

等离子与反应离子刻蚀终点的在线监测 ——光学反射法

米宝永

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 叙述了用光学反射法在线监测 LSI 等离子及反应离子刻蚀过程和终点的监测原理与具体实施。所设计的仪器获得了优于 80\AA 的动态监测精度及小于 0.3 cm^2 的最小监测面积。比较了用光学反射法和等离子发射光谱法得到的监测结果, 指出了影响光学反射法监测精度的因素, 提出了切实可行的解决办法。

关键词: 等离子; 反应离子; 刻蚀终点; 在线监测; 光学反射法

1 引言

当大规模集成电路(LSI)线宽小至微米和亚微米量级时,必须采用等离子刻蚀工艺,它是集成电路制造过程中的一项关键技术。虽然这种干法刻蚀具有许多优点,但当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,从而影响器件的成品率和产品质量。

由于刻蚀过程相当复杂,它不仅取决于放电过程本身,如离子、原子团的产额等,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,以及射频功率密度、气体成份、压力和流速等。对这些参数进行控制是相当困难的,甚至是不可能的。而监测刻蚀终点即可保证充分刻蚀又不发生过刻蚀,这是关系到干法工艺的成败及保证大规模集成电路产品质量的关键。

所谓终点监测即通过监测刻蚀过程完成时某种工艺特征的变化来判断被刻蚀膜在垂直方向上是否完全被去除,并立即用适当的信号形式去终止刻蚀。

近年来,国外对集成电路刻蚀过程的在线监测进行了许多研究,并取得很大进展^[1],其控制方法有放电阻抗法、兰米尔法、压力法、质谱法、发射光谱法和光学反射法等。前三种办法原理简单、设备便宜,但精度低。质谱法的灵敏度虽和发射光谱法相当,但设备庞大。因后两种方

法监测精度高, 目前国外应用较多, 但光谱法依赖于被刻蚀材料及硅片的暴露面积, 尤其对 SiO_2 的刻蚀监测比较困难。而光学反射法与刻蚀材料无关, 并能监测刻蚀速率, 对大尺寸硅片和均匀性好的工艺设备来说尤为适宜。

2 光学反射法的监测原理

前面已经谈到国外有许多人^[1-6]对光学反射法进行了研究, 但真正用于生产线上进行工艺监测尚须解决许多关键技术。早在 1991 年我们就已研制成功了专用仪器, 并用于集成电路生产线。所谓光学反射法即是利用被刻蚀材料与衬底材料的反射率差或被刻蚀膜上的干涉效应来判断刻蚀过程和终点。如图 1 所示, 当光束垂直入射到被测硅片上时, 反射信号将由有光刻胶复盖和无光刻胶复盖两个区域所反射的信号组成。一般可以认为前者是恒定不变的, 而后者即无光刻胶复盖部分的反射信号则是随时间变化的。我们监测随时间变化的反射信号则可满意地确定刻蚀终点。

对于金属膜, 如 Al、Mo 等, 反射信号幅度取决于材料的反射率 R , 它可表示为:

$$R = \frac{(\bar{n} - 1)^2 + \bar{n}^2 \bar{k}^2}{(\bar{n} + 1)^2 + \bar{n}^2 \bar{k}^2} \quad (1)$$

式中 \bar{n}, \bar{k} 为正入射时的 Drude s 光学常数, 当到达刻蚀终点时, 反射信号将发生明显变化, 变化量的大小与金属和衬底的反射率有关。对 SiO_2 、Poly-Si 等介质膜而言, 光束被膜层上下界

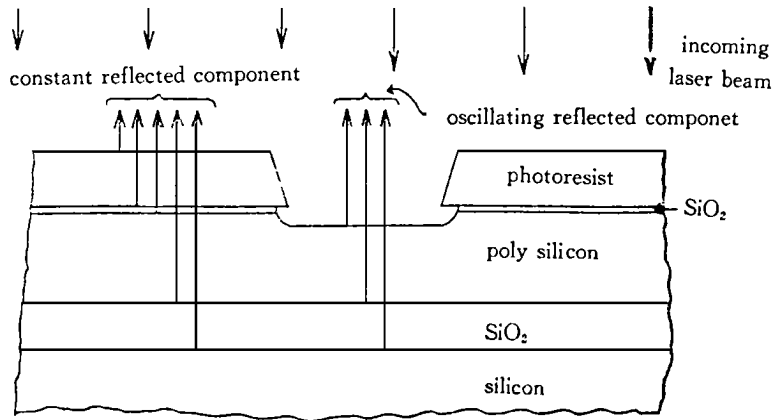


Fig. 1 Cross section of a patterned film

面反射形成干涉条纹, 其状态可由 2×2 复矩阵^[4]

$$S = \begin{bmatrix} \exp(i\delta_j - 1) & r_j \exp(i\delta_j - 1) \\ r_j \exp(-i\delta_j - 1) & \exp(-i\delta_j - 1) \end{bmatrix} \quad (2)$$

表示, 当忽略膜层吸收时,

$$r_j = \frac{n_{j-1} - n_j}{n_{j-1} + n_j} \quad (3)$$

$$\delta_j = 2\pi d_j n_j / \lambda \quad (4)$$

式中 n_j, d_j 分别为第 j 层膜的折射系数和厚度, λ 为入射光波长。很显然, 当正入射时, 它是一个以厚度变化

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2n} \quad (5)$$

为周期的,幅度与

$$R = |r|^2 \quad (6)$$

成比例的周期函数。亦就是膜厚每变化一个 Δd 周期,其反射信号就出现一次最大值(或最小值)。因此,总的刻蚀深度可表示为

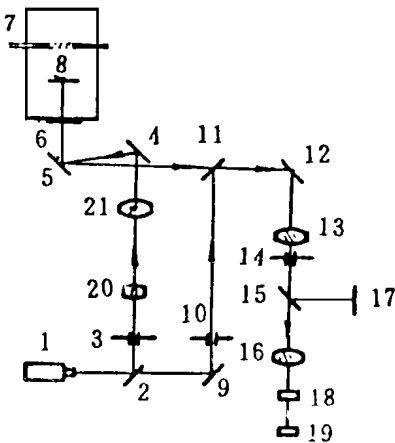
$$D = \frac{\lambda}{2n} K \quad (7)$$

式中 K 是信号最大值(或最小值)出现的次数。

3 仪器组成

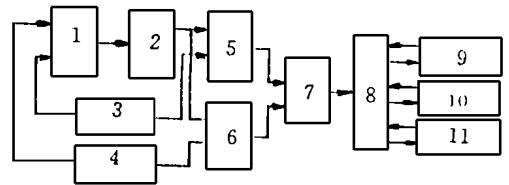
仪器是由一套包括被测硅片 8 在内的双光路干涉系统、电子学系统及微机系统组成。为了消除光源波动及探测器温度效应给测量带来的影响,我们设计了双光路系统。当采取一定措施后,可使两路电子系统特性基本一致,若光学系统不存在偏振,则测量信号与参考信号之比为一常数,它和光源及探测器变化无关。

光学系统原理如图 2 所示。由 He-Ne 激光器 1 发出的光经半反射镜 2 分成两路,一路经调制频率为 705 周的振子 3 调制,经透镜 20、21 扩束后射向被测硅片并反射回到探测器 18 上形成测量光路。另一路经振动频率为 295 周的振子 10、半反射镜 11 折向探测器 18 形成参考光路。观察屏 17 用来观察被测硅片位置是否正确,膜厚变化所形成的条纹情况及仪器是否失调等。



1. He-Ne laser 2. 11. 15 semireflector
3. 10. vibrator 4. 5. 9. 12 mirror 6. window
7. reactor 8. wafer 13. 16. 20. 21. lens
14. aperture 15. window
18. photocell 19. electric system

Fig. 2 Optics of optical reflection



1. interferometer 2. photodiode and amplifier
3. 4 vibrator 5. 6 separator 7. divider
8 ~ 11. microcomputer system
12. reactor 13. He-Ne laser

Fig. 3 Block diagram of electric system

为满足集成电路生产线的使用要求,我们解决了硅片的装夹及对准问题。装夹的关键技术

之一是要解决硅片不受振动的影响, 装片取片方便; 同时在材料选择上要解决在 300 °C 高温下不变形、不挥发、不污染硅片; 在结构上不改变离子室内的电场分布和气流方向。我们将激光光束扩为直径为 8 mm 的光束, 保证了在任何情况下都有 3~5 个芯片被激光斑所复盖, 而避免了硅片的精密对准。

仪器的电子学系统如图 3 所示。硅光电探测器同时接收两种频率的信号, 经同一放大器放大后再由信号分离器 5、6 将其分开, 经模拟除法器进入计算机。所谓信号分离器实际上就是一个乘法器, 它的开关信号分别由振荡器 3 和 4 提供。为使电路可靠工作, 两路信号不发生串扰, 在测量回路(705 周)和参考回路(295 周)里分别串入一个调谐在 295 周和 705 周的高 Q 值有源隔波网络。整个电路对工频及其倍频均有较好的抑制能力, 分别为 68 db 和 52 db。

计算机通过 12 bit AD 转换器采集随时间变化的光强信号并进行移动点平滑处理, 求取对时间的微商, 当曲线变化率为零或接近零即可认为到达了刻蚀终点, 同时以声光信号提示操作者关机或自动关机。

由于离子室所需射频功率为 300 W 至 1500 W 左右, 加之周围的强电设备, 使得电磁干扰很大。另一方面, 由于激光束扩束后所复盖的芯片被刻蚀面积仅达光斑总面积的 0.1% 至 0.3% 左右, 所以信号十分微弱, 采取相干检测和多重滤波技术以及特殊工艺措施后, 已相当满意地解决了淹没于噪声中的信号提取问题。

4 实验结果及分析评价

我们在北京 878 厂集成电路生产车间, 用所研制的仪器在等离子和反应离子刻蚀设备上对不同工艺条件进行了光学反射法和发射光谱法的监测实验得到了预期结果。从对 Si_3N_4 、 SiO_2 、Al、Mo 等的刻蚀以及去胶监测结果表明, 所得终点准确可靠。尤其对圆筒式刻蚀机而言, 根本无法用等离子发射谱监测 Si_3N_4 的刻蚀, 而用光学反射法则获得了十分理想的终点。

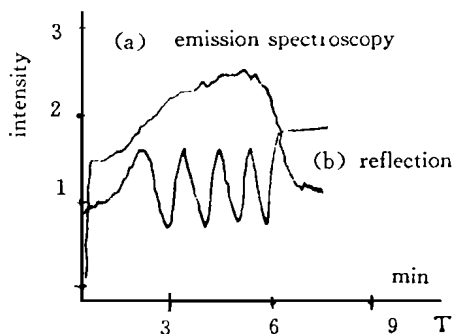


Fig. 4 The results of removing photoresist by two methods monitoring simultaneously 1 wafer

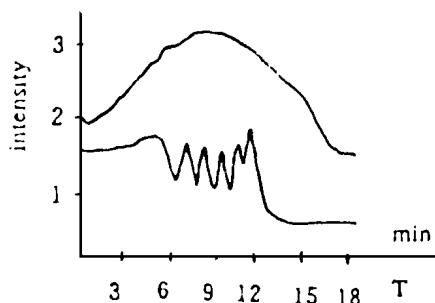


Fig. 5 The results of removing photoresist (thickness of 1 μm , negative) of 21 wafers by two methods monitoring simultaneously

图 4 和图 5 是光刻胶去胶过程曲线。胶厚为 1 μm , 射频功率 400 W O_2 的压力为 133.32 Pa, 流速为 400 ml/M, 曲线 a 是用特征谱为 308.9 nm 的发射光谱法监测所得的曲线, 曲线 b 是用

反射法监测得到的结果。由于图 4 装片量为一片, 所以两者终点一致(须指明, 光谱法的终点应是斜率最大点而不是曲线变平点)。而图 5 是 21 片实际工艺片在刻蚀 Si_3N_4 压点后的去胶过程, 两种监测方法的终点明显不同。用反射法监测的曲线 b 早于用光谱法监测的曲线 a, 这是由于等离子设备本身的均匀性不一致引起的 21 片终点各异所致。光谱法监测的是平均结果, 而反射法只监测一片, 故曲线 b 的终点早于曲线 a。

图 6 是用反射法监测一片 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ 的刻蚀过程曲线, 曲线的终点十分明显。将终止刻蚀的硅片取出, 用显微测厚仪测量得其过刻蚀量小于 80\AA , 对光刻胶的监测精度还要好。但从图 7 可以看出, 随着被刻蚀面积的减少, 曲线的正弦规律明显变坏。其曲线 a 的暴露面积占总面积的 5%, 而曲线 b 的暴露面积只占总面积的 1%, 从图中可以看出, 曲线 b 的终点就不很显著了, 这是由所谓“横向干涉”^[5]造成的。前面在介绍测量原理时曾谈到反射信号由两部分组成, 为了讨论方便, 我们忽略了这两部分信号之间产生的干涉效应, 而实际上随着刻蚀面积的减少, 这种效应愈显著致使合成信号的正弦规律变差, 因而限制了刻蚀精度的提高。为提高精度必须减少甚至消除横向干涉效应, 为此建议采用对光刻胶不透明的光作光源, 或者在硅片上设置一特定监测区亦可。

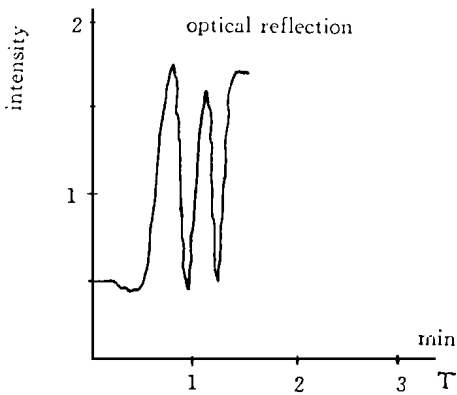


Fig. 6 The etching process of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ monitored

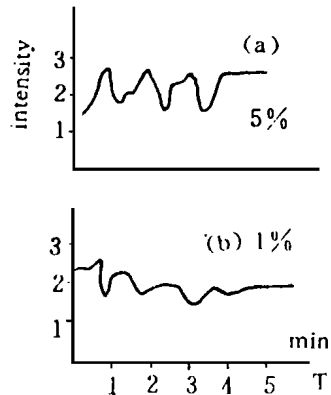


Fig. 7 The monitor curves of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ caused by the lateral interference

光学反射法对均匀性好的设备和大尺寸硅片监测特别有用, 并能监测刻蚀速率。它可以和光谱法联合应用, 起到取长补短的效果。

本工作是在张庆英、宋克非、高健翔等同志合作下进行的, 在此一并表示感谢。还要感谢 878 厂张旭东同志给予的协作以及电子工业部有关领导的支持。

参 考 文 献

- [1] Paul J M. Methods of Endpoint Detection for Plasma Etching. S S T, 1981, **24**(4): 115 ~ 121
- [2] Heinz H Busta. Endpoint Detection with Laser Interferometry. Proc SPIE, 1981, **276**: 164 ~ 169
- [3] Curtis B J. Optical Endpoint Detection for the Plasma Etching of Aluminium, S S T, 1980, **13**(4): 129 ~ 132

- [4] Heimann P A. Optical Etch-Rate Monitoring: Computer Simulation of Reflectance. S S T 1984, **131**(4) : 881 ~ 885
- [5] Mi Baoyong. Optical Endpoint Detection of Plasma Etching and RIE for LSI Circuits. Proc SPIE, 1994, **2321**: 211 ~ 213
- [6] 上村隆. 大平 等. エツ チング 终点の モニタ 技 . Semiconductor World, Technical Paper, 1988, 38 ~ 40

In Situ Monitoring of Etching End-Point for Plasma and Reactive-ion Etching by the Optical Reflection

Mi Baoyong

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

Abstract

This paper describes the principle of end-point monitoring of the plasma etch and the reactive-ion etch for LSI by the optical reflection, and implementation of the optical reflection. The minimum area monitored of 0.3 cm^2 and the dynamic monitoring accuracy of less than 80 \AA have been obtained by the instrument designed. We compared monitored result of the optical reflection with the emission spectroscopy. Finally the factor influenced on monitoring precision of the optical reflection is discussed in the paper, and put forward solvable methods.

Key words: Plasmas, Reactive-ion, Etching end-point, In situ monitoring, Optical reflection method

米宝永 男, 副研究员, 硕士生导师, 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。曾先后主持了光学薄膜厚度控制仪、高精度光电自动折射仪、等离子刻蚀终点检测仪、短波段光子计数器、非接触式低噪声应力测量头并参加了光栅摄谱仪, 太阳紫外光谱监视器等多项仪器的研制工作。先后获中科院科技进步二等奖一项, 三等奖两项, 获1991年机械电子工业部七五攻关先进个人奖和优秀成果奖。在国内外有关刊物上发表论文近20篇。