

〈综述与评论〉

## 金掺杂碲镉汞红外探测材料及器件技术

宋林伟, 孔金丞, 李东升, 李雄军, 吴 军, 秦 强, 李立华, 赵 鹏

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘要:** 采用金掺杂替代作为深能级缺陷中心的汞空位, 可明显提高 P 型碲镉汞材料少子寿命, 进而降低以金掺杂 P 型材料为吸收层 n-on-p 型碲镉汞器件的暗电流, 明显提升了 n-on-p 型碲镉汞器件性能, 是目前高灵敏度、高分辨率等高性能 n-on-p 型长波/甚长波以及高工作温度中波碲镉汞器件研制的一种技术路线选择。本文在分析评述金掺杂碲镉汞材料现有研究技术要点的基础上, 结合昆明物理研究所目前的研究成果, 总结了碲镉汞金掺杂相关工艺技术, 重点分析了金掺杂对碲镉汞器件性能的影响。

**关键词:** 碲镉汞 (HgCdTe); 金掺杂; 少子寿命; 暗电流; 稳定性

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)02-097-07

## Au-Doped HgCdTe Infrared Material and Device Technology

SONG Linwei, KONG Jincheng, LI Dongsheng, LI Xiongjun, WU Jun, QIN Qiang, LI Lihua, ZHAO Peng

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** The minority carrier lifetime of p-type HgCdTe materials can be improved significantly by using Au atoms instead of Hg vacancies, which have been considered as deep-level energy recombination centers; consequently, the dark current of n-on-p HgCdTe devices reduced and performance improved. Further, Au doping is helpful for developing high-performance n-on-p LWIR/VLWIR and high operating temperature (HOT) MWIR HgCdTe infrared detectors with high resolution and high sensitivity. In this paper, Au-doped HgCdTe IR material and device technologies were reviewed. Critical processes and the effect of Au doping on the device properties were discussed as well.

**Key words:** HgCdTe, Au doping, minority carrier lifetime, dark current, stability

### 0 引言

碲镉汞 ( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ) 材料的禁带宽度可随组分  $x$  的变化在  $0\sim 1.6$  eV 范围内连续调节, 实现对整个红外波段的探测, 且具有高量子效率的优势, 使碲镉汞焦平面成为目前红外光电系统中需求最为迫切、应用最为广泛的关键核心器件, 在高端红外探测器领域一直占据着主导地位<sup>[1]</sup>。

碲镉汞焦平面器件的结构主要有 n-on-p 和 p-on-n 两种类型, 从器件结构设计来说, n-on-p 型和 p-on-n 型器件结构并无优劣之分。然而 p-on-n 型器件吸收层为载流子浓度可控制在较低水平的 N 型碲镉汞, 由于 N 型碲镉汞材料的少子寿命优于 P 型材料, 使得 p-on-n 型器件暗电流更小; 而 n-on-p 型器件采用 P 型

材料作为吸收层, 材料少子寿命低, 导致 n-on-p 型器件暗电流很难控制在较低水平。从理论上来说, p-on-n 型器件的暗电流可以比 n-on-p 型器件低两个数量级, 但 n-on-p 型器件工艺简单可靠、稳定性较好, 被法国 Sofradir 等红外探测器公司广泛采用。

碲镉汞 n-on-p 型器件吸收层材料少子寿命的提升理论上有两种途径: 其一, 控制 P 型吸收层材料载流子浓度, 但实际工艺中很难将本征 P 型材料载流子浓度控制在  $1\times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$  以下; 其二, P 型吸收层材料采用非本征掺杂原子代替作为深能级缺陷的汞空位, 提高吸收层材料少子寿命, 达到控制器件暗电流, 改善 n-on-p 型器件性能的目的。如图 1 所示为不同结构碲镉汞器件品质因子 ( $R_0A$ ) 值随截止波长变化, 可看出与汞空位本征掺杂器件相比, 非本征掺杂可将

收稿日期: 2020-08-12; 修订日期: 2020-09-05.

作者简介: 宋林伟 (1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事红外材料与器件研究, E-mail: songlinwei0111@163.com.

通信作者: 孔金丞 (1979-), 男, 博士, 研究员, 主要从事红外材料与器件研究, E-mail: kongjincheng@163.com.

器件  $R_0A$  值从  $30 \Omega \cdot \text{cm}^2$  提高到  $100 \Omega \cdot \text{cm}^2$  以上, 明显提高了 n-on-p 型器件性能。

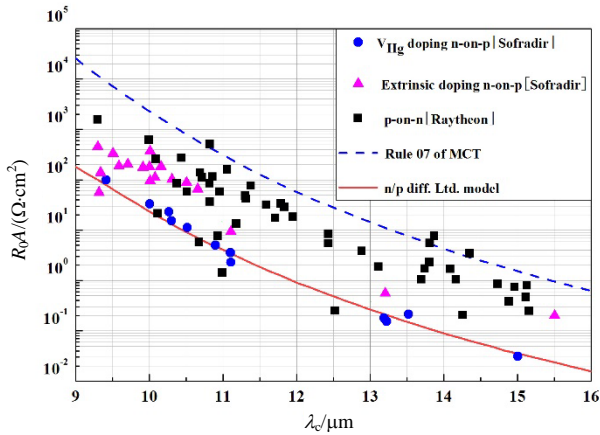


图 1 不同器件结构下碲镉汞器件性能对比

Fig.1 The performance of HgCdTe detectors for various growth techniques and different diode structures

在非本征掺杂 n-on-p 型碲镉汞器件工艺中, 通常采用 Au、Ag、Cu 掺杂原子实现 P 型吸收层的掺杂。研究发现 Ag、Cu 掺杂原子的扩散系数高、稳定性差, 应用研究较少<sup>[2-3]</sup>。相较于 Ag、Cu 掺杂原子来说, Au 原子稳定性较好, 是目前 n-on-p 型器件 P 型吸收层的重要掺杂原子, 主要应用于高性能 n-on-p 型器件的 P 型吸收层材料的制备, 可提高 P 型碲镉汞材料少子寿命、降低暗电流、提高品质因子  $R_0A$  值, 是提升 n-on-p 型器件整体性能最有效的途径。本文基于公开发表的研究论文<sup>[4-22]</sup>, 对相关技术要点进行了分析和评述, 并结合昆明物理研究所目前的研究成果, 总结了碲镉汞 Au 掺杂相关工艺技术, 重点分析了 Au 掺杂对碲镉汞器件性能的影响。

### 1 碲镉汞材料的金原子掺杂技术

在碲镉汞 P 型材料掺杂原子中, Au 为浅受主能级掺杂元素, 其电离能略低于汞空位电离能。以色列的 Finkman 等<sup>[4]</sup>提及在组分  $x=0.2$  的 Au 掺杂碲镉汞材料中, Au 掺杂原子电离能约为 10 meV, 而汞空位电离能约为 13 meV。采用非本征 Au 掺杂代替本身作为深能级缺陷的汞空位, 可降低碲镉汞材料中深能级复合中心密度, 提高材料少子寿命, 降低器件暗电流, 从而改善 n-on-p 型器件性能。

Au 原子作为碲镉汞 n-on-p 型器件中最重要的掺杂剂, 一般不需要高温激活处理 Au 掺杂原子就能占据金属格点, 实现受主掺杂。在 Au 掺杂碲镉汞材料外延生长工艺中, 液相外延 (liquid phase epitaxy, LPE) 工艺是实现 Au 掺杂 P 型材料生长最有效、应用最广泛的技术, 气相外延 (metal organic chemical vapor

deposition, MOCVD) 及分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 生长 Au 掺杂材料的研究也见少量报道。Selamet 等<sup>[5]</sup>利用 MBE 技术采用沉积加热扩散的技术制备了 Au 掺杂材料, 通过后续热处理得到载流子浓度为  $6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的 P 型材料。王仍等<sup>[6]</sup>利用气相外延技术制备了 Au 掺杂 HgCdTe 材料, 通过后续热处理得到载流子浓度为  $5 \sim 7 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的 P 型材料, 说明利用气相外延实现 Au 掺杂碲镉汞材料制备是可行的。德国 AIM、法国 Sofradir、美国 DRS 公司采用液相外延生长技术, 都实现了 Au 掺杂 P 型碲镉汞材料的制备, 且工艺成熟度达到了较高的水平, 研制出了中波、长波、甚长波等高性能 n-on-p 碲镉汞焦平面器件, 其暗电流水平较常规汞空位 n-on-p 型器件降低了一个量级<sup>[7-9]</sup>。

由于单质 Au 的熔点很高, 在液相外延生长碲镉汞过程中直接实现 Au 元素掺杂是比较困难的。一般来说液相外延碲镉汞中掺入 Au 元素主要有两种途径, 一种是用 Hg 溶解 Au, 在合成碲镉汞母液的过程中实现 Au 掺杂; 另一种是 Au 与 Te 在一定条件下先合成  $\text{AuTe}_2$ , 然后以  $\text{AuTe}_2$  为掺杂源在合成碲镉汞母液的过程中实现掺杂。在富碲和富汞两种液相外延技术中, 由于富 Te 液相外延生长的碲镉汞薄膜中会有大量汞空位 ( $V_{\text{Hg}}$ ) 存在, 掺杂 Au 原子在此条件下很容易占据 Hg 格点实现受主掺杂, 可实现较高的掺杂浓度材料的生长, 通常采用富 Te 生长技术实现 Au 掺杂 HgCdTe 薄膜生长。而在富 Hg 液相外延中, 由于 Hg 压较高, 外延材料中 Hg 空位浓度较低, 掺杂 Au 原子占据 Hg 空位较困难, 难于实现有效 Au 掺杂。

在富 Te 液相外延生长 Au 掺杂碲镉汞技术中, 需考虑 Au 掺杂原子的分凝系数。研究发现富 Te 液相外延工艺中 Au 掺杂原子的分凝系数非常低, 也就是说外延生长时外延薄膜中的 Au 原子浓度远小于其在碲镉汞母液中的浓度<sup>[10]</sup>。实验表明, 富 Te 液相外延生长碲镉汞时 Au 原子的分凝系数低于  $10^{-3}$  量级, 且随着掺杂浓度的升高分凝系数降低, 这使得高浓度掺杂的难度更大<sup>[11]</sup>。

### 2 金原子在碲镉汞晶体中的热扩散特性

采用 Au 掺杂原子占据 P 型材料中的汞空位, 有助于降低 P 型材料中汞空位浓度, 降低深能级复合中心密度, 提高少子寿命, 降低器件暗电流, 是提高器件综合性能的有效方法, 但由于 Au 掺杂原子在碲镉汞材料中为快扩散杂质, 在热处理过程以及芯片制造工艺过程中, 容易往缺陷区以及界面处扩散并富集,

因而在金掺杂碲镉汞材料及器件工艺制造中, 应重点关注 Au 掺杂原子的扩散特性。

Au 掺杂原子在碲镉汞材料中是一种快扩散原子, 在材料器件工艺中存在明显不稳定性。研究发现 Au 原子在碲镉汞材料中的扩散系数约为  $2.7 \times 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而同样的 P 型掺杂原子 As 的扩散系数在  $10^{-14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的量级, Au 原子扩散系数比 As 大了近 3 个数量级<sup>[1]</sup>。为了解决这一问题, 有研究认为可以引入一定量的  $V_{\text{Hg}}$ , 引入  $V_{\text{Hg}}$  后将使 Au 原子扩散系数降低<sup>[12]</sup>。这是由于掺杂 Au 原子与  $V_{\text{Hg}}$  结合成 Au- $V_{\text{Hg}}$  复合物, 在不影响材料电学性能的前提下降低了 Au 扩散速率。此外 Au 在碲镉汞材料中的扩散系数是由间隙 Au 原子 ( $\text{Au}_i$ ) 决定的, 间隙 Au 原子的快扩散是 Au 扩散系数高的原因。Au 与  $V_{\text{Hg}}$  相互作用关系式可表示为:



反应常数  $K_{\text{Au}}$  可表示为:

$$K_{\text{Au}} = \frac{[\text{Au}_{\text{Hg}}]}{[\text{Au}_i] \cdot [V_{\text{Hg}}]} \quad (2)$$

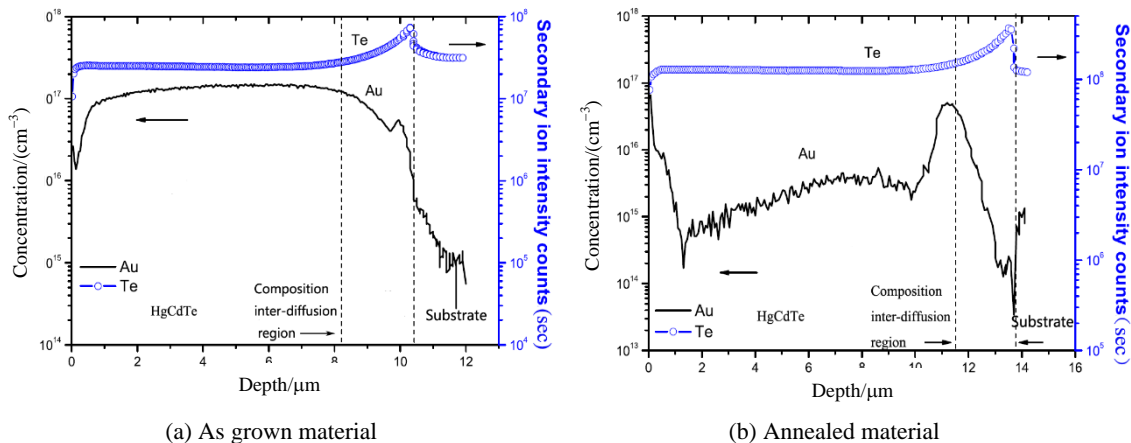


图 2 Au 掺杂碲镉汞材料退火前后 Au 原子分布对比

Fig.2 Depth distributions of Au atom concentration in Au-doped HgCdTe materials as grown and annealed in an Hg-rich state

### 3 金掺杂对碲镉汞红外探测器性能的影响

#### 3.1 金掺杂对碲镉汞材料少子寿命影响

碲镉汞材料的少子寿命与俄歇 1 复合、俄歇 7 复合、辐射复合、SRH (Shockley-Read-Hall) 复合、表面复合等相关, 其关系如式(3)所示:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{A1}} + \frac{1}{\tau_{A7}} + \frac{1}{\tau_{\text{Rad}}} + \frac{1}{\tau_{\text{SRH}}} + \frac{1}{\tau_{\text{Sur}}} \quad (3)$$

在碲镉汞中, 材料的少子寿命并不是与上述几种复合机制都有关, 一般只受限于某种或某几种复合机制。N 型材料少子寿命主要与俄歇 1 复合及 SRH 复

从式(2)可以发现, 随着  $V_{\text{Hg}}$  浓度的增加, 占据  $V_{\text{Hg}}$  格点呈现受主的掺杂 Au 原子浓度也将增加。因而在 Au 掺杂材料实际应用时需要引入一定量的 Hg 空位, 以加强材料稳定性<sup>[13-14]</sup>。

Sun 等<sup>[15]</sup>对 Au 掺杂原子在碲镉汞材料中的分布特性做了详细研究, Au 原子在热处理退火时有向缺陷及界面扩散富集的趋势。如图 2 所示<sup>[15]</sup>, Au 掺杂原生材料中 Au 原子浓度约为  $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ , 而经过汞饱和和退火后材料中的 Au 原子浓度只有  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  左右, 大量的 Au 原子向 HgCdTe/CdZnTe 界面以及表面扩散富集, 且扩散及富集程度与退火温度及退火时间密切相关。Sun 等为了解决退火过程中 Au 原子向缺陷及界面富集的问题, 采用汞饱和-富碲复合退火或在汞饱和退火后增加一段富碲退火, 通过调整碲镉汞材料中汞空位浓度分布, 改善了退火过程中 Au 原子纵向分布均匀性。因而在 Au 掺杂碲镉汞材料器件工艺中, 需重点关注 Au 掺杂原子的扩散行为, 并通过工艺过程的合理优化控制 Au 原子的扩散富集程度, 提高材料的均匀性控制。

合有关, 而 P 型材料少子寿命主要与俄歇 7 复合、辐射复合及 SRH 复合有关。汞空位 ( $V_{\text{Hg}}$ ) P 型材料中,  $V_{\text{Hg}}$  本身就是 SRH 复合中心, 俘获电子能力很强, 因此汞空位 P 型材料的少子寿命较低。而采用 Au 掺杂原子代替本身作为深能级复合中心的汞空位, 材料中的汞空位被掺杂 Au 原子占据, 深能级复合中心汞空位浓度大大降低, 明显提升了 P 型材料的少子寿命。

美国加利福尼亚大学的 Chu 等<sup>[16]</sup>发现, 相同载流子浓度下 Au 掺杂 P 型材料的少子寿命是汞空位 P 型材料的 2~3 倍。Chu 等为了研究提高 Au 掺杂材料少

子寿命的机理，分别测试了低温 100 K 以下 Au 掺杂 P 型材料和汞空位 P 型碲镉汞材料的 Hall 系数随温度的变化。研究表明，Au 掺杂碲镉汞材料中 Hall 系数随着温度的降低而升高，呈近似线性关系，并不会出现汞空位型材料中汞空位的“冻出”现象。这是由于在 Au 掺杂材料中，汞空位格点基本被 Au 原子占据，材料中汞空位浓度很低，材料中 Au 掺杂原子占主导作用。

Chen 等<sup>[17]</sup>比较了不同浓度下非本征 Au 掺杂及本征汞空位掺杂 P 型长波碲镉汞材料少子寿命，当 Au 掺杂浓度为  $2 \times 10^{15} \sim 1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时，77 K 下材料少子寿命为 2000 ~ 8 ns；然而当汞空位浓度为  $3 \times 10^{15} \sim 8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  时，77 K 下材料少子寿命只有 150 ~ 3 ns，如图 3 所示<sup>[17]</sup>。DRS 公司采用富 Te 液相外延生长的组分  $x=0.2067$  的 Au 掺杂甚长波碲镉汞材料，消除汞空位后 Au 掺杂浓度为  $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，碲镉汞材料少子寿命高达 0.82  $\mu\text{s}$ ，与本征汞空位材料相比其少子寿命有明显提升<sup>[3]</sup>。采用非本征 Au 掺杂原子代替本身作为深能级复合中心的汞空位，在相同载流子浓度下可明显提高碲镉汞 P 型材料少子寿命，从而抑制 n-on-p 型碲镉汞器件暗电流，改善器件性能。

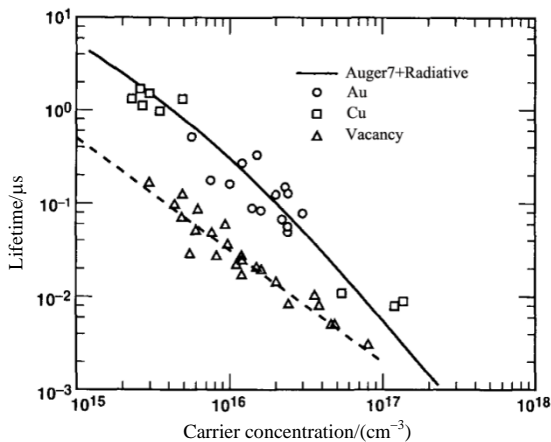


图 3 77 K 下 Au/Cu 掺杂与  $V_{\text{Hg}}$  型 P 型材料不同载流子浓度下的少子寿命

Fig.3 Measured and calculated lifetimes as a function of carrier concentration at 77 K

### 3.2 金掺杂对器件暗电流的影响

器件暗电流是反映探测器本质的特征参数，暗电流的大小决定了器件性能，包括扩散电流  $I_{\text{diff}}$ 、产生复合电流  $I_{\text{G-R}}$ 、直接隧道电流  $I_{\text{BBT}}$ 、缺陷辅助隧道电流  $I_{\text{TAT}}$ 、碰撞电离电流  $I_{\text{IMP}}$  和表面漏电流  $I_{\text{surf}}$  等类型。总的暗电流等于各项电流之和，如下式所示：

$$I_d = I_{\text{diff}} + I_{\text{G-R}} + I_{\text{BBT}} + I_{\text{TAT}} + I_{\text{IMP}} + I_{\text{surf}} \quad (4)$$

HgCdTe 器件各种暗电流中，扩散电流和产生-复合电流由材料电学性能及复合机制决定，隧道电流与

材料缺陷性能有关。扩散电流是 PN 结空间电荷区两端载流子在电场作用下发生扩散和漂移而形成的电流，是热平衡下由空间电荷区两端少子扩散长度内的载流子所形成的电流。n-on-p 型器件的饱和电流值可用肖克利公式表示：

$$I_{\text{sat}} = q \frac{n_i^2}{N_{\text{dop}}} \sqrt{\frac{k_B T}{q} \frac{\mu}{\tau}} \quad (5)$$

式中： $k_B$  为玻尔兹曼常数； $n_i$  为本征载流子浓度； $N_{\text{dop}}$  为受主/施主浓度； $\tau$  为少子寿命； $q$  为电子电荷值； $T$  为温度。

载流子浓度相同的情况下，碲镉汞器件的扩散电流与少子寿命成反比，因此提高材料的少子寿命可以降低器件扩散电流。如前文所述，P 型碲镉汞材料少子寿命的提高可采用掺杂方式抑制材料中深能级缺陷，Au 是提高 P 型材料少子寿命的有效掺杂原子，可降低器件扩散电流，从而提高 n-on-p 型碲镉汞器件暗电流控制。

美国 DRS 公司的 Shih 等<sup>[3]</sup>在 2003 年的研究论文中指出，降低碲镉汞 P 型吸收层材料中汞空位浓度可控制 n-on-p 型器件的暗电流，图 4 所示为不同掺杂工艺条件下材料暗电流随温度变化<sup>[3]</sup>，可以看出与 Hg 空位掺杂型标准工艺相比，采用非本征 Au 掺杂工艺控制碲镉汞材料中的汞空位浓度，可明显降低器件暗电流。DRS 公司<sup>[8]</sup>在 2004 年研究了 Au 及 Cu 掺杂对高温中波碲镉汞材料暗电流影响，对于载流子浓度  $p = 1.2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的 Au 掺杂器件，130 K 时的暗电流为  $5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ，相同载流子浓度及工作温度条件下，Cu 掺杂器件的暗电流为  $1 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。Au 掺杂器件的暗电流比仅为 Cu 掺杂的 1/20。因而与本征汞空位器件及非本征 Cu 掺杂碲镉汞器件相比，相同掺杂浓度条件下 Au 掺杂可明显改善 n-on-p 型器件暗电流，表现出明显的技术优势。

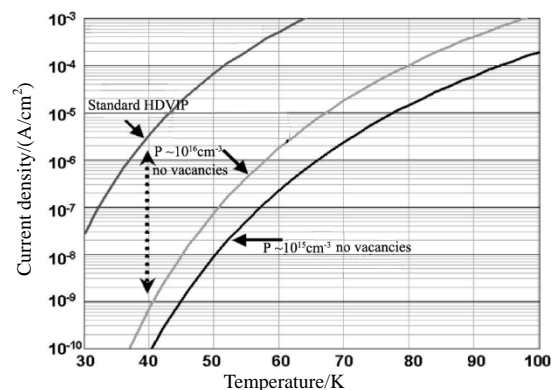


图 4 不同掺杂工艺中暗电流随温度变化曲线

Fig. 4 Dark current versus temperature for different technologies

### 3.3 金掺杂对碲镉汞器件性能影响

暗电流从本质上决定了器件的性能, 但从应用的角度出发, 我们更多关注器件的结阻抗, 结阻抗与漏电流之间的关系为:

$$R = \frac{\partial V}{\partial I} \quad (6)$$

由于 HgCdTe 光伏器件大多都工作在零偏压附近, 探测器的  $R_0$  常受到特别的关注。为消除结面积  $A$  的影响, 一般都采用  $R_0A$  作为衡量器件品质的参数指标。当少子扩散长度远大于吸收层厚度时,  $R_0A$  与少子寿命及暗电流关系如下式所示:

$$R_0A = \frac{k_B T N_{\text{dop}} \tau}{q^2 n_i^2 d} \quad (7)$$

$$R_0A = \frac{k_B T}{qI} \quad (8)$$

式中:  $d$  为薄膜厚度;  $I$  为暗电流。如(7)式所示, 在相同载流子浓度情况下, 通过掺杂提高少子寿命、降低暗电流可大幅度提高  $R_0A$ 。正如前文所述, 对于 P 型碲镉汞材料来说, Au 掺杂是提高材料少子寿命的有效方法。

西澳大利亚大学的 Nguyen 等<sup>[18]</sup>在 2003 年比较了长波非本征 Au 掺杂与本征汞空位掺杂碲镉汞器件的  $R_0A$  值。结果显示非本征 Au 掺杂器件的  $R_0A$  值远大于本征掺杂汞空位器件的  $R_0A$  值, 在 80 K 温度下 Au 掺杂器件的  $R_0A$  值为  $71 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 而汞空位本征掺杂器件的  $R_0A$  值只有  $16 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。此外, 美国 DRS 公司的 Souza 等<sup>[19]</sup>在 2003 年分别采用 Au、Cu 掺杂的 P 型材料为吸收层, 离子注入形成 N 型层制备出高密度垂直环孔器件, 研究了 Au、Cu 非本征掺杂对器件品质因

子  $R_0A$  值的影响。结果表明 Au 掺杂器件的  $R_0A$  值是 Cu 掺杂器件的  $R_0A$  值的 5 倍, 图 5 所示为 Au、Cu 掺杂中波 ( $\lambda_{(78\text{K})}=5 \mu\text{m}$ ) 器件的  $R_0A$  值随温度变化关系<sup>[19]</sup>。

对于 n-on-p 型碲镉汞器件来说, 与本征汞空位掺杂及非本征 Cu 掺杂相比, 采用 Au 掺杂 P 型材料作为吸收层可明显控制器件暗电流, 提高器件  $R_0A$  值, 从而提升 n-on-p 型器件性能。Au 掺杂 n-on-p 型碲镉汞器件研制以德国 AIM 公司为代表, 将 Au 掺杂作为提升传统汞空位 n-on-p 型器件性能最有效的方法, 是 AIM 公司高温器件研制的主要技术路线<sup>[9,20]</sup>。以中波器件为例, 与汞空位 n-on-p 型器件相比, Au 掺杂的 n-on-p 型器件在同等暗电流控制水平条件下, 可将工作温度从 120 K 提高到 140 K。此外通过控制 Au 掺杂浓度, 可进一步降低暗电流, 提升器件性能, 将中波碲镉汞器件工作温度提高到 160 K, 如图 6 所示<sup>[9]</sup>。目前 AIM 公司 Au 掺杂工艺已非常成熟, 工作温度为 160 K 的  $640 \times 512$  ( $15 \mu\text{m}$  pitch) 中波高温器件已经实现批量生产。

中国电科 11 所也对 Au 掺杂碲镉汞器件作了一定研究, 通过富 Te 液相外延生长的长波 Au 掺杂材料浓度为  $8.3 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ , 少子寿命可达 300 ns, 较汞空位 P 型材料少子寿命提高了一个数量级,  $R_0A$  较常规汞空位器件工艺提高了 5 倍<sup>[21]</sup>。昆明物理研究所针对 Au 掺杂 n-on-p 型器件工艺做了广泛研究, 液相外延生长的 Au 掺杂材料载流子浓度可稳定控制到  $1 \sim 3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ,  $R_0A$  值可达  $100 \Omega \cdot \text{cm}^2$  ( $\lambda_{(77\text{K})}=10.5 \mu\text{m}$ ), 研制出的长波  $256 \times 256$  焦平面器件有效像元率达 99.5%, NETD  $\leq 15 \text{mK}$ , 器件性能较本征汞空位型器件有明显的提升。

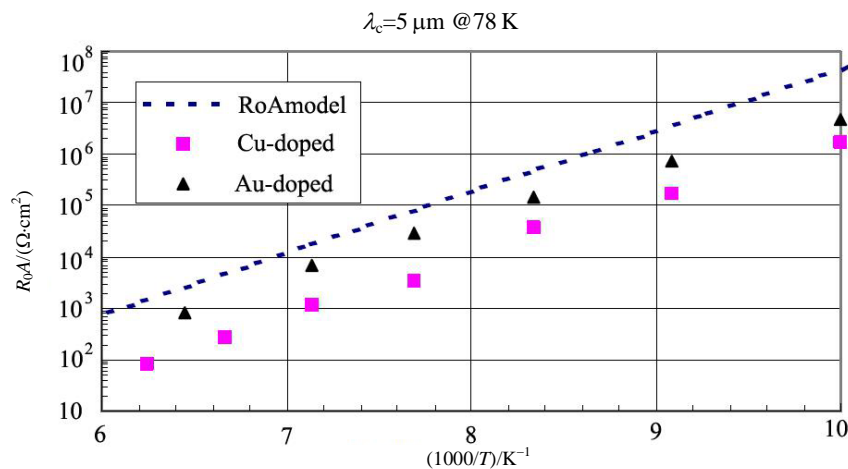


图 5 Au、Cu 掺杂中波器件的  $R_0A$  值随温度变化关系图  
Fig.5  $R_0A$  versus temperature for Au/Cu doped HgCdTe

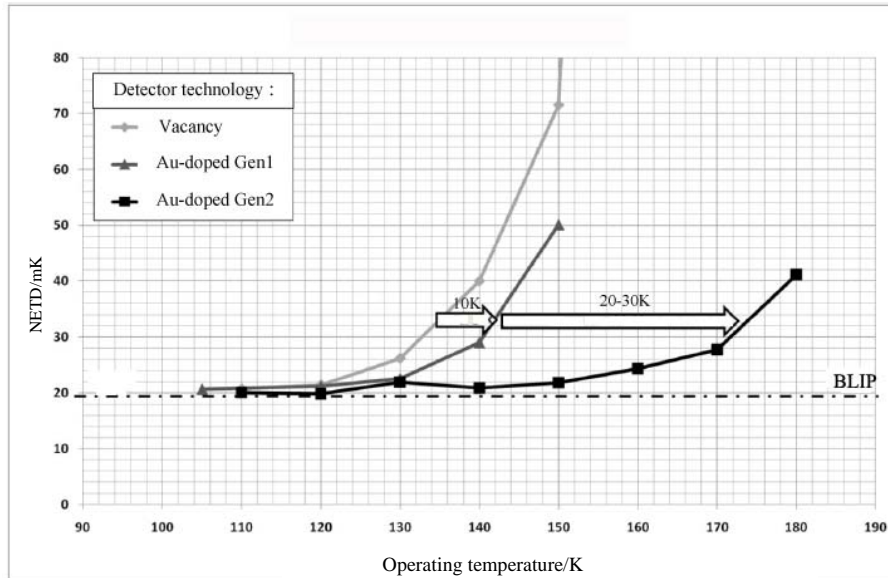


图 6 德国 AIM 公司中波高温器件技术路线

Fig. 6 The technical route of AIM for high operating temperature detector

虽然法国 Sofradir 公司研究 Au 掺杂碲镉汞器件时认为, Au 掺杂原子为快扩散杂质原子, 可能会对器件长期稳定性有一定影响<sup>[22]</sup>, 但昆明物理研究所在对金掺杂器件长期稳定性的研究中发现, 金掺杂器件在经过高 (+70℃) 低 (-40℃) 温存储、长期贮存 (超过 6 年) 后其性能无明显变化。

因而基于对 Au 掺杂碲镉汞器件性能整体分析, 并结合项目组在 Au 掺杂碲镉汞器件方面的研究, 分析认为, 与本征汞空位掺杂及非本征 Cu 掺杂相比, Au 掺杂可明显提高 P 型碲镉汞材料少子寿命, 降低器件暗电流, 是提升 n-on-p 型器件性能的有效方法。对灵敏度、分辨率等器件性能要求较高的实际应用需求中, 非本征金掺杂技术是长波/甚长波及高工作温度碲镉汞器件研制的一种有效的技术途径。

#### 4 总结

Au 是碲镉汞半导体材料中重要的 P 型掺杂原子, 不用后续激活处理即可直接占据金属格点, 呈现受主特性, 富 Te 液相外延工艺是实现 Au 掺杂最有效的技术。但 Au 掺杂原子在碲镉汞材料中是快扩散原子, 扩散系数较高, 因此在应用中需引入一定量的汞空位浓度, 以提高 Au 原子的稳定性。

采用 Au 掺杂原子代替作为深能级缺陷中心的汞空位后, P 型碲镉汞材料中深能级复合缺陷密度大大降低, 可明显提高 P 型碲镉汞材料少子寿命, 降低器件暗电流, 提升 n-on-p 型碲镉汞器件性能, 可作为高灵敏度、高分辨率等高性能 n-on-p 型长波/甚长波以及高工作温度碲镉汞器件研制的有效技术途径。

#### 参考文献:

- [1] Capper P. *Properties of Narrow Gap Cadmium-based Compounds*[M]. London: INSPEC, the institution of electrical engineers, 1994.
- [2] 俞谦荣, 杨建荣, 黄根生, 等. P 型碲镉汞液相外延材料 Ag 掺杂的研究[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(2): 91-94.  
YU Qianrong, YANG Jianrong, HUANG Gensheng, et al. Ag doping of p-type HgCdTe grown by LPE[J]. *J. Infrared Millim. Waves.*, 2002, 21(2): 91-94.
- [3] Shih H D, Kinch M A, Aqariden F. et al. Development of gold-doped Hg<sub>0.79</sub>Cd<sub>0.21</sub>Te for very-long-wavelength infrared detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82(23): 4157-4159.
- [4] Finkman E, Nemirovsky Y. Electrical properties of shallow levels in p-type HgCdTe[J]. *J. Appl. Phys.*, 1986, 59(4): 1205-1211
- [5] Selamet Y, Singh R, ZHAO J, et al. Gold diffusion in mercury cadmium telluride grown molecular beam epitaxy [C]//*Proc. of SPIE*, 2003, 5209: 67-74.
- [6] 王仍, 焦翠灵, 徐国庆, 等. Au 掺杂碲镉汞气相外延生长及电学性能 [J]. 红外与毫米波学报, 2015, 34(4): 432-436.  
WANG Reng, JIAO Cuiling, XU Guoqing, et al. Growth of Au-doped Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te epitaxial crystal and its Raman spectrum[J]. *J. Infrared Millim. Waves.*, 2015, 34(4): 432-436.
- [7] Granrand O, Mollard L, LARGERON C, et al. Study of LWIR and VLWIR focal plane array developments: comparison between p-on-n and different n-on-p technologies on LPE HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38(8): 1733-1740.
- [8] Shih H D, Kinch M A, Aqariden F, et al. Development of high-operating-temperature infrared detectors with gold-doped Hg<sub>0.70</sub>Cd<sub>0.30</sub>Te

- [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(8): 1263-1266.
- [9] Lutz H, Breiter R, Figgemeier H, et al. Improved high operating temperature MCT MWIR modules[C]//*Proc. Of SPIE*, 2014, **9070**: 90701D.
- [10] Triboulet R, Duy T N, Durand A, T H M. a breakthrough in  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  bulk metallurgy[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 1985, **3**(1): 95-99.
- [11] Kalisher M H. The behavior of doped  $Hg_{1-x}Cd_xTe$  epitaxy layers grown from Hg-rich melts[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1984, **70**: 365-372.
- [12] Mynbaev K D, Ivanov-Omskii V I. Doping of epitaxial layers and heterostructures based on HgCdTe[J]. *Semiconductors*, 2006, **40**(1): 1-21.
- [13] Ciani A J, Ogut S, Batra I P. Concentrations of native and gold defects in HgCdTe from first principles calculations[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, **33**(6): 737-741.
- [14] Antoszewski J, Musca C A, Dell J M, et al. Characterization of  $Hg_{0.3}Cd_{0.7}Te$  n-on p-type structures obtained by reactive ion etching induced p to n conversion[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, **29**(6): 837-840.
- [15] SUN Q Z, YANG J R, WEI Y F, et al. Characteristics of Au migration and concentration distributions in Au-doped HgCdTe LPE materials[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(8) : 2773-2778.
- [16] CHU M, Terterian S, WANG C C, et al. Au-doped HgCdTe for infrared detectors and focal plane arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2001, **4454**: 116-122.
- [17] CHEN M C, Colombo L, Dodge J A, et al. The minority carrier lifetime in doped and undoped p-type  $Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$  liquid phase epitaxy films [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1995, **24**(5): 539-544.
- [18] Nguyen T, Musca C A, Dell J M, et al. HgCdTe long-wavelength infrared photovoltaic detectors fabricated using plasma-induced junction formation technology[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, **32**(7): 615-621.
- [19] Souza A I D, Stapelbroek M G, Bryan E R, et al. HgCdTe HDVIP detectors and FPAs for strategic applications[C]//*Proc. Of SPIE*, 2003, **5074**: 146-156.
- [20] Breiter R, Figgemeier H, Luta H, et al. Improved MCT LWIR modules for demanding imaging applications[J]. *Proc. of SPIE*, 2015, **9451**: 945128.
- [21] 胡尚正, 郭明珠, 刘铭, 等. 液相外延原位 Au 掺杂碲镉汞薄膜材料的研究[J]. *激光与红外*, 2017, **47**(7): 838-841.  
HU Shangzheng, GUO Mingzhu, LIU Ming, et al. Research on Au-doped HgCdTe epilayer growth by LPE[J]. *Laser & Infrared*, 2017, **47**(7): 838-841.
- [22] Reibel Y, Rouvie A, Nedelcu A, et al. Large format, small pixel pitch and hot detectors at Sofradir[C]//*Proc. of SPIE*, 2013, **8896**: 88960B.