

深亚微米刻蚀与等离子体源

吴汉明

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

[摘要] 讨论等离子体刻蚀及其等离子体源在微电子工业中的作用, 介绍四种高效等离子体源, 并讨论这一领域亟待解决的问题。

[关键词] 等离子体源, 亚微米刻蚀, 挑战性问题

1 等离子体刻蚀的背景和意义

近 20 年来, 等离子体科学在微电子生产领域起着越来越重要的作用。低气压放电冷等离子体在微电子工业中的应用已形成一门年轻的领域。70 年代末期, 由于芯片生产厂商大量使用等离子体刻蚀技术, 人们开始认识到等离子体刻蚀具有湿法刻蚀所无法比拟的优点, 它不仅减少污染程度, 而且其刻蚀刻面的垂直性可使刻蚀线条细至微米^[1]。

国际上芯片生产的趋势表明, 从 70 至 90 年代, 芯片的线条宽度从 6 微米降至亚微米, 而芯片上的晶体管从数千个增至数十兆个。这种趋势极大地降低了计算机的制造成本, 而且几乎公认这种趋势将至少持续至下世纪初。这种趋势的支撑条件之一就是低气压冷等离子体科学的发展必须跟上去。显然, 如果没有等离子体刻蚀技术, 这种趋势只能是一个梦想而已。这是因为, 湿法刻蚀是各向同性的, 根本不可能达到亚微米的刻蚀所需要的剖面纵横比的要求。

随着芯片面积的增大和线条的精细化, 对等离子体刻蚀机的要求也越来越苛刻。在整个芯片加工工艺中, 刻蚀是最大难题之一, 是亚微米工艺中关键的关键。为此, 本文略详细地讨论一下等离子体刻蚀在亚微米工艺中面临的问题。

(1) 深亚微米刻蚀对等离子体的要求

一般来讲, 刻蚀可分为化学刻蚀和物理刻蚀两类: 前者指化学反应的方式 (如湿法刻蚀), 后者指物理溅射方式。湿法刻蚀主要依赖其溶液的配方, 但由于反应是各向同性的而无法进行微米以下的刻蚀。反之, 物理溅射具有很好的各向异性, 但选择性和刻蚀率太差。等离子体刻蚀技术是把物理与化学刻蚀合为一体的刻蚀方法, 集中了两者的优点并使缺点降至极小, 因而成为亚微米刻蚀的必不可少的手段。

众所周知, 刻蚀中最重要的是均匀性、选择性和各向异性三个方面。通常这三个方面是相互抵触的, 我们只能进行折衷的优化选择。

均匀性 在刻蚀过程中, 希望芯片上各处的刻蚀率都相同。通常较高的选择性允许有一

本文于 1994 年 12 月 24 日收到。

定的非均匀性,但在氧化硅的地方必须注意由等离子体引起的损伤。同时,单个芯片加工又比多个芯片加工要更多地注意均匀性问题。小芯片的均匀性问题通常不象大芯片那么严重。目前最具挑战性的是不同的纵横比会引起不同的刻蚀率,即对小纵横比剖面的刻蚀率增大;反之大纵横比剖面的刻蚀率减小(microload)。而且,不均匀性引起的芯片表面电荷有可能击穿短路而损坏器件^[2]。

选择性 对于一个纯各向异性的多晶硅刻蚀 MOSFET 门结构,由于表面的多晶硅并不平整,经过纯粹的各向异性刻蚀后会留下一个环状多晶硅环。为了去除这个环,就必须刻蚀较长时间。这样,氧化硅就要承受更长时间的等离子体轰击,这对于只有 80 Å 厚的门氧化硅来说是很麻烦的问题,如果没有较好的选择性其后果不言而喻。较高的选择性可以使均匀性的要求不那么苛刻。这是因为有较高选择性的保证便可以通过增加刻蚀时间来减少非均匀度。

各向异性 等离子体刻蚀是物理和化学两种刻蚀法的混合物。前者,等离子体中各向异性的离子轰击起主要作用;后者是中性气体中各向同性的原子分子起主要作用。为了提高各向异性,我们希望离子通过等离子体鞘层时不与中性气体碰撞,使离子能近似垂直地轰击基片。这就需要减少鞘层厚度(通过提高等离子体的密度)和降低气压,使离子的平均自由程远大于鞘层厚度。出于这个原因,各种新一代的高密度等离子体源吸引了越来越多的科学家和芯片生产商^[3,4]。

此外,解决基片加工过程中的损伤和污染也是等离子体技术中的关键。一般,损伤是因高能粒子轰击基片使基片的晶格错位引起,通常损伤深度可达 300 Å;或因基片表面的不均匀性使静电堆积产生较高的击穿电压引起^[5]。刻蚀率的增长与离子能量流有密切关系,即离子流与离子能量的积。降低离子能量,提高离子流密度,可以提高刻蚀率而不致使损伤恶化,这也是人们要发展高密度高效等离子体源的原因之一。

(2) 现有等离子体刻蚀设备的限制

芯片面积的增长和线条宽度的减少使刻蚀工艺对等离子体源提出了新的苛刻要求^[5]即:各向异性的离子流以保证刻蚀剖面的垂直性;均匀的等离子体参数分布使均匀性得到保证;可控的离子轰击能量和较高的离子流密度,使选择性与刻蚀率得以优化。传统的等离子体刻蚀是在电容耦合下的射频放电等离子体中进行的。这种放电等离子体源虽有很好的均匀性,却无法单独调节其离子流密度和离子轰击能量。为了提高等离子体密度,就必须提高射频电压,从而使等离子体势提高,导致等离子体鞘层电压增大,使离子轰击能量上升。此外,该源无法在低于 2 Pa 的气压下工作,而高压会使离子通过等离子体鞘层时与中性气体多次碰撞,失去各向异性的特点。因此,传统的电容耦合气体放电等离子体源很难进行下一代的深亚微米刻蚀。

2 新一代高效等离子体源(反应器)

为满足新一代亚微米器件的工艺需要,必须发展新一代的高效高密度等离子体源。目前世界上有好几种高密度等离子体源,它们的共同点是都有一个绝缘材料的窗口让外加的能量能通过窗口进入腔体,腔体内没有电极,因此没有电极污染。这种非电容性的功率输入是降低等离子体鞘层电压的关键,从而使离子轰击所有腔体壁面的能量降为 10—20 V。为了控制离子能量,在基片平台上加了可独立调节的类似电容耦合的射频偏压。新型等离子体源的等

离子体密度一般均可达 $10^{12}/\text{cm}^3$ 。

新一代的等离子体反应器的优点之一,是可通过射频偏压单独对离子能量进行调制。实验结果表明,较低频率的偏压不仅可以改善均匀性,还可以减少静电荷对基片的损伤,但是低频偏压对选择性不利。反之,较高频率的偏压可提高刻蚀的选择性,但对均匀性及电荷损伤有负面影响。学者们猜测上述结果可能与腔体的几何形状有关,目前还无法从理论上给出机理性的解释。

下面介绍四种较为流行的高效高密度等离子体反应器

(1) 电子回旋共振等离子体源 (ECR)

现有的电子回旋共振等离子体源可分为紧凑型 and 延长型两种^[5-7],前者是以商业目的为主,而后者更多地用于研究部门。在深亚微米刻蚀中,目前应用最广泛的高密度等离子体源是日立公司生产的紧凑型电子回旋共振等离子体刻蚀机,1988年时可成功地对200 mm片进行金属刻蚀。ECR的工作过程是:2.54 GHz的微波经过石英窗口进入腔体,外加的直流磁场一般为发散型的。在离窗口5—10 cm处是电子吸收微波能量的共振区,通常为0.0875 T(考虑多普勒效应后为0.095 T)。1—2 MHz的射频功率施加在基片台上可独立调控离子轰击的能量,工作台下方是液氮冷却源,用以保护基片不至于过热损伤。在基片台旁的磁场线圈用来改善刻蚀的均匀性。电子回旋共振可以在0.01 Pa的气压下运行。虽然在较低气压运行时有助于刻蚀剖面的控制,但是在太低的气压下刻蚀的生成物要求尽快排出,这对真空系统的要求变得更为苛刻。所以,一般电子回旋共振等离子体刻蚀机都是运行在气压为0.1—2 Pa范围内。一些研究表明,中性气体对等离子体参数大约有10%的影响^[7]。它的均匀性主要依赖于磁场位形^[8,9],即外加线圈的位置和电流起重要作用。

(2) 螺旋波等离子体源 (Helicon)

该源的基本过程为:由腔体外的射频天线通过绝缘腔壁与横波结构耦合激发出 Helicon 波。等离子体中的电子通过碰撞(包括无碰撞的 Landau 阻尼)吸收能量。等离子体参数,如电子温度、等离子体势、等离子体密度等,基本上与电子回旋共振等离子体源接近。但 Helicon 所需的磁场比电子回旋共振的 0.0875 T 低得多。另外, Helicon 使用射频电源而不是像电子回旋共振的微波功率源。由于不需要很强的磁场,制造成本可比 ECR 低些。但是 Helicon 模式与天线共振时导致的模式突变限制了它的使用范围。相比较而言, Helicon 还是相当年轻的新型等离子体源,还有许多机制不清楚,目前主要用于实验研究。

(3) 感应耦合等离子体源 (ICP 或 TCP)

感应耦合等离子体的线圈可分为两种类型,即圆柱端面的平面螺旋型和圆柱侧面的柱面螺旋型,它们都是 13.56 MHz 射频的电源。这种源的工作过程是:腔体外的感应线圈产生的感应电场穿过介质窗口,使电子欧姆加热(小于 1 Pa 时主要由电子与随机电场的碰撞加热)至约 5 eV,使气体电离产生等离子体。等离子体静电势一般小于 40 V,若再加上 DC 磁场还可望降低电势提高等离子体密度。基片工作台用 RF 偏压控制离子能量。这种源中等离子体密度可达 $10^{12}/\text{cm}^3$,比传统的电容放电等离子体密度高两个数量级。均匀性主要由感应线圈的几何位形决定。由于感应耦合等离子体不用磁场,结构简单,因此价格低廉,同时参数对材料工艺过程正合适,所以受到世界各国芯片制造商们的青睐。中国科学院力学研究所目前正在研制的感应耦合等离子体刻蚀机(TCP)采用球面螺旋型线圈,它综合了上述两者的优点,可望

能改善均匀性和颗粒污染^[10,11]。我国作为发展中国家,经济能力有限,选用廉价的感应耦合等离子体(ICP)作为突破口较为合理。

(4) 螺旋共振子等离子体源(Helical Resonator)

螺旋共振子等离子体源运行在3MHz以下。该源不用磁场,设备简单,同时具有很高的功率因子Q值(600—1500)和高感抗,这些振子是慢波结构,电磁波沿Z轴的传播速度远小于光速,源由接地同轴导体柱面内的线圈和线圈内的石英管组成。当1/4波数的整数倍正好为两端距离时,合成的波便可共振,由此产生等离子体。该源可在两个参数范围内运行,即:电容耦合的低功率,高等离子体势,低等离子体密度;电感耦合的高功率,低等离子体势,高等离子体密度。通常在材料的工艺过程中希望运行在电感耦合区内,因此需要在线圈和腔体间置一片法拉第鞘,只让角向电场分量进入腔体,形成电感型耦合。

3 新型等离子体源中的一些问题

仅列举其中的几个方面。

(1) 为等离子体反应器进行的理论模拟工作

与其它等离子体领域相比,等离子体工艺过程的计算机的数值模拟还远落后于芯片加工工艺的发展。比如在电子回旋共振等离子体中的自洽的波和等离子体的耦合并考虑等离子体输运的模拟工作尚未出现。另外,利用并行机来求解考虑流体、粒子或混合的等离子体系统也尚属空白,用真正的反应气体和等离子体作模型的理论模拟还处于幼稚状态,因此目前还无法对等离子体反应器进行计算机辅助设计。随着计算机能力的逐步提高,较为完整的、复杂的模拟工作将可进行。

(2) 基础研究和工业应用的实时测量诊断

虽然在工艺过程中的等离子体实验诊断工作已有多年历史,但还有不少有待研究的问题,如高灵敏度的终点检测方法等。目前在工业部门所用的等离子体反应器中,几乎还没有直接利用反馈控制的,这会给芯片质量的控制带来麻烦。

对基础研究而言,也有许多新问题,如Bowden在1993年用汤姆逊散射法测量等离子体反应器中较低密度的等离子体密度就是一个很有意义的工作。另外,在RF电磁场中非平衡态的负电性等离子体放电的探针理论也亟待发展。

(3) 等离子体中的颗粒:尘埃等离子体

在反应等离子体中的微小颗粒主要来源是溅射、气相凝聚(通常由正负离子演化出来)和从受到张力的壁膜上的发射,以及其他未知的因素。从芯片加工中存在的污染的问题可以看出,即使很低浓度的颗粒也会对工艺过程构成威胁,一定密度的颗粒会影响等离子体的均匀性。目前,用光散射法还无法测小于0.1 μm 颗粒的低浓度工况。虽然现在还不清楚哪些材料可在低气压等离子体中合成,但是用低气压等离子体来合成纳米级颗粒的功能材料是可能的。另外,颗粒的物理和化学结构,以及颗粒在正和负电性等离子体中的行为也是个谜。

(4) 放电的稳定性

等离子体工艺过程中的放电不稳定性是很重要的问题。辉光等离子体的稳定性与高温时的情况很不同,大多数弱电高放电的不稳定性主要与电子温度、电离率和复合系数的非线性耦合有关。在电子回旋共振中的模式跃变,看来也与沿发散磁场的电磁波和等离子体均匀性

及共振区内的中性气体的稀释耦合有关。在磁化等离子体中, 由于磁场而丰富了波的模式使其更易激发模跃变不稳定性。对于非磁化等离子体(如 ICP 和 Helical Resonator), 则可能会由双稳态及磁滞现象使工艺参数发生意外变化。

(5) 等离子体与表面相互作用(损伤和污染)

从机制上来讲, 目前这类问题还不太清楚。例如, 用什么能量的离子轰击基片时可使刻蚀率大幅度增加, 基片在什么能量的离子轰击下会产生损伤, 以及薄膜本身对工艺的影响等一系列问题都是等离子体工艺中急待解决的。这类问题的解决需要等离子体科学与材料科学的相互紧密结合, 属交叉领域课题。

由此可见, 等离子体科学将随微电子工业的发展, 发挥越来越重要的作用^[12], 其中主要是低气压放电的冷离子等离子体将成为深亚微米加工必不可少的工具。

参 考 文 献

- [1] Tolliver D L. The History of Plasma Processing of Chapter 1 in VLSI Electronics Microstructure Science, Vol 8, Plasma Processing for VLSI, edited by N. G. Einspruch and D. M. Brown, Academic Press, Inc., 1984.
- [2] Burton R A, Gottscho R A, Smolinsky S. Dry Etching of Group III-Group V Semiconductors, Ch3 in Dry Etching for Microelectronics, Edited by Powell R A, Elsevier, Amsterdam, 1984.
- [3] Lieberman M A, Gottscho R A. Design of High Density Plasma Sources for Materials Processing in Physics of Thin Films, edited by M. Francombe, J. Vossen, Academic Press, 1994.
- [4] Lieberman M A, Lichtenberg A J. Principles of Plasma Discharges & Materials Processing, John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [5] 吴汉明, 董大为, 许居衍. ECR 与 TCP 的参数比较. 电子材料, 1994, 12: 7.
- [6] Porteous R K, Wu H M (吴汉明), Graves D B. A 2-D Axisymmetric Model of Magnetized Glowing Discharge Plasma. Plasma Source Science and Technology, 1994, 3 (1): 25.
- [7] Kilgore M D, Wu H M (吴汉明), Graves D B. Neutral Transport in High Plasma Density. J. Vac. Sci. Technol., Jan/Feb, 1994, B12 (1): 486.
- [8] Graves D B, Wu H M (吴汉明), Porteous R K. Modeling and Simulation of High Density Plasma. Japanese Journal of Applied Physics, 1993, Part A, 32 (6B): 2999.
- [9] LAM Research Corporation, Technical Note, TN-003, (1992).
- [10] Wu H M (吴汉明), Li M (李明), Chen Y M (陈允明). Parameter Estimation of ICP Source with a Global Model, Proceedings of 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Science & Technology, September (1994), Seoul, Korea, 95.
- [11] 中国科学院力学研究所(吴汉明). 拱形组合线圈感应耦合等离子体源(TCP), 中国国家发明专利, 申请号93119776-7.
- [12] Graves D B. Plasma Processing. IEEE trans. Plasma science, 1994, 22 (1): 31.

SUB-MICROMETER ETCH AND PLASMA SOURCES

Wu Hanming

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract In the present paper, the functions of plasma etch and plasma sources are discussed. Four enhanced plasma sources are introduced and some being attacked problems are presented.

Key words plasma sources, sub-micrometer etch, challenge problems