

# ICP刻蚀Mo侧壁角度及刻蚀速率的研究

田本朗<sup>1</sup>, 梁柳洪<sup>1,2</sup>, 何成勇<sup>1</sup>, 罗淦<sup>1</sup>, 郭耀祖<sup>1</sup>, 米佳<sup>1</sup>

(1. 中国电子科技集团公司第二十六研究所, 重庆 400060;

2. 中国电子科技集团公司第二十四研究所, 重庆 400060)

**摘要:**采用基于Cl基气体的电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀设备对金属Mo薄膜进行刻蚀,研究了刻蚀条件对侧壁角度以及刻蚀速率的控制。通过调节ICP干法刻蚀过程中射频源功率、ICP离子源功率、腔体压力、混合气体流量比例等工艺参数,实现了14.8°~85.0°图形侧壁倾角,表明图形侧壁角度可在大范围内得到控制,刻蚀速率可在148~232 nm/min调节,为薄膜体声波谐振器(FBAR)器件研制工艺打下良好基础。

**关键词:**电感耦合等离子体(ICP);Mo;薄膜体声波谐振器(FBAR);侧壁角度;刻蚀速率

**中图分类号:**TN305.7 **文献标识码:**A

## Research of Transformer-Coupled Plasma Etching Molybdenum Sidewall Profile and Etch Rate

TIAN Benlang<sup>1</sup>, LIANG Lihong<sup>1,2</sup>, HE Chengyong<sup>1</sup>, LUO Gan<sup>1</sup>, GUO Yaozu<sup>1</sup>, MI Jia<sup>1</sup>

(1. The 26th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China;

2. The 24th Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Chongqing 400060, China)

**Abstract:** This study examined the influence of the chlorine-based inductively-coupled plasma (ICP) dry etch system on Mo sidewall profile and etch rate. A sidewall angle of 14.8° to 85.0° was achieved by changing the radio-frequency (RF) and ICP power, chamber pressure, and mixed gas flow ratio during the ICP dry etching process. The experiment results show that the Mo sidewall profile can be controlled over a wide range, and the etching rate can be adjusted between 148 and 232 nm/min. Therefore, this study provides a helpful process guideline for fabricating thin-film bulk acoustic resonator (FBAR) devices.

**Key words:** inductively coupled plasma; molybdenum; film bulk acoustic resonator; sidewall profile; etch rate

### 0 引言

随着移动通信的发展,目前已进入5G甚至6G时代,网络传输速度和数据承载能力均获得极大的提升,开放的频段越多,导致工作频率越高,而对滤波器的性能及其小型化和集成化的要求也越高。薄膜体声波谐振器(FBAR)构成的滤波器具有品质因数(Q)值高、体积小、工作频率高、承受功率大以及与半导体和集成电路工艺兼容等特点<sup>[1-4]</sup>,与其他同类型的滤波器相比,它是一种性能优良的射频(RF)滤波器,是5G通讯系统应用中核心元器件之一,也是近年来研究的热点之一。

多年的研究和应用表明,无论从金属自身的性能,还是与FBAR器件中核心功能层AlN压电薄膜的匹配效果应用,金属Mo是FBAR器件电极材料

中较好的选择<sup>[1]</sup>。但在器件制备过程中,压电层会沿着垂直于金属表面进行生长,当下电极金属Mo侧壁角度过大时,压电层AlN薄膜易出现不连续的情况,致使后续制备过程中出现失效等问题,因此需要制备较小的下电极角度以满足器件制备需要。金属Mo薄膜的图形化实现方法较多,实验室常用的方法有湿法腐蚀和干法刻蚀。湿法腐蚀存在腐蚀速度慢、钻蚀严重、图形表面粗糙、侧壁角度较大等缺陷。干法刻蚀较大角度,会引发AlN压电薄膜覆盖性不好、生长质量差以及金属拐角处应力大等缺陷。两者都不适用于大批量生产过程。

本文采用基于Cl基气体的电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀设备对金属电极Mo薄膜进行干法刻蚀,通过调节ICP干法刻蚀设备的各种工艺参

数,如 RF 功率、ICP 离子源功率、腔体压力、Cl<sub>2</sub> 的气体流量及 O<sub>2</sub> 的气体流量等,研究其对金属 Mo 薄膜图形角度及刻蚀速率的影响。

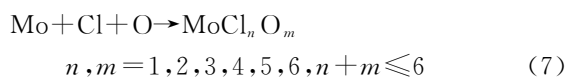
## 1 实验

### 1.1 实验原理

ICP 干法刻蚀过程是由复杂的物理变化和化学变化组成,其中化学变化主要由进入腔室的气体发生电离及电离后活性粒子与需要刻蚀的材料发生化学反应两个过程组成。首先,在高能量高频率的交变电场和电感耦合共同作用下,进入腔室的 Cl<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 反应气体与高速运动的电子发生碰撞,产生辉光放电,从而使气体发生解离或电离,形成大量的等离子体,如 Cl 和 O 原子、活性游离基、亚稳态原子以及带电离子等活性粒子。活性粒子之间发生碰撞而发生解离或电离,进而产生新的活性粒子。主要发生的解离反应和电离反应<sup>[5]</sup>为



其次,通过解离或电离产生的活性粒子跟样品表面暴露的光刻胶或金属 Mo 发生化学反应,生成气体或易挥发的固体物质被抽离,暴露出新的材料,让反应过程持续进行,称这种气体与固体接触面发生的化学反应过程为刻蚀过程。ICP 干法刻蚀设备对金属 Mo 的刻蚀过程主要以解离或电离中的 Cl 和 O 中性基团与金属 Mo 发生化学反应而起主要作用,主要反应机理可表示为



除以上发生的化学反应外,该过程还伴有物理反应。物理反应主要是解离或电离产生的粒子在 RF 源作用下获得能量,继而转化为动能。粒子高速运动且到达金属 Mo 表面时,将对表面产生强烈

的轰击作用;在加速运动过程中,还会与腔室中的气体分子或离子发生碰撞,引起气体分子或离子进一步解离或电离。因此,该物理反应过程对化学反应起到了明显的增强和辅助作用。一方面粒子在加速运动过程中与腔室中的粒子发生碰撞,自身或被碰撞的粒子发生解离或电离,为化学反应提供了更多的活性粒子;另一方面,高速运动的粒子到达金属 Mo 表面并对其产生轰击作用,使部分 Mo 原子获得能量而克服附近原子的束缚,脱离表面,形成自由运动的 Mo 原子,与腔室中的活性粒子反应形成气态物质被抽离;同时,高速运动的活性粒子主要轰击吸附于 Mo 表面的反应产物,使其脱离并暴露出下层新的金属 Mo 表面,从而促进化学反应持续进行。

对最终刻蚀结果产生影响的参数很多,如 RF 功率、ICP 离子源功率、腔室压力、Cl<sub>2</sub> 的气体流量和 O<sub>2</sub> 的气体流量等。其中 RF 功率源为腔体中的离子提供垂直于样品表面的加速电压,使得离子获得动能,对样品表面产生轰击作用,同时在腔室中与其他粒子发生碰撞;ICP 离子源位于腔室上部,为粒子提供回旋的能量,使腔体中的气体处于激发态;腔室压力的大小决定着刻蚀过程是以物理反应为主,还是化学反应为主,为活性粒子提供刻蚀环境;Cl<sub>2</sub> 的气体流量和 O<sub>2</sub> 的气体流量为刻蚀提供活性粒子,气体流量的大小不仅影响着刻蚀活性粒子的数量,也影响到化学反应和物理反应的效果。上述各参数对刻蚀结果的影响并非独立的,相互间还存在一定的关联。

### 1.2 实验方案

在干法刻蚀过程中影响刻蚀金属 Mo 最终图形角度的因素很多,过程也较复杂,为了达到预期结果,采用 LAM9600 刻蚀设备针对上述各参数进行研究,所用实验参数如表 1 所示。仿照文献[2]的方法,在研究某个参数时其他参数恒定不变,仅研究该参数的变化对刻蚀图形角度和刻蚀速率的影响。由表可见,通过调节实验参数获得金属 Mo 图形侧壁角度可调范围为 14.8°~85.0°,刻蚀速率为 148~267 nm/min。

表 1 实验参数表

序号	RF 功率/W	ICP 功率/W	腔室气压/mT	Cl <sub>2</sub> 气体流量/(cm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )	O <sub>2</sub> 气体流量/(cm <sup>3</sup> ·min <sup>-1</sup> )
1	50	300	20	50	100
2	100	300	20	50	100

续表

序号	RF 功率/W	ICP 功率/W	腔室气压/mT	Cl <sub>2</sub> 气体流量/(cm <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup> )	O <sub>2</sub> 气体流量/(cm <sup>3</sup> · min <sup>-1</sup> )
3	50	200	20	50	100
4	50	100	20	50	100
5	50	300	15	50	100
6	50	300	10	50	100
7	50	300	10	40	100
8	50	300	10	30	100
9	50	300	10	30	120
10	50	300	10	30	150

2 实验结果及讨论

图 1 为刻蚀过程中保持 ICP 功率、腔室压力、Cl<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 气体流量不变时,仅调节 RF 功率的图形形貌结果。由图可见,50 W 时侧壁角度为 66.2°,100 W 时侧壁角度为 85.0°。离子在电场作用下定向加速,随着 RF 功率的增加,腔室中离子能量增加,到达样品表面的动能增加,轰击作用增强,表现为刻蚀各向异性增强,金属 Mo 的图形侧壁角度增加。经测算,随着 RF 功率从 50 W 增加到 100 W,刻蚀速率从 232 nm/min 增加到 267 nm/min,RF 功率的增加对侧壁角度和刻蚀速率影响均较大。

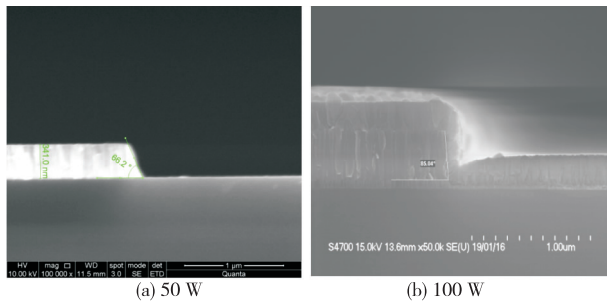


图 1 RF 功率变化的刻蚀结果分析图

图 2 是在刻蚀过程中保持 RF 功率、腔室压力、Cl<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 气体流量不变,ICP 功率变化对图形侧壁角度的影响。由图可见,当 ICP 功率为 200 W 时,侧壁角度为 50.8°;当 ICP 功率为 100 W 时,侧壁角度为 47.7°。结果表明,随着 ICP 功率的减小,刻蚀图形侧壁角度减小,但其变化范围较小,其原因主要是随着 ICP 功率的降低,腔体活性粒子随之降低,离子的平均自由程增加,刻蚀的各向异性减弱,刻蚀图形角度减小;当 ICP 功率超过一定范围时,进入腔体的气体完全被离化,则 ICP 功率的变化对刻蚀结果不会产生明显影响。功率从 200 W 减小到 100 W 时,刻蚀速率从 220 nm/min 减小到

204 nm/min,由此可见,随着 ICP 功率的降低,进入腔室的气体离化率降低,刻蚀速率减小。

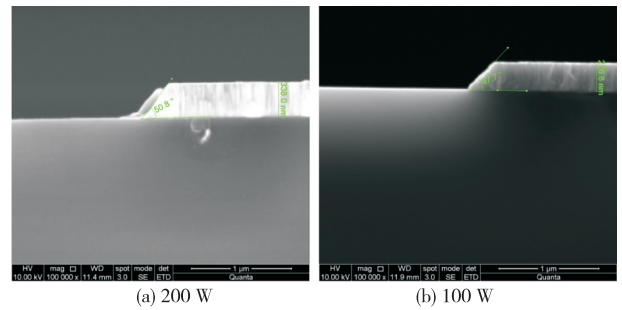


图 2 ICP 功率变化的刻蚀结果分析图

图 3 是在刻蚀过程中保持 RF 功率、ICP 功率、Cl<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 气体流量不变,腔室压力改变对刻蚀图形侧壁角度的影响。

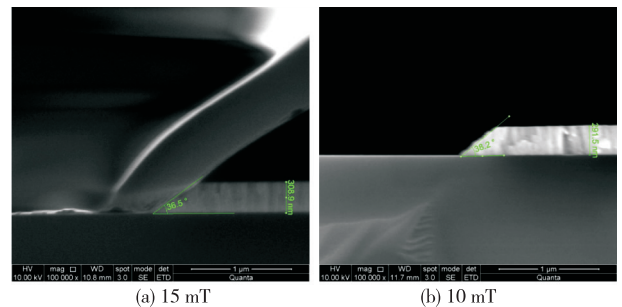


图 3 腔室气压变化的刻蚀结果分析图

由图 3 可见,当腔室压力为 15 mT(1 T = 133.322 Pa)时,图形侧壁角度为 36.5°;当腔室压力为 10 mT 时,图形侧壁角度为 38.2°。结果表明,随着腔室压力的减小,图形侧壁角度增加,但影响效果不明显。其主要原因是随着腔室压力减小,腔室内粒子随之减少,粒子的平均自由程增加,在加速运动过程中受到的散射减弱,到达样品表面的动能增加,导致刻蚀的各向异性增加。同时,随着腔室压力的降低,刻蚀产生的副产物更有利于被抽走。虽然粒子的平均自由程增加,但整个腔室的粒子数量减少,

产生的化学反应和物理轰击的整体效果随之减弱,导致刻蚀速率由 195 nm/min 降低至 182 nm/min。

图 4 是在刻蚀过程中保持 RF 功率、ICP 功率、腔室压力和  $O_2$  气体流量不变,调节  $Cl_2$  气体流量对刻蚀图形侧壁角度的影响。由图可见,当  $Cl_2$  气体流量为  $40\text{ cm}^3/\text{min}$  时,侧壁角度为  $33.1^\circ$ ;当  $Cl_2$  气体流量为  $30\text{ cm}^3/\text{min}$  时,侧壁角度为  $20.2^\circ$ 。结果表明,随着  $Cl_2$  气体流量的降低,图形侧壁角度减小,且调节范围较明显。其主要原因是在两种气体粒子中 Cl 的质量较重,在刻蚀过程中物理轰击大于化学反应,因此,随着  $Cl_2$  气体流量的减小,离化程度更高,刻蚀的各向同性增强,图形侧壁角度减小;同时 O 的相对比例增加,富裕的氧与光刻胶的反应加快,暴露的金属 Mo 表面比刻蚀速度快,导致刻蚀的角度减小。随着  $Cl_2$  气体流量减小,刻蚀速率由  $165\text{ nm}/\text{min}$  降低到  $158\text{ nm}/\text{min}$ ,影响较小。

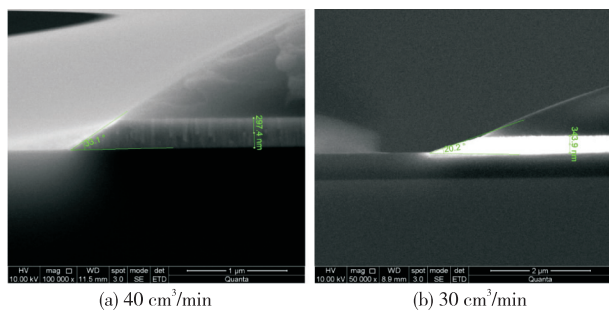


图 4  $Cl_2$  气体流量变化的刻蚀结果分析图

图 5 是在刻蚀过程中保持 RF 功率、ICP 功率、腔室压力和  $Cl_2$  气体流量不变,仅调节  $O_2$  气体流量对刻蚀图形侧壁角度的影响。由图可见, $O_2$  气体流量为  $120\text{ cm}^3/\text{min}$  时,侧壁角度为  $19.2^\circ$ ;  $O_2$  气体流量为  $150\text{ cm}^3/\text{min}$  时,侧壁角度为  $14.8^\circ$ 。结果表明,随着氧气流量的增加,刻蚀图形角度减小,但效果不明显。其主要原因是在刻蚀过程中  $O_2$  除了与 Cl 和 Mo 发生反应外,其主要与掩膜层光刻胶发生化学反应,因此,随着  $O_2$  气体流量的增加,化学反应提供的氧粒子增加,化学反应加快,特别是光刻胶的刻蚀速率加快,刻蚀各向同性增强,图形侧壁角度减小。随着  $O_2$  气体流量增加,刻蚀速率从  $151\text{ nm}/\text{min}$  变化到  $148\text{ nm}/\text{min}$ ,因此, $O_2$  气体流量的变化对刻蚀速率基本无影响。

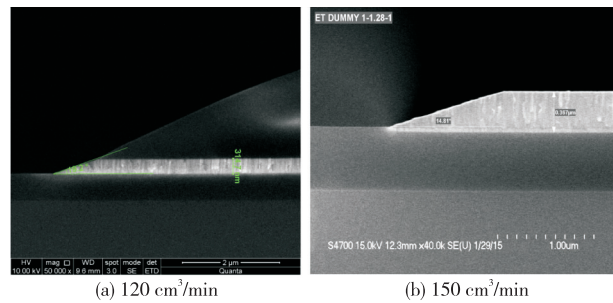


图 5  $O_2$  气体流量变化的刻蚀结果分析图

### 3 结束语

ICP 干法刻蚀工艺因其刻蚀形貌和刻蚀速率可控,被广泛应用于微细加工工艺。本文采用 ICP 刻蚀设备,通过调节刻蚀过程中 RF 功率、ICP 离子源功率、腔室压力、 $Cl_2$  气体流量和  $O_2$  气体流量等工艺参数,研究了其对刻蚀图形侧壁角度和刻蚀速率的影响,并获得刻蚀图形侧壁角度范围为  $14.8^\circ \sim 85.0^\circ$ ,且图形形貌良好。随着工艺参数的变化,刻蚀速率也发生相应变化。研究结果不仅可应用于 FBAR 器件研制过程,也可为微机电系统 (MEMS) 器件加工中其他薄膜材料的小角度刻蚀提供借鉴,同时为其他微细加工中高角度图形刻蚀提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 于小利, 罗中涌, 曹明, 等. AlN 薄膜体声波谐振器的二维数值模拟[J]. 压电与声光, 2012, 34(5): 661-663.
- [2] 田本朗, 徐阳, 曹家强, 等. 干法刻蚀条件对 Mo 侧壁角度的影响[J]. 压电与声光, 2016, 38(2): 199-202.
- [3] LI Nian, WANG Bin, QIAN Zhenghua. Suppression of spurious lateral modes and undesired coupling modes in frame-like FBARs by 2-D theory[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2020, 67(1): 180-190.
- [4] 刘娅, 陈凤, 黄晶, 等. 高性能温补型薄膜体声波滤波器的研制[J]. 压电与声光, 2023, 45(6): 795-799. LIU Ya, CHEN Feng, HUANG Jing, et al. Development of high performance TC-FBAR[J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2023, 45(6): 795-799.
- [5] 王玮, 蔡勇, 张宝顺, 等. ICP 刻蚀 GaN 侧壁倾角及刻蚀速率的控制[J]. 固体电子学研究与进展, 2012, 32(3): 219-224.