

# CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>O 等离子体刻蚀工艺

俞 诚

(电子工业部江南无线电器材厂)

等离子体刻蚀(PE)具有成本低、清洁、线条分辨率高以及容易实现工艺自动化等优点。近几年来,随着低温等离子体淀积氮化硅半导体器件表面钝化技术的普及推广,等离子体刻蚀工艺得到了广泛的应用。我们从1981年起在大批量器件生产中应用了等离子体氮化硅刻蚀工艺。几年来由于被加工的器件种类不断增加,PE工艺本身存在的一些问题陆续暴露了出来。为解决这些问题,我们做了一些工作。

## 一、小电流放大系数( $h_{FE}$ )的下降

经过等离子体工艺处理过的半导体器件芯片,不可避免地会受到不同程度的射频辐射损伤。等离子体氮化硅钝化工序中造成器件表面损伤的,主要不是等离子体淀积过程,而是等离子体刻蚀。因为,前者的射频功率仅40—50W,而后者的则要高出几倍甚至十几倍。不过,通常的大功率、中功率晶体管以及双结型集成电路对等离子体处理带来的副作用并不敏感,器件特性基本上不受影响,这是因为大、中功率管结比较深,双结型电路存在电路整体功能。表面器件(如场效应晶体管、各种MOS电路以及一些浅结的双结型分立器件),经过等离子体刻蚀后会出现电参数劣化现象,例如MOS器件出现阈值电压漂移,双结型器件出现 $h_{FE}$ 下降。

等离子体处理后器件特性劣化的原因是,经过等离子体中高能粒子的轰击后,器件表面二氧化硅系统中形成电子-空穴对,在一定条件下这些电子-空穴对除了被复合掉一部分外,有的电子和空穴被分开,大多数空穴被俘获在Si-SiO<sub>2</sub>界面薄层内。由于空穴的堆积,又会产生新的界面陷阱,从而导致了器件的不稳定性,如上述阈值电压漂移、 $h_{FE}$ 下降。从目前国内等离子体刻蚀设备的实际情况看,一般反应室等离子区边缘电场是不均匀的,且具有直流分量。因为等离子体是高导区,这个直流分量的电压绝大部分降落在SiO<sub>2</sub>上。对于等离子体刻蚀二次钝化层压焊点的芯片来说,当电压方向是由铝层指向硅衬底时,就等效于在铝栅上加了一个正偏压。在这个正偏压作用下,由于等离子体轰击在SiO<sub>2</sub>系统中激发产生的电子-空穴对就会被分开,电子向栅板漂移,而空穴则被扫到Si-SiO<sub>2</sub>界面。所以在PE过程中,位于等离子体边缘区域的管芯往往

受损伤较重, $h_{FE}$ 下降幅度较大。我们认为,这也与刻蚀速率的不均匀性有关。通常总是四周的图形先刻干净,最后才是中心部位被刻掉。

## 二、针对 $h_{FE}$ 下降的PE工艺措施

为了避免或减轻PE过程中器件因表面损伤造成的 $h_{FE}$ 下降,首先我们尽量将被加工的圆片置于相对稳定、均匀的等离子体场中。其次,为了改善刻蚀的均匀性,在使用圆筒形结构的设备刻片时,我们将待刻硅片置于密布小孔的铝质圆筒中,再放在刻蚀设备反应室内进行等离子体刻蚀。这对减轻器件受到的等离子体辐射损伤颇有好处,但缺点是这种“隧道”式的刻蚀方法刻蚀速率有所降低。

等离子体刻蚀时间越长,器件受到的损伤也越重,应当尽可能在不增加射频功率的条件下提高刻蚀速率。刻蚀气体中含有水的成分会大大降低刻蚀速率,这是由于等离子体中H<sub>2</sub>O的存在会抑制F\*游离基的产生。我们曾一度采用CF<sub>4</sub>-空气系统对氮化硅膜进行等离子体刻蚀,这种工艺受环境影响很大,主要是湿度,一旦到了梅雨季节就再不能用这种方法刻片了。

刻蚀设备反应室必须保证充分干净和干燥,我们在正式刻片之前一般先空室预刻几分钟,对反应室进行预处理。刻蚀速率与所用腐蚀气体关系也很大,我们使用进口氟里昂14比用国产CF<sub>4</sub>气体在相同条件下刻蚀,腐蚀速率增大一半以上。目前我们正与国内从事CF<sub>4</sub>生产的单位一起研究,有关解决这一差距的问题。

适当提高衬底温度,可使刻蚀速率加快,但应当注意,温度提高后光刻胶掩膜被腐蚀的可能性会增加。此外,有时我们也利用等离子体刻蚀的负载效应来减少器件受到的高频损伤,将一次刻蚀的片子少放一些,刻蚀时间相应短一些,结果, $h_{FE}$ 下降的情况就显著好一些。这样做生产效率会受到一定影响,但是对一些产量不大而参数要求严格的品种来说,这种方法仍不失为一种可供选择的途径。

## 三、CF<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>O 等离子体刻蚀工艺

从前面分析的器件表面高频辐射损伤的机理可以

看出,采用尽可能低的射频功率是减轻和避免  $h_{FB}$  下降的根本办法。实际操作表明,有些器件对射频功率的敏感性是很强的,在其它条件如气体流量、刻蚀温度、刻蚀时间等相同的情况下,对于 DK-P200 平板型刻蚀台,采用 RfV 为 2.2kV,  $i_a$  为 200mA,  $i_g$  为 30mA 的条件刻蚀时,部分管芯明显出现  $h_{FB}$  下降的趋势。当 RfV 降到 1.9kV,  $i_a$  降到 180mA,  $i_g$  降到 26mA 时,所有管芯参数与 PE 前丝毫不变。但是,按此条件刻蚀有时会有部分管芯的压焊点刻蚀得不十分干净,这将危及器件的长期可靠性。为了解决这一矛盾,我们经过较长时间的试验摸索,最后选用了  $CF_4-N_2O$  气体系统代替普通的  $CF_4-O_2$  系统进行等离子刻蚀,取得了满意的效果。

等离子体刻蚀氮化硅早先多采用氟油以氧气携带(鼓泡)工艺,后来改用  $CF_4$  气体取代氟油,工艺稳定性大大提高,因此现在通用的氮化硅 PE 工艺基本上都是采用  $CF_4$  气体。等离子体中发生的化学过程是十分复杂的,它包括许多基本反应,而在所有情况中,化学反应总是高能自由电子和气体分子碰撞产生各种反应基团所促成的。等离子体刻蚀氮化硅就是  $CF_4$  等离子体中的  $F^*$  活性基与氮化硅中的 Si 发生化学反应,生成  $SiF_4$  从器件芯片表面脱附。事实证明,如果  $CF_4$  等离子体中存在一定含量的氧,则可以提高  $F^*$  活性基的产生率,从而提高氮化硅的刻蚀速率。所以,一般使用  $CF_4$  等离子体刻蚀氮化硅时,往往要加 3—5% 的氧,它不仅抑制氟原子在反应室壁上的损失,提高  $F^*$  产生率,还可以作为附加的反应剂参加腐蚀过程。这是通过形成能与氮化硅快速反应的分解能比较低的氟氧化物游离基来实现的。

我们在氮化硅 PE 工艺中不用氧气而用笑气( $N_2O$ ),是受等离子体淀积氮化硅的启示。我们注意到,PECVD 工艺生长氮化硅,除了使用气体  $SiH_4$  外,还要用  $N_2$  或  $NH_3$ ,而通常用得较多的是  $NH_3$ 。这是因为  $N_2$  是单元素双原子分子,其离解能比较高。实际对比表明,在其它条件都相同的情况下,淀积同样的氮化硅薄膜,用  $N_2$  与用  $NH_3$  相比,所需要的射频功率要高一倍以上。以 PD-300 II 型 PECVD 低温淀积台为例,采用  $SiH_4-NH_3$  系统时,若按  $300 \text{ \AA} / \text{min}$  的速率均匀淀积氮化硅,一般只需 RfV 为 650V,  $i_a$  为 70mA。如改成  $SiH_4-N_2$  系统,则要求 RfV 为 1000V,  $i_a$  为 110mA。根据等离子体淀积的这种情况,我们考虑,在等离子体刻蚀氮化硅时,除主气体  $CF_4$  外,将添加剂以  $N_2O$  (离解能为 1.68eV) 代替  $O_2$  (离解能为 5.12eV)。将  $CF_4-N_2O$  系统代替  $CF_4-O_2$  系统刻蚀时,在刻蚀速率基本不变的条件下,射频功率可以降低 30%。这对于某些对等离子体刻蚀功率比较敏感的器件来说是很重要的,对于控制 PE 造成的  $h_{FB}$  下降很有好处。对于前面提到的那种用  $CF_4-O_2$  系统刻蚀, RfV 取 2.2kV,

出现  $h_{FB}$  下降,而取 RfV 为 1.9kV 参数就不变的器件,改用  $CF_4-N_2O$  系统刻蚀后,仍然用 RfV 为 1.9kV 的条件,结果就能保证既不出  $h_{FB}$  下降,同时又能使压焊点刻蚀得相当干净。

为了稳定工艺,采用  $CF_4-O_2$  系统刻蚀时,有时还要另加一股  $N_2$  气体作为缓冲成分。改用  $CF_4-N_2O$  系统后,工艺稳定性比较好,不必再加缓冲  $N_2$  气,同样能够保证既刻蚀干净,而且管芯表面胶面完好整洁,图形线条也整齐。通常我们用腐蚀速率与腐蚀时间的函数关系曲线来描绘和表达 PECVD 氮化硅膜的腐蚀特性。对于等离子体干法刻蚀方法来说,这一腐蚀特性曲线既非一条平行于时间轴的直线,亦非随时间线性上升的斜线,而是在开始一段时间腐蚀速率几乎为零,经过一定时间(这段时间的长短与工艺条件有关),腐蚀速率骤然升高,出现一个阶跃。而当我们采用  $CF_4-N_2O$  气体系统刻蚀后,腐蚀特性中这一阶跃突变在程度上有所和缓。

#### 四、与 PE 相关的一些工艺的影响

$h_{FB}$  下降除与 PE 工艺有关外,还和与 PE 相关的一些工艺有直接的关系。被刻蚀的材料(如氮化硅膜)的质量及均匀性,对于保证 PE 工艺正常进行十分重要,倘若氮化硅膜中含氧量增加,PE 速率势必下降。

虽然我们在前面说过,由于等离子体淀积功率比刻蚀功率低得多,器件表面损伤主要出现在 PE 工艺之后。有些器件,要求击穿耐压高、反向漏电流小,制造这些器件用的硅材料电阻率相当高,其本身掺杂浓度很低,从而对表面状况极其敏感,管芯在中测时,测试灯光对击穿特性有显著影响。不难理解,这类连微弱的光生载流子都如此反应明显的器件,其芯片对表面杂质玷污的感应程度自然很强烈。在给这类器件作钝化时,经过氮化硅 PECVD 后往往也会出现特性参数退化(包括  $h_{FB}$  下降等现象)。有时,轻微玷污在淀积工艺后并不立即在器件特性上表现出来,但是经过 PE 工艺后,一方面等离子体中的能量传递给  $SiO_2$  中的可动离子,使之在栅压为正时向硅界面定向运动,不仅使界面正电荷增加,而且引起晶格失配,使界面陷阱也增加;另一方面氧化层陷阱中的杂质在等离子体激发下脱离陷阱的束缚,成为可动离子电荷,和其它可动电荷一样使界面电荷特性受到影响。以上这些都会使器件特性在 PE 后变差,不仅是  $h_{FB}$  下降,严重时还会出现漏电甚至失效。

光刻显影不彻底往往是导致 PE 时压焊点刻不干净或不得不延长刻蚀时间的重要原因。PE 的刻蚀掩膜是光刻工序按常规工艺操作制作的,显影之后还要经过坚膜。对于湿法腐蚀,为防止浮胶,坚膜是必要(下转第 124 页)

## 介绍新书《量子频标原理》

李 义 发  
(科学出版社)

《量子频标原理》(王义遒等著)一书最近由科学出版社出版,这是我国第一部关于量子频标方面的专著,内容极为丰富。

量子频率和时间标准(量子频标和原子钟)是量子物理学和电子学高度结合的产物,是波谱学在技术上应用最突出的成就之一。目前,量子频标已成为理论性强、工艺精和应用广的一门崭新的分支学科。随着科学技术的突飞猛进,人们对测量时间、空间、长度和温度等物理量的精确度要求也越来越高,而以量子频标为基础的时间频率测量的相对精密度和准确度高达 $10^{-16}$ 和 $10^{-14}$ 数量级,远远超过对其他物理量测量的精度,所以人们常常想方设法将其他物理量(如长度、温度和电压等)转换成频率(时间)来进行测量,可以说,量子频标是当代最先进、最精密的时间、频率计量标准,它广泛地应用于计量、导航、通信和大地测量等方面。

(上接第 94 页)

的;而对于等离子体干法腐蚀,则并不存在浮胶的问题。相反,由于 PE 过程中放出大量的热,经过刻蚀胶膜粘附更牢。假如显影后不坚膜,即使需要刻蚀的图形中残存有胶膜,一般也不会造成很严重的后果,但是要是经过坚膜的,就难克服残胶对图形腐蚀的影响了。所以,PE 工艺中用光致抗蚀剂掩膜时,不仅不需要而且也不应该在显影后再进行坚膜。

按常规,经等离子体工艺处理后一般都要对被加工器件进行退火。我们实际生产情况是,只有少数小图形器件才需在 PE 后进行退火。3DG 79 型自动增益控制用的高频低噪声小功率管圆片工艺中,在技术文件规定的条件下作等离子体刻蚀后,通常不会出现异常。但是有时由于前面提到的那些因素没有完全控制好,也会出现  $f_{FB}$  下降的情况,不过往往都是比较轻微的表面损伤,偶尔出现时,只要将经过 PE 加工后的圆片置于 PECVD 氮化硅淀积台内,在  $300^{\circ}\text{C}$  下真空退火 30min,参数就可以完全恢复正常。在这条件下,界面被俘获的空穴就能被复合,界面结构得到改善。然而,在同等的 PE 条件下,另一种与 3DG 79 相近的

量子频标的研究开始于二十世纪四十年代末期。五十年代初氨( $\text{NH}_3$ )分子振荡器的初始运转(1953年),标志着自激型量子频标的诞生。随着科学技术的迅速发展,使量子频标得到了快速发展。目前,已有不少国家研制出了性能优异的各类频标,例如铯原子束和铷气泡式非自激型量子频标,氢激光器 and 铷激光器 etc 自激型量子频标。我国对量子频标的研究起步较晚,开始于五十年代后期。

《量子频标原理》一书主要叙述各种量子频标的原理。从微波到光频,从基础物理理论到工艺设计,从历史发展到前沿工作,从国外动态到国内发展等方面都作了比较清晰、细致和深入的介绍。

该书可供从事于量子频标研究和制造的科研和工程技术人员以及大专院校有关专业的师生参考。

品种 3DG 388,受表面损伤造成  $f_{FB}$  下降的情况就严重得多,要完全消除损伤退火温度,必须升至  $480-490^{\circ}\text{C}$ 。

在大批量生产中,PE 工艺出现各种问题的机会是很多的,以上提到的只是围绕  $f_{FB}$  下降的一部分,而且要彻底地解决这些问题也还需要更进一步的努力。两种图形几何尺寸以及结深等相差不多同时电参数也大体相同的 3DG 型小功率管,按同一工艺条件在同一设备上作等离子体刻蚀,结果总是一个有  $f_{FB}$  下降出现,而另一个就没有这种现象。可是  $f_{FB}$  下降的这个品种,当退火温度升到一定高度时,特性就能恢复,而  $f_{FB}$  一般不变的那个品种,一旦出现了  $f_{FB}$  下降,就很难恢复,其退火温度不允许升到同样高,否则连击穿特性也会变坏。产生这种情况,是否因为一个用的单晶材料,而另一个用的是外延材料,缺陷相对要多一些,或者由于它们的延伸电极之间的距离不一样,从而对高频感应的效果不同。这些都有待进一步的试验和分析。