

## 二氟化氙释放牺牲层多晶硅刻蚀速率研究

司美菊, 杜波, 田本朗, 徐阳, 金成飞, 蒋欣, 江洪敏, 马晋毅

(中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060)

**摘要:**该文研究了相关工艺参数对二氟化氙( $\text{XeF}_2$ )干法释放多晶硅的释放速率的影响。结果表明,对于薄膜体声波谐振器(FBAR)悬臂结构,腔室压力不变时,随着载气 $\text{N}_2$ 流量的增大,刻蚀速率先增加后减少,刻蚀速率最大值为 $10.3 \mu\text{m}/\text{min}$ ;载气 $\text{N}_2$ 流量不变时,腔室压力越大,工艺腔室参与刻蚀反应的 $\text{XeF}_2$ 气体的浓度增大,刻蚀速率越大。当腔室压力超过 $1200 \text{ Pa}$ 时,随着腔室压力的增加,刻蚀速率的增长率逐渐减小。

**关键词:**空气隙;干法刻蚀;刻蚀速率;粗糙度;支撑层

中图分类号:TN65

文献标识码:A

## Study on Poly-Si Etch Rate About Sacrificial Layer Release With $\text{XeF}_2$

SI Meiju, DU Bo, TIAN Benlang, XU Yang, JIN Chengfei,

JIANG Xin, JIANG Hongming, MA Jinyi

(26th Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** The effect of the process parameters on the release rate through the  $\text{XeF}_2$  etching to release the poly-Si is studied in this paper. The results show that for the cantilever structure the etch rate increases first and then reduces with the increase of the carrier gas  $\text{N}_2$  flow in the stable chamber pressure, the maximum etch rate is  $10.3 \mu\text{m}/\text{min}$ . When the carrier gas  $\text{N}_2$  flow is the constant, the greater the chamber pressure value, the concentration of taking part in the etch reaction in process chamber is increased, the faster the etch rate. While the chamber pressure is greater than  $1200 \text{ Pa}$ , the percentage increase for etch rate decreases with the increasing of the chamber pressure.

**Key words:** air gap; dry etch; etchrate; roughness; support layer

### 0 引言

随着薄膜体声波谐振器(FBAR)技术在无线通讯设备中的广泛应用,空气隙 FBAR 结构因具有好的结构稳定性和相对较高的品质因数(Q)值而成为国内外研究的热点,是目前用于产品最成功的形式<sup>[1]</sup>。空气隙 FBAR 结构是在加工完电极和压电膜后,通过移除其下方的牺牲层材料形成空气腔,并以此来减小声泄露<sup>[2]</sup>。牺牲层材料的移除有湿法和干法两种。湿法工艺采用腐蚀液腐蚀牺牲层。在释放后的干燥过程中,由于毛细作用的影响,薄膜极易出现粘附、破裂,这将降低复合薄膜的成品率和可靠性。干法释放即干法刻蚀,是采用化学气相各向同性刻蚀的方法,利用刻蚀气体与牺牲层材料发生反应,生成废气后排出。此法可在对结构无破坏的前提下实现牺牲层的释放,具有很好的一致性和均匀性。二氟化氙( $\text{XeF}_2$ )在未蒸发情况下为白色固

体,室温下的饱和蒸气压约为 $0.5 \text{ kPa}$ ,是一个稳定的化合物,在一定的条件下升华为气体<sup>[3]</sup>,曾有文献报道即使在没有外加能量的情况下, $\text{XeF}_2$ 气体仍会吸附在硅表面,自发分解成氟化物和氙,而氟化物可在室温下对硅进行较高速率的刻蚀<sup>[4-5]</sup>。因此, $\text{XeF}_2$ 常被用作刻蚀硅的气体。 $\text{XeF}_2$ 干法释放具体过程<sup>[6]</sup>如下:通过工艺气体配送管路的 $\text{N}_2$ 作为载气把 $\text{XeF}_2$ 带到反应腔室,刻蚀气体 $\text{XeF}_2$ 和牺牲层材料发生化学反应,即: $\text{Si} + 2\text{XeF}_2 = \text{SiF}_4(\text{g}) \uparrow + 2\text{Xe}(\text{g}) \uparrow$ 。通过对气体流量和腔室压力的控制优化刻蚀速率,并通过气流移除反应产物。 $\text{XeF}_2$ 作为刻蚀气体,对二氧化硅、氮化铝、氮化硅及光刻胶等材料具有较高的选择比<sup>[7-9]</sup>。因此, $\text{XeF}_2$ 作为刻蚀气体已被广泛应用于微机电系统(MEMS)器件制作中<sup>[10]</sup>。但是,在空气隙 FBAR 结构制作过程中,在释放孔大小相同的条件下, $\text{XeF}_2$ 对牺牲层 poly-

收稿日期:2016-05-30

作者简介:司美菊(1986-),女,河南开封人,工程师,硕士,主要从事薄膜材料的研究。

Si 薄膜刻蚀速率影响因素的相关报道较少, 基于此, 本文通过分别改变载气 N<sub>2</sub> 流量和腔室压力, 研究 XeF<sub>2</sub> 对牺牲层 poly-Si 薄膜的刻蚀速率。

### 1 实验

取 14 片 6 寸光硅片清洗, 在其上光刻制作图形。采用干法刻蚀制作深 300 nm 的硅槽, 湿氧厚 1 μm 的 SiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub> 的主要作用是保护硅片在 XeF<sub>2</sub> 中不被腐蚀。低压化学气相沉积 (LPCVD) 生长厚 400 nm 的牺牲层 poly-Si 薄膜, 采用化学机械抛光 (CMP) 工艺将其表面磨至粗糙度约为 1.5 nm; 采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 清洗 45 s, 冲水甩干, 用原子力显微镜 (AFM, Seiko SPA-300HV) 测试和表征 CMP 后样品的表面形貌和粗糙度; 之后, 在其上 LPCVD 生长 300 nm 的 SiO<sub>2</sub>, 在释放完成后起支撑层作用, 防止结构的塌陷; 最后光刻制作图形, 干法刻蚀释放孔。以上工艺过程如图 1 所示。

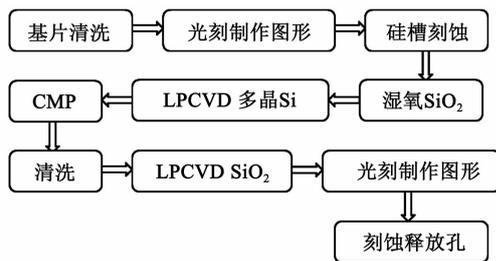


图 1 样片释放前期工艺制作流程

将按照上述工艺制作好的样品放入牺牲层释放设备内进行释放。该设备所用的释放模式是连续模式, 即在整个工艺过程中边充 XeF<sub>2</sub> 气体, 边排除反应后的废气。工艺过程所用载气为纯度 99.999% 的 N<sub>2</sub>。通过质量流量控制器 (MFC) 调整载气 N<sub>2</sub> 的流量和腔室压力, 该设备的具体结构原理图如图 2 所示。

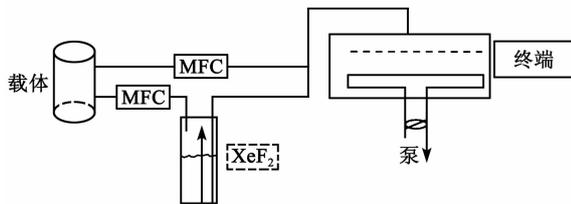


图 2 XeF<sub>2</sub> 刻蚀设备结构原理图

取预先制作好的 14 片样片, 实验过程中的条件:

1) 腔室压力保持不变, 设为 1 000 Pa, 载气 N<sub>2</sub> 的流量分别设置为 50 cm<sup>3</sup>/min、100 cm<sup>3</sup>/min、150 cm<sup>3</sup>/min、200 cm<sup>3</sup>/min、250 cm<sup>3</sup>/min、300 cm<sup>3</sup>/min、350 cm<sup>3</sup>/min, 每一流量条件下释放 1 个样片, 共需用 7 个样片。

2) 载气 N<sub>2</sub> 流量设置为 200 cm<sup>3</sup>/min, 腔室压力为变动值, 分别为 133 Pa、400 Pa、667 Pa、933 Pa、1 200 Pa、1 466 Pa、1 733 Pa, 每一压力条件下释放一个样片, 共需用 7 个样片。

释放完成后选择两种条件下刻蚀速率最大的样品。采用聚焦离子束 (FIB) 对样品进行切片, 然后用扫描电子显微镜 (SEM) 对切片断面进行二维成像, 观察空腔结构。

### 2 实验结果与讨论

空气隙 FBAR 结构是否会发生塌陷, 除与释放工艺有关外, 生长支撑层 SiO<sub>2</sub> 时界面的粗糙度也有一定的影响。本次实验过程中 CMP 后, 表面粗糙度为 1.447 nm。为保证测试的准确性, 测试区域的选择在不影响测试结果的前提下尽可能的大, 本次实验选择的测试区域面积为 20 μm × 20 μm, 具体测试结果如图 3 所示。

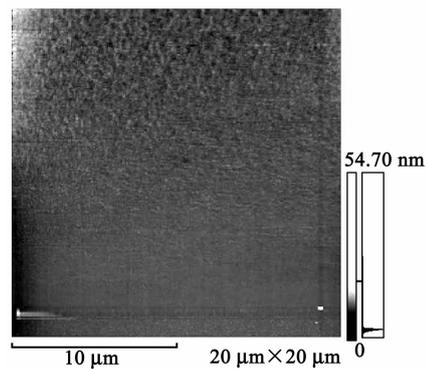


图 3 样品 CMP 后表面形貌

由图 3 可看出, 虽然界面仍有一定程度的起伏, 但大体上较平整, 满足支撑层对界面的要求。

#### 2.1 腔室压力保持不变, 载气 N<sub>2</sub> 的流量发生变化

为保证 XeF<sub>2</sub> 气体均匀、快速地进入工艺腔室, 选择 N<sub>2</sub> 作为载气, N<sub>2</sub> 只起载带作用, 不参与整个刻蚀反应。图 4 为载气 N<sub>2</sub> 流量下不同刻蚀速率的变化曲线图。

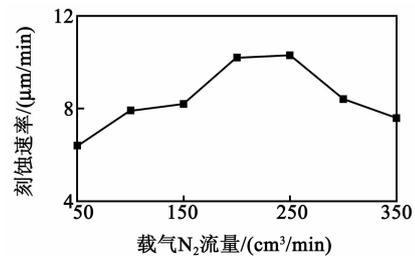


图 4 不同载气 N<sub>2</sub> 的流量下刻蚀速率的变化曲线

由图 4 可看出, 随着载气 N<sub>2</sub> 流量的增加, 刻蚀速率呈先增加后减少的趋势。其原因是开始随着载

气  $N_2$  流量的增加,随之携带到工艺腔室参与刻蚀反应的  $XeF_2$  气体也增加,故刻蚀速率明显增加。随着载气  $N_2$  流量的继续增加,携带到工艺腔室的  $XeF_2$  气体的量虽然得到进一步的提升,但参与刻蚀反应的  $XeF_2$  气体的摩尔分数反而会减少,从而导致刻蚀速率的下降。

当载气  $N_2$  流量为  $250\text{ cm}^3/\text{min}$  时,刻蚀速率最大(为  $10.3\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ ),在此条件下得到的空腔结构如图 5 所示。

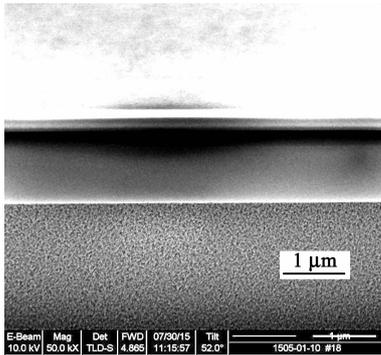


图 5 腔室压力为 1 kPa,改变载气  $N_2$  流量,最大刻蚀速率时的空腔结构

由图 5 可看出,得到了预期的空气隙结构,支撑层薄膜未出现塌陷,空腔内部和支撑层薄膜表面都较光滑,牺牲层 poly-Si 薄膜材料被完全移除,无任何残余。

## 2.2 载气 $N_2$ 流量为 $200\text{ cm}^3/\text{min}$ ,腔室压力为变动值

当载气  $N_2$  流量固定时,改变腔室压力,其实是间接改变  $XeF_2$  气体的浓度,对刻蚀速率的具体影响如图 6 所示。

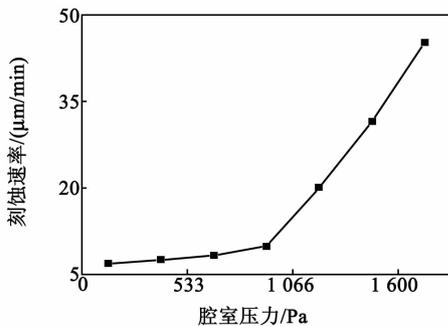


图 6 不同腔室压力下,刻蚀速率的变化曲线

由图 6 可看出,当载气  $N_2$  流量固定时,随着腔室压力的增加,刻蚀速率逐渐增大。分析其原因:载气  $N_2$  流量不变,当腔室压力增大时,工艺腔室参与刻蚀反应的  $XeF_2$  气体的浓度增大,促进反应  $\text{Si} + 2\text{XeF}_2 = \text{SiF}_4(\text{g}) \uparrow + 2\text{Xe}(\text{g}) \uparrow$  的进行,从而增大刻蚀速率。

表 1 为腔室压力的增加对刻蚀速率的增长率的影响。由表可见,当腔室压力低于  $1\ 200\text{ Pa}$  时,随着腔室压力的增加,刻蚀速率的增长率逐渐增加;当腔室压力超过  $1\ 200\text{ Pa}$ ,随着腔室压力的增加,刻蚀速率的增长率开始减小。分析其原因:腔室压力增加,参与刻蚀反应  $XeF_2$  气体的浓度增长率较大,刻蚀速率的增长率也增大;随着腔室压力的继续增大,  $XeF_2$  气体的浓度虽然继续增大,但不参与反应而直接被尾气泵排出的  $XeF_2$  气体开始增多,从而导致参与刻蚀反应的  $XeF_2$  气体的浓度增大率减小,进而引起刻蚀速率的增长率开始减小。

表 1 随腔室压力的增加,刻蚀速率的增长率

腔室压力变化( $p_1$ 到 $p_2$ )	刻蚀速率增长率/%
133 Pa 增加到 400 Pa	8.5
400 Pa 增加到 667 Pa	10.5
667 Pa 增加到 933 Pa	19.0
933 Pa 增加到 $1\ 200\text{ Pa}$	102.0
$1\ 200\text{ Pa}$ 增加到 $1\ 466\text{ Pa}$	56.4
$1\ 466\text{ Pa}$ 增加到 $1\ 733\text{ Pa}$	43.3

当载气  $N_2$  流量为  $200\text{ cm}^3/\text{min}$ ,腔室压力为  $1\ 733\text{ Pa}$  时,刻蚀速率为  $45.3\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ ,在此条件下得到的空腔结构如图 7 所示。

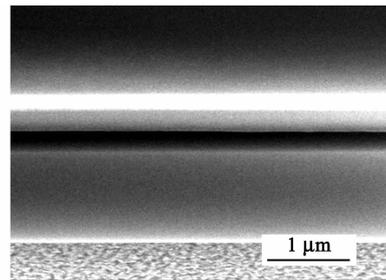


图 7 载气  $N_2$  流量为  $200\text{ cm}^3/\text{min}$ ,腔室压力为  $1\ 733\text{ Pa}$  释放后的空腔结构

## 3 结束语

通过研究载气  $N_2$  流量和腔室压力的变化对  $XeF_2$  释放牺牲层 poly-Si 刻蚀速率的影响发现,腔室压力保持不变,随着载气  $N_2$  流量的增加,刻蚀速率呈先增加后减少的趋势;载气  $N_2$  流量为  $200\text{ cm}^3/\text{min}$ ,随着腔室压力的增加,刻蚀速率逐渐增大。当腔室压力低于  $1\ 200\text{ Pa}$  时,随着腔室压力的增加,刻蚀速率的增长率逐渐增加;当腔室压力超过  $1\ 200\text{ Pa}$ ,随腔室压力的增加,刻蚀速率的增长率开始减小。

(下转第 933 页)