

CF₄ 和 O₂ 等离子体刻蚀改善氮化硅薄膜形貌研究

魏育才

(福建省福联集成电路有限公司, 福建 351115)

摘要: 探讨 PA 工艺因介电层高低差发生金属线路内部断裂的改善方案。以不同光刻条件和刻蚀条件为基础, 对介电层 (Si₃N₄) 进行 ICP 刻蚀。研究表明, 增加曝光焦距, 刻蚀完的侧壁倾斜角改变不大; 而光刻胶对氮化硅的刻蚀选择比越高, 刻蚀完氮化硅侧壁斜角变化越大。当光刻胶对氮化硅的刻蚀选择比为 2.4 时, 刻蚀完氮化硅的侧壁斜角可控制在 45° ~ 65°。

关键词: CF₄ 和 O₂ 等离子体刻蚀; ICP 刻蚀; 氮化硅刻蚀; 掩膜退缩; PA 工艺。

中图分类号: TN405 文章编号: 1674-2583(2019)07-0040-04

DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2019.07.013

中文引用格式: 魏育才.CF₄和O₂等离子体刻蚀改善氮化硅薄膜形貌研究[J].集成电路应用, 2019, 36(07): 40-43.

Study on Silicon Nitride Shape Profile Improvement by CF₄ and O₂ Plasma Etching

WEI Yucai

(Unicompound Semiconductor Corporation, Fujian 351115, China.)

Abstract — This paper is a mechanism discussion of improvement solution for metal circuit cracking which caused by the difference height of dielectric layer in PA process. The dielectric layer (Si₃N₄) ICP etching is base on different lithography and etching conditions. The result shows that increasing the exposure focus, the variation of bevel angle is almost unchanged after etched; but the raise huge changing under the high selectivity ratio of photoresist to silicon nitride, when the etching selectivity ratio of photo resist to silicon nitride is 2.4, the silicon nitride profile angle can be controlled in 45° ~ 65°.

Index Terms — CF₄ and O₂ plasma etching, ICP etching, Si₃N₄ etching, mask retraction, PA process.

1 引言

随着半导体科学技术的进步, 以半导体科技为基础的高科技产品层出不穷, 运用领域涉及军事和民用。集成电路作为半导体核心科学技术, 是目前半导体类产品重要的组成部分。半导体集成电路运用领域的不断拓宽使得市场对集成电路的需求量与日俱增, 但同时也对产品的性能的要求也越来越高。

然而, 随着集成电路越来越密集, 半导体工艺技术越来越复杂, 晶体管性能的不断改进, 势必将减小晶体管的几何尺寸, 增加单位面积的器件数量, 从而降低了芯片的成本, 提高了晶体管的电性能, 如能耗、速度等^[1]。

但随着几何尺寸下降以及布线密度增加, 连接窗 (contact window) 与金属线路之间因介电层而有高低差, 使得介电层与金属线路接触位置在金属镀膜后容易因介电层形貌过于垂直导致金属线路断线。增加金属黏合层 (glue layer) 可以增加线路于侧壁之黏合, 但随着黏合层的增加, 连线电阻和寄生电容也会增加, 影响器件的速度; 增加金属厚度虽可确保不断

线, 但内部断裂 (crack) 的部分仍会造成因电阻造成局部高温等问题, 如图 1 所示。针对目前集成电路金属布线工艺所面临因高低差造成的断裂, 可通过改变介电层侧壁形貌以应对越来越小的尺寸要求并减少金属接线处内部断裂, 提高可靠度与良率。

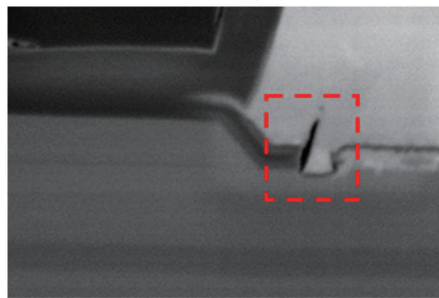


图 1 金属层内部断裂 (crack)

2 工艺

介电层选择方面, 氮化硅作为一种优秀的半导体介电材料, 在半导体生产工艺中常被用作绝缘层、表面钝化层、最后保护膜和结构功能层^[2]。所以目前 HBT 工艺中选用氮化硅作为介电层。在氮

基金项目: 福建省科技型企业技术创新课题项目。

作者简介: 魏育才, 福建省福联集成电路有限公司, 研究方向: 集成电路制造技术。

收稿日期: 2019-05-09, 修回日期: 2019-06-09。

化硅刻蚀方面,目前工艺有湿法刻蚀和干法刻蚀两种,湿法刻蚀一般通过热 H_3PO_4 进行刻蚀,但湿刻蚀受限于刻蚀液寿命和刻蚀均匀性问题^[3]。如今半导体芯片尺寸越来越小,图形更加细微,需要具有刻蚀速率快、各向异性高、均匀性好和好的刻蚀形貌,纯液体化学刻蚀各向同性,图形保真度差,具有局限性,而纯物理刻蚀慢,选择性差,因此具有化学和物理作用的干法刻蚀逐渐成为趋势。干法刻蚀氮化硅一般采用氟基气体,像 CHF_3 、 CH_4 、 SF_6 、 C_2F_6 等都可以有效刻蚀氮化硅^[4,5],但如果选用单纯的碳氟基气体则容易形成聚合物侧壁保护,不利于刻蚀的进行,加入氧气有助于聚合物的去除,本实验以 CF_4 和 O_2 混合气体作为研究对象。

干刻蚀主要有 PE (等离子刻蚀)、RIE (反应离子刻蚀) 和 HDP (高密度等离子刻蚀) 三种模式。PE 刻蚀有较高的刻蚀速率、较好的选择比和较低的刻蚀损伤,但与湿刻蚀一样存在各向同性倾向问题,无法满足各向异性较高的一些制程。RIE 刻蚀属于自由基的化学反应、离子冲击物理反应,刻蚀特点以各向异性为主,但由于无法单独控制离子能量和离子通量,对刻蚀衬底的损伤较大;HDP 刻蚀则避免了 RIE 刻蚀的缺点,对离子能量和离子通量分开控制,更加容易在损伤较小的情况下获得适合的形貌,主要有电子回旋共振等离子体 (ECR)、电感耦合等离子 (ICP)、螺旋波等离子体 (HWP) 等^[6-8]。

目前氮化硅多数采用 PE 或 PIE 刻蚀,刻蚀完再进行金属镀膜,侧壁剖面形貌示意图如图 2 (a) 所示,由于 PE 或 PIE 刻蚀以及碳氟刻蚀气体的特性,使得介电层侧壁形貌过于垂直,导致金属镀膜在阶梯覆盖时出现断裂不连续的情况,图 2 (b) 为改善目标,希望将介电层氮化硅的倾斜角度控制在 $45^\circ \sim 65^\circ$ 之间,形成具有一定倾斜角度的氮化硅侧壁形貌,有利于金属阶梯覆盖,从而改善金属层内部断裂的现象。由于 HDP 在刻蚀控制上具有一定优势,能够分开控制离子密度和物理方向,所以实验机台选用 ICP 刻蚀机。

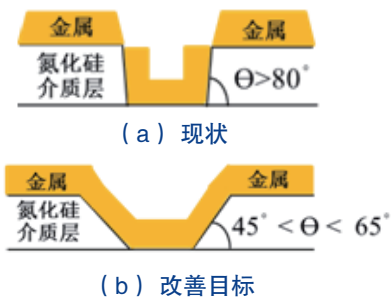


图 2 Si_3N_4 剖面斜边示意图

而实现具有倾斜角度的介电层侧壁,也可以从光刻条件入手。通过光刻机进行曝光能量与焦距的调整,使显影后的光刻胶产生不同的形貌,再利用

烤箱进行烘烤,由于光刻胶中的溶剂因温度而挥发,造成光刻胶体积缩小,也会使得光刻胶图形边缘形貌发生改变,从而降低角度,有利于后续刻蚀出倾斜角度的介电层侧壁,本次实验我们将通过调整曝光焦距进行测试。

综上所述,在工艺选择方面,实验将用 ICP 刻蚀机对氮化硅薄膜进行干刻蚀,并以 CH_4 和 O_2 混合气体、曝光焦距作为基础实验条件,研究不同工艺参数对氮化硅薄膜侧壁形貌的影响。

3 实验

3.1 实验设备

光刻机,光刻胶涂布机,光刻胶显影机,无尘烤箱,等离子刻蚀机 (ICP),湿刻蚀机,化学气相沉积机,聚焦离子束机 (Hitachi NX2000),膜厚测试仪 (UV1250SE)。

3.2 电感耦合等离子刻蚀机 (ICP) 工作原理

实验所用电感耦合等离子刻蚀机 (ICP) 来自英国 SPTS,设备腔体反应室结构简图如图 3 所示,反应气体从腔体顶部通入,再由底部涡轮泵将气体抽走,反应室配有 source RF 和 platen RF 两个射频,其中 source RF 主要控制反应等离子体密度,在反应室上部;而 platen RF 则主要偏向控制等离子能量轰击力度,位于静电吸盘下方。刻蚀过程中需要平衡两者的射频功率,控制好腔体压力和气体流量才能刻蚀出理想形貌。

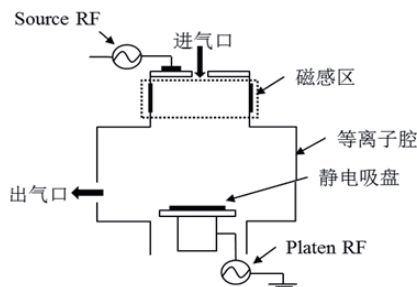


图 3 ICP 反应室结构

3.3 实验过程

将砷化镓晶圆片经过湿刻蚀机清洗后进行化学气相沉积,氮化硅薄膜沉积厚度为 $1\,500\text{ \AA}$,再进行光刻胶涂布、显影和坚膜,光刻胶厚度为 $14\,000\text{ \AA}$,在同一片晶圆片上进行不同焦距曝光,在不影响产品线宽规格的前提下,曝光焦距选择从 0 到 1.2,如图 4

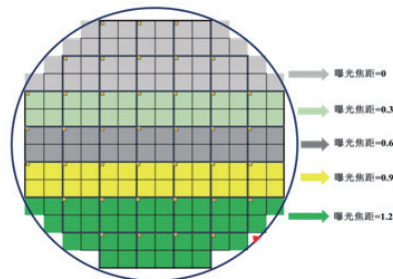


图 4 光刻焦距矩阵

所示,最后将制备好的测试片用于 ICP 刻蚀。

3.4 分析过程

通过膜厚测试仪 (UV1250SE) 换算刻蚀前后的膜厚变化来确定 ICP 刻蚀后光刻胶 (PR) 和氮化硅 (Si_3N_4) 薄膜刻蚀率 (ER)、均匀性 (U), 并计算选择比 (S)。换算如式 (1)、式 (2)、式 (3)。

$$\text{ER} = (\text{刻蚀前膜厚} - \text{刻蚀后膜厚}) / \text{刻蚀时间} \quad (1)$$

$$U = (\text{ER}_{\max} - \text{ER}_{\min}) / (2 \times \text{ER}_{\text{avg}}) \times 100\% \quad (2)$$

ER_{avg} 为晶圆片各个位置刻蚀率的平均值。

$$S = \text{ER}_{\text{PR}} / \text{ER}_{\text{Si}_3\text{N}_4} \quad (3)$$

ER_{PR} 为光刻胶刻蚀率, $\text{ER}_{\text{Si}_3\text{N}_4}$ 为氮化硅 (Si_3N_4) 薄膜刻蚀率。

利用聚焦离子束机 (Hitachi NX2000) 对晶圆片特征尺寸区进行剖面切割分析并确认光刻胶膜厚、氮化硅薄膜厚、刻蚀前后的剖面倾斜角度变化等, 图 5 为器件特征尺寸刻蚀前的剖面形貌。

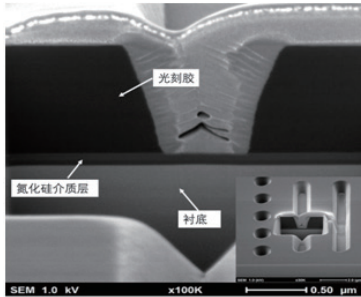


图 5 特征尺寸区刻蚀前剖面形貌

4 结果与讨论

4.1 曝光焦距对光刻胶侧壁倾斜角度的影响

图 6 为不同曝光焦距对光刻胶侧壁倾斜角度的影响, 在其他光刻参数不变的情况下改变曝光焦距从 0 到 1.2, 从图 6 和图 7 可以看出, 随着曝光焦距的增大, 光刻胶的侧壁倾斜角度有减少趋势, 而晶圆片不同曝光位置的光刻胶膜厚维持在 $1.4 \sim 1.5 \mu\text{m}$ 左右, 均匀性控制在 4% 以下, 说明光刻胶涂布均匀稳定, 可满足后续刻蚀的进行。

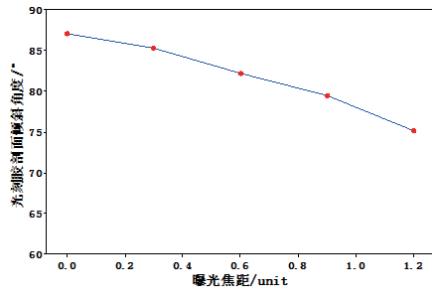
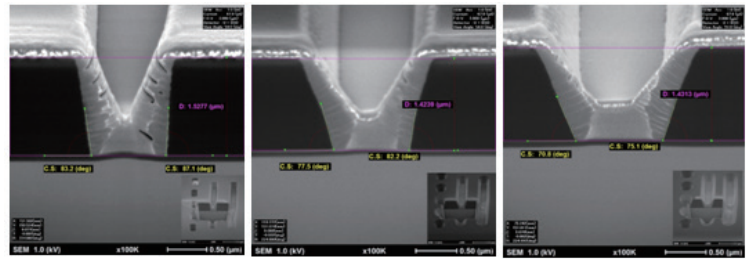


图 6 不同曝光焦距对光刻胶侧壁倾斜角度的影响

4.2 不同气体流量比对氮化硅薄膜刻蚀的影响

图 8 为不同气体流量比下氮化硅刻蚀率和选择比, 当 ICP source RF 和 platen RF 分别为 200 W 和



(a) 曝光焦距 0 (b) 曝光焦距 0.6 (c) 曝光焦距 1.2
图 7 光刻胶剖面 FIB

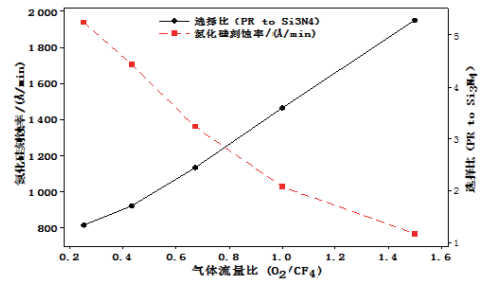


图 8 不同气体流量比下氮化硅刻蚀率和选择比

60 W, 腔体压力为 5 mTorr, O_2 和 CF_4 总流量为 100 sccm 时, 从图中可以看出, 随着氧气含量的增加, 氮化硅刻蚀率呈下降趋势, 光刻胶对氮化硅的选择比上升。这是由于 O_2 含量增加导致光刻胶刻蚀变快, 同时在总流量一定的情况下, CF_4 含量则降低。所以氮化硅刻蚀率下降, 两者共同影响导致选择比上升。当气体流量比为从 0.25 提高到 1.5 时, 氮化硅刻蚀率为从 1940 Å/min 下降到 767 Å/min , 选择比从 1.3 上升到 5.3。

4.3 光刻和刻蚀条件对氮化硅侧壁倾斜角度的影响

图 9 和图 10 分别为不同选择比和不同曝光焦距

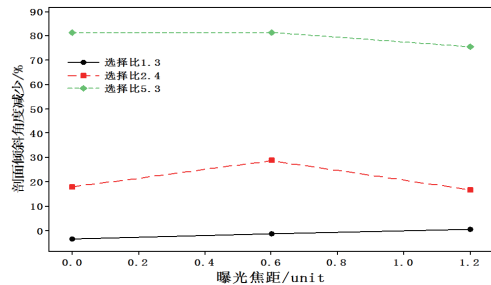
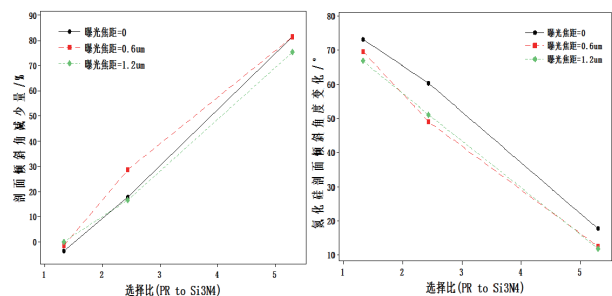


图 9 不同曝光焦距对刻蚀后氮化硅侧壁倾斜角度的影响



(a) (b)
图 10 不同选择比对刻蚀后氮化硅侧壁倾斜角度的影响

对刻蚀后氮化硅侧壁倾斜角度的影响,纵轴的剖面侧壁倾斜角减少量是刻蚀完的氮化硅侧壁倾斜角度相对于刻蚀前的光刻胶侧壁倾斜角度而言。

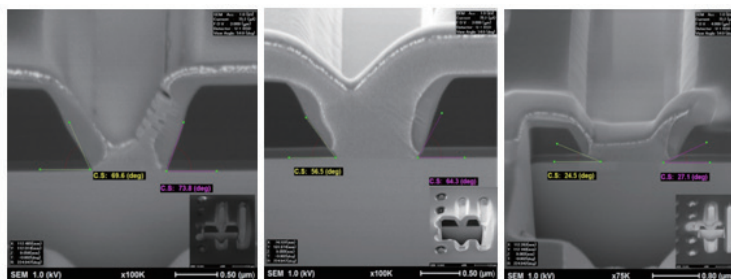
从图 9 可知,增加曝光焦距,刻蚀完的剖面倾斜角度变化量几乎不变,侧面说明,一定角度的光刻胶侧壁形貌只能刻蚀出相应角度的氮化硅侧壁,刻蚀完氮化硅侧壁倾斜角度大小取决于刻蚀前的光刻胶侧壁倾斜角度。如果要获得刻蚀理想的氮化硅侧壁形貌,不考虑刻蚀影响因素,单从光刻条件方面考虑,则只能继续减少刻蚀前光刻胶侧壁的倾斜角度,但受限于机台以及产品线宽,继续增大曝光焦距会引起产品线宽超出规格造成图形失真。

因此,单纯通过改变曝光焦距的方法很难达到实验目的。而在曝光焦距、ICP 射频、气体总流量和腔体压力一定的情况下,如图 10 (a) 所示,刻蚀后氮化硅侧壁倾斜角度变化量与刻蚀选择比 (PR to Si_3N_4) 几乎呈线性关系,选择比越大,刻蚀后氮化硅侧壁的倾斜角度变化量就越大。

从另一方面也可以看出,曝光焦距为 0、0.6、1.2 都可以通过不同刻蚀选择比刻蚀出小角度的氮化硅侧壁,这很大程度放宽了刻蚀前的光刻条件。选择比能显著改变氮化硅薄膜的侧壁倾斜角度,是由于 O_2 和 CF_4 混合气体在刻蚀过程中会刻蚀光刻胶,引起掩膜退缩,而掩膜退缩促使刻蚀过程中氮化硅薄膜表面更多的裸露出来并被刻蚀。

随着 O_2 含量的增加,光刻胶刻蚀率升高,造成掩膜退缩加快,被刻蚀到的氮化硅薄膜表面增大。另一方面, CF_4 含量降低,氮化硅刻蚀变慢,当掩膜退缩速度与氮化硅刻蚀速度维持相对比例时,就会形成不同倾斜角度的侧壁形貌。

从图 10 (b) 可以看出,选择比从 1.3 提高到 5.3 时,氮化硅倾斜角度由 70° 左右减小到 30° 以下,当选择比为 2.4,曝光焦距为 1.2 时,刻蚀完的氮化硅侧壁倾斜角度可控制在 $45^\circ \sim 65^\circ$,图 11 为刻蚀完特征尺寸区的剖面 FIB 图。

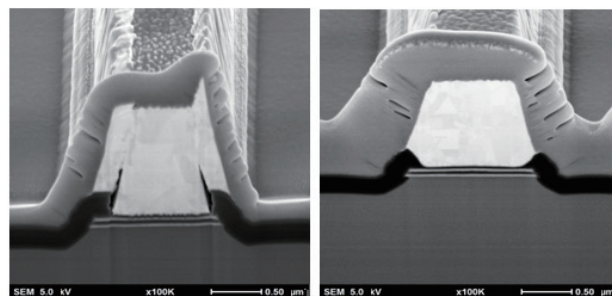


(a) 选择比 1.3 (b) 选择比 2.4 (c) 选择比 5.3
图 11 刻蚀完特征尺寸区剖面 FIB

4.4 介电层形貌对金属镀膜的影响

图 12 为产品晶圆片金属镀膜完的剖面,改善前由于氮化硅侧壁形貌过于垂直,导致金属镀膜在阶梯覆盖时出现断裂的情况,造成金属断层。改善后

的氮化硅侧壁呈斜角,金属镀膜能有效地进行阶梯覆盖。



(a) 改善前 (b) 改善后
图 12 金属镀膜完剖面 FIB

5 结语

通过 CF_4 和 O_2 等离子刻蚀氮化硅介电层薄膜,研究了曝光焦距对光刻胶形貌的影响,并在不同气体流量比条件下刻蚀氮化硅薄,获得了不同刻蚀选择比 (PR to Si_3N_4) 下的氮化硅侧壁形貌。

实验结果表明:一定条件下,增加曝光焦距,刻蚀完的氮化硅侧壁斜角变化不大;而光刻胶对氮化硅的刻蚀选择比变化对刻蚀完氮化硅侧壁斜角影响显著。氮化硅介电层侧壁形貌呈斜角可改善和解决 PA 工艺金属线路因介电层高低差引发的金属线路内部断裂问题。

参考文献

- [1] 苟君,吴志明,太惠玲,袁凯.氮化硅的反应离子刻蚀研究[J].电子器件,2009,32(05):864-866+870.
- [2] 赵毅红,陈荣发,刘伯实. Si_3N_4 薄膜的成分与结构研究[J].真空,2004(04):71-73.
- [3] 肖方,汪辉,罗仕洲.氮化硅湿法蚀刻中热磷酸的蚀刻率[J].半导体技术,2007(10):847-850.
- [4] Ying WANG, Lero LUO. Ultrahigh-Selectivity Silicon Nitride Etch Process Using An Inductively Coupled Plasma Source[J]. American Vacuum Society, 1998, 16(3): 1582-1587.
- [5] Baris Fidan, Rasen I G, Tyler Parent. Multi-Variable Adaptive Control of CF_4 - O_2 Plasma Etching of Silicon Nitride Thin Films[C]. Proceedings of the American Control Conference. 2001:1280-1285.
- [6] 赵智昊. 感应耦合等离子体刻蚀及应用研究[D]. 广东: 华南师范大学, 2003.
- [7] 樊中朝, 余金中, 陈少武. ICP刻蚀技术及其在光电子器件制作中的应用[J]. 微细加工技术, 2003(02): 21-28.
- [8] 邓其明. PECVD氮化硅薄膜的制备工艺及仿真研究[D]. 四川: 电子科技大学, 2010.