

碲镉汞器件接触孔的 ICP 刻蚀工艺研究

李 震, 胡小燕, 史春伟, 朱西安

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要:介绍了 ICP 等离子体刻蚀技术的工作原理和主要工艺参数, 阐述了碲镉汞器件接触孔 ICP 刻蚀工艺的特点和技术要求。通过一系列实验和分析, 最终优化并确定了 ICP 刻蚀碲镉汞材料接触孔的工艺参数, 获得了良好的刻蚀形貌和器件性能。

关键词:ICP; 接触孔; 干法刻蚀; 碲镉汞; 低损伤; 刻蚀形貌

中图分类号:TN305.92

文献标识码:A

A Study of MCT Contact Hole Etching by ICP Process

LI Zhen, HU Xiao-yan, SHI Chun-wei, ZHU Xi-an

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

Abstract: This paper gives a brief introduction to the ICP etching process & equipment. All the parameters which influence the etching profile of contact hole are detailedly discussed. The final etching parameters are given after a series of experiments.

Key words: ICP; contact hole; dry etch; MCT; low damage; profile

1 引 言

碲镉汞红外焦平面光电二极管接触孔刻蚀是探测器芯片制备的关键技术之一, 碲镉汞材料本身的特殊性使得器件的接触孔刻蚀工艺必须实现超低损伤。常规的接触孔刻蚀工艺有湿法腐蚀和干法刻蚀两大类型, 传统的湿法腐蚀工艺由于存在着钻蚀严重、腐蚀深度重复性差、均匀性不好等缺点, 难以适应较细线宽的加工, 不适合二代和三代碲镉汞红外焦平面探测器器件的接触孔刻蚀工艺。新型的 ICP 干法刻蚀具有超低损伤、加工精度高、线条陡直度好、工艺稳定可控等诸多优点, 在碲镉汞焦平面探测器的接触孔刻蚀工艺中得到了较好应用。

2 ICP 干法刻蚀工艺与设备

目前, 碲镉汞器件接触孔的干法刻蚀工艺采用的主要方法有 IBE, ECR, RIE 和 ICP 几种。

IBE (ion beam etch, 离子束刻蚀) 具有较好的方

向性和较高的刻蚀速率, 但是因为其离子能量较大, 会造成碲镉汞材料表面处造成轰击损伤, 很少在碲镉汞材料的刻蚀工艺中使用。

ECR (electron cyclotron resonance, 电子回旋共振等离子体刻蚀) 采用了将产生等离子体的功率源和下电极自偏压功率源相互独立的设计, 利用电子回旋共振的原理, 在反应室中产生高密度的等离子体, 可以达到较高的刻蚀速率和较好的刻蚀形貌。但由于该类设备是靠电子回旋共振来加热等离子体中的电子来维持等离子体, 电子温度很高, 且浓度较大, 加上所使用的微波信号本身对基片也有一定的加热作用, 使 ECR 对碲镉汞芯片有很明显的加热效应, 使其温度急剧升高造成材料热损伤。^[1]

作者简介:李 震(1982 -), 男, 吉林大学毕业, 主要从事红外焦平面探测器器件工艺研究。E-mail: leesir21@yahoo. com. cn

收稿日期:2008-06-02

RIE (reactive ion etch, 反应离子刻蚀) 技术目前也广泛应用于碲镉汞材料的刻蚀。RIE 利用电容耦合方式, 在设备的上下电极板间产生等离子体, 同时射频信号会在下电极处产生一定的自偏压, 使离子和活性基团在自偏压作用下加速并轰向样品表面, 来达到刻蚀的作用。RIE 是一种较早期的技术, 存在较多缺点。RIE 的等离子体发生只靠一个单一的电容耦合装置, 难以得到高浓度的等离子体, 刻蚀速率较低。单一的电容耦合结构无法实现下电极自偏压和等离子体密度的单独控制。要达到较高的等离子体密度, 必须增大下电极 RF 功率, 但自偏压会随之上升, 对碲镉汞器件造成轰击损伤。并且, 由于 RIE 工作气压较高, 刻蚀形貌较难控制。

ICP (inductive coupled plasma, 电感耦合等离子体刻蚀) 技术是在 RIE 的基础上发展起来的。采用两个独立射频源, 将等离子体产生的功率源和下电极的自偏压功率源相互独立。一个射频源与环绕在反应腔室周围的电感耦合线圈相连 (ICP Power), 作为等离子体产生装置, 单独控制等离子体的密度。另一个独立的射频源与反应室下端的下电极相连 (RF Power), 通过改变射频源功率来单独控制设备下电极处的自偏压大小。ICP 较 RIE 最大的优点就是能使等离子体密度和下电极自偏压能得到独立控制。因此能在下电极自偏压很低的同时维持高密度的等离子体, 即在很低的轰击损伤下实现较高的刻蚀速率。这种特点使得 ICP 技术能够很好地应用于碲镉汞器件的接触孔刻蚀工艺中, 在能使刻蚀对材料的损伤降至最低的前提下维持较高的刻蚀速率。ICP 的工作气压通常在 $0.5 \sim 10\text{Pa}$, 远低于 RIE 的工作气压, 因此能在工艺中能有效降低气体分子散射, 实现较好的刻蚀形貌和图形侧壁陡直度。ICP 刻蚀设备示意图如图 1 所示。

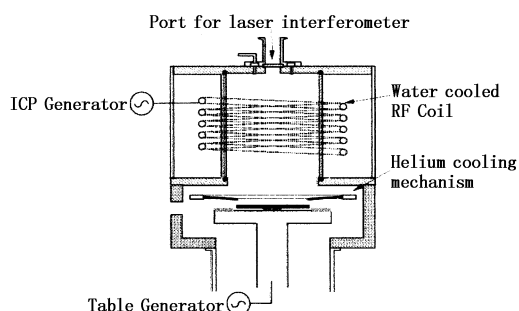


图1 ICP刻蚀设备示意图

3 碲镉汞器件接触孔的 ICP 干法刻蚀

接触孔刻蚀工艺是碲镉汞器件的重要工艺之一, 是在器件已经形成 P-N 结的基础上, 用干法刻蚀或湿法腐蚀的方法将 P-N 结上方一定区域的钝化层刻透, 从而使器件电极可以从接触孔中引出。碲镉汞器件接触孔结构示意图如图 2 所示。

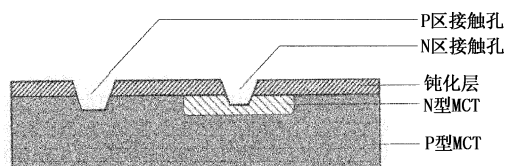


图2 碲镉汞器件接触孔结构示意图

碲镉汞 (HgCdTe) 是一种 II-VI 族化合物半导体, 是目前公认较好的红外探测器材料之一, 能够通过调节材料中 Hg 的化学计量比, 实现对不同波段红外信号的探测。由于汞 (Hg) 元素的价键较弱, 在碲镉汞中很不稳定, 对外部粒子轰击和温度较为敏感。通常, 在器件的 P 型区域, 一定能量的粒子轰击到材料表面时, 会使材料表层的一些 Hg 原子价键断裂发生 Hg 移位, 造成表面反型。另外, 当温度较高时, 也会造成材料中的 Hg 原子价键发生断裂, 使一定的 Hg 元素从表面逸出形成表面反型。

器件接触孔的刻蚀是实现电极欧姆接触的前提, 如果在器件刻蚀工艺中材料受到损伤发生表面反型, 将在探测器 P-N 结处产生一个反向的寄生二极管, 破坏器件性能。因此, 碲镉汞器件的接触孔刻蚀工艺需要在实现超低损伤、较低工艺温度的前提下, 达到较好的刻蚀形貌。

3.1 刻蚀工艺的主要参数

ICP 刻蚀碲镉汞器件接触孔工艺的主要参数包括工作气压 (Working Pressure)、自偏压 (Self Bias)、ICP 功率 (ICP Power)、下电极射频功率 (RF Power)、基片温度 (Substrate Temperature) 以及反应气体的种类和比例。^[2]

3.2 各个工艺参数对接触孔刻蚀结果的影响

(1) 工作气压 (Working Pressure) 对刻蚀结果的影响

工作气压对刻蚀形貌的影响较为显著。在刻蚀过程中反应气体不断与材料进行反应, 该过程不断有生成物生成。当工作气压较高时, 反应生成物不

能及时从刻蚀图形表面排出,就会聚积在图形表面附近,甚至会重新沉积在图形上。由于生成物一般不能与反应气体继续发生反应,聚积在图形表面会阻止刻蚀过程的继续进行,影响刻蚀形貌和速率。另外,反应生成物一般为聚合物,导电性较差,残留在器件接触孔的内壁会形成一定的寄生电阻,破坏器件性能。工作气压过低时,刻蚀过程对接触孔底面的物理轰击作用较为明显,刻蚀形貌较差。分别在不同工作气压下进行碲镉汞器件的接触孔刻蚀,结果如图 3 所示。

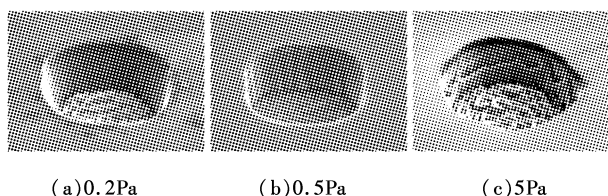


图3 工作气压分别为 0.2Pa,0.5Pa 和 5Pa 时的刻蚀结果

工作气压为 0.2Pa 时,反应产物能及时排出,接触孔侧壁较为洁净,但由于物理轰击作用显著,底部形貌不好。当工作气压为 0.5Pa 时,得到了较好的刻蚀形貌。当工作气压增至 5Pa 时,由于反应产物不能及时排出,接触孔内产生了较多的生成物堆积。

(2) 下电极射频功率(RF Power)对刻蚀结果的影响

下电极射频功率大小主要决定刻蚀工艺的自偏压,即决定离子和活性基团到达基片表面时的能量大小,是评价刻蚀工艺对材料损伤的重要参数。自偏压的作用有两个:一是直接为反应过程的物理轰击作用提供动能,二是为活性基团和化学反应过程提供一定的能量。

自偏压较高时,物理轰击作用较强,孔的侧壁通常较陡直,但一般底部形貌较差,损伤较大;自偏压较低时,化学作用为主,底部形貌通常较好,但侧壁的陡直程度不佳,一定程度下会形成钻蚀,损伤较低。

图 4 所示为不同下电极功率下得到的接触孔刻蚀结果。由图可见,功率 70W 时的结果较好;50W 时自偏压过低,刻蚀速率较慢,且活性基团到达基片表面时的能量太低,化学反应进行得不够充分,形貌较差。功率 300W 时,物理轰击过强,导致光刻胶严重变形,造成图形失真,同时形貌也较差。大功率下

也容易对碲镉汞材料表面造成损伤。

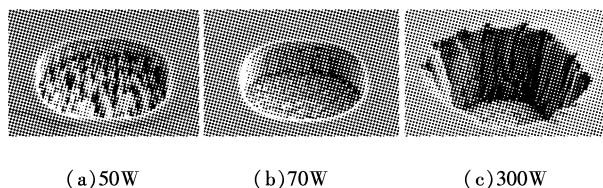


图4 不同下电极 RF 功率下的刻蚀结果

(3) ICP 功率(ICP Power)对刻蚀结果的影响

环绕反应腔室的电感耦合线圈上的 ICP 功率大小主要决定反应室中的等离子体密度。较高的 ICP 功率下离子体密度较高,刻蚀速率加快;较低 ICP 功率下的刻蚀速率也较低。分别采用 ICP 功率 200W, 300W 和 500W 进行刻蚀,得到的刻蚀速率之比约为 1:1.5:2.5,与 ICP 功率大致成正比。

(4) 基片温度(Substrate Temperature)对刻蚀结果的影响

工艺中能够影响基片温度的因素很多,包括下电极功率、ICP 功率、下电极背冷的 He 压等。基片温度是 ICP 刻蚀工艺中的重要参数,对刻蚀速率和形貌的影响显著。较低的样品温度下反应产物不易挥发,容易造成产物在接触孔内再次沉积。样品温度稍高时,能促进反应产物快速挥发,有效防止产物的再沉积。碲镉汞器件对温度的承受能力有限,因此一般要将工艺温度控制在 80℃ 以下。对不同温度下的接触孔刻蚀结果进行比较后,发现当温度控制在 45~55℃ 时的图形形貌较好。图 5 所示为温度较低时的刻蚀结果,可看到由于反应产物难以迅速挥发,大量残留在接触孔的侧壁和底部。

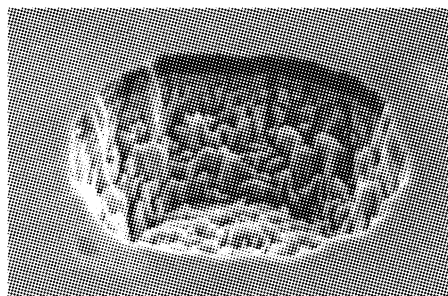


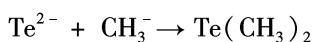
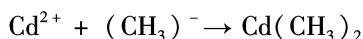
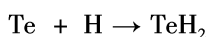
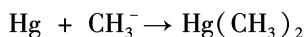
图5 基片温度较低时生成物大量残留在接触孔内

(5) 反应气体种类和比例对刻蚀结果的影响

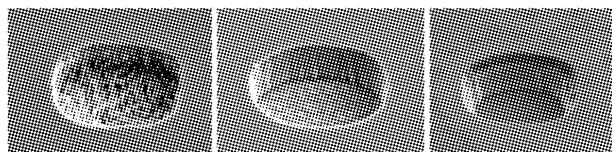
碲镉汞材料刻蚀的工艺气体一般采用能与碲镉汞材料发生反应并且形成可挥发产物的甲基气体和

氢气的混合物,通常为 CH_4 和 H_2 ,同时加入一定的 Ar 气起到稀释气体和稳定等离子体的作用。

在反应过程中, CH_4 和 H_2 发生裂解而产生甲基(CH_3^-)、氢原子(H)和氢离子(H^+),它们与碲、镉、汞三种元素发生反应,分别生成不同的可挥发产物:



在不同的工艺气体比例下,刻蚀形貌和刻蚀速率有较大不同,如图6所示。实验结果表明,增加 Ar 的比例会明显降低刻蚀速率。Ar 离子通常只起到物理轰击作用,所以一般在 Ar 比例较大时刻蚀形貌较差。 H^+ 和 H 与碲镉汞材料的化学反应速率相对较低;而甲烷裂解后产生的甲基(CH_3^-)与碲镉汞的反应较剧烈。可以通过调节 CH_4 和 H_2 的比例来改变刻蚀速率和形貌,增大甲烷的比例时,能够提高反应速率并改善接触孔的底部形貌,但甲烷较多时,反应产物容易大量残留在接触孔的侧壁上。实验可得出:甲烷比例较高时能得到非常平坦的底部形貌,但接触孔的侧壁会有明显的生成物堆积;甲烷比例较低时的接触孔的侧壁较为洁净,底部形貌略为粗糙。



(a) (b) (c)

图6 不同气体比例下的刻蚀结果

(a) $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4 = 30/10/1$; (b) $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4 = 10/10/1$;

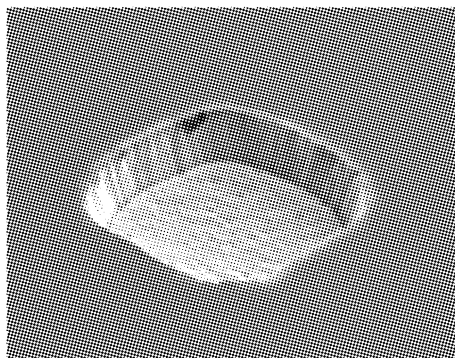
(c) $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4 = 2/2/1$

从实验结果可以看出,当气体比例为 $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4 = 30/10/1$ 时,Ar 气比例较大,刻蚀形貌较差;当比例为 $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4 = 2/2/1$ 时,随着甲烷增多,接触孔底部形貌非常平滑,但侧壁的反应产物堆积也非常明显;在比例为 $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4 = 10/10/1$ 时的刻

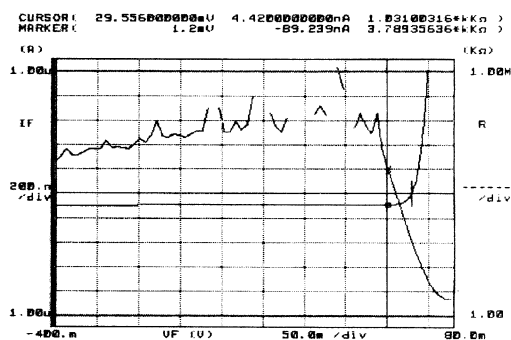
蚀形貌较为适中,接触孔内无明显生成物堆积,且底面较为平整。

4 结论

通过对 ICP 接触孔刻蚀的所有参数分析并进行试验,得到了较合适的碲镉汞器件接触孔刻蚀工艺条件:采用工作气压为 $0.5 \sim 1\text{Pa}$ 、自偏压 $80 \sim 150\text{V}$ 、下电极 RF 功率 $50 \sim 80\text{W}$ 、ICP 功率 $200 \sim 300\text{W}$ 、样品温度 $45 \sim 55^\circ\text{C}$ 、反应气体比例 $\text{Ar}/\text{H}_2/\text{CH}_4 = 10/10/1$,得到了较好的刻蚀形貌和合适的刻蚀速率。进一步完成后续工艺后对器件的电学性能进行测试,得到了很好的器件 $I-V$ 特性曲线,如图7所示。



(a)



(b)

图7 较为理想的器件接触孔刻蚀结果(a)及器件的 $I-V$ 特性曲线(b)

参考文献:

- [1] A J Stoltz, J B Varesi, J D Benson. Comparing ICP and ECR Etching of HgCdTe, CdZnTe and CdTe[J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(8): 1007-1012.
- [2] E Laffosse, J Baylet, J P Chamonal, et al. Inductively coupled plasma etching of HgCdTe using a CH_4 based mixture[J]. Journal of Electronic Materials, 2005, 34(6): 740-745.