

文章编号:1004-2474(2014)05-0782-04

# 高密度 RF 等离子体刻蚀工艺直流自我偏压的研究

李悦

(北京大学 微电子研究院 微米/纳米加工技术国家重点实验室, 北京 100871)

**摘要:**直流自我偏压作为高密度射频(RF)等离子体刻蚀工艺中的重要电学参数,反映出具有高能量的离子对待刻蚀晶片的轰击效果,后者决定了刻蚀工艺的各向异性、刻蚀速率、选择比及形貌特征等工艺结果。该文以HBr作为刻蚀气体,采用电感耦合等离子体(ICP)金属刻蚀系统针对刻蚀工艺中的直流自我偏压进行研究。研究中分别改变离子源功率、衬底偏压功率、刻蚀压力及HBr气体流量,观察直流自我偏压及其峰值的相应变化规律。实验结果表明,随着离子源功率的升高,直流自我偏压将会轻度降低;升高偏压功率则会显著提升直流自我偏压。刻蚀压力与直流自我偏压呈正比例关系,HBr气体流量的变化及待刻蚀晶片的材质对直流自我偏压无显著影响。

**关键词:**ICP刻蚀系统;离子源功率;衬底偏压功率;刻蚀压力;气体流量;直流偏压

**中图分类号:**TN405.98 **文献标识码:**A

## Study on DC Self-Bias of High Density RF Plasma Source Etching Process

LI Yue

(National Key Lab. of Nano/Micro Fabrication Technology, Institute of Microelectronics(IME), Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** DC self-bias is the important process reading of high density RF plasma source etching process, by which ion energy and wafer bombardment are decided. In this research, ICP etcher is used and the effects of plasma power, platen power, etcher chamber pressure and HBr gas flow on the DC self-bias are studied by using HBr as the etching gas. The result shows that the higher DC self-bias is achieved when elevating either platen power or reactor pressure and the lower DC self-bias is gotten while plasma power is increased. The effect of HBr gas flow and etched wafer materials on the DC self-bias are not seen obviously in this process regime.

**Key words:** ICP etcher; plasma power; platen power; reactor pressure; HBr gas flow; DC self-bias

### 0 引言

借助半导体工艺加工技术的发展,工艺加工的特征尺寸已进入亚 100 nm 时代。在纳米级微结构及器件的研究和大规模生产中,高密度等离子刻蚀机、高密度等离子化学气相沉积(CVD)及先进的物理气相沉积(PVD)设备被广泛应用。上述设备均采用射频(RF)等离子体用于带电粒子的产生、加速、轰击或沉积。在这些工艺加工过程中,除常见的工艺参数,如应用于上、下电极的 RF 等离子电源功率、腔体的工作压力及工艺气体气流外,还有一个重要的工艺电学读数即存在于承载晶片工作台(电极)的直流自我偏压(直流偏压)。直流偏压对于离子轰击时的能量影响很大<sup>[1]</sup>,如在 PVD 工艺的金属淀积前,为去除金属自然氧化层以达到减小金属与硅材之间接触电阻的目的,需要进行预清洗。在从事预清洗工艺的腔体上,应用了 2 个 13.56 MHz 的 RF 等离子体电源。其中一个电源位于腔体外,用于产

生轰击所需正离子;另一个电源则加于承片台上,以提供 RF 电压。RF 电压产生直流偏压,后者将离子加速并引向待加工晶片表面,以离子轰击的形式去除自然氧化层。类似的情况也发生在用于形成各向异性结构的等离子刻蚀工艺中。因此,本文以电感耦合等离子体(ICP)刻蚀机和溴基为基础,对高密度 RF 等离子体刻蚀工艺中的直流偏压及其峰值与工艺参数的相互关系进行研究。研究内容包括气体流量、刻蚀压力、离子源功率、偏压功率及直流偏压,通过实验结果发现其间的相互关系并得到合理的理论解释。

### 1 实验

#### 1.1 高密度 RF 等离子体 ICP 刻蚀系统

英国 STS 公司所生产的 ICP 刻蚀系统是一种高密度 RF 等离子刻蚀工艺设备。ICP 的优点是等离子体密度和离子能量可分别控制,从而实现了高

收稿日期:2013-12-04

作者简介:李悦(1964-),男,北京人,高级工程师,主要从事纳米工艺研究及工艺加工设备的调研与采购工作。

刻蚀速率和高选择比<sup>[2-3]</sup>。该设备采用单腔体、单晶片工艺加工模式,配备 13.56 MHz 的等离子 RF 电源,其功率范围为 0~1 000 W。衬底偏压电源为 13.56 MHz 的 RF 电源,其功率范围为 0~300 W。真空系统采用机械泵与分子泵组合的工作模式,可达  $6.665 \times 10^{-4}$  Pa 以下的真空度来满足刻蚀工艺对真空度要求。设备所配备的工艺气体有  $\text{Cl}_2$ 、 $\text{HBr}$ 、 $\text{BCl}_3$  和  $\text{SF}_6$ 。目前常用工艺为以氯基、溴基为刻蚀剂来刻蚀金属铝。

## 1.2 刻蚀工艺

本文采用的衬底材料为 10.16 cm、n 型、(100) 面、厚 520  $\mu\text{m}$  和电阻率  $2 \sim 4 \Omega \cdot \text{cm}$  的单面抛光单晶硅片,分别以如下两种方式产生待刻蚀晶片样品:以热氧化方式生成厚度为 500 nm 的  $\text{SiO}_2$  膜;采用 TEMPRESS 公司的 LPCVD 系统淀积厚度为 900 nm 的多晶硅薄膜。上述两种晶片以相同的工艺流

程菜单分别在上述的 ICP 系统中进行以  $\text{HBr}$  为腐蚀剂的刻蚀工艺实验。实验中每次改变某一工艺参数而维持其他参数不变,以此来观察直流偏压及其峰值的数值与变化的工艺参数间的对应关系。不同工艺参数的选取,离子源功率为 400~900 W,衬底偏压功率为 50~250 W,工艺压力 0.399 9~1.999 5 Pa,  $\text{HBr}$  气体流量为 25~45  $\text{cm}^3/\text{min}$ 。表 1~4 分别为刻蚀实验中上述单一工艺参数变化时直流偏压及其峰值的读数。针对 ICP 某些刻蚀工艺中因追求高选择比而采用很小衬底偏压功率的情况,在其他工艺参数及其变化范围保持不变的前提下,选择 10~20 W 衬底偏压功率重复上述实验。表 5~8 分别为此种实验情况下直流偏压及其峰值的读数。表 9 为基于所有实验结果而得到的工艺参数与直流偏压对应关系的总结。

表 1 偏压功率对直流偏压及峰值的影响

离子源 功率/W	偏压 功率/W	HBr 流量/ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	压力/Pa	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
				直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
600	50	25	0.399 9	-110	-400	-114	-420
600	100	25	0.399 9	-192	-670	-202	-682
600	150	25	0.399 9	-280	-930	-276	-925
600	200	25	0.399 9	-320	-1 130	-340	-1 140
600	250	25	0.399 9	-420	-1 450	-400	-1 440

表 2 离子源功率对直流偏压及峰值的影响

离子源 功率/W	偏压 功率/W	HBr 流量/ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	压力/Pa	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
				直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
400	150	25	0.399 9	-320	-1 145	-306	-1 075
500	150	25	0.399 9	-305	-1 085	-290	-1 000
600	150	25	0.399 9	-280	-930	-276	-925
700	150	25	0.399 9	-264	-914	-255	-885
800	150	25	0.399 9	-250	-900	-236	-815
900	150	25	0.399 9	-240	-830	-228	-765

表 3 压力对直流偏压及峰值的影响

离子源 功率/W	偏压 功率/W	HBr 流量/ ( $\text{cm}^3/\text{min}$ )	压力/Pa	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
				直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
600	150	25	0.399 9	-280	-930	-276	-925
600	150	25	0.799 8	-330	-1 130	-300	-1 055
600	150	25	1.199 7	-355	-1 240	-310	-1 140
600	150	25	1.599 6	-375	-1 270	-321	-1 185
600	150	25	1.999 5	-393	-1 300	-330	-1 225

表4 气体流量对直流偏压及峰值的影响

离子源 功率/W	偏压 功率/W	HBr 流量/ (cm <sup>3</sup> /min)	压力/Pa	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
				直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
600	150	15	0.399 9	-280	-1 000	-282	-915
600	150	25	0.399 9	-280	-930	-276	-925
600	150	35	0.399 9	-290	-1 015	-290	-960
600	150	45	0.399 9	-285	-1 015	-274	-960

表5 偏压功率对直流偏压及峰值的影响

离子源 功率/W	偏压 功率/W	HBr 流量/ (cm <sup>3</sup> /min)	压力/Pa	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
				直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
400	10	25	0.399 9	-34	-160	-30	-120
400	15	25	0.399 9	-50	-190	-43	-180
400	20	25	0.399 9	-70	-260	-67	-235

表6 离子源功率对直流偏压及峰值的影响

离子源 功率/W	偏压 功率/W	HBr 流量/ (cm <sup>3</sup> /min)	压力/Pa	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
				直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
400	20	25	0.399 9	-70	-260	-67	-235
600	20	25	0.399 9	-50	-185	-45	-200
800	20	25	0.399 9	-42	-155	-37	-170

表7 压力对直流偏压及峰值的影响

离子源 功率/W	偏压 功率/W	HBr 流量/ (cm <sup>3</sup> /min)	压力/Pa	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
				直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
900	11	25	0.399 9	-17	-89	-18	-90
900	11	25	0.666 5	-22	-115	-27	-150
900	11	25	1.599 6	-31	-170	-31	-165

表8 气体流量对直流偏压及峰值的影响

离子源 功率/W	偏压 功率/W	HBr 流量/ (cm <sup>3</sup> /min)	压力/Pa	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
				直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
900	11	25	0.399 9	-17	-89	-18	-90
900	11	35	0.399 9	-18	-96	-19	-95
900	11	45	0.399 9	-17	-95	-19	-97

表9 工艺参数与直流偏压变化的关系

工艺参数	变化趋势	SiO <sub>2</sub> 测试晶片		多晶硅测试晶片	
		直流偏压/V	偏压峰值/V	直流偏压/V	偏压峰值/V
偏压功率	增加	较大增加	较大增加	较大增加	较大增加
离子源功率	增加	轻度降低	轻度降低	轻度降低	轻度降低
压力	增加	轻度增加	轻度增加	轻度增加	轻度增加
HBr 流量	增加	无显著影响	无显著影响	无显著影响	无显著影响

## 2 分析及讨论

等离子体作为物质存在的第四种状态已广泛应

用于半导体工艺加工技术中。PVD、CVD 及刻蚀等工艺都使用了等离子体技术以完成相应的工艺过

程。除 PVD 工艺中用于较大的工艺特征尺寸器件的金属薄膜淀积外,上述其余工艺都采用 RF 等离子(PVD 工艺中的预清洗工艺,用于大高宽比、小尺寸器件的金属薄膜淀积均采用了 RF 等离子技术)。与直流等离子体不同,RF 等离子体存在直流偏压,是 RF 等离子体特有现象。如反应离子刻蚀工艺产生的原理:一对面积不相等的电极板(工艺腔体及承片台),将较大面积的电极板(工艺腔体)接地。RF 功率源通过电容耦合方式与面积较小的电极板(承片台)连接。当 RF 电压加于面积较小的电极板瞬间,因电子质量远小于离子质量,大量电子快速流向接地电极,而接地极板面积相对连接 RF 电源电极面积较大,其结果使 RF 电浆内离子浓度远高于电子浓度,为达到离子流量与电子流量的相等且维持 RF 等离子体内的电场为 0,面积较小的电极将自动降低电浆电压以吸引离子,由此产生 RF 等离子体特有的直流自我偏压即直流偏压<sup>[1]</sup>。直流偏压与两电极板的面积比成比例关系。当接地电极板的面积大于连接 RF 电源电极板面积时:高能量的离子流向连接 RF 电源的电极,造成对此电极的轰击,而接地电极所受来自于离子的轰击可忽略,此时直流偏压的极性为负。当接地电极板面积小于连接 RF 电源的电极板面积时,高能量的离子流向并轰击接地电极,而连接 RF 电源的电极所遭受的轰击可忽略,此时直流偏压的极性为正。

ICP 系统有 2 个独立的 13.56 MHz 的 RF 电源,一个连接于工艺腔体外的电感线圈,另一个连接于工艺腔体内的承片台。当给工艺腔体外的电感线圈施加电压时,腔体内产生交变的电磁场,当电场达到一定程度时,气体产生放电现象从而进入等离子状态。交变电磁场使等离子体内电子的路径改变,增加了电离程度,从而增加了等离子体的密度。连接于承片台的 RF 电源作为辅助功率来加强等离子体的产生并提供偏置电压,后者提供离子轰击的能量。与传统的二级平行板式反应离子刻蚀相比,ICP 系统实现了等离子密度与离子能量的分别控制,从而得到高刻蚀速率与高选择比。

当提升承片台的偏压功率时,根据上述直流偏压的产生原理,等离子中的电子流向 ICP 工艺腔体从而使离子浓度加大的现象得到加强,由此使作为吸引离子的直流偏压得到较大增加(负值更大)来维持电场为 0,呈现出实验所得到的趋势,其结果是使离子在通过阴极暗区时得到更大的能量,使位于承

片台的晶片承受更高的离子轰击。

当提升离子源功率时,工艺腔体内由耦合而得到的电场增强,从而使气体电离程度得到提高,其结果造成等离子体内离子浓度增加,等离子体的电流增大,带电粒子运动更流畅,从而带来用于吸引离子的直流偏压轻度降低。由此可看出,直流偏压不仅由偏压功率来决定,同时,它也受到离子源功率的影响,是 2 个 RF 电源互相影响的产物。在 2 个 RF 功率中,偏压功率对其影响较大。与传统二级平行板式反应离子刻蚀中的直流偏压相比,ICP 中的直流偏压来的更复杂。

增加工艺腔体压力,在本研究的工艺范围内,直流偏压将会轻度增加而随后逐渐恒定。这是因为压力的升高缩短了气体粒子的平均自由程,导致粒子的碰撞几率增高,从而导致离子密度升高,离子能量减少<sup>[1]</sup>。其结果是因为离子能量的降低,与较低工艺腔体压力状态相比,离子较难离开等离子体而通过壳区加速到达阴极承片台。为维持等离子体内的电场为 0,直流偏压将会升高来吸引离子。随着压力的逐渐增大,离子的密度也将增大而使等离子体内电流增强,这将抵消离子的能量损失从而使直流偏压升高的趋势减缓。表 3 表明了此种现象。

针对 HBr 气体流量这一工艺参数,研究结果显示其变化在此工艺范围对直流偏压无显著影响。两种不同刻蚀晶片样品对直流偏压的影响差别不明显,其原因是承片台与晶片接触部分为绝缘陶瓷材料,测试样品是否导电都不会对直流偏压的读数产生影响。

### 3 结束语

本文对高密度 RF 等离子体刻蚀工艺中的直流自我偏压参数进行研究,通过不同工艺试验得到直流偏压与工艺参数的对应关系,并对其进行了合理的理论解释。直流偏压作为对离子能量有重要影响力的电学参数受离子源功率、偏压功率及工艺压力的影响,同时其数值预示着 ICP 刻蚀工艺的结果。

### 参考文献:

- [1] 莊达人. VLSI 制造技术[M]. 台湾:高立图书有限公司,1995.
- [2] ZHENG Cui. Micro-nanofabrication technologies and applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2005:206-208.
- [3] POPOV O A. High density plasma sources design, physics and performance[M]. USA: Noyes Publications,1995:100-101.