

## 碲镉汞高工作温度红外探测器

覃 钢<sup>1</sup>, 吉凤强<sup>1</sup>, 夏丽昆<sup>2</sup>, 陈卫业<sup>1</sup>, 李东升<sup>1\*</sup>, 孔金丞<sup>1</sup>, 李艳辉<sup>1</sup>, 郭建华<sup>1</sup>, 袁绶章<sup>1</sup>

(1. 昆明物理研究所, 云南 昆明 650223;

2. 陆军装备部驻重庆地区军事代表局驻昆明地区第一军事代表室, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 基于当前红外探测器技术的发展方向, 从高工作温度红外探测器应用需求的角度分析了碲镉汞高工作温度红外探测器在组件重量、外形尺寸、功耗、环境适应性及可靠性方面的优势。总结了欧美等发达国家在碲镉汞高工作温度红外探测器研究方面的技术路线及研究现状。从器件暗电流和噪声机制的角度分析了碲镉汞光电器件在不同工作温度下的暗电流和噪声变化情况及其对器件性能的影响; 总结了包括基于工艺优化的 Hg 空位 p 型 n-on-p 结构碲镉汞器件、基于 In 掺杂 p-on-n 结构和 Au 掺杂 n-on-p 结构的非本征掺杂碲镉汞高工作温度器件、基于 nBn 势垒阻挡结构的碲镉汞高工作温度器件及基于吸收层热激发载流子俄歇抑制的非平衡模式碲镉汞高工作温度器件在内的不同技术路线碲镉汞高工作温度器件的基本原理, 对比分析了不同技术路线碲镉汞高工作温度器件的性能及探测器制备的技术难点。在综合分析不同技术路线高温器件性能与技术实现难度的基础上展望了碲镉汞高工作温度器件技术未来的发展方向, 认为基于低浓度掺杂吸收层的全耗尽结构器件具备更好的发展潜力。

**关键词:** 碲镉汞; 俄歇抑制; SRH 抑制; 暗电流; 高工作温度

**中图分类号:** TN304      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20200328

## HgCdTe high operation temperature infrared detectors

Qin Gang<sup>1</sup>, Ji Fengqiang<sup>1</sup>, Xia Likun<sup>2</sup>, Chen Weiye<sup>1</sup>, Li Dongsheng<sup>1\*</sup>, Kong Jincheng<sup>1</sup>,  
Li Yanhui<sup>1</sup>, Guo Jianhua<sup>1</sup>, Yuan Shouzhong<sup>1</sup>

(1. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2. No.1 Military Representative Office in Kunming of Military Representative Bureau of  
Army Equipment Department in Chongqing, Kunming 650223, China)

**Abstract:** Based on the current development direction of infrared detector technology. The advantages of HgCdTe high operation temperature (HOT) infrared detector were analyzed in terms of module weight, shape size, power consumption, environmental adaptability and reliability from the perspective of application requirements of HOT infrared detector. The technical route and research status of HgCdTe HOT infrared detector in Europe and America were summarized. From the perspective of device dark current and noise mechanism, the change of dark current and noise at different operating temperatures and their effects on device performance were analyzed. The basic principles of the process optimization HgCdTe devices based on Hg vacancy n-on-p structure, extrinsic doped HgCdTe HOT devices based on in-doped p-on-n structure and Au doped n-on-p structure, nBn based HOT devices based on barrier structure and non-equilibrium mode HgCdTe HOT devices based on thermally excited carrier auger suppression in absorption layer were summarized. The performance of HgCdTe HOT devices with different technology routes and the technical difficulties in the preparation of detectors were compared and analyzed. Based on the comprehensive analysis of the performance and technical difficulties of

HOT devices with different technology routes, the future development direction of HgCdTe HOT device technology was prospected. It is considered that the fully depleted device based on low concentration doping absorption layer has better development potential.

**Key words:** HgCdTe; auger suppression; SRH suppression; dark currents; HOT

## 0 引言

目前,新一代红外探测器的核心聚焦于更小尺寸 (Size)、更小重量 (Weight)、更低功耗 (Power consumption)、更高性能 (Performance) 和更低成本 (Price), 即“SWaP<sup>3</sup>”。对于高性能光子探测器而言, 提高探测器组件的工作温度是其中的关键之一<sup>[1]</sup>。

1959 年, 英国人 Lawson 发明的碲镉汞 ( $Hg_{1-x}Cd_xTe$  或 MCT) 材料是一种闪锌矿结构的直接带隙三元化合物半导体, 材料的吸收系数大, 禁带宽度连续可调, 通过改变 Cd 组分  $x$  可实现 1~3  $\mu\text{m}$ 、3~5  $\mu\text{m}$  和 8~14  $\mu\text{m}$  三个大气窗口的红外探测。碲镉汞红外焦平面探测器因其优异的光电性能在高性能红外光子探测领域一直占据着主导地位<sup>[2-3]</sup>。

窄带隙的碲镉汞材料, 随着工作温度的升高本征热激发载流子浓度指数增大, 从而使得器件暗电流呈指数上升。碲镉汞红外探测器的暗电流水平及相关噪声是决定其探测性能的关键要素, 决定了红外系统对目标的探测、跟踪和识别能力。因此, 高性能的碲镉汞红外焦平面探测器需要工作在 77 K 的液氮温区以抑制器件的暗电流, 其较大的制冷量需求使得制冷机的费用占到了整个探测器组件的约 1/3。同时, 探测器组件的外形尺寸、质量和功耗较大, 探测器组件的系统适应性降低。随着工作温度降低到液氮温度, 碲镉汞与硅读出电路之间热膨胀系数较大的差异导致芯片发生较大的翘曲变形, 使得焦平面像元稳定性降低, 阵列规格越大热失配相关问题也越严重, 最终使得探测器组件的可靠性下降<sup>[1-3]</sup>。

因此, 在保证碲镉汞红外探测器性能的前提下提高探测器组件的工作温度, 可以兼顾红外系统小尺寸、低功耗、低成本、高灵敏度和高响应速度等优点, 是目前新一代红外焦平面探测器技术的重要发展方向之一<sup>[3]</sup>。

## 1 碲镉汞 HOT 器件应用分析

1985 年, 英国的 T. Ashley 等人首次提出了高工

作温度 (High Operation Temperature, HOT) 红外探测器的概念<sup>[4-5]</sup>。随着高晶体质量碲镉汞外延薄膜制备技术、碲镉汞材料与器件相关基础理论及器件制备工艺研究的深入, 碲镉汞高温器件技术的研究也得到了较好的发展。碲镉汞 HOT 器件得到了包括法国 Sofradir 公司、德国 AIM 公司、英国 Selex 公司、美国 DRS 公司、美国 Teledyne 公司在内的欧美发达国家的重点研发<sup>[6-18]</sup>。

法国 Sofradir 公司基于开发的碲镉汞 HOT 探测器, 对比了阵列规格 640×512、像元间距 15  $\mu\text{m}$  的中波碲镉汞探测器组件在不同工作温度时探测器组件参数, 如图 1 所示。采用相同制冷机的情况下, 将 n-on-p 结构器件工作温度从 80 K 提升到 110 K, 探测器组件功耗降低了 20%, 制冷时间缩短了 20%, 平均失效时间提高了 30%; 采用小型化制冷机的情况下, 探测器组件尺寸减小了 15%, 质量降低了 20%。工作温度达到 150 K 的 p-on-n 结构 HOT 器件, 探测器组件尺寸和功耗分别减小了约 40%<sup>[1]</sup>。

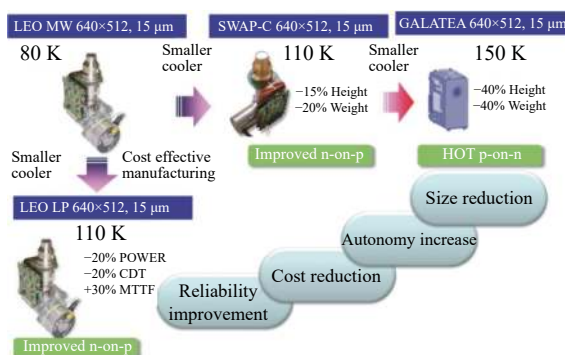


图 1 中波探测器不同工作温度下参数对比

Fig.1 Comparison of parameters of MW infrared detectors at different working temperatures

图 2 所示为昆明物理研究所中波红外碲镉汞 640×512 (15  $\mu\text{m}$ ) 焦平面组件在不同工作温度下制冷机的稳态功耗测试结果及制冷到相应工作温度所需的制冷时间对比。随探测器组件工作温度的提高, 制冷机的功耗和降温时间显著下降。

同时, 由于 Si 读出电路 (ROIC) 与碲镉汞材料之

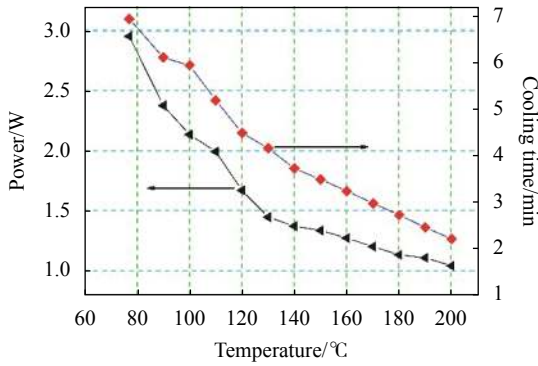


图 2 不同工作温度时制冷机的稳态功耗和降温时间

Fig.2 Steady state power consumption and cooling time of cryocooler at different working temperature

间的热膨胀系数的不同, 导致低温工作时存在较大的热失配, 从而影响探测器组件的探测率、相应均匀性及噪声等性能, 严重时甚至导致芯片的互连钢柱脱开和芯片断裂。在大面阵的碲镉汞红外焦平面探测器中, 热失配导致失效的现象会更加明显。因此, 提高探测器组件的工作温度可以显著降低由于热失配带来的影响, 提高探测器组件的可靠性。

得益于探测器组件工作温度的提升, 由此带来了探测器组件的可靠性提升、制造成本的下降, 探测器组件外形尺寸和重量的降低使得探测器组件的环境适应性得到有效提升。

## 2 碲镉汞 HOT 器件研究现状

提高薄膜材料的晶体质量, 降低缺陷密度, 优化器件制备工艺, 采用非本征掺杂技术等能够有效提升碲镉汞器件的工作温度。法国 Sofradir 公司和德国 AIM 公司通过优化基于 Hg 空位的 n-on-p 器件工艺, 中波红外器件在 120 K 时仍具备优异的光电性能。

非本征掺杂方面, 德国 AIM 公司采用 Au 掺杂 P 型碲镉汞开发了基于 n-on-p 结构的碲镉汞 HOT 器件, 第一代中波碲镉汞 HOT 器件工作温度达 140 K。将 Au 掺杂浓度从中系数  $10^{16} \text{ cm}^{-3}$  降低到低系数  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 并优化器件钝化工艺后工作温度达到 160 K<sup>[6]</sup>。

AIM 公司与 Sofradir 公司都开发了基于 LPE 原位 In 掺杂结合 As 离子注入技术的 p-on-n 结构碲镉汞器件, 其中波探测器工作温度达到 160 K<sup>[7-9]</sup>。美国雷神公司采用垂直液相外延技术开发了原位 p-on-n 技术。图 3 为 AIM 公司 20  $\mu\text{m}$  中心距、640×512 规格阵列中

波红外 p-on-n 探测器组件成像效果, 在较高的工作温度下探测器组件仍然具有较好的成像分辨率<sup>[7]</sup>。

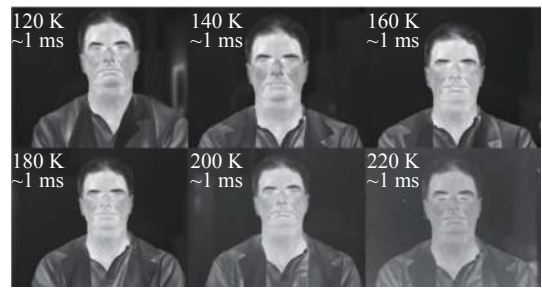


图 3 AIM 公司 p-on-n 中波探测器成像效果

Fig.3 Imaging effect of p-on-n middle wavelength detector in AIM Co.

通过能带调控设计新结构来抑制暗电流可有效提升探测器的工作温度, 主要包含以下两条技术路线: (1) 基于非平衡模式的碲镉汞器件, 采用  $\text{P}^+/\pi(\nu)/\text{N}^+$  结构 (见图 4)<sup>[10]</sup>; (2) 基于 nBn 势垒阻挡结构的碲镉汞器件 (见图 5)<sup>[19]</sup>。

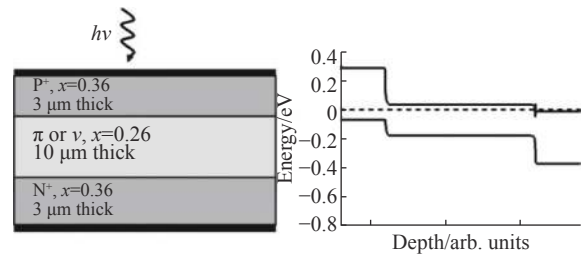


图 4  $\text{P}^+/\pi(\nu)/\text{N}^+$  器件结构

Fig.4 Structure of  $\text{P}^+/\pi(\nu)/\text{N}^+$  device

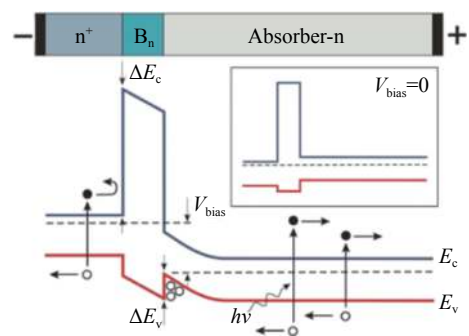


图 5 碲镉汞 nBn 器件能带结构

Fig.5 Bandgap structure of HgCdTe nBn device

1985 年, 英国人 Elliot 提出的  $\text{P}^+/\pi(\nu)/\text{N}^+$  结构器件, 得到了包括英国 Selex 公司、美国陆军实验室 (Army Research Laboratory)、DRS 公司、EPIR 公司、伊利诺伊大学芝加哥分校 (University of Illinois at Chicago)、密歇根大学 (University of Michigan)、TIS 公司、波兰

华沙军事技术大学 (Military University of Technology) 等众多科研机构或公司的研究<sup>[11-18]</sup>。2006 年,英国 Selex 公司报道了阵列规格为 320×256、像元间距 30 μm、工作温度 200 K 的 P<sup>+</sup>/π/N<sup>+</sup>中波碲镉汞探测器<sup>[11]</sup>。

2010 年,美国 DRS 公司报道了基于 HDVIP 结构的非平衡模式中波红外碲镉汞高温器件,包括 P<sup>+</sup>/π/N<sup>+</sup>和 P<sup>+</sup>/v/N<sup>+</sup>两种结构(见图 6)。优化工艺后的中波器件在 170 K (λ<sub>C</sub>=4.8 μm)工作温度下 NETD 仍然小于 25 mK<sup>[13]</sup>。

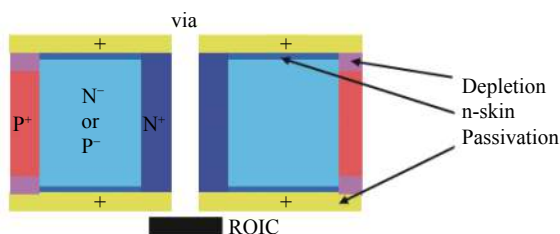


图 6 美国 DRS 公司非平衡模式器件结构

Fig.6 Structure of device in unbalanced mode in DRS Co

美国 ARL 采用 As 离子注入结合扩散激活退火实现了 P<sup>+</sup>/π/N<sup>+</sup>结构器件的制备(见图 7)<sup>[14-16]</sup>。

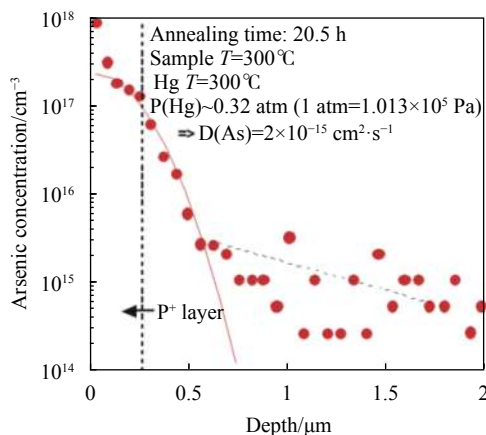


图 7 As 离子注入分布及扩散后分布

Fig.7 Distribution of As ion after injection and diffusion

美国 Teledyne 公司采用吸收层掺杂浓度为 2~5×10<sup>13</sup> cm<sup>-3</sup>的 P<sup>+</sup>/v/N<sup>+</sup>结构(见图 8),低掺杂浓度使得吸收层在较低的偏压下实现全耗尽,从而有效抑制 Aguer-1 过程,器件暗电流水平达到背景辐射限。其中波红外探测器工作温度达到 250 K,长波红外探测器工作温度达到 160 K<sup>[17-18]</sup>。

2011 年,密歇根大学的 A. M. Itsuno 首次报道了

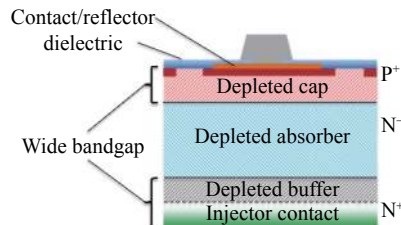


图 8 Teledyne 公司 P<sup>+</sup>/v/N<sup>+</sup>碲镉汞器件结构

Fig.8 P<sup>+</sup>/v/N<sup>+</sup> HgCdTe device structure of Teledyne

nBn 势垒型碲镉汞器件<sup>[19]</sup>。之后,基于势垒阻挡型的碲镉汞器件得到了欧美等众多公司和科研机构的研究,并在中波、长波 HOT 器件的研制中取得了一定的成果。由于碲镉汞异质结 Type-I 型能带配置导致 nBn 器件需要较高的工作偏压,因此能带调控是目前研究的重点。波兰华沙军事技术大学基于 MOCVD 技术开发了 As 掺杂势垒型器件,包括 pBn 和 pBp 型器件,并推出了基于热电致冷的单元器件样品(见图 9)。



图 9 华沙军事技术大学势垒型碲镉汞单元器件样品

Fig.9 Sample of barrier HgCdTe cell device in Military Technical University at Warsaw

澳大利亚的西澳大学与华沙军事技术大学合作开发了基于 HgTe/CdTe 三类超晶格势垒的 nBn 型器件。由于能带调控及材料制备方面存在的技术问题,目前尚无成熟的 nBn 势垒型碲镉汞焦平面器件报道<sup>[20-25]</sup>。

国内中国科学院上海技术物理研究所、中国电子科技集团公司第十一研究所及昆明物理研究所都开展了低功耗、小型化碲镉汞高工作温度红外探测器组件的研制,目前还处于技术研发阶段,尚无成熟的产品报道。

### 3 碲镉汞 HOT 器件原理与技术路线

#### 3.1 暗电流及噪声分析

碲镉汞器件性能受到器件暗电流水平的限制,其

中器件的暗电流主要包括: 扩散电流、SRH 产生-复合电流、直接隧穿电流、陷阱辅助隧穿电流及表面漏电流等。暗电流的有效抑制是提升探测器组件工作温度的基础。

随着工作温度的升高, 由于高的热激发载流子, 本征载流子在近室温碲镉汞材料中起主导作用, 尤其是长波红外波段。碲镉汞材料的本征载流子浓度与温度之间满足如下关系<sup>[26]</sup>:

$$n_i = (5.85 - 3.82x + 0.001753T - 0.001364xT) \cdot \left[ 10^{14} E_g^{0.75} T^{1.5} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \right] \quad (1)$$

图 10 和 11 分别为组分  $x=0.3$  和  $x=0.22$ 、n 型掺杂浓度  $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  时本征载流子浓度、电子浓度和空穴浓度与温度之间的关系。

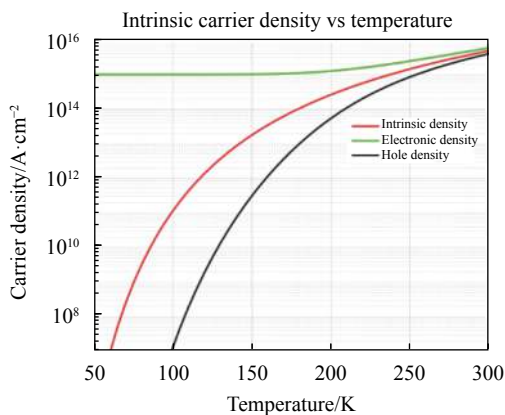


图 10  $x=0.3$  时本征载流子浓度与温度的关系

Fig.10 Relationship between the intrinsic carrier concentration and temperature at  $x=0.3$

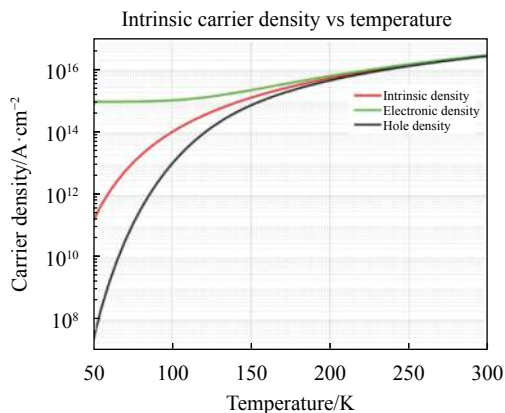


图 11  $x=0.22$  时本征载流子浓度与温度的关系

Fig.11 Relationship between the intrinsic carrier concentration and temperature at  $x=0.22$

俄歇复合速率与电子和空穴浓度成正比, 高的俄歇复合速率导致高的暗电流和噪声。随着工作温度的升高, 俄歇复合过程占据主导地位, 探测器暗电流随本征载流子浓度的增大而快速增大。图 12 所示为截止波长为  $10 \mu\text{m}$  (78 K) 的长波碲镉汞器件暗电流密度随工作温度的变化关系。

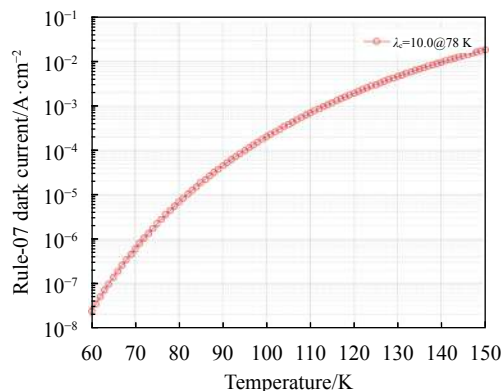


图 12 探测器暗电流密度与工作温度的关系

Fig.12 Relationship between dark current density and working temperature of detectors

碲镉汞器件的优质因子  $R_0A$  与器件的暗电流之间的关系如下<sup>[26]</sup>:

$$R_0A = \left( \frac{dI}{dV} \right)^{-1} \Big|_{V=0} \cdot A = \frac{kT}{eJ_0} \quad (2)$$

器件的探测率  $D^*$  满足如下的关系:

$$D^* = \frac{\eta\lambda q}{hc} \cdot \left( \frac{4kT}{R_0A} + 2q^2\eta\Phi_B \right)^{-1/2} \quad (3)$$

碲镉汞探测器工作温度升高, 暗电流增大导致器件的  $R_0A$  快速减小,  $4kT/R_0A \gg 2q^2\eta\Phi_B$ , 探测率  $D^*$  可简化为:

$$D^* = \frac{\eta\lambda q}{hc} \cdot \left( \frac{4kT}{R_0A} \right)^{-1/2} \quad (4)$$

因此, 高工作温度下抑制器件的暗电流是实现探测器高性能的基础。

碲镉汞器件的噪声水平决定了探测器组件的探测灵敏度, 即器件的噪声等效温差 (NETD)。碲镉汞光伏器件噪声主要有热噪声 (Johnson 或 Nyquist 噪声)、散粒噪声 (Shot 噪声)、 $1/f$  噪声及随机电报噪声 (RTS) 等<sup>[26]</sup>。

热噪声是由器件中电荷载流子的随机热运动引

起, 噪声电流与温度关系为<sup>[26]</sup>:

$$\overline{i_{nj}^2} = \frac{4kT_d\Delta f}{R_d} \quad (5)$$

式中:  $T_d$  为探测器工作温度;  $R_d$  为结电阻;  $\Delta f$  为电子学带宽, 一般取  $\Delta f = 1/2T_{int}$ ,  $T_{int}$  为积分时间。

散粒噪声源于载流子输运过程中的离散性, 噪声均方电流与器件的电流直接相关<sup>[2]</sup>:

$$\overline{i_{ns}^2} = 2eI\Delta f \quad (6)$$

在碲镉汞器件中,  $1/f$  噪声是限制器件性能的重要因素之一, 尤其对于长波红外探测器。  $1/f$  噪声与器件的表面态直接相关。除表面态之外, 外延层中的贯穿位错也是  $1/f$  噪声的重要来源。Tobin 研究指出,  $1/f$  噪声电流与探测器暗电流密度之间存在经验的线性关系, 具体为<sup>[27]</sup>:

$$i_{nf} = \alpha \cdot I^\beta \cdot f^{-1/2} \quad (7)$$

式中:  $f$  为频率;  $\alpha$ 、 $\beta$  为拟合参数, 根据拟合数据  $\alpha \approx 1 \times 10^{-3}$ 、 $\beta = 1$ 。在低频区域,  $1/f$  噪声是光电器件的主要噪声形式。根据公式 (7) 可知, 碲镉汞器件工作温度升高导致器件暗电流增大, 使得  $1/f$  噪声也随工作温度的升高而增大。

在低频区域, 除了  $1/f$  噪声外, 随机电报噪声也是限制器件性能的一个重要因素。研究认为随机电报噪声主要是由于半导体材料中的缺陷引起的。碲镉汞器件中的位错、Hg 空位缺陷等是随机电报噪声的重要来源。缺陷在禁带中形成深能级陷阱, 陷阱随机俘获释放载流子从而调制器件的电流, 形成随机电报噪声。其特征为电流或电压在两个 (或多个) 分离的位置随机跳来跳去, 脉冲频率大都小于 100 Hz。图 13 所示为工作温度为 140 K 的中波碲镉汞 p-on-n 器件

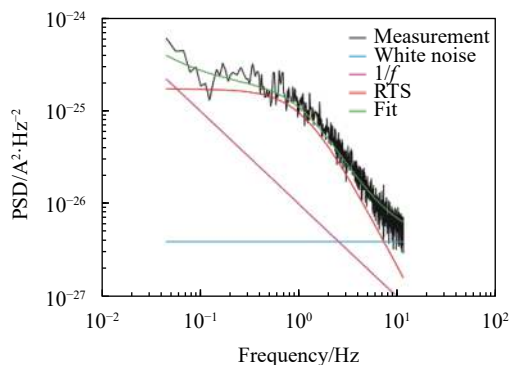


图 13 140 K 时中波红外 p-on-n 器件噪声功率谱密度

Fig.13 PSD of MWIR p-on-n devices at 140 K

噪声功率谱密度测试结果, 可以看到在低频区域  $1/f$  噪声和随机电报噪声占据主导地位<sup>[28]</sup>。

随探测器组件探测波长或工作温度的提升, 随机电报噪声的幅度和频度都随之增加。图 14 所示为不同温度下随机电报噪声像元数对比<sup>[28]</sup>。

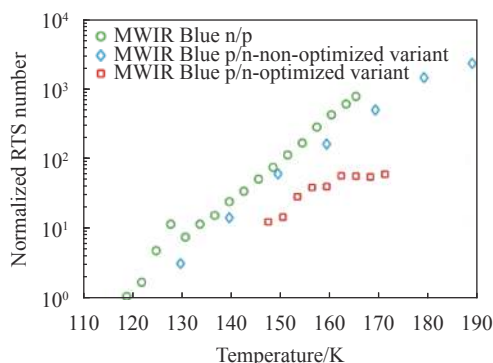


图 14 中波器件随机电报噪声像元数与工作温度的关系

Fig.14 Number of RTS noise pixels detected as a function of the operating temperature for MWIR devices

对于高工作温度碲镉汞红外探测器, 热噪声随工作温度的升高而快速增大; 高工作温度下暗电流快速增大使得暗电流相关噪声和  $1/f$  噪声快速增大; 同时, 高浓度的本征热激发载流子使得位错缺陷等对载流子的俘获和发射概率增大, 随机电报噪声也随之增大。因此, 暗电流及噪声的有效抑制是碲镉汞高工作温度红外探测器研制的基础。其中, 高工作温度下高浓度本征热载流子的有效抑制 (俄歇抑制) 是暗电流抑制从而提升探测器工作温度的关键。

### 3.2 非本征掺杂碲镉汞 HOT 器件

液氮温区工作的碲镉汞器件本征载流子浓度得到了有效抑制, 器件性能受到 SRH 产生-复合电流的限制。对于基于本征 Hg 空位 p 型的碲镉汞 n-on-p 结构器件而言, Hg 空位本身为一种结构缺陷, 除了呈现 p 型受主特性的浅能级外, 还呈现出深能级特性。Hg 空位的深能级为 SRH 过程提供了通道, 使得 SRH 电流增大; 同时, 深能级陷阱也为陷阱辅助隧穿电流提供了通道, 使得陷阱辅助隧穿电流增大 (见图 15)。因此, 基于本征 Hg 空位的 n-on-p 结构器件很难用于低暗电流高工作温度碲镉汞探测器组件的研制。

采用非本征掺杂技术能够有效降低 Hg 空位缺陷所带来的深能级缺陷密度, 从而使得 SRH 电流和陷阱辅助隧穿电流密度降低。器件暗电流密度的降低

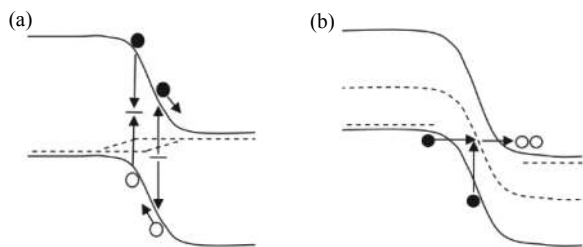


图 15 (a) SRH 产生-复合电流; (b) 陷阱辅助隧穿电流

Fig.15 (a) SRH G-R current ; (b) Trap assisted tunneling current

使得器件可以工作在更高的温度。

目前, 基于非本征掺杂的碲镉汞器件主要包括基于 LPE 技术的 Au 掺杂 n-on-p 结构器件和 In 掺杂 p-on-n 结构器件。随工作温度的升高, 器件性能由 SRH 产生-复合电流限制转到扩散电流限制, 少数寿命由俄歇复合寿命主导。

对于 p-on-n 器件, N 型碲镉汞材料中俄歇复合寿命由 Auger-1 过程主导<sup>[26]</sup>:

$$\tau_{A1} = \frac{2\tau_{A1i}n_i^2}{N(N+P)} \quad (8)$$

式中:  $\tau_{A1i}$  为本征俄歇寿命<sup>[26]</sup>。

$$\tau_{A1i} = \frac{3.8 \times 10^{-18} \varepsilon^2 (1+\mu)^{\frac{1}{2}} (1+2\mu) \exp\left(\frac{-q(1+2\mu)E_g}{(1+\mu)kT}\right)}{\left(\frac{m_e}{m_0}\right) |F_1 F_2|^2 \left(\frac{kT}{qE_g}\right)^{3/2}} \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon$  为介电常数;  $\mu = (m_e/m_n)$ ;  $F_1 F_2$  估算值为 0.25。图 16 和图 17 分别为组分 0.3 和 0.22 时不同 N 型掺杂浓度情况下碲镉汞材料的俄歇寿命随温度的变化关系。

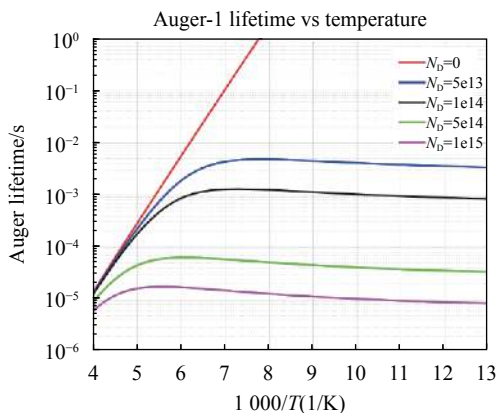


图 16  $x=0.3$  时碲镉汞俄歇寿命与温度的关系

Fig.16 Relationship between Auger lifetime and temperature at  $x=0.3$

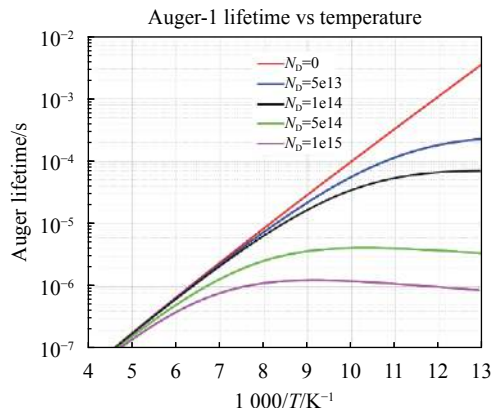


图 17  $x=0.22$  时碲镉汞俄歇寿命与温度的关系

Fig.17 Relationship between Auger lifetime and temperature at  $x=0.22$

可以看到, 相同温度下掺杂浓度越低, 材料的俄歇寿命越高。随着工作温度的升高, 中波碲镉汞在约 130 K 以上时俄歇寿命快速减小; 长波碲镉汞在约 90 K 以上时快速减小。

对于 Au 掺杂 P 型碲镉汞材料而言, 材料的俄歇寿命由 Auger-7 过程占据主导地位, 俄歇寿命与掺杂浓度和温度之间的关系如图 18 所示 (材料组分  $x=0.3$ )。

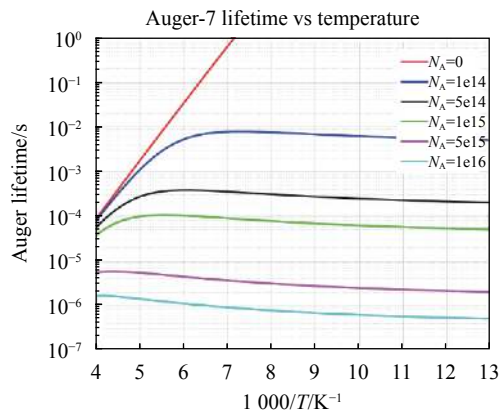


图 18  $x=0.3$  时碲镉汞俄歇寿命与温度的关系

Fig.18 Relationship between Auger lifetime and temperature at  $x=0.3$

目前 Au 掺杂浓度只能控制到  $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  的水平, 较高的掺杂浓度使得材料的俄歇寿命较短。常规 Au 掺杂 n-on-p 器件不能很好实现对本征载流子浓度俄歇复合过程的有效抑制。对于 Au 掺杂碲镉汞 n-on-p 结构器件而言, 最好完全消除材料中的 Hg 空位, 但实际上  $\text{Au}_{\text{Hg}}$  是伴随  $\text{V}_{\text{Hg}}$  而存在的, 且扩散速率非常快。Au 掺杂 n-on-p 结构器件存在的这些技术问题限制了其工作温度的提高。

In 掺杂 p-on-n 器件采用 As 离子注入或原位掺杂

成结技术实现 p-n 结的制备,相对于 Au 掺杂器件而言,更容易获得可控的吸收层低浓度掺杂。但常规的碲镉汞 p-on-n 结构器件在高工作温度下同样不能对吸收层的俄歇过程形成有效的抑制,高工作温度下器件的暗电流噪声和 1/f 噪声逐渐占据主导,成为制约器件 NETD 的主要因素,限制了器件工作温度的进一步提升。

### 3.3 势垒型结构碲镉汞 HOT 器件

碲镉汞 p-n 结型光伏器件通过空间电荷区将电子空穴对分离,而 nBn 势垒阻挡型碲镉汞器件通过宽带隙势垒层的引入实现电子空穴对的分离。势垒层对多数载流子(电子)起到阻挡作用,但是允许少数载流子(空穴)的移动,从而将光生电子和空穴从空间上分开。势垒层足够的厚度使得器件可以忽略隧穿电流,势垒的高度足以忽略热电子的激发。

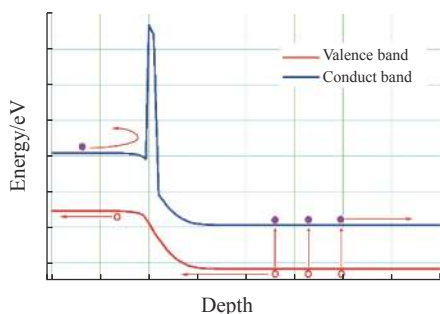


图 19 nBn 结构器件反向偏压下载流子输运示意图

Fig.19 Carrier transport schematic of nBn devices under reverse bias

碲镉汞 p-n 结器件在 77 K 低温工作时性能主要受到 SRH 产生-复合电流的限制。SRH 电流与禁带宽度之间有如下关系<sup>[22-23]</sup>:

$$J_{SRH} \sim \frac{q \cdot W_{dep}}{2\tau_{SRH}} \cdot \exp\left(-\frac{E_g}{2k \cdot T}\right) \quad (10)$$

可以看到 SRH 电流随禁带宽度的增加而指数减小。势垒型器件工作时外加偏压时分压主要分布在势垒层,吸收层几乎没有空间电荷区的形成。宽带隙势垒层使得 SRH 产生-复合电流得到有效抑制。同时,宽带隙势垒层对器件表面漏电流有抑制作用。因此,势垒型器件从本质上降低了 SRH 电流和表面漏电流对器件性能的影响。理想的 nBn 器件性能为扩散电流限性能,更低的暗电流密度使得 nBn 势垒型器件同 p-n 结器件相比在相同工作温度时具备更高的性能,相同性能下具有更高的工作温度。

理论上 nBn 势垒型碲镉汞器件对 SRH 产生-复合电流和隧穿电流具有较好的抑制效果,器件的暗电流水平由扩散电流决定,通过引入类似非平衡模式碲镉汞器件的排斥结构来抑制吸收层的俄歇复合过程,降低扩散电流可以进一步提升器件性能。

碲镉汞 nBn 势垒器件研制面临的主要问题在于碲镉汞异质结构 Type-I 型能带配置(见图 20),使得器件存在较大的价带带阶  $\Delta E_V$ 。价带带阶对光生少子(空穴)的输运起到阻挡作用,器件需要外加较大的反向偏压以提升少子的收集效率<sup>[22-25]</sup>。

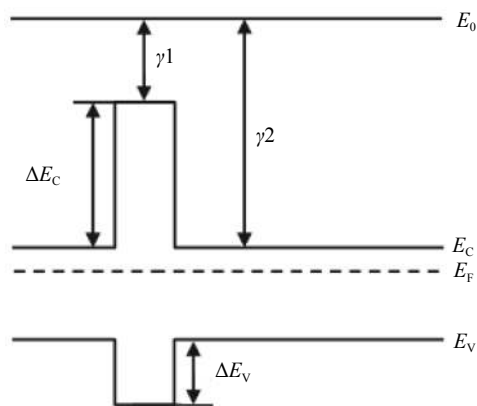


图 20 碲镉汞异质结能带配置示意图

Fig.20 Energy band configuration of HgCdTe heterojunctions

较大的反向偏压下吸收层靠近势垒层的区域能带发生较大弯曲,形成一定宽度的空间电荷区,从而使得器件的 SRH 电流和隧穿电流等暗电流增大,降低了器件性能。因此,nBn 势垒型碲镉汞器件的研究重点在于价带带阶的调节。目前,主要采用了以下方法<sup>[22-25]</sup>:

(1) 掺杂调控,主要通过势垒层中引入梯度 As 掺杂调平价带。

(2) CdTe/HgTe 三类超晶格势垒层,通过调节超晶格层的厚度调节电子微带和空穴微带的位置来消除价带带阶。

上述方法中,对于 MBE 生长而言都具备较大的技术难度。这也是目前制约 nBn 势垒型碲镉汞器件发展的重要因素。

### 3.4 非平衡模式碲镉汞 HOT 器件

随探测器工作温度的升高,碲镉汞器件中 SRH 产生-复合电流主导的器件暗电流会逐渐过渡到以扩



散电流为主导。采用 N 型碲镉汞吸收层的 p-on-n 器件中扩散电流有如下关系<sup>[22-23]</sup>:

$$J_{\text{diff}} \sim q \cdot P_n \cdot \frac{d}{\tau_{\text{diff}}} = q \cdot \frac{n_i^2}{N_D} \cdot \frac{d}{\tau_{\text{diff}}} \quad (11)$$

式中:  $\tau_{\text{diff}}$  为吸收层少数寿命;  $N_D$  为吸收层掺杂浓度;  $d$  为吸收层厚度;  $n_i$  为本征浓度。少数寿命  $\tau_{\text{diff}}$  在高温下主要受俄歇寿命限制, 因此:

$$\tau_{\text{diff}} \approx \tau_{\text{Auger-1}} = \frac{2\tau_{A1}n_i^2}{n(n+p)} \quad (12)$$

式中:  $\tau_{A1}$  为本征俄歇寿命。对于本征或高工作温度器件,  $p \cong n = n_i > N_D$ , 扩散电流简化为:

$$J_{\text{diff}} \sim q \cdot \frac{n_i}{\tau_{A1}} \cdot d \quad (13)$$

由公式 (13) 可知, 在高温本征区域, 扩散电流密度与掺杂浓度无关, 而由本征载流子浓度决定。因此, 本征载流子浓度的有效抑制是实现器件高工作温度的基础。P 型吸收层器件分析与上述分析过程类似。

非平衡模式碲镉汞器件采用  $P^+/\pi(v)/N^+$  结构。在  $P^+/\pi/N^+$  结构中,  $P^+-\pi$  形成排斥结,  $\pi-N^+$  作为抽取结; 在  $P^+/v/N^+$  结构中,  $v-N^+$  形成排斥结,  $P^+-v$  作为抽取结。图 21 分别为  $P^+/v/N^+$  和  $P^+/\pi/N^+$  器件结构、能带及载流子分布示意图<sup>[4-5]</sup>。

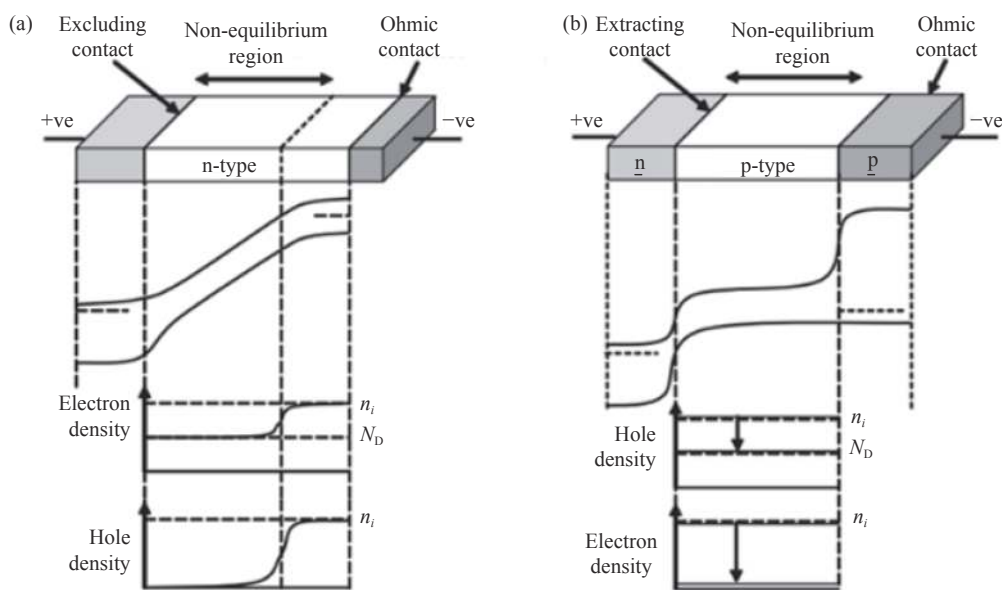


图 21  $P^+/v/N^+$ 、 $P^+/\pi/N^+$  器件结构、能带及载流子分布示意图

Fig.21 Structure, energy band and carrier distribution of  $P^+/v/N^+$  and  $P^+/\pi/N^+$  devices

非平衡模式碲镉汞器件利用少数载流子的排斥与抽取现象使得吸收层电子和空穴浓度耗尽, 在高工作温度下低于本征载流子浓度。随器件反向偏压的增大, 吸收层多数载流子浓度最终达到非本征掺杂水平, 从而使得俄歇复合过程得到有效抑制, 降低器件的暗电流。理论上 3~5  $\mu\text{m}$  波段探测器能够提升到近室温, 而 8~12  $\mu\text{m}$  波段探测器能够采用热电致冷。

对于  $P^+/v/N^+$  结构器件,  $P^+$  层的宽带隙可以有效降低隧穿电流, 重掺杂可以使得耗尽区宽度扩展到整个吸收层, 宽带隙重掺杂的  $N^+$  层使得吸收层中空穴少子得不到补充而耗尽。 $P^+/\pi/N^+$  结构器件的分析也类似。

根据上述分析, 非平衡模式碲镉汞器件的吸收层掺杂浓度越低, 相同偏压下吸收层耗尽宽度越宽, 俄歇抑制效应越明显, 最终器件的扩散电流密度也越小。器件的耗尽区宽度表示如下<sup>[26]</sup>:

$$w = \left[ \frac{2\epsilon_0\epsilon_r V_i (N_a + N_d)}{q N_a N_d} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

式中:  $V_i = V_{bi} - V$ ,  $V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$ 。图 22 所示为组分  $x=0.3$ 、 $P^+$  层浓度  $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 、不同吸收层掺杂浓度时耗尽区宽度与外加偏压之间的计算关系。根据计算结果可知, 吸收层的掺杂浓度越低, 形成相同吸收层

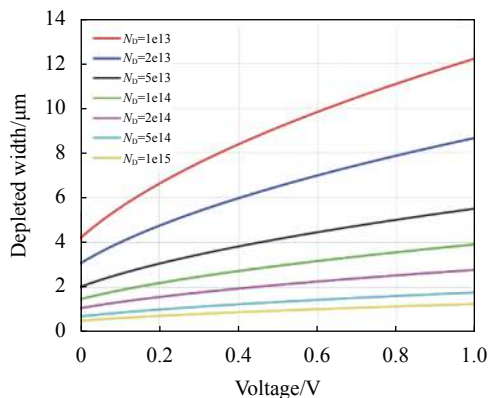


图 22 不同掺杂浓度时吸收层耗尽宽度与反向偏压的关系

Fig.22 Relationship between depletion width and reverse bias voltage with different absorption layer doping concentration

耗尽宽度所需的偏压也越小。

优化材料制备工艺获得接近背景的低浓度掺杂,非平衡模式碲镉汞器件在较小的偏压下就能实现吸收层的全耗尽。降低碲镉汞材料位错密度,优化器件制备工艺降低器件成型过程中应力缺陷的引入,使得与深能级相关的 SRH 产生-复合电流足够低的情况下,非平衡模式碲镉汞器件性能可以达到背景辐射限。同样,对于  $P^+/\pi/N^+$  结构碲镉汞器件,如果  $\pi$  吸收层的掺杂浓度能够达到  $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$  以内,器件性能可以达到背景辐射限性能。

在非平衡模式器件中抽取结与排斥结之间的距离足够接近,可以使得吸收层载流子浓度远低于热平衡值,吸收层足够薄的  $P^+/\pi(N^+)$  器件可以获得较好的俄歇抑制效果;然而吸收层太薄使得光子吸收不充分,从而导致器件的量子效率下降。采用低浓度掺杂吸收层可以在较小的偏压下实现较宽的吸收层耗尽区,从而可以在保证较好的俄歇抑制效果的同时,保证器件的量子效率。同时,由于非平衡模式器件宽带薪帽层的引入及对热激发载流子浓度的抑制,器件对  $1/f$  噪声和随机电报噪声具有更好的抑制效果<sup>[17, 27-28]</sup>。

对于非平衡模式的碲镉汞器件制备而言,其技术难度在于低位错密度高晶体质量多层异质结构薄膜材料的制备、吸收层接近材料背景浓度的低掺杂浓度控制及低缺陷低应力器件成型工艺几个方面。

### 3.5 碲镉汞 HOT 器件发展方向

根据前文不同技术路线的碲镉汞 HOT 器件的分析可知,基于 Au 掺杂的 n-on-p 结构器件或 In 掺杂 p-on-n 结构器件等常规非本征掺杂器件在高工作温度

下缺乏对俄歇复合过程的有效抑制,从而限制了其工作温度的进一步提升。基于 nBn 势垒阻挡结构的碲镉汞器件由于 Type-I 型能带配置使得价带带阶的调控仍然存在较大的困难,基于 MBE 原位 As 掺杂或超晶格势垒层技术的成熟度相对较低。基于非平衡模式的碲镉汞器件不仅具备优异的性能,而且技术成熟度相对较高;通过合理的组分、掺杂调控可以获得吸收层内热载流子的深度耗尽,从而有效抑制俄歇复合过程。其中  $P^+/\nu/N^+$  器件相对于  $P^+/\pi/N^+$  器件而言,更容易获得吸收层低浓度掺杂,且工艺难度相对较低,更具发展潜力。

## 4 结 论

文中从新一代红外探测器的发展方向出发,总结了碲镉汞高工作温度 (HOT) 红外探测器的优点及当前碲镉汞 HOT 器件的发展现状。在此基础上,总结分析了目前碲镉汞 HOT 器件的几条主要技术路线的基本原理、存在的技术难点及未来的发展方向,对碲镉汞 HOT 器件相关技术的研发具有一定的指导意义。

### 参考文献:

- [1] Reibel Y. Infrared SWAP detectors: pushing the limits[C]//SPIE, 2015, 9451: 945110.
- [2] Yang Jianrong. Physics and Technology of HgCdTe Materials[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012. (in Chinese)
- [3] Rogalski A. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(9): 091101.
- [4] Ashley T. Non-equilibrium modes of operation for infrared detectors [J]. *Infrared Physics*, 1986, 26(5): 303-315.
- [5] Ashley T. Infrared detection using minority carrier exclusion[C]//SPIE, 1986, 588: 62-68.
- [6] Lutz H. Improved high operating temperature MCT MWIR modules[C]//SPIE, 2014, 9070: 90701D.
- [7] Eich D. Progress of MCT detector technology at AIM towards smaller pitch and lower dark current [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2017, 46(9): 5445-5457.
- [8] Péré-Laperne N. Improvement of long wave p on n HgCdTe infrared technology[C]//SPIE, 2016, 9933: 99330H.
- [9] Rubaldo L. Recent advances in sofradir IR on II-VI photodetectors for HOT applications[C]//SPIE, 2016, 9755: 97551X.

- [10] Emelie P Y. Modeling and design considerations of HgCdTe infrared photodiodes under nonequilibrium operation [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, 36(8): 846-851.
- [11] Gordon N T. HgCdTe detectors operating above 200K [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35(6): 1140-1144.
- [12] Wijewarnasuriya P S. Nonequilibrium operation of arsenic diffused long-wavelength infrared HgCdTe photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(9): 1283-1290.
- [13] Kinch M A. High operating temperature MWIR detectors[C]//SPIE, 2010, 7660: 76602V.
- [14] Wijewarnasuriya P S. Nonequilibrium operation of long wavelength HgCdTe photo detectors for higher operating temperature[C]//SPIE, 2010, 7780: 77800A.
- [15] Velicu S. MWIR and LWIR HgCdTe infrared detectors operated with reduced cooling requirements [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2010, 39(7): 873-881.
- [16] Velicu S. Two color high operating temperature HgCdTe photodetectors grown by molecular beam epitaxy on silicon substrates[C]//SPIE, 2013, 8876: 887608.
- [17] Lee D. High-operating temperature HgCdTe: a vision for the near future [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, 45(9): 4587-4595.
- [18] Jerrama P. Teledyne's high performance infrared detectors for space missions[C]//SPIE, 2019, 11180: 111803D.
- [19] Itsuno A M. Design and modeling of HgCdTe nBn detectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, 40(8): 1624-1629.
- [20] Itsuno A M. Mid-wave infrared HgCdTe nBn photodetector [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 161102(100): 2-4.
- [21] Itsuno A M. Design of an Auger-suppressed unipolar HgCdTe NBvN photodetector [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2012, 41(10): 2886-2993.
- [22] Kopytko M. Engineering the bandgap of unipolar of HgCdTe-based nBn infrared photodetectors [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(1): 158-166.
- [23] Martyniuk P. Theoretical modeling of HOT HgCdTe barrier detectors for the mid-wave infrared range [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2013, 42(11): 3309-3319.
- [24] Akhavan N D. A method of removing the valence band offset discontinuity in HgCdTe-based nBn detectors [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105(12): 1-4.
- [25] Akhavan N D. Superlattice barrier HgCdTe nBn infrared photodetectors: validation of the effective mass approximation [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, 63(12): 1-8.
- [26] Chu Junhao. Narrow-gap Semiconductor Physics[M]. Beijing: Science Press. 2005.
- [27] Tobin S T. 1/f noise in (Hg, Cd)Te photodiodes [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1980, 27(1): 43-48.
- [28] Guinedor P. Low-frequency noises and DLTS studies in HgCdTe MWIR photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 42(11): 3309-3319.



第一作者简介：覃钢 (1987-), 高级工程师, 硕士, 主要从事分子束外延材料技术及基于能带调控的低噪声高性能红外器件方面的研究工作, 申请国防专利 3 项, 发表学术论文十余篇。



通讯作者简介：李东升 (1974-), 男, 研究员级高级工程师, 理学硕士, 中国光学学会红外光电器件专业委员会委员。理论功底扎实, 材料和器件研究经验丰富, 发明专利 5 项, 发表学术论文 20 多篇, 获得兵器工业集团公司的“红外二代焦平面探测器”项目团队重大科技创新奖, 获得兵器工业集团公司科技进步一等奖 1 项、二等奖 1 项、三等奖 1 项。