波长、探测范围、探测灵敏度等都有重要的

影响。通过对红外探测器的材料性能进行调控来根据需要合理优化器件性能，是一项不可或缺的科研工作。

### 2.1.1 基于组分和温度的材料性能调控

作为一种直接带隙半导体材料， $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  具有合适的带隙，电子从其价带直接跃迁到导带。因此， $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的光吸收系数和量子效率高， $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  红外探测器具有光响应大、响应率高的优点。 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的晶体结构属于闪锌矿型，面心立方的四条空间对角线的  $1/4$  处各有一个 Te 原子。每个 Te 原子和它周围的四个其它 Cd、Hg 原子共价，Cd、Hg 原子的比例由  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  中的  $x$  值确定。 $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的能带结构随组分  $x$  变化。 $x = 0.165$  为临界值，此时  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  的导带和价带在  $\Gamma$  点重合， $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  呈带隙为零的半金属。当  $0 \leq x < 0.165$  时， $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  具有与 HgTe 相似的倒置型能带序能带结构。当  $x > 0.165$  时， $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  具有与 CdTe 类似的能带结构，呈典型窄带隙半导体，其带隙随  $x$  的变化可以得到精确调控，并且可调控范围(从 HgTe 的半金属到 CdTe 的  $1.5 \text{ eV}$  的连续可调)可以很好地与红外波段对应<sup>[10-12]</sup>。

同时已有碲镉汞禁带宽度  $E_g$  的多个经验公式，比如 Hansen-Schmit 公式为<sup>[12]</sup>

$$E_g = -0.302 + 1.93x + 5.35 \times 10^{-4} T(1-2x) - 0.82x^2 + 0.832x^3 \quad (5)$$

CXT 公式为<sup>[2]</sup>

$$E_g = -0.295 + 1.87x - 0.28x^2 + (6 - 14x + 3x^2) \times 10^{-4} T + 0.35x^4 \quad (6)$$

式中， $x$  为 Cd 原子组分； $T$  为温度。综上所述可知，材料组分和温度都对碲镉汞材料的带隙有影响。

### 2.1.2 基于掺杂的材料性能调控

图 1 为未掺杂  $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$  以及在  $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$  中稳定掺杂 B (六角间隙杂质掺杂) 时的能带结构图。图 1(a) 描述了未掺杂  $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$  材料的总的态密度。可以看出， $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$  为半导体材料，其费米能级分布在价带与导带之

间。图 1(b) 为 B 在  $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$  中的稳定掺杂体系(六角间隙杂质)的能带结构图。从中可以看到该体系的费米能级进入了导带。因此，B 六角间隙掺杂表现为 n 型掺杂。从图 1(b)~图 1(f) 中可以看出，B 掺杂  $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$  体系(六角间隙杂质)的导带最低点和价带最高点都主要由 Hg 和 Te 贡献。相对于未掺杂体系，掺杂使材料的导带最低点、价带最高点以及它们相对于费米能级的位置等都发生了变化。因此，掺杂可以有效地调控材料性能<sup>[13-14]</sup>。

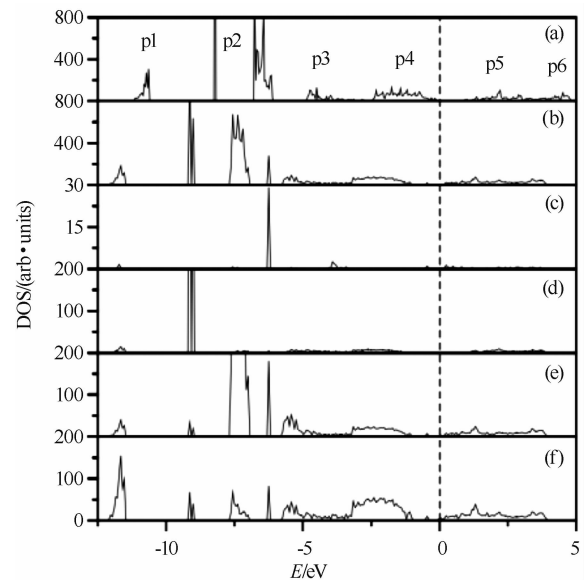


图 1 态密度图：(a) 未掺杂  $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$  材料的总的态密度；(b) 掺杂六角间隙杂质体系的总的态密度；(c)~(f) B、Cd、Hg、Te 对体系能带结构的贡献。其中费米能级设为零<sup>[13]</sup>

### 2.1.3 基于压强及应力的材料性能调控

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  可以看成是 HgTe 和 CdTe 的混晶。对 HgTe 和 CdTe 两种材料的研究，是  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料研究的基础。HgTe 在相应压强下会发生相变。常压下，HgTe 为闪锌矿结构(Zinc Blende, ZB)；在 1 GPa 下，HgTe 转变为朱砂结构(cinnabar)；在常压与 1 GPa 之间，会有 ZB 和 cinnabar 共存的 C222<sub>1</sub> 结构。若增大压强，HgTe 则会转变为盐矿结构(Rock Salt, RS)。当压强升高到 10 GPa 时，HgTe 会转变为类似  $\text{cmcm}\beta\text{-Sn}$  或体心正方结构(Body Centered Tetragonal, BCT)。如果再

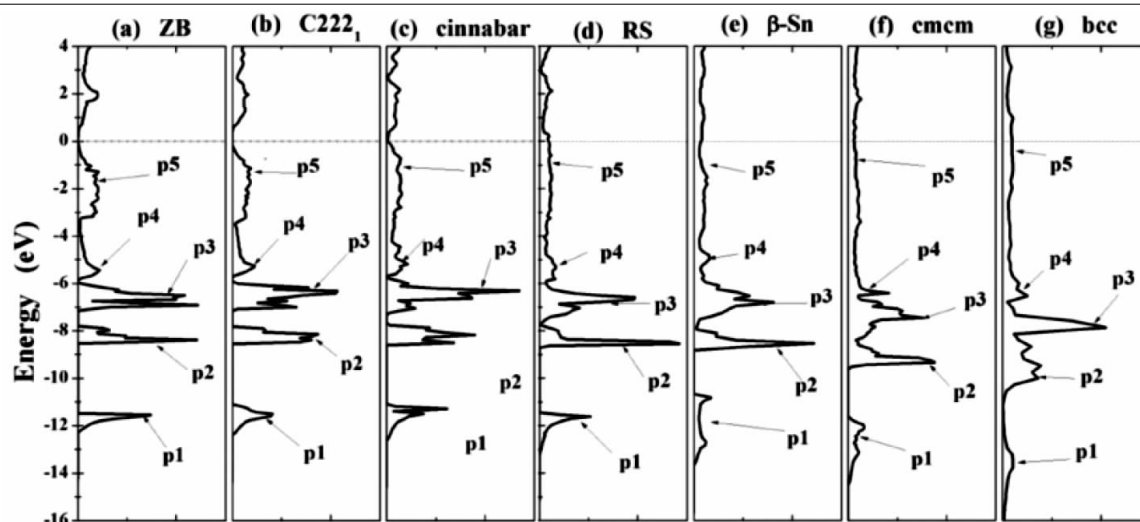


图 2 不同结构的 HgTe 的总态密度图<sup>[15]</sup>

增加压强, HgTe 就会转变为畸变的体心立方结构(Body Centred Cubic, bcc)。图 2 为 HgTe 在压强逐渐增大的情况下不同相结构的态密度图。随着 HgTe 的相变结构变化, HgTe 的性质经历了半金属→半导体→导体的变化。由此可见, 通过调控结构来调控材料的电子结构, 是  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  红外探测器材料的可用方向<sup>[10,15]</sup>。

在应力作用下, HgTe 的电子结构和能隙也会发生变化。图 3 为 HgTe 材料在应力下的能带结构图。图 3(a)~图 3(d)为应力下 HgTe 材料的能带结构图, 图 3(a2)~图 3(d2)为图 3(a)~图 3(d)中费米能级附近能带结构的细节图。其中, 图 3(c)和图 3(c2)为 HgTe 材料在无应力作用下的能带结构及细节图。从图 3(a)、图 3(b)、图 3(a2)和图 3(b2)中可以看出, 在[111]方向的单轴应力下, 材料的价带和导带逐渐从  $\Gamma$  点移开, 形成间接带隙。在压缩作用下, 形变足够大时形成了导带转移到 H 点的半金属能带结构。在拉伸作用下, HgTe 材料打开了一个带隙, 如图 3(d)和图 3(d2)所示<sup>[10,16]</sup>。

## 2.2 器件结构调控

### 2.2.1 n-on-p 和 p-on-n 结构

器件结构对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  探测器的性能也会有很大影响。光电探测器的结构类型主要有

标准 n-on-p (汞空位掺杂)、n-on-p (非本征掺杂)、p-on-n (非本征掺杂)、同质结、异质结等。通过调控器件结构可以有效调控探测器的光电性能。例如, 与 n-on-p 器件相比, p-on-n 结构可以制作出暗电流较小的器件, 有利于器件的高温工作。在 n-on-p (汞空位掺杂)器件中, 由于 Hg 空位的 p 型材料中的缺陷, 载流子寿命降低, 导致器件的扩散电流升高; 在 p-on-n (非本征掺杂)器件中, 采用本征掺杂的 n 型吸收层碲镉汞材料, 可以把器件的扩散电流降低一个数量级。如图 4 所示, 中波 n-on-p 型碲镉汞探测器的暗电流比 p-on-n 器件高<sup>[17-20]</sup>。

### 2.2.2 p-on-n 和 p-i-n 结构

通过调控传统的 p-on-n 结构, 也可以进一步优化器件的性能。如图 5 所示, 为了降低晶格失配, 工艺上在 p-n 结交界区增加了 Cd 组分缓变区, 使得原来的 p-on-n 结构变成了 p-i-n 结构。图 5(a)所示为随厚度变化的器件材料能带结构。可以看出, Cd 组分缓冲层在 p-n 结交界区形成了一个势垒。随着缓冲层厚度的增加, 势垒高度逐渐增大。图 5(b)所示为算得的存在缓冲层情况下的器件暗电流。可以看出, 随着缓冲层组分的增加, 势垒高度不断增大, 暗电流逐渐变小<sup>[5]</sup>。因此, 器件结构对器件性能有着很重要的影响。

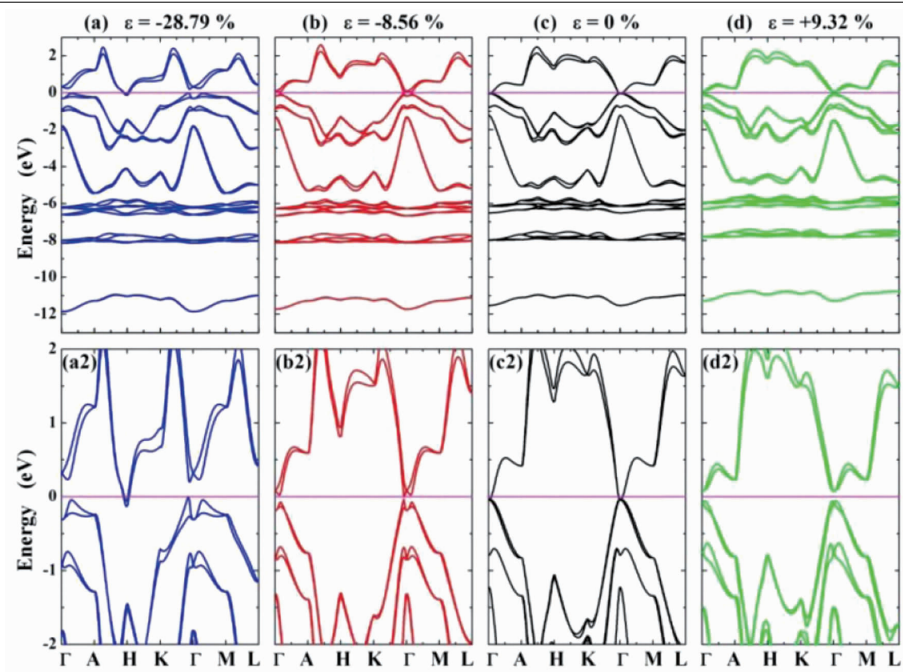


图3 HgTe 材料在应力下的能带结构图: (a)  $\epsilon = -28.79\%$ ; (b)  $\epsilon = -8.56\%$ ; (c)  $\epsilon = 0\%$ ; (d)  $\epsilon = +9.32\%$ 。(a2)~(d2)分别对应(a)~(d)中费米能级附近的电子结构细节。紫红线代表费米能级<sup>[16]</sup>

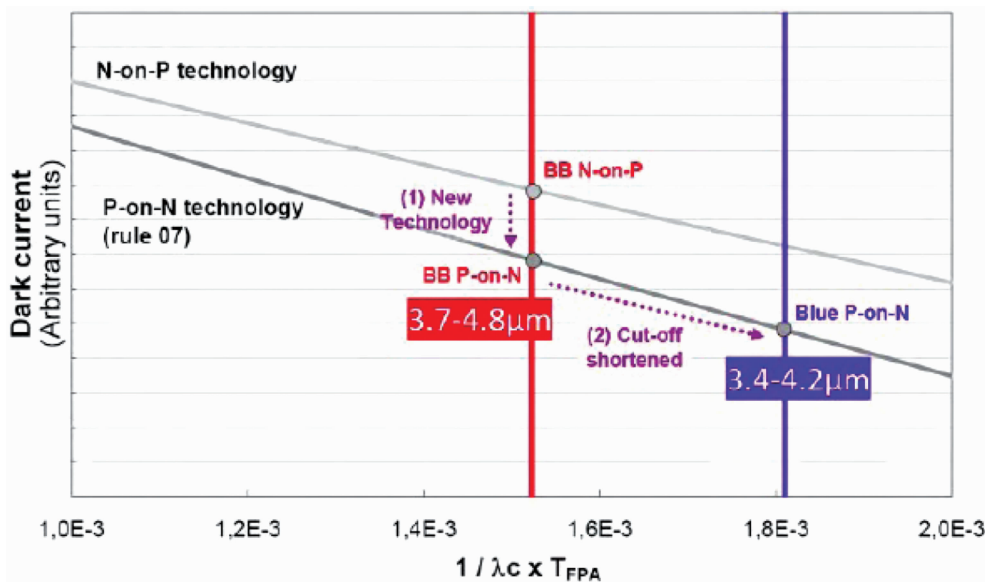


图4 不同结构中波红外探测器的暗电流对比<sup>[17]</sup>

### 2.2.3 n-B-n 结构

基于能带工程的单极阻挡层器件也是发展高温碲镉汞红外探测器的热点方向。n-B-n 光导型结构器件在消除产生复合电流、表面电流等方面的性能优于 p-i-n 结构器件,其能带结构示意图如图 6(a)所示。n-B-n 结构(包括 n 型吸收层、宽禁带势垒层和 n 型接收层)的势垒

层可以阻止多数载流子通过,同时允许少数载流子通过,因此能够基本消除产生复合电流和表面电流,减小暗电流,提高器件工作温度。根据相关报道,通过调控 n-B-n 势垒型探测器的中间势垒层厚度,也可以优化光电探测器的性能。从图 6(b)中可以看出,随着势垒层厚度的增加,暗电流密度逐渐减小。但是当势垒

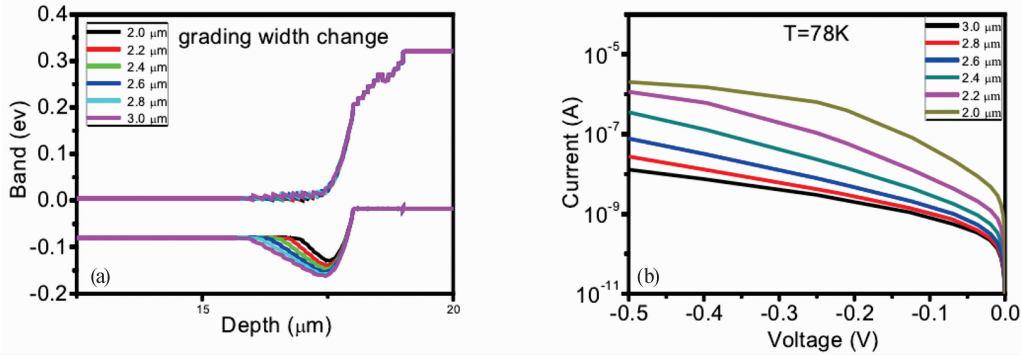


图 5 不同 Cd 组分缓冲层所对应的能带结构(a)以及暗电流大小(b)<sup>[5]</sup>

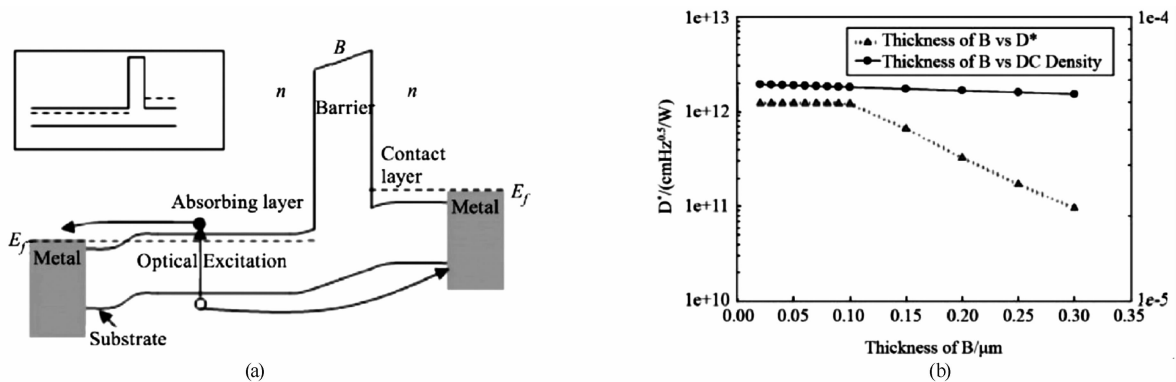


图 6 (a) n-B-n 结构器件的能带结构示意图<sup>[21]</sup>; (b) 不同势垒厚度碲镉汞光电探测器的探测率和暗电流密度<sup>[22]</sup>

层厚度大于 0.1 μm 时, 峰值探测率迅速下降, 因此光电探测器的性能会有所下降。同时, 势垒层的厚度如果过小, 则会增加载流子的隧穿几率, 增大暗电流密度, 进而降低探测器的性能<sup>[22]</sup>。

### 2.3 制备工艺调控

#### 2.3.1 材料制备工艺调控

各种工艺的调控对  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  材料和器件的制备也有重要意义<sup>[24-26]</sup>。退火工艺对材料性能具有很大影响, 即不同退火时间对  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  材料表面组分有较大的影响。图 7 所示为退火时间对外延材料组分的影响情况。其中采用了三种厚度分别为 18 μm、11 μm、9.2 μm 的样品。在一定退火温度下, 材料的扩散系数基本保持不变。因此, 互扩散程度和退火时间的增长趋势应该相同。从图 7 中可以看出, Cd 组分由衬底向外延层表面的扩散程度随退火时间的增加而增大。同时, 随着材料厚度的增加, Cd 组分变化及其变化梯度越来

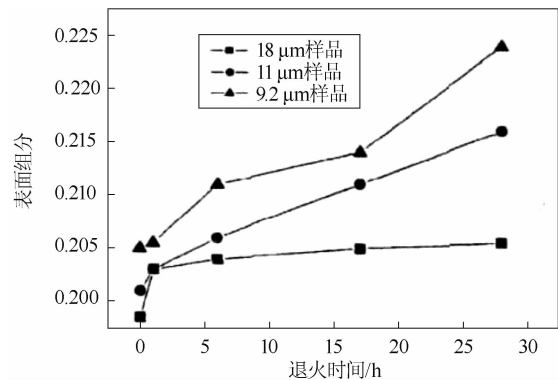


图 7  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  材料表面组分随退火时间(每小时)的变化曲线<sup>[23]</sup>

越小。因此, 通过调控退火时长, 可以制备出相应性能的  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  材料<sup>[23]</sup>。

高质量衬底材料对分子束外延生长有重要作用。为了阻止衬底与碲镉汞外延层之间由于晶格失配而形成的大量位错, 可在界面处生长二次缓冲层。图 8 为在生长二次缓冲层前后以及退火后的反射式高能电子衍射仪 (Reflection High-Energy Electron Diffractometer, RHEED)



图8 生长二次缓冲层前后以及退火后的 RHEED 对比图<sup>[27]</sup>

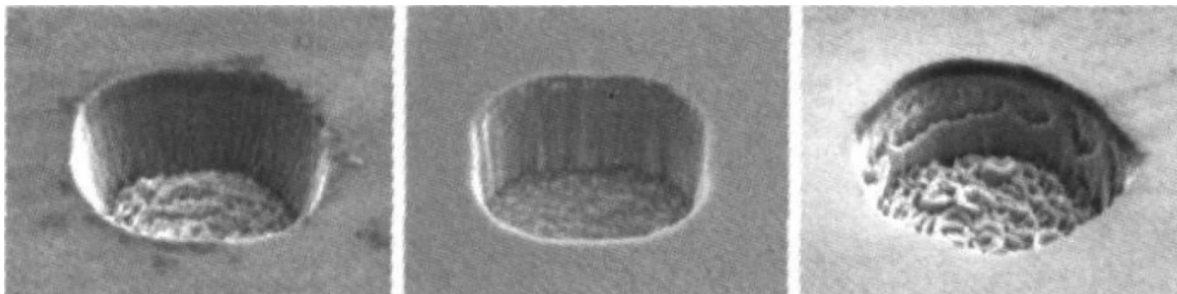


图9 用 ICP 等离子体刻蚀技术刻蚀碲镉汞器件接触孔时, 在 0.2 Pa、0.5 Pa 和 5 Pa 工作气压下的刻蚀图<sup>[29]</sup>

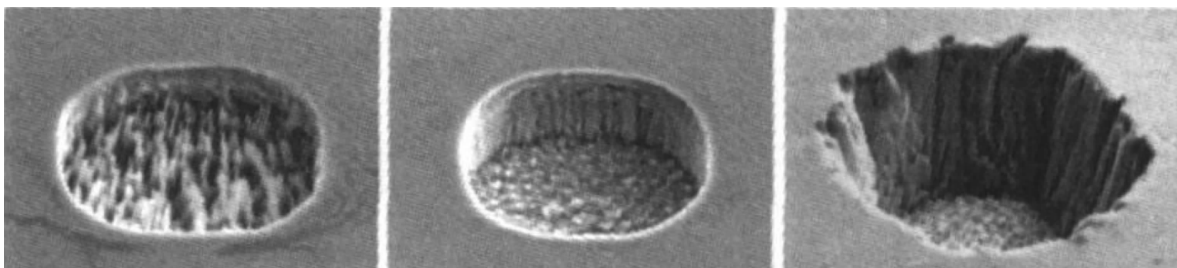


图10 不同下电极射频功率下的刻蚀结果: (a) 50 W; (b) 70 W; (c) 300 W<sup>[29]</sup>

条纹图。可以看出, 在二次缓冲层生长后, RHEED 条纹明显变长, 说明衬底的平整度明显提高, 有利于碲镉汞的分子束外延生长<sup>[27-28]</sup>。

### 2.3.2 器件制备工艺调控

各种工艺调控在器件制备工艺中也有很大影响。如图9所示, 在用 ICP 等离子体刻蚀技术刻蚀碲镉汞器件接触孔的过程中, 工作气压会对刻蚀效果造成较为明显的影响。若工作气压过低, 刻蚀过程则会对接触孔底面产生较强的物理轰击作用, 导致刻蚀结果较差。当工作气压为 0.2 Pa 时, 可将反应物及时排出, 使接触孔侧壁比较干净。但由于仍有较强的物理轰击作用, 刻蚀效果依然不好。当工作气压升到 0.5 Pa 时, 可以实现较好的刻蚀效果。当

气压增加到 5 Pa 时, 反应产物又无法及时排出, 堆积在接触孔内, 导致刻蚀效果又较差<sup>[29-31]</sup>。

此外, 下电极射频功率对刻蚀结果也有明显影响。它主要决定刻蚀工艺的自偏压, 从而调节离子和活性基团到达基片表面的能量, 因此是刻蚀工艺的重要参数。自偏压可为反应过程的物理轰击提供能量, 也可为活性基团和化学反应过程提供能量。当自偏压较低时, 刻蚀过程以化学作用为主, 一般刻蚀的底部形貌较好, 但会形成侧壁陡直程度不理想的现象。若调高自偏压, 刻蚀过程中的物理轰击作用会增强, 刻蚀孔的侧壁会有较陡直的效果, 但同时底部形貌会趋于不理想状况。图10为不同下电极射频功率下的接触孔刻蚀图。可以看出,

当下电极射频功率为 50 W 时, 由于刻蚀自偏压过低, 活性基团到达基片表面的能量不够, 导致化学反应进行不充分, 形貌较不理想。当下电极射频功率为 70 W 时, 刻蚀效果较好; 当下电极射频功率增至 300 W 时, 由于物理轰击作用过强, 碲镉汞材料受到损伤, 形成较差的形貌<sup>[29-31]</sup>。

### 3 结论

$\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  材料是目前最优异的红外探测器材料, 其物理特性能够很好地满足红外探测器的需要。本文根据  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  红外探测器的性能需求, 介绍了合理调控  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  器件性能的几种技术方式, 包括材料调控(组分及温度、掺杂浓度、压强及应力等对材料的调控)、器件结构调控(n-on-p、p-on-n、p-i-n、n-B-n 等器件结构的调控)和制备工艺调控(材料制备工艺和器件制备工艺等调控的影响)等, 并分析了它们对  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  红外探测器的影响, 以有效降低器件暗电流、提高器件工作温度及探测率等, 从而促进红外探测器在降低成本、减小功耗、提高可靠性等方面的发展。

### 参考文献

- [1] 苏君红. 红外材料与探测技术 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2015.
- [2] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 刘铭. 石墨烯基碲镉汞复合材料技术研究 [J]. 红外, 2018, **39**(10): 16-21.
- [4] Rogalskia A, Chrzanowski K. Infrared Devices and Techniques [J]. *Opto-Electron Review*, 2002, **10**(2): 111-136.
- [5] 李庆. 长波碲镉汞红外焦平面探测器暗电流机理分析 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2017.
- [6] 崔书娟. 氧化镓基光电探测器的研制与研究 [D]. 北京: 中国科学院物理研究所, 2018.
- [7] Rogalski A. Infrared Detector [M]. New York: CRC Press, 2011.
- [8] 宋淑芳, 巩锋, 周立庆. InAs/GaSb II 型超晶格红外探测器的研究进展 [J]. 激光与红外, 2014, **44**(2): 117-121.
- [9] 崔书娟. 氧化镓基光电探测器的研制与研究 [D]. 北京: 中国科学院物理研究所, 2018.
- [10] 赵嫔嫔. 非晶碲镉汞半导体材料的第一性原理研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2014.
- [11] 沈丹萍, 张晓东, 孙艳, 等. 负带隙  $\text{HgCdTe}$  体材料的磁输运特性研究 [J]. 物理学报, 2017, **66**(24): 247301.
- [12] Hansen G L, Schmit J L. Calculation of Intrinsic Carrier Concentrations in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  [J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**: 1639-1640.
- [13] Tang D H, Xue L, Zhang L Z, et al. Doping Effect of Boron in  $\text{Hg}_{0.75}\text{Cd}_{0.25}\text{Te}$  First-principles Study [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, **61**(2): 027102.
- [14] Zhang X H, Chen L, Lin T, et al. Photoluminescence and Electrical Characteristics of Arsenic-doped  $\text{HgCdTe}$  [J]. *Journal of infrared and millimeter waves*, 2012, **31**(5): 0407-0410.
- [15] Zhao H X, Chen X S, Lu J P, et al. Electronic Properties of  $\text{HgTe}$  within Different Structures [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2013, **27**(18): 1350086.
- [16] Zhao H X, Chen X S, Lu J P, et al. Band Gap Tuning in  $\text{HgTe}$  through Uniaxial Strains [J]. *Solid State Communications*, 2013, **166**: 1-5.
- [17] Reibel Y, Rouvie A, Nedelcu A, et al. Large Format, Small Pixel Pitch and Hot Detectors at SOFRADIR [C]. *SPIE*, 2013, **8896**: 88960B.
- [18] 周连军, 韩福忠, 白丕绩, 等. 高温碲镉汞中波红外探测器的国内外进展 [J]. 红外技术, 2017, **39**(2): 116-124.
- [19] Mollard L, Bourgeois G, Lobre C, et al. P-on-n  $\text{HgCdTe}$  Infrared Focal-plane Arrays: From short-wave to Very-long-wave infrared [J]. *Journal of electronic materials*, 2014, **43**(3): 802-807.
- [20] Gravrand O, Chorier P. Status of Very Long Infrared-wave Focal Plane Array Development



- at DEFIR [C]. *SPIE*, 2009, **7298**: 729821.
- [21] 刘铭, 闻娟, 周朋, 等. Sb 基 nBn 型红外探测器发展现状 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(12): 1461-1467.
- [22] 覃钢, 夏菲, 周笑峰, 等. 基于 nBn 势垒阻挡结构的碲镉汞高温器件 [J]. *红外技术*, 2018, **40**(9): 853-862.
- [23] 李艳鹏, 张传杰, 徐庆庆, 等. 激活退火对 As 掺杂型 HgCdTe 材料的影响 [J]. *激光与红外*, 2010, **40**(5): 506-510.
- [24] 何凯. 碲镉汞红外光伏探测器电学性能表征技术研究 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2015.
- [25] Stoltz A J, Benson J D, Jaime-Vasquez M, et al. A Review of the Characterization Techniques for the Analysis of Etch Processed Surfaces of HgCdTe and Related Compounds [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2014, **43**(9): 3708-3717.
- [26] 王丛, 刘铭, 王经纬, 等. MBE 外延 InSb 基 CdTe 工艺研究 [J]. *激光与红外*, 2017, **47**(4): 474-478.
- [27] 王经纬, 巩锋, 刘铭, 等. Si 基碲镉汞分子束外延工艺优化研究 [J]. *激光与红外*, 2012, **42**(10): 1161-1164.
- [28] 高达, 王经纬, 王丛, 等. 低缺陷 Si 基碲镉汞分子束外延工艺研究 [J]. *红外*, 2018, **39**(10): 12-16.
- [29] 李震, 胡小燕, 史春伟, 等. 碲镉汞器件接触孔的 ICP 刻蚀工艺研究 [J]. *激光与红外*, 2008, **38**(12): 1211-1214.
- [30] 王溪. 12.5  $\mu\text{m}$  长波碲镉汞红外探测器制备与表征 [D]. 上海: 中国科学院上海技术物理研究所, 2016.
- [31] Pal R, Malik A, Srivastav V, et al. Compositionally Graded Interface for Passivation of HgCdTe Photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, **35**(10): 1793-1800.