

大规模集成电路刻蚀过程和终点的在线监测 ——等离子发射光谱法

米宝永

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 文章叙述了大规模集成电路(LSI)等离子和反应离子刻蚀原理及在线监测刻蚀过程的基本方法。详述了用等离子发射光谱法进行LSI离子刻蚀过程监测的具体实施和实验结果,得到了80Å的动态监测精度和0.3 cm²的最小可监测面积。最后文章还讨论了影响监测精度的因素。

关键词: 等离子体; 发射光谱; 在线监测; 刻蚀; 大规模集成电路; 终点

1 前 言

作为微细加工技术中的等离子和反应离子刻蚀工艺目前已发展成LSI和VLSI研究和生产中的关键技术。众所周知,这种工艺虽具有各向异性刻蚀、选择性好且易获得陡削剖面等优点,但对有负载效应的刻蚀设备而言,当其刻蚀快要结束的一瞬间若不及时终止刻蚀,则将产生比正常刻蚀速度快几倍的钻蚀,致使图形的尺寸精度严重变坏。

由于刻蚀过程相当复杂,它不仅取决于各种工艺参数,如射频功率、反应气体成份等,还取决于被刻蚀物质和某些活性物质相互作用的动力学特性。对上述参量进行控制是非常困难的,甚至是不可能的。目前,国内一般都采用控制刻蚀时间的办法,这在很大程度上要取决于操作者的经验,因而限制了器件的生产率和成品率。我们采用发射光谱法实时监测LSI离子刻蚀过程,并确定刻蚀终点。实践证明,该技术可大大提高产品质量和劳动生产率。这里所提到的刻蚀终点监测是通过监测刻蚀过程中某些生成物参数的变化来确定被刻蚀膜在硅片的垂直方向上是否完全被去除,并立即用适当形式的信号去终止刻蚀。

2 刻蚀过程及监测方法

在谈到监测方法以前有必要叙述一下LSI的刻蚀过程。根据不同的被刻蚀材料,通以不同组分、压力和流速的混合气体,如用CF₄(95%) + O₂(5%)刻蚀Si系材料(Si, Poly-Si, SiO₂, Si₃N₄),用CCl₄ + He(或Ar)刻蚀铝等。再给这些气体施加以大于其临界值的13.6 MHz,功率为几百瓦到上千瓦的射频电场,此时,气体原子或分子在该电场作用下发生电离,形成具有导

电性质的包含有正、负离子、自由电子和游离基的气体等离子体。由于游离基中的中性原子或分子大都处于由各种碰撞引起的激发态,所以具有很强的化学活性。所谓等离子刻蚀就是利用游离基中长寿粒子与硅片表面而被刻蚀材料的化学反应来去除非掩模部份的膜层,而反应离子刻蚀则是利用中性游离基的化学反应和一部份离子的溅射作用实现这一过程。

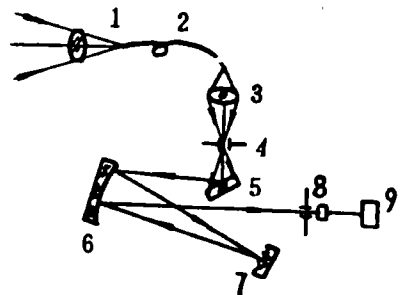
针对上述刻蚀过程,有许多监测刻蚀过程的方法,如质谱法、兰米尔法、阻抗法、光学反射法和发射光谱法等国外都有报导^[1],但经过近几年我们仔细研究认为,真正比较实用的应属反射法和光谱法^[2,3],它们的优点是费用低廉、监测精度高。这两种方法我们都已研制成了专用仪器并最早在国内应用于集成电路生产线。

在等离子和反应离子刻蚀的反应室内,由于复杂的理化作用,不同粒子浓度在不断消长,而这些粒子又在不断地释放出对应不同特征波长的光能。因此,我们可对等离子体中某些特征光谱强度变化进行监测,这些光谱强度的变化反映了反应室内的粒子浓度消长,从而也就实时的反映了刻蚀过程。这种监测刻蚀过程的方法一般称为发射光谱法。

前面已谈到,常用 $\text{CF}_4(95\%) + \text{O}_2(5\%)$ 的混合气体刻蚀 Si_3N_4 。在辉光放电作用下产生的 F 原子活性基和硅片上的 Si_3N_4 膜发生反应生成 SiF_4^+ 和 N_2^+ ($\text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{F} \rightarrow 3\text{SiF}_4^+ + 2\text{N}_2^+$), 由此可见,我们既可监测 F 原子谱线强度变化,又可监测 N_2 谱线强度的变化。这要取决于具体设备情况,看那个谱线信噪比最好。如监测反应物质 F 原子谱线,在到达刻蚀终点时,由于其浓度增加而光谱强度增加,如监测反应生成物 N_2 的发射谱线,则因其浓度在终点到达时降低,因而光谱强度就减少。通过大量的刻蚀工艺试验,可以找出在刻蚀不同半导体材料时的最佳监测波长。

3 监测方法的实施和终点判别

为了实施等离子发射光谱法,我们特殊设计了一个由多蕊石英光纤经聚光镜头和离子反应室耦合的小型精密单色仪系统,用以提取淹没在强光背景下的弱等离子光谱。其光路原理如图 1 所示。该系统的波长范围为 190 nm 至 800 nm,波长精度为 0.3 nm。为有效地收集弱等离子谱光信号,我们采取了特殊措施将内部杂光减为最小。同时对光纤束的束蕊进行了巧妙的排列。由出射狭缝射出的单色等离子光进入光电倍增管并转换成电信号,经专门设计的低噪声电子学系统处理后进入 12bit AD 转换器并由计算机实时采集。以下将要分析所监测的光电信号和刻蚀过程的关系。从中可看出信号幅值在工艺条件一定时与硅片最小暴露面积有关,面积愈小,刻蚀速率愈慢,信号就愈小。当蕊片上的线条少而线宽又窄时,信号只能达到微伏量级,而电子学系统却工作在较强的电磁干扰环境下,因此我们采用了相关检测和多重滤波技术来提高信噪比,收到了相当好的效果。电子学的动态范围和装片量、蕊片图形等有关,有时达到 10^6 以上。还要注意,不



- 1. 3. Lens 2. Fibre-optic bundle
- 4. Entrance slit 5. Flat mirror
- 6. spherical mirror 7. Grating
- 8. Exit slit and detector
- 9. Electric system

图 1 光学系统原理图

Fig. 1 Optics of emission spectroscopy

能为了降低噪声而无限制地压缩带宽,因为它会使时间常数增加,这对刻蚀速率快,被刻蚀膜又较薄的情况是十分不利的。在设计时必须给以综合考虑。

为实现工艺优化,所设计的系统可任意选择感兴趣的监测波长,还设计了一套光栅自动扫描系统,在计算机控制下进行光谱扫描。所设计的电子学系统原理框图如图 2 所示。整个电子学系统灵敏度优于 $0.1 \mu\text{V}$ 。

全部刻蚀过程可在屏幕上实时显示出来,每当刻蚀结束,计算机便可给出声光报警信号且自动关闭射频电源和切断气流。对不同刻蚀工艺,操作者只要根据屏幕上所显示的主菜单内容按动相应的键,监测工作便可自动进行。

前面已谈到,刻蚀终点的准确判别是关系到干法工艺成败的关键。要严格控制刻蚀尺寸,允许的过刻蚀量尽可能小,关键的问题是过程监测数据的处理方法。目前,广泛使用恒定信号法和转换阈值法,我们采取的用以确定信号变化率的数值微商法则不多见。为了说明这几种方法的区别,让我们看一下图 3(a)的终点监测曲线,它们是用 $\text{CF}_4(95\%) + \text{O}_2(5\%)$ 气体刻蚀

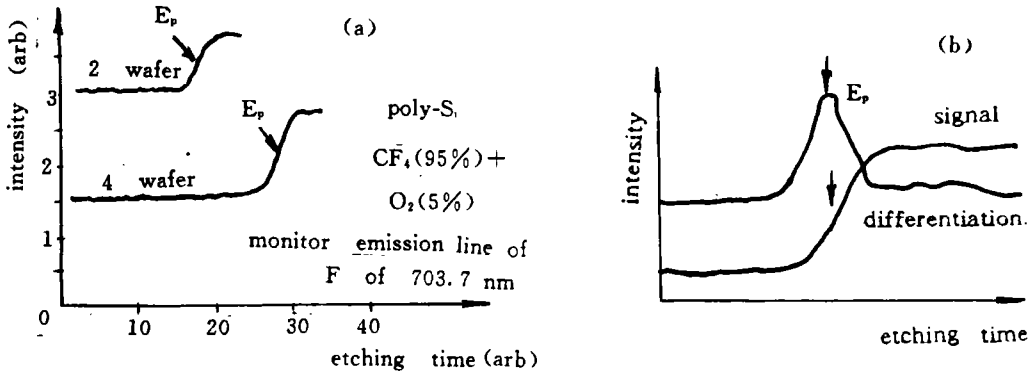
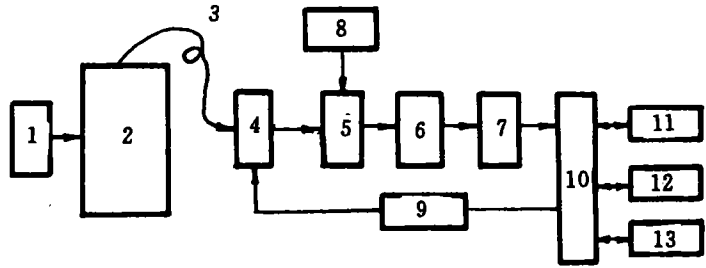


图 3 不同处理法的终点比较

Fig. 3 Comparison of endpoint obtained by different methods

Poly-si 的例子。监测波长是 F 原子发射谱线(704 nm)。曲线上标出的由经验确定的实际终点 EP 并不是曲线变平的那一点,且随装片量不同而异。而恒定信号法所确定的终点正是曲线变平的那一点,因其迟于实际终点将造成不必要的过刻蚀。所谓转换阈值法则认为刻蚀结束时某一个谱强度达到了一个特定阈值。但此阈值往往与装片量、仪器噪声、射频功率、气体压强等工艺参数有关,大量实验证明它并不是十分有效的。使用数值微商法,上述依赖性就不存在了。图 3(b)给出了用微商法处理曲线的例子,它是依据信号变化率曲线的最大点作为终点的,所以



1. RF Power of 13.6 M 2. Reactor 3. Fibre-optic bundle
4. Monochromator 5. detector 6. Coherence detection system
7. A/D converter of 12 bit 8. H. V 9. Scan controller
10. Microcomputer 11. display 12. keyboard 13. printer

图 2 电子学系统框图

Fig. 2 Block diagram of Electric system

重复性好,过刻蚀量小,消除了由常规工艺参数变化引起的错误终点。

4 结果及评价

等离子发射光谱技术是对等离子体环境而不是对各种工艺参量的监测,所以它是独立于刻蚀设备的,因此除监测刻蚀过程外,还可对设备本身进行评价以及对维修后的设备进行检验,对原始工艺及反应室的泄漏等进行分析。

现场实验时,我们对不同原始工艺状态进行了光谱扫描,得到了如文献^[1-4]所示的大体一致的结果。我们比较如图 4 所示的光谱曲线中有硅片时和原始工艺(无硅片)的光谱曲线,可以发现,某些波长的光谱强度变化较明显,如 N_2 分子谱(337 nm)的变化非常显著,可用作监测波长。在平板式刻蚀机上我们就采用了 337 nm 这条谱线对 Si_3N_4/SiO_2 进行了监测,得到了如图 5 所示的刻蚀过程曲线。同时我们还监测了 F 谱线,结果表明监测 N_2 发射谱比监测 F 原子谱要灵敏得多,这是因为 N_2 是反应生成物的缘故。当射频刚一接通,反应刚开始,反应室内 N_2 分子浓度小,而过程进行中其变化趋于平稳,反应一结束, N_2 分子浓度立刻降低。而在圆筒式设备上用 N_2 发射谱监测 Si_3N_4/SiO_2 则不十分明显,这是因为老式圆筒设备内真空度低,在原始工艺状态下, N_2 分子就已达到了一定浓度。图 6 是 21 片实际工艺

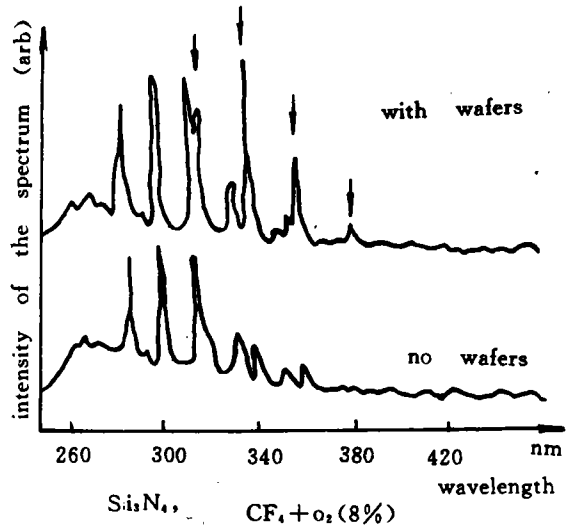


图 4 有硅片和原始工艺光谱强度变化的比较
Fig. 4 Comparison of intensity of the spectrum with wafers and without

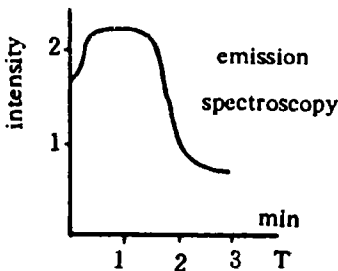


图 5 用光谱法监测 Si_3N_4/SiO_2 的刻蚀过程,膜厚 1500 Å

Fig. 5 Etching process of Si_3N_4/SiO_2 monitored

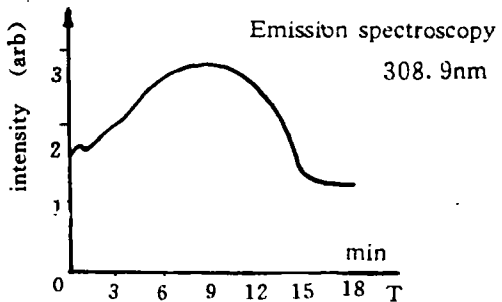


图 6 21 片硅片的去胶结果

Fig. 6 The results of removing photoresist

片在刻蚀 Si_3N_4 压点后的 1 微米厚光刻胶(负胶)的去胶过程曲线。将终止刻蚀后的硅片取出,用显微膜厚仪观测发现,对于 Si_3N_4 的刻蚀过刻蚀量仅为 80 Å,而对光刻胶的去胶结果更为理想。

为了用发射光谱法评价刻蚀设备,我们还将硅片分别放在 PIE 机石英舟中 7 个不同等距位置上监测 $1\ \mu\text{m}$ 厚负胶去胶情况(射频功率为 300 W),它们到达终点的时间从石英舟里往外排列分别是 8 min 50 s、7 min 40 s、6 min 50 s、5 min 50 s、6 min 10 s、7 min、8 min 10 s,这正说明用光谱法可评价刻蚀设备本身的非均匀性。这种非均匀性是由电极、进气口和出气口的位置分布所引起的。

我们不仅在国内首先利用等离子发射光谱在线监测刻蚀过程和判别终点,而且率先研制成了基于光谱法的离子刻蚀终点监测仪,至今已安全运行四年之久。通过对光刻胶的剥离、 Si_3N_4 、 SiO_2 、poly-si、Al、Mo 等的刻蚀进行过程监测结果表明所得终点正确可靠。在平板式刻蚀机上对 Si_3N_4 的刻蚀监测表明,最小暴露面积仅为 $0.3\ \text{cm}^2$,远远优于文献[1]所报导的结果。

5 关于监测精度的讨论

关于监测精度有两个含意,一是过刻蚀量大小,一是最小可监测面积。我们可以得到发射光谱强度与工艺参数间有如下关系^[4,5]

$$I = \frac{R_N}{\alpha\beta} \left(1 + \frac{\beta\tau d A_w N}{V} \right) \quad (1)$$

对某一固定设备和工艺而言,式中与射频功率有关的系数 α 、与硅面表面状态有关的系数 β 、以及与被刻蚀材料密度、分子量等有关的系数 d 、活性物质平均寿命 τ 、等离子体体积 V 等都可认为是一常量,于是上式可简化为

$$I = K_1 R_N (1 + K_2 A_w) \quad (2)$$

式中 K_1 、 K_2 为近似常数, R_N 、 A_w 分别表示刻蚀速率和被刻蚀面积。可见刻蚀速率愈快,光谱强度信号愈强,面积愈大,信号也愈大。在 R_N 不变时,可监测的最小面积则只取决于仪器本身的灵敏度,即电子学系统的灵敏度。实际系统的灵敏度优于 $0.1\ \mu\text{V}$,所达到的最小面积对 Si_3N_4 而言为 $0.3\ \text{cm}^2$ 。过刻蚀量大小则取决于信号的变化率,终点发生在微分曲线的极值点处,它与 R_N 、 A_w 的变化都有关。从图 5 可看出,仪器的灵敏度愈好,刻蚀速率愈快,则曲线从平稳值处下降也就愈快,其信号微分极值愈明显,终点判别则愈准确。在平板式刻蚀机上刻蚀 Si_3N_4 证明,过刻蚀量仅为 $82\ \text{\AA}$ 。

请不要忽视,原始工艺状态下,被监测的波长值所对应的信号强度即本底噪声往往要比电子学系统噪声大几倍,甚至一两个量级,我们把它称之为“光本底”。可以用双光路法或双波长法予以消除。鉴于费用问题,我们采用了电子学抵消法,取得了十分满意的结果。

所研制的仪器也可以用于亚微米集成电路的刻蚀过程监测,因为仪器已达到了 $0.3\ \text{cm}^2$ 的监测灵敏度,这对一般亚微米电路是足够的。在不能提高刻蚀速率的情况下,我们还可设置监测片或在硅片上设置附加监测区来提高监测精度也是有效的。

本工作得到了电子工业部有关领导的重视,得到了丁林辉教授的大力支持,电子部 878 厂为我们提供了十分满意的试验条件,在此一并表示感谢。我还要感谢郝德阜、孙树人、宋克非等人为此而付出的辛勤劳动。

参 考 文 献

- [1] Paul J M, Methods of end point detection for plasma etching, S. S. T. , 1981, **24**(4):115~121
- [2] Kadon H, Endpoint detection in plasma etching by optical emission spectroscopy, J. Electrochem. Soc. , 1980, **127**(1)234~235
- [3] Curtis B J, Optical endpoint detection for the plasma etching of aluminium, S. S. T. , 1980, **13**(4):129-120
- [4] Mogab C J, The loading effect in plasma etching, J. Electrochem. SOC. , 1977, **124**(8):1262~1268
- [5] Mi Baoyong, Song Kefei, Optical endpoint detection of plasma etching and RIE for LSI circuits. Proc. SPIE, 1994, **2321**:211

In situ Monitoring Etch Process and Endpoint for LSI by the Plasma Emission Spectroscopy

Mi Baoyong

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun, 130022)

Abstract

This paper describes the etching principle of the plasma etch and the reactive-ion etch for Large scale integration of circuits and basic methods for monitoring etch process on line. Implementation of monitoring etch process for large scale integration of circuits by the plasma emission spectroscopy and results of monitoring are described in the paper in detail. The minimum area monitored of 0.3 cm^2 and the dynamic monitoring accuracy of less than 80 \AA have been obtained. Finally the paper will discuss factors influence on monitoring precision.

Key words: Plasma, Emission spectroscopy, In situ monitoring, Etch, Endpoint

米宝永 男,副研究员,1964年毕业于北京理工大学。长期从事微弱信号检测和光电测量仪器的研制工作。曾先后研制成功光电自动折射仪和离子刻蚀终点检测仪,获科学院科技进步三等奖,获机械电子工业部七五攻关先进个人荣誉奖。在国内外有关刊物上发表论文十余篇。