

〈材料与器件〉

分子束外延碲镉汞薄膜的砷掺杂技术

覃 钢, 李东升

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: V族元素 As 在碲镉汞中具有较小的扩散系数, 在非本征 p 型掺杂中得到广泛应用, 在 p-on-n 型高性能探测器及双色或多色探测器应用方面优势明显。对分子束外延掺 As 碲镉汞薄膜的几种生长技术的基本原理进行了简单介绍, 并对各方法存在的优缺点进行了对比分析; 同时对 As 杂质在碲镉汞材料中的掺杂形态、杂质激活退火工艺及杂质激活率等进行了总结分析。对 MBE As 掺杂在第三代多层膜结构器件的应用方面提出了建议。

关键词: 分子束外延; 碲镉汞; As 掺杂; 退火; 杂质激活

中图分类号: TN304

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2015)10-0858-06

The As-doping Technique of HgCdTe Thin Film by MBE

QIN Gang, LI Dong-sheng

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: The group V element arsenic is applied widely in extrinsic p-type doping HgCdTe for its low diffusion coefficient, and it has obvious superiority on the application of p-on-n high performance detectors and dual-band or multi-band detectors. This paper introduced the basic theory of As-doped HgCdTe thin film growth techniques by MBE, as well as the advantages and disadvantages of each were compared. It also analyzed the impurity doping form, the annealing technique of impurity activation and the activation rate. The suggestion has been proposed, which is about application in the third generation device that demonstrates a multilayer with As-doped by MBE.

Key words: MBE, $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$, As-doping, annealing, impurity activation

0 引言

1959 年英国人 Lawson 发明了碲镉汞($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$)红外材料^[1-5]。碲镉汞是一种具有闪锌矿结构、禁带宽度连续可调、直接带隙的三元化合物半导体。通过改变其组分 x 值, 可使其禁带宽度满足 $1\sim 3\ \mu\text{m}$ 、 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 三个大气窗口的红外探测。目前, 碲镉汞红外探测器正朝着大面阵、多波段、高性能、低成本方向的第三代红外器件发展^[1-7]。

碲镉汞 p 型可分为本征的 Hg 空位 p 型和非本征掺杂 p 型。其中 Hg 空位在禁带中存在受主型浅能级、深能级和陷阱能级, 深能级为产生-复合重心, 陷阱能级为辅助隧穿中心, 造成 Hg 空位 p 型器件存在较大

暗电流。因此采用 Hg 空位 p 型材料作为吸收层的器件很难得到较高的 R_0A 值^[1-11]。同时, 材料中 Hg 空位浓度的控制主要通过调节退火时 Hg 压大小来实现, 多层外延膜中不同层的不同浓度难以实现, 限制了其在双色或多色探测等多层薄膜结构器件中的应用^[7-9]。

非本征掺杂因其优异的性能、可控的掺杂浓度以及适合多层薄膜结构不同掺杂浓度应用等方面的优势成为目前研究的重点。碲镉汞非本征掺杂 p 型可采用 I 族元素占据金属位 (As_{Hg}) 或 V 族元素占据碲位 (As_{Te}) 实现。I 族元素能直接占据金属位形成 p 型掺杂, 但是其较大的扩散系数不利于 p-n 结陡峭界面的形成, 限制了其在碲镉汞器件中的应用。V 族元素特

收稿日期: 2014-12-25; 修订日期: 2015-09-11.

作者简介: 覃钢 (1987-), 男, 湖北建始人, 硕士, 工程师, 主要从事半导体光电材料与器件方面的研究工作。Email: qingang0125@163.com.

基金项目: 核高基项目。

别是 As 在碲镉汞材料中扩散系数较小, 可以形成比较稳定的掺杂结构, 有利于 p-n 结的良好界面的形成。同时, 相对于 Hg 空位 p 型, As 掺杂 p 型材料的少子寿命提升了约一个数量级, 有利于提升红外探测器的探测率^[7, 9, 11-18]。

碲镉汞 As 掺杂可采用离子注入、杂质高温热扩散^[10, 15]或原位掺杂等技术实现, 原位掺杂可采用液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE)、金属有机物化学气相沉积 (Metal Organic Chemical Vapor Deposition, MOCVD) 或分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 等技术。其中 MBE 技术具有超高真空环境、低温生长、陡峭界面或组分梯度的多层膜结构生长及可控的原位掺杂等优点, 是目前公认的下一代碲镉汞红外焦平面最有希望的“柔性”制造技术之一。1991 年, Huges 实验室的 O.K.Wu 首次报道了采用(111)晶向 CdTe 衬底生长的 As 掺杂碲镉汞薄膜, 生长温度 170~180℃, 采用 Cd₃As₂ 源作为掺杂源, 富 Hg 条件下退火后在 0.28<x<0.35 组分呈现 p 型^[19]。自此之后 As 掺杂技术得到了广泛的研究。MBE 原位 As 掺杂因其在原位 p-on-n 技术、双色或多色探测技术方面展现出的优势成为目前的研究重点。

本文分析对比了在分子束外延碲镉汞薄膜原位 As 掺杂材料的生长技术、杂质掺杂形态及杂质激活退火工艺, 对开展 MBE 碲镉汞原位 As 掺杂、原位 p-on-n、双色或多色探测等技术的研究具有一定的参考意义。

1 MBE 碲镉汞 As 掺杂材料的生长技术

目前 MBE 原位 As 掺杂主要采用高纯的 As 源, 掺杂方法主要有以下几种。

1.1 常规 (Conventional) 方法

在碲镉汞材料的生长过程中保持 As 束源炉快门一直打开直接将 As 掺入, As 束源炉可采用普通单温区束源炉或双温区阀控高温裂解炉。

采用单温区束源炉, As 束流主要为 As₄ 分子, 束流的大小通过调节束源炉加热温度来实现。As 源温度、衬底表面温度和 Hg 束流大小等共同决定了 As 掺杂的效果。其最大问题在于 As₄ 对衬底表面温度十分敏感, 随着温度的升高, 其表面粘附系数快速下降。保持 As 源加热温度不变的情况下, 衬底温度变化 10℃, 对应掺杂浓度变化一个数量级。降低材料的生长温度 (170℃), 使得 MBE 的生长模式由富镉转为富碲, 可以有效提高 As 的表面粘附系数。但是较低

的生长温度不利于碲镉汞薄膜的晶体质量, 由于较低温度下形成材料表面 Hg 的富集从而在材料中出现孪晶, 同时位错密度增大^[20-21]。As 掺杂浓度的控制可通过控制束源炉的加热温度调节 As 束流的大小来实现。研究发现在衬底表面生长温度和材料组分相同的情况下掺杂浓度与束源炉加热温度有如图 1 所示的线性关系^[22]。

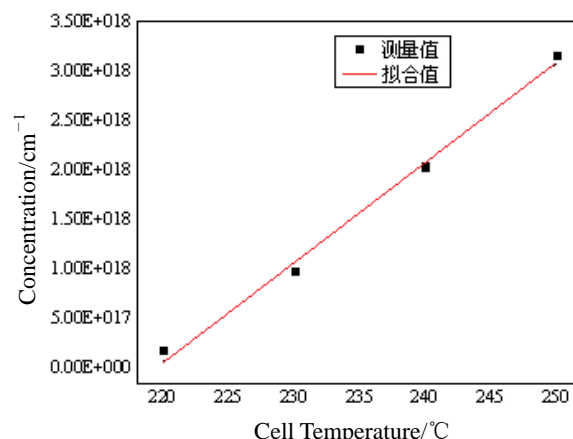


图 1 束源炉加热温度与 As 掺杂浓度曲线

Fig.1 The curve between As concentration and temperature of effusion cell

采用双温区裂解炉 (如图 2 所示) 可将 As₄ 通过高温裂解为 As₂ 或 As 原子, 从而有效提高 As 的表面粘附系数, 使得在较低束流下 As 可以有效地结合进入碲镉汞材料中, 降低了 MBE 真空系统污染的风险, 而且使得碲镉汞材料的生长温度保持在最佳生长窗口 (180~185℃) 时也具有较好的掺杂效率, 这对保持材料良好的晶体质量是有利的^[22]。同时, As 掺杂浓度的控制, 可通过调节裂解炉的阀孔径大小实现。

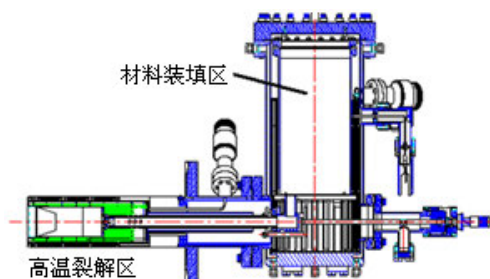


图 2 V 族阀控高温裂解炉

Fig.2 The group V cracker effusion cell with valve controller

采用裂解炉进行 As 掺杂的缺点在于裂解炉口的高温 (>600℃) 对衬底表面有强烈的热辐射, 影响衬底表面的温度稳定性, 对薄膜晶体质量产生不利的影响。因此需要严格控制材料生长开始时衬底的表面温度。虽然裂解炉由于其辐射对 As 在碲镉汞材料中结合存在影响, 但是在 As 的激活退火工艺研究中并

没有发现对束源炉的依赖关系,说明采用裂解炉时 As 在碲镉汞中的结合形态同普通单温区束源炉相同,即仍以 As_4 的形式结合进入碲镉汞晶格中^[22]。

美国 UIC、Rockwell、DRS、EPIR 和上海技物所等国内外机构采用常规方法进行 MBE 碲镉汞原位 As 掺杂取得了较好的实验成果。

1.2 HgTe/CdTe 超晶格结构的掺杂方法

1997 年,美国 Rockwell 报道了采用 HgTe/CdTe 超晶格结构的方法进行 As 掺杂的技术,其基本原理在于 As 在 HgCdTe 和 CdTe 两种材料的生长过程中具有不同的表面粘附系数。在 CdTe 生长中,As 具有较大的表面粘附系数,更容易结合进入材料中,在 Cd 束流稳定的情况下,As 容易进入 Te 位从而形成 p 型掺杂。因此采用 HgTe/CdTe 超晶格结构使 As 结合进入 CdTe 层的方法能够获得很好的 As 掺杂效果。超晶格结构的生长周期约为 $50\sim 180\text{\AA}$ (如图 3 所示),生长结束后对样品高温退火,通过组分互扩散 (IMP) 形成均匀的掺 As 碲镉汞外延层^[23-24]。由于 CdTe 薄膜的最佳生长温区为 $280\pm 5^\circ\text{C}$,为了保证良好的晶体质量,HgTe/CdTe 超晶格材料的生长温度控制在 280°C 附近。同时通过计算调节超晶格周期的生长厚度并精确控制 As 束流的大小从而实现 As 浓度的控制。

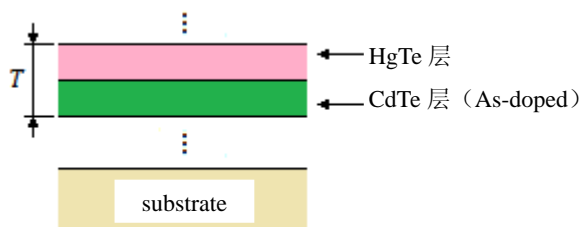


图3 HgTe/CdTe 超晶格方法 As 掺杂示意图

Fig.3 The As doping schematic of HgTe/CdTe superlattice method

采用 HgTe/CdTe 超晶格结构的方法进行碲镉汞 As 掺杂的缺点在于超晶格结构生长和控制的复杂性。在生长过程中,需要同步控制各束源炉的快门开关来实现超晶格结构的生长,各束源炉口对衬底表面不同的温度辐射造成衬底表面温度稳定性较差,材料的缺陷控制较难。同时,由于 As 具有较高的离化能,需要高温退火在材料中形成均匀分布。同时,由于周期性交替生长 HgTe 和 CdTe 进行掺杂,材料的组分和掺杂浓度的精确控制变得困难。Rockwell 采用这种方法获得了较好的 As 掺杂碲镉汞材料^[23-24]。

1.3 Planar 掺杂方法

美国 UIC 首次在文献中报道了 Planar 掺杂方法,

也称为 Deleta (δ) 掺杂方法^[25],其具体过程为在碲镉汞材料的生长过程中,控制 As 束源炉快门呈周期性打开,在 As 快门打开的这个时间段内,关闭 Te 源和 CdTe 源的快门,同时保持 Hg 源快门在生长过程中一直保持打开状态,从而在材料生长表面形成富 Hg 状态,确保 As 与外延层表面的 Hg 反应形成 As-Hg 键,使 As 直接占据 Te 位。如图 4 所示,每一个碲镉汞材料的生长周期厚度约为 $30\sim 200\text{\AA}$,保证后续退火后 As 杂质扩散分布的均匀性,As 束源炉快门的打开时间持续几秒,As 束流控制在 $10^{15}\text{atm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 量级^[25-26]。采用 Planar 掺杂方法,As 杂质浓度的控制主要通过控制快门的开关过程持续时间与生长周期的厚度来实现,As 浓度的精确控制较为困难。

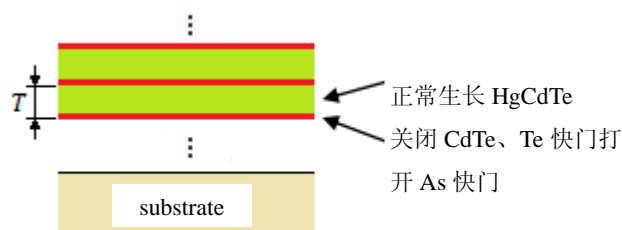


图4 Planar 掺杂方法示意图

Fig.4 The schematic of planar doping method

采用这种方法,大多数的 As 在生长过程中可直接激活,不经过退火,部分样品即可呈现 p 型导电,获得的空穴浓度约为 10^{16}cm^{-3} 量级。材料经 250°C 恒温退火后即可实现 As 的 100% 激活,说明大多数的 As 生长过程直接激活。这种方法的缺点在于材料生长过程中断的必要性,在生长中断过程中同时引入相关的缺陷,如富 Hg 状态形成孪晶。

相比常规的 As 掺杂方法,采用超晶格方法和 planar 方法进行 As 掺杂,由于 As 杂质周期性掺入碲镉汞材料的缘故,As 掺杂的浓度控制相对较难。且 As 在碲镉汞中需要通过扩散分布,因此其纵向分布均匀性相对较差。且由于快门的周期性开关,造成材料表面温度稳定性较差,材料中容易引入大量的缺陷。

除了上述这些方法外,2009 年,CEA 所属的 LETI 报道了采用射频等离子体 (RF-plasma) 束源炉成功进行了 MBE 原位 As 掺杂,实验采用高纯 As,采用 13.56MHz 频率,使得 As 束流主要为 As 原子。采用这种方法的优点在于避免了 As 裂解炉口对衬底表面强烈的温度辐射,同时也具有较好的掺杂效率,材料经过 370°C 高温激活退火后得到了 100% 的激活率^[26]。另外,采用 Cd_3As_2 材料作为掺杂源也获得了较好的掺杂效果,样品经过 250°C 消除 Hg 空位退火后即可实

现 p 型受主, 其最大的缺点在于最高只有 60% 的 As 杂质激活率, 意味着在碲镉汞外延层存在着很强的补偿行为, 从而限制了其应用^[11], 且采用 Cd_3As_2 源, 由于 Cd 的引入, 使得材料的组分精确控制变得较难。

通过以上几种不同的 MBE 原位 As 掺杂方法的原理以及优缺点的分析对比, 我们认为对于在第三代高性能的具有多层的复杂结构的红外器件如原位 p-on-n、双色多色、APD 及 HOT 等的应用方面采用双温区高温裂解炉的常规 As 掺杂方法相对而言更具可控性, 生长工艺相对简洁, 同时也能兼具较好的掺杂效率和薄膜材料的晶体质量, 而采用射频等离子束源炉进行 As 掺杂由于束源炉炉口对衬底表面无高温辐射且束流为单原子 As 的特点使其具有良好的发展前景。

2 材料中 As 的掺杂形态与电学激活

2.1 As 在碲镉汞中的掺杂形态

对于采用常规方法在 MBE 生长的碲镉汞中 As 的掺杂形态, 根据实验结果研究分析认为与掺杂浓度相关^[17]。

研究发现在 As 杂质的激活过程中, 存在一个激活浓度上限: $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。低于这一浓度时, As 杂质可达到 100% 激活, 当超过这一浓度时, 激活率随浓度的增加而快速下降。分析认为可能是受 As 在碲镉汞中的溶解度限制 (Solubility limit)^[27]。研究发现不论是采用普通单温区束源炉 (As_4 束流) 还是双温区的高温裂解炉 (As_2 束流) 进行掺杂, 其掺杂激活行为没有什么差别。当浓度较低时, As 在碲镉汞中以四聚物 (Tetramer) 的形式存在, 当浓度较高时 ($> 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 逐渐形成 As 的四聚物团簇 (Tetramer cluster) 结构, 从而导致杂质激活率的快速下降。四聚物团簇结构的大量存在会破坏晶格结构的周期性, 对晶体质量有较大的影响。

采用 HgTe/CdTe 超晶格结构方法进行掺杂, As 掺入 CdTe 层中, As 容易占据 Te 位而形成 p 型掺杂。Planar 方法进行掺杂, 由于在富 Hg 表面进行 As 掺杂而形成 As-Hg 键, As 在材料中占据 Te 位, 呈现自然激活状态。采用 Cd_3As_2 源掺杂时 As 也可直接占据 Te 位。而采用射频等离子束源炉进行掺杂并不能使 As 直接占据 Te 位, As 在碲镉汞中的形态与常规掺杂方法相似。

采用不同的掺杂方法以及 As 在碲镉汞中不同的掺杂浓度时使得 As 在碲镉汞中呈现不同的掺杂形态,

从而对激活退火工艺和杂质的电学激活率产生重要的影响。

关于 As 杂质在碲镉汞中的掺杂形态与机理, 国内外许多科研机构做了很多理论方面的研究。例如技物所采用基于多粒子系统薛定谔方程的第一性原理计算了 As 在碲镉汞原生片中的稳定存在形式。

美国 SRI 国际应用物理科学实验室的 Berding M A 等人通过理论计算认为 As 掺杂生长在低 Hg 压下是高度补偿的, As_{Hg} 的浓度大于 As_{Te} 的浓度, 表明 As 更容易占据 Hg 位而形成施主。当 Hg 压接近 10 atm 或更大时, As_{Te} 的浓度大于 As_{Hg} 的浓度。在较低 As 浓度时, 材料为带有 As_{Hg} 施主杂质补偿的 Hg 空位 p 型半导体; 较高 As 浓度时, As_{Hg} 为施主的 n 型半导体^[28]。

Ballet. P 等人发表了基于 X 射线吸收精细结构分析对热退火激活的 As 杂质转移的新看法, 认为 P 型激活退火前, 掺入的 As 原子有施主型复合物 As_2Te_3 和受主型复合物 As_{Hg} 两种结构, 比例几乎相同^[29]。

2.2 As 杂质的电学激活

As 在碲镉汞材料中具有两性掺杂行为^[29-31], 即可占据金属位形成 p 型掺杂又可占据 Te 位形成 n 性掺杂。MBE 为富 Te 生长模式, As 原子很难直接占据 Te 位成为 p 型受主, 因此需要通过高温激活退火, 使 As 占据 Te 位形成 p 型受主 (如图 5)^[31-35]。

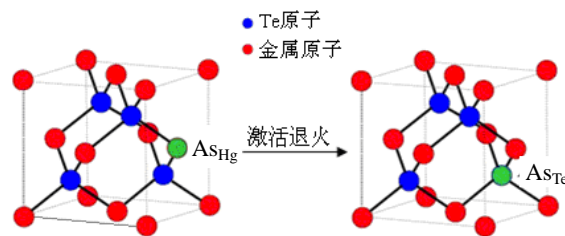


图5 As 杂质的激活示意图

Fig.5 The schematic of As impurity exciting

由于 As 掺杂方法的不同, Planar 等方法可实现 As 杂质的自然激活, 因此只需 250℃ 的低温消除 Hg 空位退火即可。下面 As 杂质的激活退火主要介绍了基于常规 As 掺杂样品的退火及分析。退火基本都采用两步法, 第一步高温激活退火, 使 As 占据 Te 位形成 As_{Te} 受主; 第二步 Hg 饱和气氛下消除 Hg 空位退火, 与常规的 N 型退火工艺相同。主要有双温区闭管和开管两种退火工艺。

1) 闭管退火工艺

闭管退火工艺如图 6 所示, 在一个封闭的石英管中, 样品与 Hg 源处于不同的位置, 两者的加热温度也不相同。Hg 蒸汽压的大小可通过调整 Hg 源加热温度

来调节, 通过控制样品端的温度来调节退火温度。在退火的过程中确保 Hg 源温度低于样品温度, 从而确保样品表面不会出现 Hg 的积累造成样品表面损坏^[35]。

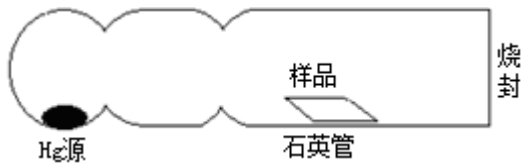


图6 双温区富汞封管退火工艺示意图

Fig.6 The schematic of double zone Hg-saturate annealing with tube sealing

这种工艺方法的缺点在于石英管的清洗和封管很麻烦, 随样品尺寸的增加, 封管难度增大, 同时石英管的一次性使用造成的高成本也不利于大规模生产化。

2) 开管退火工艺

鉴于受到闭管退火工艺的一些缺点限制, 为实现规模化生产, 美国 Rockwell 公司在生产线上采用了开管式退火工艺。即在垂直腔体中, 通过控制汞回流的方法, 在石英腔体的底部实现稳定的 Hg 压。与封管退火工艺相比, 开管退火的杂质激活率相当或略好一些。国内外许多科研机构就开管退火工艺做了很多研究。中科院上海技物所也做了开管退火方面的研究, 如图 7 所示为技物所研制的通 H₂ 垂直开管热处理装置示意图^[36-38]。

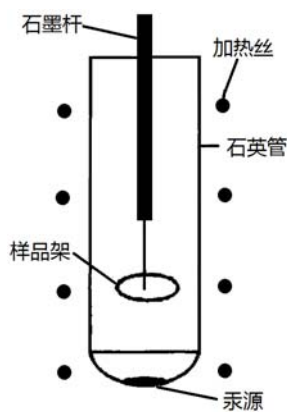


图7 通 H₂ 垂直开管热处理装置示意图

Fig.7 The schematic of vertical opened cell annealing with H₂

3) As 杂质激活相关因素

研究发现, As 杂质的激活率与材料的生长工艺、杂质激活退火工艺和 As 杂质浓度等因素相关。

UIC 研究发现当 As 浓度 $N_{As} \geq 1 \sim 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, 激活率随 As 浓度的增加而快速下降; 300℃退火温度时激活率小于 450℃退火温度时的激活率。分析认为未激活的 As 形成于 MBE 生长过程中呈中性的

As 的四聚物团簇结构, 300℃退火的热能不能使 As 四聚物团簇的价键断裂。450℃的退火提供足够的能量能使 As 的四聚物团簇的价键断裂, 从而分离的 As 原子能够占据 Te 位形成受主。但是由于受到 As 在碲镉汞中溶解度的限制, As_{Te} 在浓度 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时达到饱和^[36]。

Rockwell 的 D. Edwall 等认为 As 激活率与退火条件及样品组分有关, 并且随 Hg 压的升高而升高, 同时与退火温度和退火时间相关; 组分增加到 0.6 时, 激活率降低^[20]。

采用 Hg 氛围下两步法退火, 第一步高温激活会在材料中形成大量 Hg 空位; Hg 空位、外界 Hg 压和样品中 As 原子周围的游离 Hg 在 As→Te 过程中起主要作用, 具体过程为: 周围的 Hg 替换 As 原子占据金属格点, As 替换 Te 形成受主杂质; Te 原子替换 Hg 空位形成反位缺陷, As 再占据 Te 位, 随后占据金属格点的 Te 因为外界的 Hg 而转移出金属格点^[36-38]。具体过程如图 8 所示。

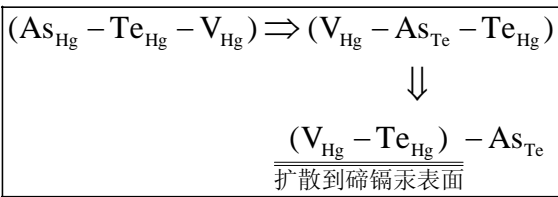


图8 Hg 空位在 As 激活中的催化作用示意图

Fig.8 The schematic of V_{Hg} catalyzing for As activation

综上所述可知: ①As 杂质的激活需要足够高的温度下才能实现, 且激活温度与浓度有一定关联; ②As 杂质激活率与掺杂浓度相关, 当浓度高于 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的溶解上限时形成 As₄ 团簇结构导致 As 杂质激活率迅速下降; ③退火时材料中的 Hg 空位对 As 杂质激活起到催化作用^[38]。

3 小结

掺 As 碲镉汞是一种制备高性能红外探测器的关键材料, 由于 As 在碲镉汞材料中的复杂的掺杂形态表现出非常复杂的行为。目前, 关于 As 掺杂方法的理论计算与实验取得了很多成果, 本文在大量文献调研的基础上对目前国内外基于 MBE 方法的原位 As 掺杂技术及杂质激活相关问题进行了总结。

参考文献:

[1] 褚君浩. 窄禁带半导体物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
[2] 杨健荣. 碲镉汞材料物理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
[3] 何力, 杨定江, 倪国强, 等. 先进焦平面技术导论[M]. 北京: 国防工

- 业出版社, 2011.
- [4] Robin F. C. Farrow. *Molecular Beam Epitaxy - Application to Key Materials*[M]. Noyes Publications, 1995.
- [5] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择[J]. *红外技术*, 2013, **35**(1): 1-8.
- [6] 巫艳, 吴俊, 魏青竹, 等. 碲镉汞 As 掺杂技术研究[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(11): 1023-1025.
- [7] 王忆峰, 刘黎明, 等. 碲镉汞材料非本征掺杂研究的发展[J]. *红外*, **33**(1): 2012.
- [8] 叶振华, 陈奕宇, 张鹏. 碲镉汞红外探测器的前沿技术综述[J]. *红外*, 2014, **35**(2): 1-8.
- [9] 张小华, 褚君浩. 掺砷碲镉汞的研究进展[J]. *红外*, 2012, **33**(4): 1-6.
- [10] F. T. J. Smith, P. Lamarre. HgCdTe LWIR p-on-n photodiodes formed by arsenic diffusion from the vapor phase[J]. *Proc. of SPIE*, 2010, 7780.
- [11] 叶振华, 吴俊, 胡晓宁, 等. 碲镉汞 p-on-n 长波异质结探测器的研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(6): 423-426.
- [12] 吴俊, 徐非凡, 巫艳, 等. 分子束外延 HgCdTe 薄膜 As 掺杂 p 型激活研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(2): 81-83.
- [13] JE Hails, SJC Irvine, DJ Cole-Hamilton, et al. As doping in (Hg,Cd)Te: An Alternative Point of View[J]. *Journal of electrical materials*, 2008, **37**(9): 1291-1302.
- [14] Keasler C A, Moresco M, D'Orsogna D, et al. 3D Numerical Analysis of As-diffused HgCdTe Planar Pixel Arrays[C]//*Proc. of SPIE*, 2010.
- [15] Itsuno A M, Emelie P Y, Phillips J D, et al. Arsenic Diffusion Study in HgCdTe for Low p-Type Doping in Auger-Suppressed Photodiodes[J]. *Journal of electrical materials*, 2010, **39**(7): 945-951.
- [16] 吴俊, 巫艳, 陈路, 等. As 在 HgCdTe 分子束外延中的表面粘附系数[J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**(5): 347-350.
- [17] Chandra D, Weirauch D F, Schaake H F, et al. Growth of Very Low Arsenic-Doped HgCdTe[J]. *Journal of electrical materials*, 2006, **34**(6): 963-968.
- [18] Lee T S, Garland J, Grein C H, et al. Correlation of Arsenic Incorporation and Its Electrical Activation in MBE HgCdTe[J]. *Journal of electrical materials*, 2000, **29**(6): 869-872.
- [19] Wu O K, Kamath G S, Radford W A, et al. Chemical doping of HgCdTe by molecular - beam epitaxy[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A Vacuum Surfaces & Films*, 1990, **8**(2): 1034-1038.
- [20] D. Edwall, E. Piquette, J. Ellsworth, et al. Molecular beam epitaxy growth of high-quantity arsenic-doped HgCdTe[J]. *Journal of electronic materials*, 2004, **33**(6): 752-757.
- [21] A. C. Chen, M. Zandian, D. D. Edwall, et al. MBE Growth and Characterization of In Situ Arsenic Doped HgCdTe[J]. *Journal of electronic materials*, 1998, **27**(6): 595-599.
- [22] 覃钢, 李东升, 李艳辉, 等. 分子束外延镉基碲镉汞薄膜原位砷掺杂研究[J]. *红外技术*, 2015, **37**(2): 105-109.
- [23] P. S. Wijewarnasuriya, S. Sivananthan. Arsenic incorporation in HgCdTe grown by molecular beam epitaxy[J]. *Applied Physics Letters*, 1998, **72**(14): 1694-1697.
- [24] Wijewarnasuriya P S, Yoo S S, Faurie J P, et al. P-Type doping with arsenic in (211)B HgCdTe grown by MBE[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1997, **175/176**: 647-652.
- [25] Han M S, Kang T W, Kim T W. Structural and electrical properties of the arsenic planar-doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epilayers grown on p- $\text{Cd}_{0.96}\text{Zn}_{0.04}\text{Te}$ substrates[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1999, **200**: 101-105.
- [26] M. A. Berding, A. Sher. Arsenic Incorporation during MBE growth of HgCdTe[J]. *Journal of electrical materials*, 1999, **28**(6): 799-804.
- [27] K. Glowinski, G. Zgorka, M. Kozyna, et al. Doping of (211)B mercury cadmium telluride[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1996, **159**: 1136-1140.
- [28] Gravrand O, Ballet P, Baylet J, et al. HgCdTe p-on-n Focal-Plane Array Fabrication Using Arsenic Incorporation During MBE Growth[J]. *Journal of electrical materials*, 2009, **38**(8): 1684-1689.
- [29] Ballet P, Polge B, Biquard X, et al. Extended X-ray Absorption Fine Structure Investigation of Arsenic in HgCdTe: the Effect of the Activation Anneal [J]. *J Electron Mater*, 2009, **38**(8): 1726 - 1732.
- [30] M. A. Berding and A. Sher. Amphoteric behavior of arsenic in HgCdTe[J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **74**(5): 685-687.
- [31] Izhnii I I, Dvoretzky S A, Mynbaev K D, et al. Arsenic incorporation in MBE-grown HgCdTe studied with the use of ion milling[J]. *Phys. Status solid*, 2010, **7**(6): 1618-1620.
- [32] James W. Gariland, Christoph Grein, Sivalingam Sivananthan. Arsenic p-Doping of HgCdTe Grown by Molecular Beam Epitaxy (MBE): A Solved Problem?[J]. *Journal of electrical materials*, 2013, **42**(11): 3331-3336.
- [33] Sivananthan S, Wijewarnasuriya P S, Aqariden F, et al. Mode of Arsenic Incorporation in HgCdTe Grown by MBE[J]. *Journal of electrical materials*, 1997, **26**(6): 621-624.
- [34] Piquette E C, Edwall D D, Lee D L, et al. Precise arsenic doping of HgCdTe by MBE and effects on compositional interdiffusion[J]. *Journal of electrical materials*, 2006, **35**(6): 1346-1349.
- [35] 徐非凡. As 掺杂 MBE 生长 HgCdTe 材料的 p 型退火及其评价[D]. 上海大学硕士学位论文, 2004.
- [36] Selamet Y, Badano G, Grein C H, et al. Electrical activation and electrical properties of arsenic doped $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epilayers grown by MBE[J]. *Proceeding of SPIE*, 2001, **4454**: 71-77.
- [37] 张传杰, 杨建荣, 吴俊, 等. 碲镉汞富汞热处理技术的研究[C]//第二届全国先进焦平面技术研讨会, 2006: 1026-1028.
- [38] 吴俊, 魏青竹, 巫艳, 等. Hg 在 As 激活退火中的作用[J]. *红外与激光工程*, 2006, **35**: 168-171.