

氮化硅薄膜的 CHF_3/O_2 混合等离子干法刻蚀研究

孙家宝, 孙一军

(浙江大学 微纳加工中心, 浙江省 杭州市 310013)

摘要: 氮化硅薄膜在微纳米结构器件和集成电路芯片制造等领域具有重要意义。研究表明, CHF_3/O_2 气体比例对氮化硅薄膜的刻蚀效果产生显著影响。在该研究中, 基于感应耦合等离子体干法刻蚀设备, 通过固定工艺气体 CHF_3+O_2 总流量为 50 sccm, ICP 功率为 200 W, RF 功率为 50 W, 工艺压力为 5 mTorr, 工艺温度为 20°C, 调整 O_2 比例至 10%, 获得了陡直的氮化硅侧壁 (约 89°) 和较低的下层硅表面粗糙度 (0.2nm)。此外, 研究中还利用 X 射线光电子能谱仪对样品表面残留物进行了组分分析, 进一步认识了 CHF_3/O_2 等离子干法刻蚀机理。

关键词: 感应耦合等离子干法刻蚀设备; CHF_3/O_2 混合等离子体; 氮化硅薄膜侧壁轮廓; 硅表面粗糙度

1 引言

氮化硅 (Si_3N_4) 在微纳米电子器件制造方面具有重要作用, 如用于栅极介质[1,2]、干法刻蚀掩蔽层[3、4]、钝化层和保护层等[5-7]。随着器件尺寸的缩小, Si_3N_4 掩膜的各向异性等离子蚀刻变得至关重要。典型的刻蚀工艺需要过度刻蚀 Si_3N_4 以彻底去除残留。然而, 过度刻蚀会导致下层硅 (Si) 表面粗糙度增加, 降低器件性能。因此, 优化蚀刻工艺实现垂直侧壁轮廓和下层 Si 的低表面粗糙度是制造小尺寸高性能微纳米器件的关键。

然而, 以往的研究往往只关注 Si_3N_4 薄膜刻蚀的某些方面, 缺乏系统性的研究来同时实现 Si_3N_4 薄膜的各向异性蚀刻和下层 Si 的低表面粗糙度。此外, 尽管 ICP 设备具备独立控制工艺参数的能力, 可以为微纳米器件的制造提供更加出色的各向异性蚀刻技术, 基于感应耦合等离子 (Inductively Coupled Plasma, ICP) 刻蚀设备运用 CHF_3/O_2 混合等离子体对 Si 晶圆表面 Si_3N_4 薄膜的刻蚀研究依然相对较少。

因而, 本研究深入探究了基于 ICP 设备的 Si_3N_4 薄膜的 CHF_3/O_2 混合等离子干法刻蚀特性。主要研究内容包括刻蚀后 Si_3N_4 薄膜的侧壁轮廓和下层 Si 晶圆的表面粗糙度。此外, 研究中还利用 X 射线光电子光谱仪 (XPS) 分析了经过不同 O_2 比例的 CHF_3/O_2 混合等离子体处理的样品表面残留物组分。

2 实验

2.1 Si 晶圆准备

实验中, 使用直径为 6 英寸 (150mm) 的单晶 Si 晶圆作为衬底, 晶圆电阻率为 2-10 $\Omega\cdot\text{cm}$, 掺杂类型为 n 型, (100) 晶向。

2.2 Si 晶圆清洗:

1) 清洗准备: 将加热台温度设定为 200°C, 加热去离子水至 100°C, 用热去离子水冲洗样品盒和聚四氟乙烯烧杯, 然后将样品盒和聚四氟乙烯烧杯在烘箱中以 80°C 烘 10 min 备用。

2) 去除有机物: 将 Si 晶圆放入聚四氟乙烯烧杯中, 加入丙酮超声清洗 5 min, 倒出丙酮并用热去离子水冲洗干净, 再加入无水乙醇超声清洗 5 min, 倒出无水乙醇并用热去离子水冲洗干净。上述过程重复两次。

3) 去除氧化层: 将 1000 ml 去离子水加热至 80°C, 加入 200 ml 氨水 (NH₄OH) 和 200 ml 双氧水 (H₂O₂), 搅拌均匀后放入硅晶圆, 烧煮 15 min, 热去离子水冲洗干净。

4) 去除金属玷污: 将 1500 ml 去离子水加热至 85°C, 加入 250 ml 质量分数为 36% 的盐酸 (HCl) 溶液和 250 ml 双氧水 (H₂O₂), 搅拌均匀后放入硅晶圆, 烧煮 15 min, 热去离子水冲洗干净。

5) 烘干: 将硅晶圆置于 80°C 烘箱中烘干待用。

2.3 Si₃N₄ 薄膜沉积与测量

1) Si₃N₄ 薄膜的制备在低压化学气相沉积 (LPCVD) 设备中进行, 前驱体为二氯硅烷 (SiCl₂H₂) 和氨气 (NH₃), 沉积温度 820°C, 沉积压力 170 mTorr, SiCl₂H₂ 流量 50 sccm, NH₃ 流量 200 sccm, SiCl₂H₂/NH₃ 流量比 1:4, 沉积时间 40 min。

2) 使用椭圆偏振光谱仪对 Si₃N₄ 薄膜进行了测量, 直径 6 英寸的晶圆平面内, 取上、下、左、右、中间 5 个点, 上、下、左、右 4 个点距离边缘 2 mm。最终测得 Si₃N₄ 薄膜的平均厚度为 100 nm, 折射率为 1.95。

2.4 样品表面图形化

刻蚀工艺前, 在 Si₃N₄ 表面旋涂一层 5350 正性光刻胶, 匀胶转速 3500 rpm, 旋涂时间 60 s, 105°C 前烘 4 min。使用型号为 Karl Suss MA6-BSA 紫外光刻机对光刻胶进行曝光处理, 曝光功率 380 W, 光强 7.9 mJ/cm², 曝光时间 4.5 s。曝光后, 采用稀释的型号为 AR300-26 的显影液进行显影处理, 显影液与水的比例为 1:7 (体积比), 显影时间为 12 s。

2.5 Si₃N₄ 薄膜的干法刻蚀

Si₃N₄ 薄膜干法刻蚀是在 ICP 蚀设备中进行的, ICP 功率主要由 ICP 源提供, ICP 源本身通常由一对电极和匹配网络组成, 用于生成高频 (13.56MHz) 电磁场, 以产生等离子体。RF 功率则由 RF 源提供, RF 源通常由高功率的 RF 发生器、匹配网络和电容等组成, 用于产生高频 (13.56MHz) 交变电场, 并调节其输出功率。在干法刻蚀过程中, 需要将待刻蚀物料放置于具有 RF 电极的载片台上, 通过引入 RF 功率来使电极产生交变电场, 从而在被刻蚀的样品表面形成直流电子束, 促进反应气体的解离和离子化, 以及粒子轰击效应等。因此, 在干法刻蚀中, ICP 功率主要控制等离子体的密度和活性, 而 RF 功率则主要控制反应气体