

常压射频冷等离子体刻蚀硅的研究

赵玲利¹ 段小晋¹ 尹明会¹ 徐向宇² 王守国^{2,†}

(1 中国科学院微电子研究所, 北京 100010)

(2 中国科学院光电研究院, 北京 100080)

摘要: 介绍一种新型的常压射频低温冷等离子放电设备,并用该设备进行硅刻蚀的工艺实验.研究了刻蚀硅的速率随等离子体放电功率、气体流量以及衬底温度的变化规律,并得到了最大刻蚀速率为 390nm/min.利用台阶仪、显微镜和扫描电镜(SEM)对刻蚀效果进行检测与分析,证实了该设备对硅的浅刻蚀具有较好的均匀性和较高的各向异性.结果表明,该设备在常压下刻蚀硅,操作简单且不易对材料表面产生损伤.

关键词: 常压; 射频; 等离子体刻蚀; 硅

PACC: 5275R; 5280Y; 4755E

中图分类号: TN405.98+2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2007)10-1615-05

1 引言

在微电子工艺中,硅刻蚀工艺应用广泛,如:器件隔离沟槽或者高密度 DRAMIC 中的垂直电容的制作、MEMS^[1,2]等.目前,单晶硅的刻蚀主要有两种方法:第一种是湿法,湿法刻蚀方法因其自身的某些局限,例如大量使用有毒化学用品,操作不够安全,侧向渗透以及由于浸胀导致粘附性不良而产生钻蚀使得分辨率下降,已逐渐被干法刻蚀所代替^[3];第二种刻蚀硅的方法是等离子体干法刻蚀,传统的等离子刻蚀技术主要是在真空室低气压的环境下进行,经过多年的探索和改进,这项技术已日趋完善.但是,由于真空设备本身的限制,在使用中不但存在设备及维护费用高,操作不方便等问题,而且被处理物体的尺度还要受真空室腔体限制,不易于实现大规模的工业化生产.能否在常压下进行材料刻蚀成为近年来人们关注的焦点.

最近几年,一些新型常压射频冷等离子体放电设备被研制出来,用于微电子刻蚀工艺.日本 Koinumal^[4]和 Yoshiki^[5]等教授分别利用他们所研制的设备在大气压下进行光刻胶的刻蚀研究,达到了刻蚀速率每分钟几个微米的刻蚀效果.美国 LOS ALAMOS 国家实验室 Selwyn 博士所领导的课题组利用自己研制出的常压射频耦合冷等离子体喷枪设备^[6~9](atmospheric pressure plasma jet, APPJ)在常压下成功地实现了 Kapton、二氧化硅、钼以及钨的刻蚀^[10,11].到目前为止,我们并未看到关于常压射频冷等离子体刻蚀硅方面的研究工作.

本文介绍我们最近研制的一种新型常压射频冷等离子体刻蚀装置,该等离子体装置可在常压下实现稳定均匀放电,能喷射出低温冷等离子体束流.此外,其携带气体不但可以采用氩气,而且还可以采用氙气,大大降低了装置的运行成本.我们在 50mm 的硅片上用光刻胶 AZ9912 做掩膜,采用 SF₆ 作为反应气体,来进行常压下硅片的等离子体干法刻蚀相关工艺研究.

2 实验

实验所采用的装置是我们新研制的常压射频冷等离子体喷枪设备^[12~14],如图 1 所示.该设备由射频电源、等离子体发生器、进气系统以及加热系统等组成.射频电源的频率为 13.56MHz,工作范围为 0~600W.等离子体发生器是由两个彼此绝缘的金属同轴内外电极构成,内电极连结射频电源的输出端,外电极接地.施加合适的功率后,被引入的气体在电极之间击穿电离后形成冷等离子体束流并均匀向下喷出.实验选用的气体是氩气以及无腐蚀、无毒性的 SF₆ 气体.喷口的直径为 10mm,喷出束流的长度范围是 5~20mm,该束流长度取决于放电功率的大小和进气量的大小.图 2 是常压射频冷等离子体喷枪设备刻蚀单晶硅的照片.

实验选用 50mm 的 p 型抛光硅片做为刻蚀材料,其晶向为〈100〉,硅片厚度 500 μ m.在进行常压等离子体刻蚀前对硅片进行两步处理.第一步:对硅片进行清洗,采用 SC-1 清洗程序,确保表面清洁.第二步:光刻刻蚀图形.用甩胶机以 3000r/min 的转速

† 通信作者. Email: wangshouguo@aoc.ac.cn

2007-04-20 收到, 2007-05-15 定稿

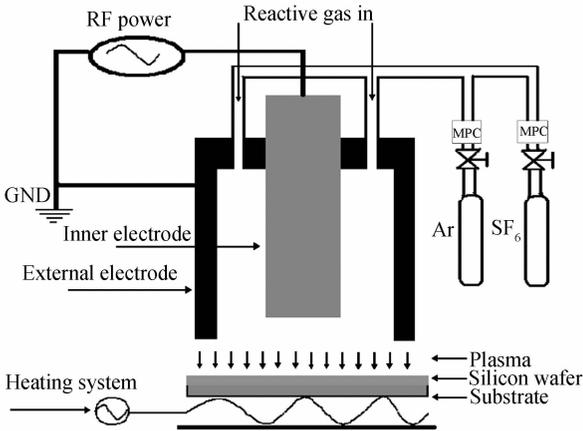


图 1 常压等离子体喷枪刻蚀系统原理图

Fig.1 Schematic sketch of the atmospheric-pressure plasma jet system for etching

旋涂厚度为 $1.2\mu\text{m}$ 的 AZ9918 正性光刻胶后,放入烘箱在 90°C 下烘 10min,烘干后在曝光机下曝光 1min(采用接触式曝光),显影 40s(显影液配比 5 : 1),最后吹干并在 120°C 下后烘 10min.烘干后可以清楚地看到基片上形成了粗细线条相间的图形,即是得到用胶作掩蔽的图形.实验中我们主要针对 1, 10 和 $20\mu\text{m}$ 3 种不同的线宽进行了对比实验.图 3 是显微镜对光刻之后刻蚀之前硅片表面的形貌照片.经过等离子体处理后采用台阶仪测量刻蚀速率.最后,通过显微镜及 SEM 检测硅片表面的刻蚀效果.(SEM: JSM-6360LV, Acc. Volt: 10kV; WD: 11mm; Vac. mode: HV; Spotsize: 33; signal: se)

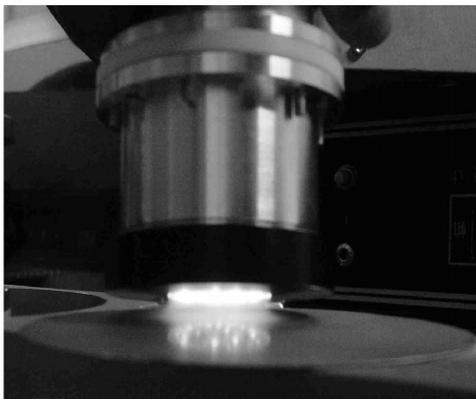


图 2 常压射频冷等离子体刻蚀单晶硅照片 放电参数:氩气流量为 10L/min, SF_6 流量为 15sccm,射频功率为 110W

Fig.2 Photograph of the atmospheric pressure cold plasma jet etching single-crystal silicon wafer Ar flow rate: 10L/min, SF_6 flow rate: 15sccm, RF power: 110W



图 3 刻蚀前用 AZ9912 做掩膜的硅片表面显微镜照片(线宽分别为 10 和 $20\mu\text{m}$)

Fig.3 Microscope image of the single-crystal silicon wafer surface with AZ9912 as the mask before etching

3 结果

保持其他参数不变,采用 Ar/ SF_6 等离子体在常压下进行硅刻蚀,其刻蚀速率与放电功率的关系如图 4 所示.采用台阶仪测量,刻蚀深度除以刻蚀时间得到刻蚀的速度.由图可以看出,刻蚀速度随着放电功率的增加而增大.当放电功率低于 80W 时,等离子体不能维持稳定放电;当放电功率高于 160W 时,产生的等离子体已经不再是冷等离子体,容易出现放电拉弧,因此不适合硅基体的均匀刻蚀.在放电功率为 80W 时,刻蚀速率较低,只有 50nm/min;随着放电功率的增加刻蚀速率明显增大,当放电功率等于 160W 时,刻蚀速率达到 200nm/min.

图 5 是刻蚀速度随着 SF_6 气体流量变化的关系曲线.由图可知,刻蚀速度随着 SF_6 流量的增大

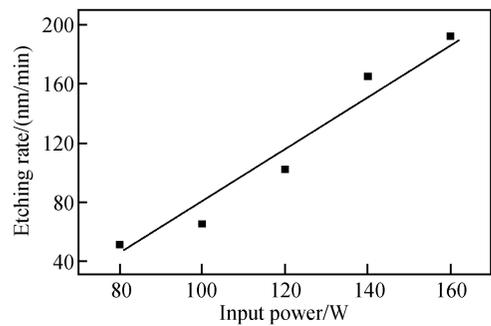


图 4 刻蚀速率与放电功率的关系 放电参数:衬底温度为 100°C ,氩气流量为 10L/min, SF_6 流量为 15sccm

Fig.4 Etching rate as a function of input power The discharge parameters:the substrate temperature is 100°C ,the argon flow rate is 10L/min, and the SF_6 flow rate is 15sccm.

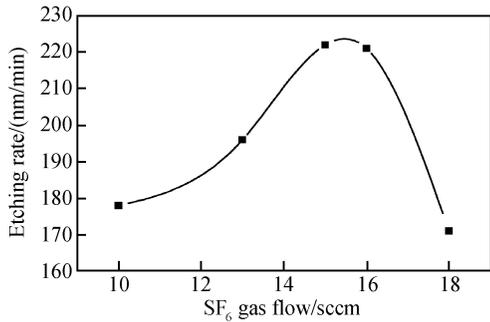


图 5 刻蚀速度与 SF₆ 流量变化的关系 放电参数:衬底温度为 100℃, 氩气流量为 10L/min, 射频功率为 110W

Fig.5 Etching rate as a function of the SF₆ flow rate The substrate temperature: 100℃, Ar flow rate: 10L/min, the RF power: 110W

先是增加, 到达一个最大值后又开始减小. 在通入的 SF₆ 量小于 10sccm 时, 刻蚀速度比较缓慢, 只有 175nm/min; 随着通入的 SF₆ 流量的不断增加, 刻蚀速率持续增大. 这可能是由于当 SF₆ 流速较小时, 等离子体中产生的 F 的自由基的浓度相应较低, 因此与 Si 的反应较为缓慢, 得到的刻蚀速率较低. 而随着 SF₆ 流速的增加, 产生的 F 的自由基的浓度相应增加, 因此刻蚀速率也就随之增加. 当 SF₆ 流量增加到 15~16sccm, 刻蚀速率达到最大 225nm/min. 继续增大 SF₆ 流量, 当其影响到等离子体本身的放电状态时, 则会出现放电不稳定的电弧现象, 刻蚀速率开始下降.

在保持输入功率和反应气体 SF₆ 流量一定时, 氩气流量对刻蚀速率的影响如图 6 所示. 在氩气流量为 8~10L/min 的范围内, 刻蚀速率与氩气流量呈线性增加的关系. 而氩气流量达到 11L/min, 刻蚀速率达到最大值, 继续增加氩气刻蚀速度基本不再增加而呈现出下降的趋势. 这是因为当气流增加

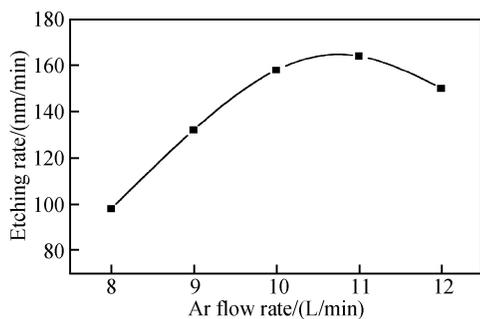


图 6 氩气流量对刻蚀速率的影响 放电参数:衬底温度为 100℃, SF₆ 流量为 15sccm, 射频功率为 110W

Fig.6 Etching rate as a function of the Ar flow rate The substrate temperature: 100℃, SF₆ flow rate: 15sccm, the RF power: 110W

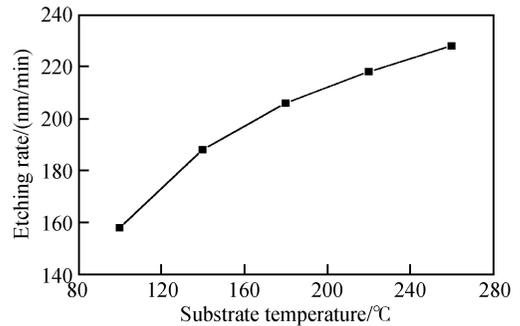


图 7 衬底温度对刻蚀速率的影响 放电参数:喷口与 Si 片的距离为 5mm, 氩气流量为 10L/min, SF₆ 流量为 15sccm, 射频功率为 110W

Fig.7 Etching rate as a function of temperature of the substrate Discharge parameters: the silicon wafer: 5mm from nozzle, Ar flow rate: 10L/min, SF₆ flow rate: 15sccm, the RF power: 110W

时, 在等离子体区域内压强也会随之增加, 从而导致激发态物种的密度增加, 因此刻蚀速率随之增加; 当气体流量太大时, 气体来不及被激发就离开了放电区域, 从而导致刻蚀速率的下降, 因此要选择适当的气体流量, 以满足具体的实验要求. 实验还发现, 对于确定的氩气流量, 当 SF₆ 所占的比例为 0.15% 时, 刻蚀速率达到最大值.

刻蚀过程中, 硅片的衬底温度也是影响刻蚀速度的因素之一. 图 7 是刻蚀速率与衬底温度的变化规律曲线. 在温度较低的时候, 刻蚀速率随着硅片温度的升高而增加, 当衬底温度进一步增加, 刻蚀速率增加趋势变得缓慢. 当对衬底加热至 220℃ 时, 尽管刻蚀速度增加了, 但是刻蚀完的硅片上光刻胶明显发生了固化反应, 采用等离子体清洗时会留下残胶, 无法完全清洗干净. 当硅片的衬底温度升高到 200℃ 以后, 有可能会使光刻胶中的聚合物发生分解, 导致刻蚀后对光刻胶的去除造成困难. 因此, 对于采用光刻胶掩蔽的硅片的衬底温度, 一般控制在 200℃ 以内.

综合考虑以上的具体实验参数并对其进行优化, 我们得到: 当入射功率为 110W, 氩气流量为 10L/min, SF₆ 流量为 15sccm, 衬底温度为 140℃ 时, 其刻蚀速率为最大 390nm/min.

我们采用 SEM 对刻蚀的各向异性效果进行了分析. 图 8 是刻蚀后硅片侧面的 SEM 照片. 由图 8 中刻蚀沟槽 1 可以看出, 横向刻蚀速度远远小于纵向刻蚀速度, 对于浅刻蚀该设备表现出较好的各向异性, 台阶面也相对平坦, 具有良好的均匀性. 同时实验发现, 随着刻蚀的深入, 刻蚀的各向异性变弱, 慢慢地呈现出各向同性, 见图 8 中的刻蚀沟槽 3. 这是由于常压等离子体束流本身的特性决定的, 在常

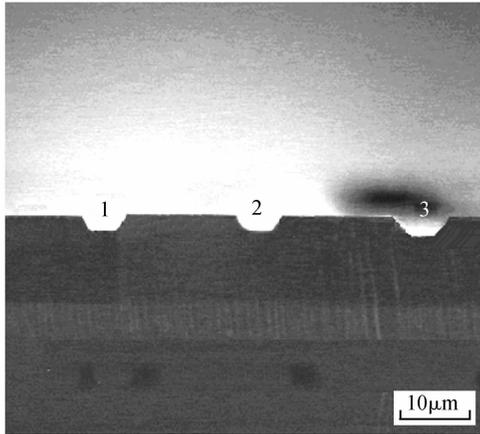


图 8 刻蚀后侧面的形貌照片(1,2,3 刻槽的深度分别是: 2.20, 2.54 和 2.88 μm , 工艺参数同图 7)

Fig.8 SEM image of the silicon lateral face after etching (Discharge parameters are the same as Fig.7)

压下气体分子的碰撞自由程很小, 等离子体束流中被激活的活性粒子无法进入到更深更细的线条处. 同时, 对于常压等离子体中离子对衬底的轰击溅射作用很弱, 刻蚀主要是依靠等离子体中活性粒子的扩散到衬底与材料发生化学反应进行刻蚀. 对于这种主要依靠化学反应进行的干法刻蚀, 与湿法刻蚀方式类似, 具备较好的选择比, 但各向异性相对较差, 刻蚀的侧壁不是十分陡直. 对于较细的刻蚀线条, 能量相对较低的等离子体组分无法进入, 所以对这类尺寸的线条只能进行浅刻蚀.

图 9 所示的光刻线条宽度是 20 μm , 刻蚀速度为 300nm/min, 刻蚀深度达到 8 μm . 与刻蚀线条宽度为 1 μm 对比, 刻蚀速度提高了 300%~400%. 这充分表现出刻蚀速率随刻蚀表面积变化而改变的负载效应. 在真空室中, 一般用减小反应室中的压

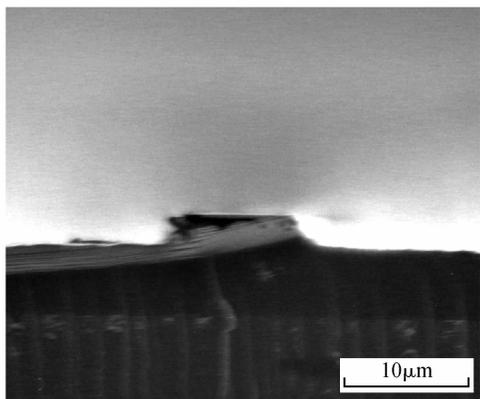


图 9 刻蚀线条宽度为 20 μm 的扫描电镜照片(工艺参数同图 7)

Fig.9 SEM image of the silicon lateral face after 20 μm line width etching (Parameters are kept the same as Fig.7)

力, 即用增加粒子自由程的方法来消除负载效应, 但是由于该实验设备是在常压下进行的, 目前对此影响的解决途径尚在寻找中.

4 结论与讨论

用常压射频冷等离子体设备对单晶硅进行刻蚀的工艺实验表明:

(1) 刻蚀速率与输入功率几乎成线性正比关系; 刻蚀速率与衬底温度也基本呈线性增加的关系. 优化实验参数得到最大刻蚀速率为 390nm/min.

(2) 等离子体对硅的浅刻蚀具有较好的选择比, 刻蚀台阶具有好的均匀性和各向异性.

(3) 实验是在常压下进行的, 减少了如真空等离子体那样对硅片表面造成损伤. 但是, 正因为是在常压下进行操作, 实验存在了诸如刻蚀速度不高, 负载效应等问题. 在以后的工作中, 我们将选择 SiO_2 或者 Al 做掩膜, 在刻蚀过程中加入适量 O_2 来提高刻蚀速度. 并进一步改善设备装置用以减小甚至消除目前存在的负载效应, 以期得到最佳的刻蚀效果.

参考文献

- [1] Mogab C J. Dry etching in VLSI technology. New York: McGraw-Hill, 1983
- [2] Brodie I, Muray J J. The physics of microfabrication. New York: Plenum Press, 1982
- [3] Einspruch N G. VLSI electronics microstructure science. New York: Academic Press, 1984
- [4] Inomata K, Koinuma H. Open air photoresist ashing by a cold plasma torch; catalytic effect of cathode material. Appl Phys Lett, 1995, 66(17): 2188
- [5] Yoshiki H, Taniguchi K, Horiike Y. Localized removal of photoresist by atmospheric pressure micro-plasma jet using RF corona discharge. Jpn J Appl Phys, 2002, 41(9): 5797
- [6] Park J, Henins I, Herrmann H W, et al. An atmospheric pressure plasma source. Appl Phys Lett, 2000, 76(3): 288
- [7] Park J, Henins I, Herrmann H W, et al. Gas breakdown in an atmospheric pressure radio-frequency capacitive plasma source. Appl Phys Lett, 2001, 89(1): 15
- [8] Park J, Henins I, Herrmann H W, et al. Discharge phenomena of an atmospheric pressure radio-frequency capacitive plasma source. Appl Phys Lett, 2001, 89(1): 20
- [9] Selwyn G S, Herrmann H W, Park J, et al. Material processing using an atmospheric pressure RF-generated plasma source. Contrib Plasma Phys, 2001, 41(6): 610
- [10] Jeong J Y, Babayan S E, Tu V J, et al. Etching materials with an atmospheric-pressure plasma jet. Plasma Sources Sci Technol, 1998, 7: 282
- [11] Jeong J Y, Babayan S E, Schütze A, et al. Etching polyimide with a nonequilibrium atmospheric-pressure plasma jet. J Vac Sci Technol A, 1999, 17(5): 2581
- [12] Wang S, Gathen V, Döbele H F. Discharge comparison of nonequilibrium atmospheric pressure Ar/ O_2 and He/ O_2 plasma jet. Appl Phys Lett, 2003, 83(16): 3272

- [13] Wang S G, Li H J, Zhao L L, et al. Basic characteristics of an atmospheric pressure RF generated plasma jet. *Chin Phys.* 2004, 13(2):190
- [14] Li H J, Wang S G, Zhao L L, et al. Study on an atmospheric pressure plasma jet and its application in etching photo-resistant materials. *Plasma Sci Technol*, 2004, 6(5):2481

Etching Si Wafer Using Atmospheric Pressure RF Cold Plasma Jet

Zhao Lingli¹, Duan Xiaojin¹, Yin Minghui¹, Xu Xiangyu², and Wang Shouguo^{2,†}

(1 *Institution of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100010, China*)

(2 *Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: A new kind of discharging device with a RF cold plasma jet at atmospheric pressure is introduced, and it is utilized to conduct experimental research on silicon-etching. The characteristics of the etching rate depend on the input power, gas flow, and temperature of Si wafers. The maximal etching rate is 390nm/min. The etching effect is characterized by step instrument, optical microscopy, and SEM. Excellent etching homogeneity and satisfactory anisotropy can be obtained during material etching with this device. These results indicate that the silicon-etching operation with this atmospheric pressure device is simple and causes no material surface damage.

Key words: atmospheric pressure; RF; plasma etch; silicon

PACC: 5275R; 5280Y; 4755E

Article ID: 0253-4177(2007)10-1615-05

† Corresponding author. Email: wangshouguo@aoe.ac.cn

Received 20 April 2007, revised manuscript received 15 May 2007