

· 综 述 ·

## 碲镉汞探测器制备湿法和干法工艺的研究进展

王忆锋, 唐利斌

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

**摘 要:** 由于材料性质比较敏感, 碲镉汞探测器的制备一直是一项具有挑战性的任务. 用湿法化学刻蚀可以成功地制备图形特征尺寸宽度在  $50\sim 60\ \mu\text{m}$  的一代器件. 对于二代和三代器件, 例如高密度焦平面器件、雪崩光电二极管、双色探测器及多光谱探测器等, 干法工艺特别是高密度等离子体刻蚀可以减小这些器件所需要的光敏元间距, 显著提高填充因子. 有一定深度并且较窄的沟道要求具有高纵横比, 同时还要求侧边平滑、均匀性高, 这些需要推动了干法刻蚀的发展. 主要通过对 2000 年以来部分英语期刊文献的归纳分析, 介绍了碲镉汞器件制备中湿法和干法处理工艺特别是干法工艺的研究进展. 刻蚀机制的深入理解涉及化学、物理和电学等多种学科. 对于大面积器件的制备, 为了获得较好的可生产性和均匀性, 需要优化刻蚀过程.

**关键词:** 碲镉汞; 红外光子探测器; 湿法刻蚀; 干法刻蚀; 离子注入

中图分类号: TN305

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)03-0001-08

## Developments of Wet and Dry Process Techniques for HgCdTe Detector Fabrication

WANG Yi-feng, TANG Li-bin

(Kunming Institute of Physics, Kunming Yunan 650223, China)

**Abstract:** Fabrication of mercury cadmium telluride (HgCdTe) devices has always been a challenging task due to sensitive nature of the material. I-generation devices requiring  $50\sim 60\ \mu\text{m}$  wide patterning feature in size can be successfully done using wet chemical etching. Dry processing, particularly high density plasma etching is capable for reducing pixel pitch and dramatically improving fill factors needed for II-generation and III-generation devices such as high-density focal plane arrays, avalanche photodiodes, two-colour detectors and multi-spectral detectors. The deep, narrow trenches are required to be with high aspect ratios, smooth sides and high uniformity, all the requirements promoted the development of dry etching. By summarizing and analyzing the related papers published in English periodicals since 2000, the developments of wet and dry processing techniques used for HgCdTe device fabrication are described with emphasis on dry etching techniques. An in-depth understanding of etching mechanisms requires knowledge of diverse fields of chemistry, physics, and electrical sciences. To fabricate a device with large areas, the etching process needs to be optimized for good reproducibility and uniformity.

**Key words:** mercury cadmium telluride; infrared photon detector; wet etching; dry etching; ion implant

碲镉汞( $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ,  $x$  为材料组分, 以下简称 MCT) 是最重要的红外光电探测器之一. MCT 探测器的制备可以在“湿”环境或“干”环境中进行, 相

应的工艺称为湿法工艺和干法工艺. 湿法工艺主要是指化学湿法刻蚀; 干法工艺则包括干法刻蚀和离子注入. 主要介绍了近年来部分英语期刊文献中报

收稿日期: 2009-04-14

作者简介: 王忆锋(1963-), 男, 湖南零陵人, 北京理工大学计算机系工学士, 高级工程师. 曾在美国内布拉斯加大学林肯分校计算机系做国家公派访问学者. 目前主要从事器件仿真研究.

道的有关工艺的研究进展。

## 1 MCT 器件制备工艺的分类

与文中内容相关的 MCT 制备工艺可粗略分类如图 1 所示。干法工艺包括离子注入和干法刻蚀。离子注入主要用于光伏器件中 pn 结的成结。刻蚀是 MCT 探测器制备的关键工序之一。MCT 探测层形成后,要通过光刻和刻蚀勾画出探测器单元的轮廓,并将其与周围材料隔离开。

刻蚀可以分为湿法刻蚀和干法刻蚀。湿法刻蚀使用液体刻蚀剂,晶片通常浸没在刻蚀溶液中,化学反应是湿法刻蚀的主要机制。干法刻蚀则将化学反

应与物理过程融为一体,它利用的是等离子体中的气体刻蚀剂,包括射频平行板(RF parallel plate)、高密度(例如, $10^{11} \sim 10^{12}$  ions/cm<sup>3</sup>)等离子体(high density plasma etching, HDPE)、反应离子刻蚀(reactive ion etching, RIE)等;离子束辅助刻蚀包括离子束研磨(ion beam milling, IBM)、反应离子束(reactive ion beam)等。根据所用等离子体源的不同,HDPE 又可以进一步分为电子回旋共振(electron cyclotron resonance, ECR)、电感耦合等离子体(inductively coupled plasma, ICP)、低能电子增强刻蚀(low energy electron enhanced etching, LE4)等。根据有关工艺特点和刻蚀性质,图 2 给出了不同刻蚀体系的变化趋势。不同干法刻蚀对应的压力范围如图 3 所示。

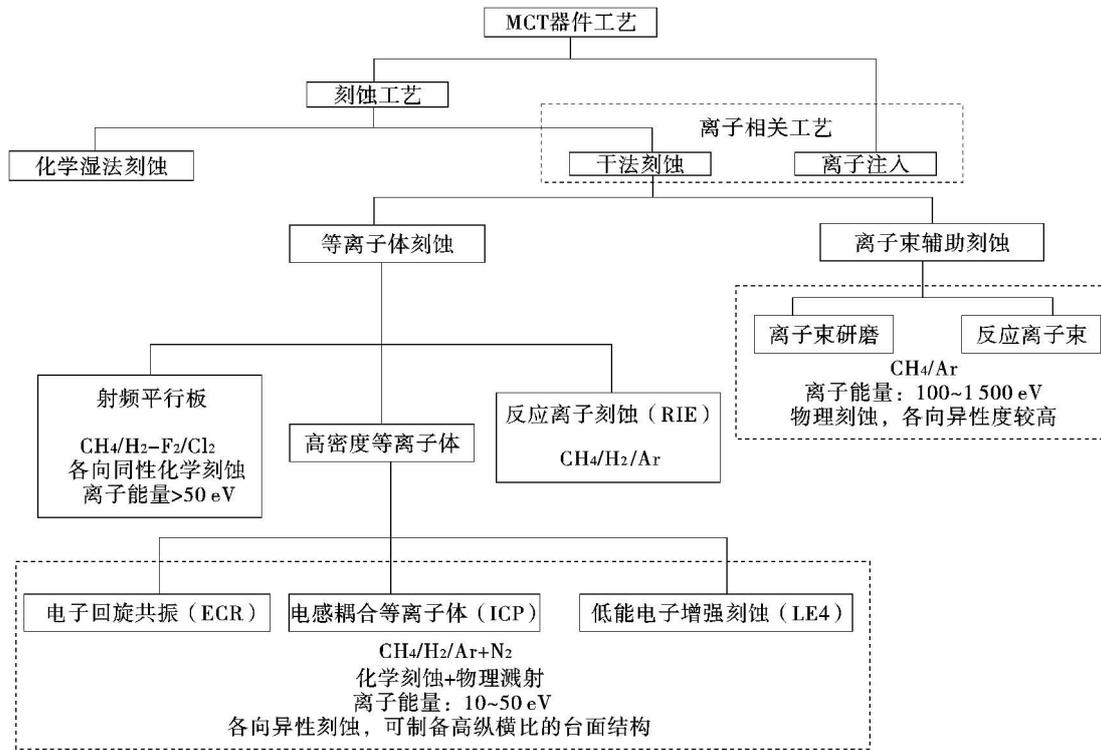


图 1 MCT 湿法工艺和干法工艺分类示意

一代 MCT 器件的几何尺寸在  $50 \sim 60 \mu\text{m}$  之间,可用湿法化学刻蚀方法制备。与干法刻蚀相比,湿法刻蚀的优点在于它对晶片造成的结构损伤和电学损伤最小。文献[1]报道了分别用 60DI(去离子水) + 10HBr + 1H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (体积比)、1% 溴/甲醇和 2% 溴/乳酸等 3 种刻蚀剂处理 MCT 后,空气对 n 型 MCT 表面的影响。文献[2]报道,研究了溴/乙二醇溶液刻蚀 MCT 的表面质量,发现去离子(DI)水可

以将新鲜刻蚀的 MCT 表面有效地保持几个小时,其原因可归于浸没在去离子水中的刻蚀 MCT 样品表面的氧化生长被阻止。文献[3]报道,将不同的湿法刻蚀剂分为 2 类:在第一类刻蚀剂中,溴是刻蚀溶液中的直接反应剂;在第二类刻蚀剂中,溴是不同反应剂中生成的副产物。发现在用第二类刻蚀剂处理的 n 型 MCT 样品中,少数载流子寿命降低,表面复合速率增加。探测器成型后要通过金属化形成探测

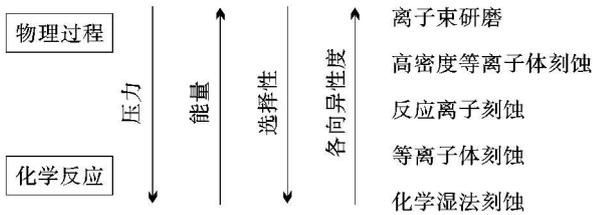


图2 不同刻蚀体系的变化趋势



图3 不同干法刻蚀腔体的压力范围

器的电极接触.对于二极管接触刻蚀来说,湿法刻蚀和干法刻蚀结合使用可以显著提高二极管产量<sup>[4]</sup>.湿法工艺处理的器件在响应率、探测率和噪声等方面要优于干法等离子体刻蚀工艺处理的器件<sup>[5]</sup>,但是湿法工艺难以满足小尺寸、高密度器件制备的需要.

干法工艺在IV族和III-V族半导体器件中的应用已十分成熟.这些工艺移植应用于MCT始于20世纪80年代末、90年代初,它具有下列优点<sup>[5]</sup>:

- ①可以通过离子注入、离子束研磨(IBM)和RIE、ECR/RIE等工艺,制备n-on-p或p-on-n结;
- ②可以通过研磨成孔制备高密度垂直集成的光电二极管(high density vertically integrated photodiode, HDVIP)和雪崩二极管(avalanche photodiode, APD);
- ③利用IBM或RIE,实现n-to-n<sup>+</sup>的表面导电性质变换;
- ④利用RIE、IBM、ECR、ICP、LE4等,实现高密度探测器阵列成型所需要的台面刻蚀;
- ⑤可用微波/射频等离子体或甚低能Ar离子研磨清洗表面/电极.

## 2 离子注入

LPE生长的MCT薄膜多为强p型;MBE生长的MCT薄膜一般为n型;一般要用掺杂或退火等方法来控制或转变薄膜的电学特性,例如使其变成弱p型或n型(即所谓反型),才能制作pn结.反型

可以通过离子注入掺进杂质实现.掺杂元素有Al、Ar、As、Au、B、Be、Cu、In、Sb等.如果在晶体点阵的间隙位置挤进一个同类的原子,则形成一个间隙原子.MCT离子注入过程中Hg间隙原子的形成强烈依赖于注入元素择优取向的晶格位置<sup>[6]</sup>.

事实上,离子注入是使用最多的pn结成结工艺,它可以满足浅结、低温和精确控制结深的要求,是制备n-on-p型MCT光伏器件的成熟方法.通常情况下离子注入可以在室温下进行,这是其最主要的优点.退火(加热半导体)是离子注入工艺中的一个环节,它具有消除晶格损伤、激活掺杂杂质的作用.例如,为了实现p型掺杂,As杂质必须在Te的位置<sup>[7]</sup>.这就要求在富阳离子条件下以较高温度退火.在空位掺杂的p型材料中注入Al、Be、In和B离子,可以形成n型区.文献[8]报道,将类受主(acceptor-like)的Hg空位密度控制在 $10^{16} \sim 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的载流子浓度范围内,可以获得期望的p型能级<sup>[8]</sup>.文献[9]报道,对空位掺杂的p型MCT体材料以200 keV、 $1 \times 10^{14} \text{ ions/cm}^2$ 的Be注入,然后在150℃的氮气氛中做不同时间的退火,实现了p-to-n反型.有研究者认为注入后的退火可以改善长波红外(LWIR)光电二极管的性能<sup>[10]</sup>.但文献[11]也指出,没有发现注入后的退火处理是获得高性能器件所必需的,特别是对于较低的剂量以及对于短波红外(SWIR)和中波红外(MWIR)器件.

离子注入对MCT造成的辐照损伤具有温度依赖性,并且随着注入物质及注入/退火条件而变化.文献[12,13]介绍了二价Ar<sup>2+</sup>离子的不同注入量( $10^{13}$ ,  $10^{14}$ 和 $10^{15} \text{ ions/cm}^2$ )对MCT造成的结构损伤.卢瑟福背散射谱(RBS)和透射电镜(TEM)观察显示,损伤分布呈现双峰<sup>[12]</sup>;在大剂量离子注入下,缺陷呈现双区分布,在第一个区主要是空位位错环和位错线,在第二个区主要是小位错环<sup>[13]</sup>.文献[14,15]研究了外延层和衬底的结构缺陷以及Hg扩散对于MCT注入成结的影响.文献[16]报道了Al<sup>2+</sup>(320 keV,  $3 \times 10^{11} \sim 3 \times 10^{14} \text{ ions/cm}^2$ )注入产生的扩散结构缺陷对于p型MCT有效载流子浓度的影响.

注入后退火可以去除辐照损伤.文献[17]研究了YAG:Nd<sup>3+</sup>激光退火对于MCT成结的影响,辐照时间为250 μs或40 ns,激光束的能量强度低于表面熔化的阈值.文献[18]测量了用200 fs的激光脉冲在MCT上打孔(drilling)、使表面熔化所需要的

能量密度阈值. 用飞秒激光可以在空位掺杂 p 型 MCT 材料上打出具有 pn 结特征的微孔<sup>[19]</sup>, 表明激光打孔有潜力成为制备 MCT 光电二极管阵列器件的一种新途径.

### 3 刻蚀工艺性能的描述

刻蚀速率是单位时间内去除的材料厚度. 在实际生产过程中, 通常希望有较高的刻蚀速率. 但是刻蚀速率越高, 工艺控制的难度也越大. 一般期望的刻蚀速率为每分钟数百至数千埃. ECR 中产生的 N 原子与 H 原子反应形成  $\text{NH}_3$ , 使 H 的比例降低, 刻蚀速率增加所需要的甲基自由基浓度提高<sup>[20]</sup>. 在某些形成挥发性刻蚀产物的气体-固体体系中, 同步正离子轰击可以极大地提高刻蚀速率. 文献[21]研究了各种 ICP 工艺参数对于 MCT 刻蚀速率的影响. ICP 刻蚀工艺可以获得 200 nm/min 的刻蚀速率. 文献[25]研究了甚长波 (VLWIR) MCT 探测器单元的设计尺寸和干法刻蚀工艺参数与最终尺寸及探测器性能之间的关系.

刻蚀速率依赖于入射在晶片单位面积上的离子能量大小. 一方面离子能量不能太高, 另一方面又要保持合理的刻蚀速率, 解决这一矛盾的途径就是增加离子束流量, 即使用高密度 (例如,  $10^{11} \sim 10^{12}$  ions/cm<sup>3</sup>) 等离子体 (high-density plasma, HDP) 系统, 如 ECR、ICP、LE4 等, 文献[23]研究了 HDP 对于几个原子层范围内的 MCT 表面的影响, 指出高密度 Ar/H 等离子体组合刻蚀可以获得排列有序、接近化学计量比的表面.

对于批量刻蚀来说, 不同晶片刻蚀速率变化的百分比称为刻蚀速率均匀性. 在 6 英寸直径的面积

上, ICP 的刻蚀均匀性优于 5%<sup>[24]</sup>. 刻蚀速率的非均匀性使湿法刻蚀的控制较为困难, 难以满足二代器件可控刻蚀的要求. 湿法刻蚀目前主要用于 MCT 表面处理<sup>[5]</sup>.

与刻蚀均匀性相关的另一类问题是负荷效应 (loading effect), 其中又可以进一步分为宏 (观) 负荷效应和微 (观) 负荷效应<sup>[26]</sup>. 宏负荷效应是指腔室内晶片较多、或者晶片上待刻蚀的区域较大时, 导致的刻蚀速率降低的现象. 微负荷效应是指刻蚀速率在晶片表面小距离内变化的现象. 文献[22]研究了用 ECR 刻蚀 II-VI 族材料时的宏负荷效应, 指出负荷可能是光刻胶性能变坏的主要原因.

刻蚀方向性是指不同方向 (通常是指垂直方向和水平方向, 或者纵向和横向) 相对刻蚀速率的度量. 与横向刻蚀速率直接相关的一个参数是光刻胶掩膜开口下方算起, 在水平方向上去除刻蚀量的大小, 称为膜下横向刻蚀距离 (undercut distance)<sup>[27]</sup>, 或者称为刻蚀偏离 (etch bias)<sup>[26]</sup>, 如图 4a 中所示, 其中  $d$  为刻蚀厚度或深度,  $b$  为刻蚀偏离. 刻蚀偏离量的大小可以用各向异性度  $A_{aniso}$  来描述.  $A_{aniso}$  定义为

$$A_{aniso} = 1 - \frac{b}{d} = 1 - \frac{r_L t}{r_V t} = 1 - \frac{r_L}{r_V} \quad (1)$$

式中,  $r_L$  为横向刻蚀速率,  $r_V$  为纵向刻蚀速率,  $t$  为刻蚀时间.  $A_{aniso} = 0$  表明是各向同性 (isotropic) 刻蚀, 这时  $r_L = r_V$ , 横向刻蚀距离与纵向刻蚀距离相等, 掩膜下的刻蚀断面趋近于一个 1/4 圆周形状, 如图 4a 所示; 当横向刻蚀速率  $r_L = 0$  时,  $A_{aniso} = 1$ , 为完全各向异性 (anisotropic) 刻蚀的情况, 如图 4c 所示, 这时没有横向刻蚀发生;  $0 < A_{aniso} < 1$  属一般情况下的各向异性刻蚀, 如图 4b 所示, 其中  $r_L < r_V$ . 有方向性的离子轰击与反应离子结合, 可以刻蚀出各向异性度很高的细小结构特征.

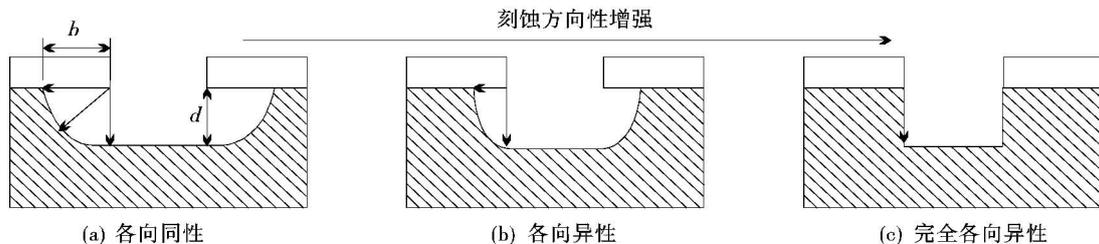


图 4 不同方向性的刻蚀截面

文献[20]报道, ECR 的刻蚀偏离和各向异性度主要由光刻胶的特征腐蚀率确定. 文献[28]报道, 用不

同的溴/溴化氢/乙二醇配方刻蚀 MCT 台面结构. 详细研究了各种组合下的刻蚀速率和各向异性度. 在常

规刻蚀液中加入乙二醇时的各向异性度大于0.5,并且刻蚀速率可控.大多数湿法化学刻蚀剂都是各向同性刻蚀<sup>[26]</sup>,这一特点使其刻蚀偏离量较大.

刻蚀选择性是刻蚀过程中不同材料的刻蚀速率的比值.如掩膜和下部衬底的刻蚀速率接近于零,而膜层的刻蚀速率较高,那么膜层相对于掩膜和衬底的刻蚀选择性就较大,这通常是所希望的情况.如果掩膜或衬底的刻蚀速率较显著,那么刻蚀选择性就较差.刻蚀选择性或刻蚀速率之比的合理取值通常认为是在25~50之间.要同时获得较好的选择性和方向性有时很困难<sup>[26]</sup>.刻蚀方向性通常与刻蚀的物理效应例如离子轰击和溅射等有关.一般而言,如果一个刻蚀过程中物理机制起主导作用,那么刻蚀方向性将较强,而选择性较弱;反之,如果是化学机制占主导,则选择性较强,方向性较弱<sup>[26]</sup>.

沟道纵横比(aspect ratio) $A_r$ 定义为

$$A_r = \frac{D}{W_e} \quad (2)$$

式中, $W_e$ 为刻蚀沟道上端宽度; $D$ 为刻蚀沟道深度.对于给定时间,刻蚀深度 $D$ 是宽度 $W_e$ 的函数<sup>[25]</sup>.文献[29]报道,在空位掺杂p型MCT中使用RIE( $H_2/CH_4$ ),将刻蚀深度作为 $H_2$ 和 $CH_4$ 分压的函数,观察到刻蚀深度在0.8氢分压时达到最大值;结深度可在2~20 $\mu m$ 之间调节.

对于ECR刻蚀来说,光刻胶特征(例如侧壁角度、厚度)、ECR刻蚀化学作用、刻蚀滞后(etch lag)<sup>[20,30]</sup>对于沟道纵横比都有影响.离子角度分布也影响ECR刻蚀的沟道宽度和纵横比<sup>[31]</sup>,其中光刻胶的刻蚀受益于低能量、大角度的离子束,而MCT的刻蚀受益于高能量、小角度的离子束.文献[32]介绍了一种将先进光刻和ECR刻蚀结合而成的制备高纵横比隔离沟道的方法,制备了纵横比大于3,宽度小于3 $\mu m$ 、深度超过15 $\mu m$ 的沟道.

## 4 MCT干法刻蚀工艺

### 4.1 反应离子刻蚀(RIE)

RIE是融化学刻蚀与离子轰击为一体的工艺,其中所用的离子能量大于50 eV,可以制备尺寸在2~40 $\mu m$ 之间的台面结构,已成为在光伏和光导器件中形成台面隔离的一种方法.

RIE的主要应用之一是非本征掺杂MCT和空

位掺杂MCT的反型.文献[33]报道,对于LPE空位掺杂和Au掺杂的MCT( $x=0.3$ )p型外延层,经过短时RIE处理,其表面可形成2 $\mu m$ 厚的n型层.文献[34]提出了一种MCT在RIE( $H_2/CH_4$ )辐照下的p-to-n反型机理模型,认为成结机制是RIE造成的损伤以及Hg间隙的形成.文献[35]介绍了RIE反型的p-to-n MCT的输运性质.文献[36]研究了用RIE制备的MWIR MCT阵列器件的均匀性,测试结果表明,RIE处理与CdTe钝化结合是一种可行MCT器件制备技术.文献[37]研究了钝化对于RIE( $H_2/CH_4$ )形成的n-on-p结的影响,结果表明双层钝化层有助于提高光电二极管的性能.文献[38]报道,分别在CdZnTe衬底和蓝宝石衬底上用LPE生长的MCT外延层、以及在CdZnTe衬底上用MBE生长的MCT外延层中,用RIE制备了n-on-p MWIR光电二极管.文献[39]报道,用RIE实现的p-to-n反型制备了小规格LWIR MCT阵列器件.圆形测试二极管的直径在50~600 $\mu m$ 之间变化.其中8×8阵列的器件尺寸为50 $\mu m$ ×50 $\mu m$ ,间距为100 $\mu m$ ,测试结果表明具有非常好的均匀性.

RIE有下列几个问题需要注意:

① RIE处理的表面粗糙度可能高达200 nm.这一粗糙度可以归于一系列原因,例如对HgTe的择优刻蚀产生的富Cd表面、等离子体中的 $CH_4$ 含量较高时造成的聚合物沉积、以及较大的射频功率导入的直流偏压使得离子能量较高等,均可造成离子诱导损伤;

② 因为RIE是离子辅助的,对半导体的物理和电学损伤可能出现p-to-n转型,使得表面附近的化学计量比发生变化;

③ 当 $CH_4$ 与 $H_2$ 的比例小于1:3时,聚合物薄膜形成的概率增加,这可能是刻蚀停止的机理.通过优化工艺参数例如 $CH_4$ 与 $H_2$ 的比例、总压力、温度和入射离子能量,可以控制RIE过程中的反型、化学计量比成分的变化、表面变粗糙以及聚合物沉积.

事实上,由于上述因素的影响,RIE多用于p-to-n转型以及用于在器件中引入化学计量比变化,在刻蚀和结构成形方面的应用反而退居其次.

减小离子导入的损伤对于MCT器件的刻蚀十分重要.某些类型的等离子体刻蚀对于pn结性能有衰减作用,衰减的程度不仅依赖于刻蚀工艺,还与pn结的类型及结深有关<sup>[27]</sup>.文献[33]报道,p型

MCT 外延层的表面电子迁移率受到 RIE 引入的损伤影响。

#### 4.2 电子回旋共振 (ECR)刻蚀

ECR 是在低压(0.05~15 mTorr)下,通过将一个微波场的频率与电子在一个固定磁场中的回旋共振频率匹配来产生高密度( $10^{13}$  electrons/cm<sup>3</sup>)低能等离子体.与射频平行板反应器相比,ECR 系统具有较高电离能比例和较低的离子能量. ECR 所用的气体组合有 CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar、CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar/N<sub>2</sub>、Ar/H<sub>2</sub> 等.在用 ECR 处理 MCT 时,降低压力可以大幅减小氢电离<sup>[40]</sup>.

ECR 工艺发展中有下列问题需要解决:

- ① 刻蚀表面及侧面要有较低的粗糙度;
- ② 刻蚀表面的化学计量比和光电性质应保持不变;
- ③ 应避免过量的聚合物沉积以及刻蚀残余物的再沉积. ECR 减少聚合物沉积的一种方法是 N<sub>2</sub> 引入 H<sub>2</sub> 和 Ar 的混合物<sup>[41]</sup>;

④ 刻蚀表面的反型;

对上述问题有影响的工艺参数包括等离子体气相组份、总压力、输入微波功率、入射离子能量、衬底偏压及温度等。

#### 4.3 低能电子增强(LE4)刻蚀

另外一种使用与 ECR 相似系统结构的工艺是低能电子增强刻蚀(LE4). LE4 可以视为反应电子激励解吸附(electron stimulated desorption, ESD). ESD 是由于外来电子能量引起的从束缚态到受激态的激励所引起,因此 LE4 所需要的最大电子能量阈值就是原子所具有的最大表面束缚能. LE4 所用的电子能量在 1~15 eV,反应物粒子处于热速度. 与其他工艺相比,电子传递到刻蚀表面的动量可以忽略,故对 MCT 造成的损伤也最小. 文献[42]报道了用氩、甲烷、氢、氮混合物对 MCT 所做的 LE4 刻蚀的特点:

- ① 可以刻蚀出具有良好各向异性度的 MCT 图形;
- ② 刻蚀表面及侧壁平滑;
- ③ 聚合物余量与甲烷浓度之间的关系可用经验公式描述;
- ④ 在非常低的 CH<sub>4</sub> 浓度下,也可以获得合适的刻蚀速率;

⑤ 表面上的 Cd 集聚减少。

#### 4.4 电感耦合等离子体(ICP)刻蚀

电感耦合等离子体(ICP)是另一种高密度等离子体刻蚀工艺. 文献[43]研究了 ICP 工艺参数的改变对于 p-to-n MCT 反型层载流子输运性质的影响,发现 n 型反型层载流子输运性质和深度对于等离子体处理的压力和温度最为敏感. 美国 Raytheon Vision Systems 公司一直在积极研发用于双色 FPA 器件制备的 ICP. 文献[44]介绍了基于 ICP 电感反型制备的高性能 MWIR MCT 光电二极管. 文献[45]报道,在 n-p<sup>+</sup>-n 三层异质结材料上,用先进光刻工艺和 ICP 刻蚀制备了中心间距为 20 μm 的高性能单元双色探测器. 性能测试结果表明,这种方法可制备用于三代成像系统的 640×480 和 1 280×720 双色 FPA 器件。

ICP 处理大尺寸晶片时的均匀性要好于 ECR 处理的均匀性<sup>[24]</sup>. ICP 可用于光敏元成形、刻蚀通路、清洗表面,提高 MCT 的可制造性,甚至可能取代 MCT 的湿法处理工艺. 与 RIE 相比,ICP 对衬底造成的损伤较小,其缺点是系统的成本和复杂度增加,并且还需要大型昂贵的抽真空系统. 尽管如此,ICP 处理已成为 MCT 及其他 II-VI 族化合物的工业处理标准<sup>[46]</sup>.

#### 4.5 离子束研磨(IBM)

离子束研磨(IBM)不需要注入任何特定的类施主原子. IBM 主要用于在 MBE/LPE 生长的 MCT 材料上制备 pn 结及各种小尺寸 MCT 阵列. 严格地说,IBM 是一个力学过程,刻蚀物与刻蚀对象之间没有化学反应,有时又称之为喷砂(sandblasting)的微力学模拟. 方向可控是离子研磨的一个显著优点. IBM 的另一个优点是不用电子灯丝,故减少了离子源受热,降低了沾污,相应地提高了系统及器件的可靠性。

IBM 使用能量在 200~1 500 eV 的离子(通常是 Ar 离子)轰击. 离子轰击能量使表面附近的 Hg 间隙原子被释放,表面 Hg 间隙原子浓度增加. 这些 Hg 间隙原子扩散进入体内,与 Hg 空位复合,形成 n 型区. Hg 间隙原子的作用、位错的影响和成结过程中离子轰击机制复杂,尚有待于深入研究. IBM 可使 MCT 出现 p-to-n 反型. 空位掺杂 p-MCT 反型到 n-MCT 的速率受限于掺杂剂量. 结深  $d$  可按

式(3)计算

$$d = \frac{kGt}{N_a A} \quad (3)$$

式中,  $k$  为与轰击离子能量弱相关的常数;  $G$  为单位时间内落在 MCT 晶片上的离子数;  $t$  为时间;  $N_a$  为 Hg 空位初始浓度;  $A$  为轰击面积. 文献[47~52]介绍了 IBM 对 MCT 缺陷结构、反型、结深、电学性质及组分均匀性等的影响.

## 5 结 束 语

湿法工艺各向同性的特点, 已不能满足新一代 MCT 器件制备的需要. 二代和三代器件例如光电二极管二维器件、高性能焦平面器件、超晶格结构、双色探测器、雪崩光电探测器、超光谱器件等, 要求隔离沟道较深, 纵横比较大(典型尺寸<sup>[32]</sup>为 10~15  $\mu\text{m}$  深, 3.5  $\mu\text{m}$  宽, 间距 20  $\mu\text{m}$ ), 表面平滑, 均匀性高; 量子线、量子点、中波红外激光器、长波红外激光器等纳米尺度器件的制备, 也需要以很高的各向异性度以及最小的结构损伤和电学损伤, 实现具有高纵横比图案的转移. 为此要求精确控制刻蚀速率、各向异性、横截面及尺寸, 不能对探测器的光敏面造成损伤, 这些需求推动了干法工艺的发展. 从近年来英语期刊发表的文献来看, 干法工艺是主要的研究和发展方向.

## 参 考 文 献

- [1] R Kiran, R Sporcken, T N Casselman, et al. Effect of Atmosphere on n-Type  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  Surface after Different Wet Etching Treatments: An Electrical and Structural Study[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008, 37(9):1471-1479.
- [2] J B Varesi, J D Benson, M Martinka, et al. Investigation of HgCdTe surface quality following Br-based etching for device fabrication using spectroscopic ellipsometry[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, 34(6):758-761.
- [3] Shubhrangshu Mallick, Rajni Kiran, Siddhartha Ghosh, et al. Comparative Study of HgCdTe Etchants: An Electrical Characterization[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2007, 36(8):993-999.
- [4] Heinrich Figgemeier, Martin Bruder, Karl-Martin Mahlein, et al. Impact of critical processes on HgCdTe diode performance and yield[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, 32(7):588-591.
- [5] V Srivastav, R Pal, H P Vyas. Overview of etching technologies used for HgCdTe[J]. *Opto-electronics Review*, 2005, 13(3):197-211.
- [6] B L Williams, H G Robinson, C R Helms. Ion dependent interstitial generation of implanted mercury cadmium telluride [J], *Applied Physics Letters*, 1997, 71(5):692-694.
- [7] M Arias, J G Pasko, M Zandian, et al. Planar p-on-n HgCdTe heterostructure photovoltaic detectors[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(9): 976-978.
- [8] J Rutkowski. Planar junction formation in HgCdTe infrared detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2004, 12(1):123-128.
- [9] Rachna Manchanda, R K Sharma, A Malik, et al. Be ion irradiation induced p-to n-type conversion in HgCdTe [J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 101(11):6102-6104.
- [10] L O Bubulac. Defects, diffusion and activation in ion implanted HgCdTe [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1988, 86:723-734.
- [11] J Rutkowski. Planar junction formation in HgCdTe infrared detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2004, 12(1):123-128.
- [12] M H Aguirre, H R Canepa. Ar-implanted epitaxially grown HgCdTe: evaluation of structural damage by RBS and TEM[C]//*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2001, 175:274-279.
- [13] Myriam H Aguirre, Horacio R Cánepa, Noemí E Walsöede Reça. Transmission electron microscopy of the induced damage by argon implantation in (111) HgCdTe at room temperature[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 92(10):5745-5748.
- [14] L O Bubulac. The role of epitaxy and substrate on junction formation in ion-implanted HgCdTe[J]. *Journal of Crystal Growth*, 1985, 72(1/2):478-484.
- [15] L O Bubulac, W E Tennant. Role of Hg in junction formation in ion-implanted HgCdTe[J]. *Applied Physics Letters*, 1987, 51(5):355-357.
- [16] P Leveque, A Declémy, P O Renault. Influence of extended structural defects on the effective carrier concentration of p-type  $\text{Hg}_{0.78}\text{Cd}_{0.22}\text{Te}$  implanted with aluminium ions[C]//*Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2000, 168(1):40-46.
- [17] L Dumanski, M Bester, I S Virt, et al. The p-n junction formation in  $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$  by laser annealing method [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(13):4481-4485.
- [18] V V Semak, J G Thomas, B R Campbell. Drilling of

- steel and HgCdTe with the femtosecond pulses produced by a commercial laser system[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2004, 37 (20):2925 – 2931.
- [19] F X Zha, S M Zhou, H L Ma, et al. Laser drilling induced electrical type inversion in vacancy-doped p-type HgCdTe[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(15): 1113 – 1115.
- [20] J D Benson, A J Stoltz, P R Boyd, et al. Lithography factors that determine the aspect ratio of electron cyclotron resonance plasma etched HgCdTe trenches[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, 32 (7): 686 – 691.
- [21] E Laffosse, J Baylet, J P Chamonal, et al. Inductively coupled plasma etching of HgCdTe using a CH<sub>4</sub>-based mixture[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, 34 (6):740 – 745.
- [22] A J Stoltz, J D Benson, J B Varesi, et al. Macro-loading effects of electron-cyclotron resonance etched II – VI materials[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(6):684 – 689.
- [23] A J Stoltz, M Jaime-Vasquez, J D Benson, et al. Examination of the effects of high-density plasmas on the surface of HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2006, 35(6):1461 – 1464.
- [24] E P G Smith, J K Gleason, L T Pham, et al. Inductively coupled plasma etching of HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, 32(7):816 – 820.
- [25] Eyneen Altaf, Amit Malik, Ravinder Pal, et al. Dry Processes for HgCdTe Infrared Detector Arrays[J]. *Invertis Journal of Science & Technology*, 2007, 1(4): 260 – 279.
- [26] James D Plummer, Michael D Deal, Peter B Griffin. *Silicon VLSI technology fundamental, practice and modeling*[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [27] Stephen A Campbell. *The science and engineering of microelectronic fabrication*[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [28] V Srivastav, R Pal, B L Sharma, et al. Etching of mesa structures in HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, 34(11):1440 – 1445.
- [29] J Rutkowski. Planar junction formation in HgCdTe infrared detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2004, 12 (1):123 – 128.
- [30] A J Stoltz, J D Benson, P R Boyd, et al. The effect of electron cyclotron resonance plasma parameters on the aspect ratio of trenches in HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, 32(7):692-697.
- [31] J D Benson, A J Stoltz, J B Varesi, et al. Determination of the ion angular distribution for electron cyclotron resonance, plasma-etched HgCdTe trenches[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(6):543 – 551.
- [32] J D Benson, A J Stoltz, A W Kaleczyc, et al. Effect of photoresist-feature geometry on electron-cyclotron resonance plasma-etch reticulation of HgCdTe diodes[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2002, 31(7):822 – 826.
- [33] J Antoszewski, C A Musca, J M Dell, et al. Characterization of Hg<sub>0.7</sub>Cd<sub>0.3</sub>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.
- [34] J White, R Pal, J M Dell, et al. p-to-n type-conversion mechanisms for HgCdTe exposed to H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> plasmas[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001, 30(6):762 – 767.
- [35] T Nguyen, J Antoszewski, C A Musca, et al. Transport properties of reactive-ion-etching-induced p-to-n type converted layers in HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2002, 31(7):652 – 659.
- [36] R Pal, P K Chaudhury, B L Sharma, et al. Uniformity in HgCdTe diode arrays fabricated by reactive ion etching[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2004, 33(2): 141 – 145.
- [37] J K White, J Antoszewski, R Pal, et al. Passivation effects on reactive-ion-etch-formed n-on-p junctions in HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2002, 31 (7):743 – 748.
- [38] J M Dell, J Antoszewski, M H Rais, et al. HgCdTe mid-wavelength IR photovoltaic detectors fabricated using plasma induced junction technology[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2000, 29(6):841 – 848.
- [39] J Antoszewski, C A Musca, J M Dell, et al. Small two-dimensional arrays of mid-wavelength infrared HgCdTe diodes fabricated by reactive ion etching-induced p-to-n type conversion [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, 32(7):627 – 632.
- [40] 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.
- [41] R C Keller, M Seelman-Eggbert, H J Richter. Dry etching of Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te using CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>/Ar/N<sub>2</sub> electron cyclotron resonance plasmas [J]. *Journal of Electronic Materials*, 1996, 25:1270 – 1275.
- [42] Jaehwa Kim, T S Koga, H P Gillis, et al. Low-energy electron-enhanced etching of HgCdTe [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2003, 32(7):677 – 685.

系统软件主要控制流程如图3所示。

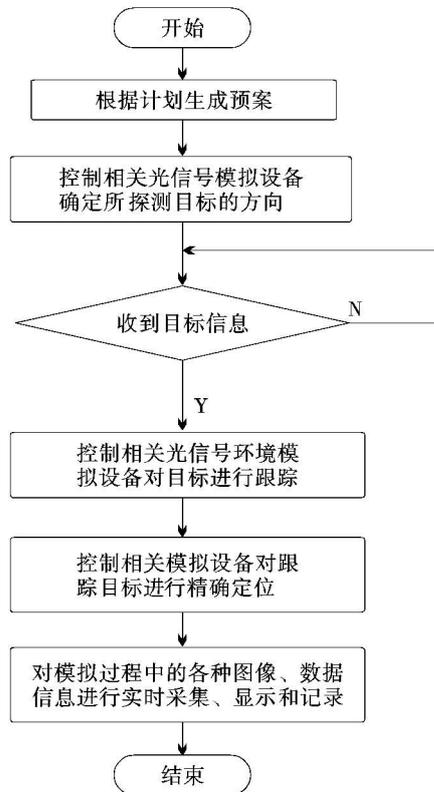


图3 系统软件主控流程图

系统软件根据计划生成模拟预案,模拟光信号环境特征,控制光信号模拟设备,并对模拟过程中的各种图像/数据信息进行实时采集、显示和记录,通过视频回放或实时显示。

## 4 结束语

通过研究光信号环境模拟系统的设计方法,构建全实物光信号环境模拟系统,将从根本上解决各种条件下对光信号环境的需求问题,从而使设备经历电磁环境的磨砺,提高其适应电磁环境的能力。同时也为多层次的试验建立完整的一体化电磁环境框架体系奠定基础。

## 参考文献

- [1] 王汝群. 战场电磁环境[M]. 北京: 解放军出版社, 135-137.
- [2] 王志刚. 战场光电信号环境分析[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 14-18.

(上接第8页)

- [43] B A Park, C A Musca, J Antoszewski, et al. Effect of High-Density Plasma Process Parameters on Carrier Transport Properties in p-to-n Type Converted  $\text{Hg}_{0.7}\text{Cd}_{0.3}\text{Te}$  Layer [J]. Journal of Electronic Materials, 2007, 36(8): 913-918.
- [44] B A Park, C A Musca, R J Westerhaut, et al. MWIR  $\text{HgCdTe}$  Photodiodes based on high-density plasma-induced type conversion [J]. Semiconductor Science and Technology, 2008, 23(9): 5027-5032.
- [45] E P G Smith, E A Patten, P M Goetz, et al. Fabrication and characterization of two-color midwavelength/long wavelength  $\text{HgCdTe}$  infrared detectors [J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(6): 1145-1152.
- [46] A J Stoltz, J D Benson, P J Smith. Morphology of Inductively Coupled Plasma Processed  $\text{HgCdTe}$  Surfaces [J]. Journal of Electronic Materials, 2008, 37(9): 1225-1230.
- [47] M Pociask, I I Izhnin, A I Izhnin, et al. Donor doping of  $\text{HgCdTe}$  for LWIR and MWIR structures fabricated with ion milling [J]. Semiconductor Science and Technology, 2009, 24(2): 5031-5034.
- [48] M Pociask, I I Izhnin, S A Dvoretzky, et al. Ion-milling-assisted study of defect structure of acceptor-doped  $\text{HgCdTe}$  heterostructures grown by molecular beam epitaxy [J]. Semiconductor Science and Technology, 2008, 23(9): 5001-5005.
- [49] V V Bogoboyashchyy, I I Izhnin, K D Mynbaev, et al. Relaxation of electrical properties of n-type layers formed by ion milling in epitaxial  $\text{HgCdTe}$  doped with V-group acceptors [J]. Semiconductor Science and Technology, 2006, 21(8): 1144-1149.
- [50] V V Bogoboyashchyy, A I. Elizarov, I I Izhnin. Conversion of conductivity type in Cu-doped  $\text{Hg}_{0.8}\text{Cd}_{0.2}\text{Te}$  crystals under ion beam milling [J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(8): 726-732.
- [51] V V Bogoboyashchyy, I I Izhnin, K D Mynbaev. The nature of the compositional dependence of p-n junction depth in ion-milled p- $\text{HgCdTe}$  [J]. Semiconductor Science and Technology, 2006, 21(2): 116-123.
- [52] R Haakenaasen, T Moen, T Colin, et al. Depth and lateral extension of ion milled pn junctions in  $\text{CdHgTe}$  from electron beam induced current measurements [J]. Journal of Applied Physics, 2002, 91(1): 427-432.