

几种集成电路硅片工艺检测技术简介

包宗明

(复旦大学)

集成电路是多工序(每道工序的加工成本相当高)的产品。在生产过程中对硅片加工质量进行检测,及早剔除不合格的硅片有利于降低加工成本;而对检测所得结果进行统计分析,追查原因,研究对策则有利于提高企业的质量管理水平和工艺水平。随着集成电路向大规模、超大规模方向发展,大块半导体平均参数的粗略测试已不能满足需要,对硅片的无损、微区、快速、自动测试技术正在迅速发展。表1列

出了现今集成电路工艺检测的主要项目及方法。曾有专著^[1-3]介绍了多种半导体测试技术。本文就新发展的、应用较广的几种集成电路硅片工艺测试技术进行简单介绍。

一、硅片表面缺陷检测^[4,5]

硅片表面的缺陷和污染如划痕、凹坑、白雾等种类很多,对此国内外制订了图谱和检测标

表1 集成电路主要工艺检测项目及方法

工艺	检测项目	检测方法	工艺	检测项目	检测方法
硅抛光片	表面油污及缺陷	显微镜观察、目测、表面缺陷检测仪	离子注入或杂质扩散	掺杂浓度均匀性及深度分布	扩展电阻、电容-电压法、二次谐波法、SIMS ^(a)
	体内缺陷	腐蚀金相法、X射线形貌、光声形貌		结聚	磨角染色
	氧、碳含量	红外吸收光谱、带电粒子活化分析、激光扫描微区分布测试		载流子寿命变化	微波光电导衰退、表面光电压
	杂质含量	中子活化分析、激光致发光光谱	氧化	膜厚	椭圆偏振光仪、干涉法
	平整度测试	平整度测试仪		可动离子沾污	电容-电压法、离子电流法
	电阻率及电阻率均匀性测试	扩展电阻法、涡流法、微波法、光电压法		膜的缺陷	衬底腐蚀装饰法检测针孔、击穿电场强度测试
	载流子寿命及其均匀性测试	微波法、涡流法、表面光电电压法、红外光吸收法		膜中掺磷的浓度	X射线荧光光谱
硅外延片	外延层厚度	红外吸收光谱仪、炉内检测仪、磨角染色	化学气相沉积钝化膜	表面产生速度、表层产生寿命、界面态	MOS电容-电压关系及电容-时间关系测量
	外延层掺杂浓度及其深度分布	扩展电阻法、电容-电压法、二次谐波法		膜厚	椭圆偏振光仪、干涉法
	少数载流子扩散长度	表面光电电压法		膜的成分	XMA ^(b) , XFA ^(c) , AES ^(d) , SIMS
	离子注入损伤	光声技术、椭圆技术、背散射技术		膜的性质	椭圆偏振光仪测折射率、腐蚀速度测试
			缺陷及异物	显微镜、扫描电镜、表面检查仪	

准。目前,我国大多采用目测,要有经验而且很花时间,况且在检验过程中硅片和人接触本身会引入新的污染。国外已有自动硅片表面检测仪,每小时可以对400—600片4"硅片进行全片检验,该仪器最小可以检测出 $0.3\ \mu\text{m}$ 左右的缺陷或缺陷群。

表面缺陷检测的工作原理如下:当一束平行光照射到理想镜面的硅片上时,反射光束也是一束平行光,而在反射光束以外的地方的探测器接收不到光信号。如果表面有缺陷或污染,光线就会受到散射而进入探测器,因此当硅片移动时,光束照射到一个缺陷,探测器就会收到一个光脉冲,可以用记数电路对缺陷进行记数,也可以用电视屏将硅片上缺陷的分布显示出来。

国际市场上供应的表面缺陷检测仪,大部分采用He-Ne激光器作为光源,用光电二极管或光电倍增管探测散射光。可以移动光束或将硅片旋转,从而对硅片表面各点进行检验。这些仪器还能自动从片架上取片测试,然后按具体要求把检测好的片子分成可用、剔除、重新清洗、重新抛光四类。

二、硅片平整度检测^[6,7]

硅片表面不平整会影响光刻质量,不同的曝光方式对硅片表面平整度的要求也有所不

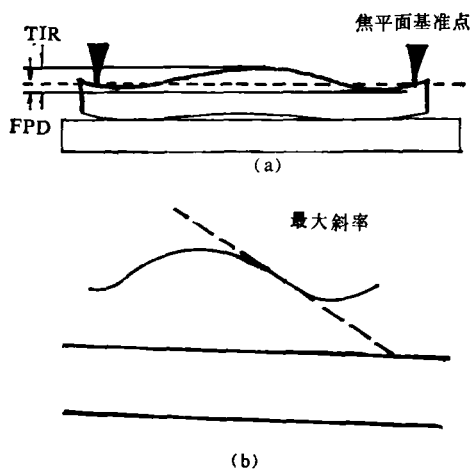


图1 硅片平整度的标志法

同。因此有几种衡量硅片平整度的标志法。例如:(1)总指示值(TIR):在接触式或接近式曝光时,硅片和掩膜版接触或接近的地方曝光图象清晰,而距离远的地方曝光图象就模糊。因此,往往用硅片表面最高点和最低点之间的差值来衡量硅片的平整度;(2)焦平面偏离值(FPD):在1:1投影曝光时,通常在硅片上选定焦平面的基准点,以该点的高度作为焦平面的位置进行调焦投影曝光。在硅片表面与焦平面一致的地方图形清晰,偏离愈远图形愈模糊。这时把焦平面与硅片表面上或向下偏离的最大值用来标志硅片的平整度。大量实践统计表明,FPD值大约是TIR值的2/3。图1(a)给出了以上两种平整度表示法的含意;(3)局部表面斜率(LSL):以上所述是全片平整度的标志法。在分步投影曝光时,为了获得清晰的细线条图形,对一片硅片上的图形逐个调整焦距和曝光,这时要求在每一次曝光的局部区域内硅片表面要有足够的平整度,用局部表面斜率表示硅片平整度更切合实际,如图1(b)所示;(4)总厚度变化(TTV):由于硅片背面并不是理想平整的,因此硅片全片中最厚和最薄处的厚度差值也是一个衡量硅片平整度的重要指标。

测量硅片平整度的方法可以用光学方法,也可以用电容法。电容法的电容探头和测试线路如图2所示。图中 C_s 是探头电容,即探头中心圆平面和周围圆环之间的电容。当探头十分

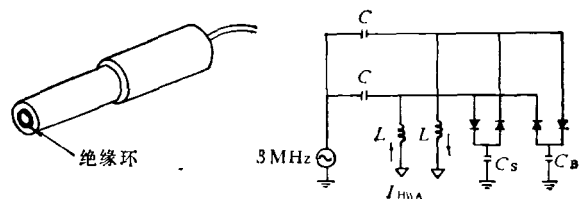


图2 电容探头和探测线路

接近硅片表面时, C_s 的数值反比于探头端面和硅片表面的距离,还和硅片的介电常数有关。 C_B 是仪器内的平衡电容。当 $C_s = C_B$ 时, $I_{HWA} = 0$;而 $C_s \neq C_B$ 时, I_{HWA} 正比于 $C_s - C_B$ 。由于 I_{HWA} 与硅片高度的变化不是线性关系,需要用线性化线路使仪器指示值与硅片表

面高度变化呈线性关系。对 $\phi 100$ 的硅片可以用 25 个探头按一定部位分布,在硅片边缘上选择三个对称点作为焦平面基准点,这三点的高度就决定了焦平面的位置。由其余 22 个点的测试值可以确定硅片的平整度。另一种方法可以用两个并排的探头在硅片上扫描,由两个探头信号的差值可以确定硅片表面的平整度。该方法的测试精度可达 $\pm 0.5\mu\text{m}$,分辨率达到 $0.1\mu\text{m}$ 。

三、硅中氧含量的微区分布测试^[8-10]

已有大量工作研究硅中氧含量的控制及硅中氧在热处理过程中的行为,结果表明,正确地控制硅中氧的含量及其热处理行为有利于提高集成电路的合格率。硅中氧含量的检测已经成为集成电路生产工艺检测的重要内容。通常是用红外吸收光谱在 $9\mu\text{m}$ 附近间隙氧的吸收来确定硅中的氧浓度。用一般红外光谱仪的测试,样品的厚度需要 2mm ,而用配有电子计算机的傅里叶红外变换光谱仪可以直接对生产上使用的数百微米厚的硅片进行无损快速自动测试^[11]。进一步的工作要求对硅片中氧的微区分布进行检测,图 3 给出了探测硅片中氧的微区分布的装置示意图。采用双异质结 $\text{PbTe}/\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x/\text{PbTe}$ 半导体激光器在 77K 发出的连续激光作为光源。取 $x = 0.18$,激光器发光波长为 $9.05 \pm 0.01\mu\text{m}$,这时单色光正好处于室温时硅中间隙氧的吸收峰值位置。激光器输出功率 $100\mu\text{W}$,照到样品上的光的功率密度为 $3.5\mu\text{W}/\text{mm}^2$,是一般红外光谱仪光强的 500 倍。用 $x = 0.2$,峰值灵敏波长在 $11\mu\text{m}$ 附近的 Hg_{1-x}

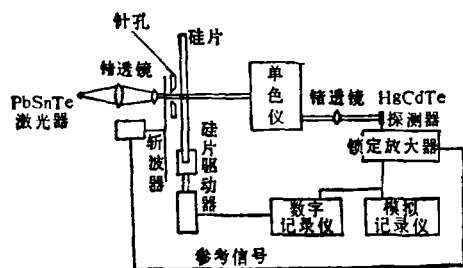


图 3 微区氧分布测试装置图

Cd_xTe 光电导型探测器探测透过样品的光,探测器也在 77K 工作。激光器和探测器都放在以锗为窗口的杜瓦瓶中。单色仪用于在测试前后检测激光器的波长是否正确。被测样品表面要涂一层无反射膜,使硅片表面的反射系数由 0.3 降低到 0.025 ,从而消除多次反射对测试的干扰。这时从有样品和没有样品时探测器接收到的光强 I 和 I_0 以及样品的厚度 t 可求得样品吸收系数 α ,

$$\alpha = -\frac{1}{t} \ln \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (1)$$

移动样品,可以测量吸收系数的微区变化,从而得到氧含量的微区变化。以此可以研究硅中间隙氧和缺陷的关系。若用二氧化碳连续激光器作光源则可能更为方便。另外, $16\mu\text{m}$ 附近有与硅中碳有关的吸收峰,而 $8\mu\text{m}$ 附近有与硅中热处理缺陷有关的吸收峰。采用类似的装置,只需采用相应波长的激光器和探测器就可用于不同的研究。

四、载流子寿命分布测试^[12-16]

载流子寿命不仅对双极型晶体管的开关速度、饱和压降、电流增益起着决定性的作用,而且对 MOS 器件的功耗、动态特性、寄生效应等也有很大影响。因此,测量硅片中载流子寿命在工艺过程中的变化及其在硅片中的分布,也受到很大的关注。微波光电导衰退法和表面光电电压法都可以满足这方面的要求,并在国外已有商品仪器。

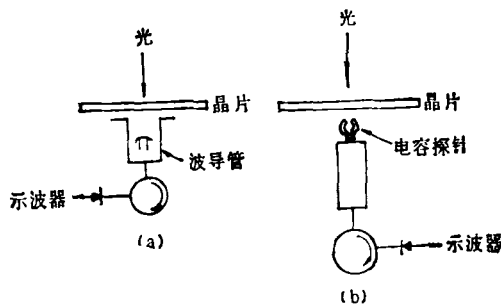


图 4 (a) 反射法 (b) 电容探针法示意图

微波光电导衰退法是用微波在半导体上的反射或透射系数与半导体中载流子浓度成比例的原理,探测光照激发的非平衡载流子在光停止照射后的指数衰减常数,从而确定载流子的寿命。代表性的方法有反射法、电容探针法等(见图4)。微波测试的样品主要是薄片。当硅片的两个表面复合速度相同[都是 S_p (对n型硅)],且硅片厚度为 2ω 时,测试所得衰退常数 τ_{eff} 与硅片中少数载流子寿命 τ_p 之间有如下关系:

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{\tau_{eff}} - R_s, \quad (2)$$

式中 R_s 为表面复合修正项,

$$R_s = D_p \left(\frac{\xi}{\omega} \right)^2, \quad (3)$$

D_p 是少数载流子(空穴)的扩散系数,而 ξ 满足

$$\tan \xi = \frac{S_p \omega}{\xi D}. \quad (4)$$

当该法用于器件工艺监测时,硅片正反面的表面复合速度不一样,而且有的片子经过离子注入、氧化、扩散等工艺,这时无法求出硅片中少数载流子的确切寿命,只能得出相对的变化规律,作为工艺监控的参考。用红外光的自由载流子吸收测量可以确定微区载流子寿命。该类方法已揭示出硅片中载流子寿命微区变化的某些规律。

表面光电压法是以光子能量大于半导体禁带宽度的单色光垂直照射到镜状的半导体表面,在表面一定深度范围内激发电子-空穴对。由于硅片表面往往存在表面势,表面附近的非平衡电子空穴在表面势的作用下将发生分离,从而建立表面光电压。表面附近非平衡载流子愈多,表面势愈大,建立的表面光电压愈大。用小的光斑在晶片上扫描,逐点测试,就可以得到载流子寿命分布。

五、微区电阻率分布测试^[16,17]

电阻率是半导体设计中最基本的参数。为了获得优良的器件性能及保证器件性能的一致

性,常常需要检测硅片中电阻率的微区变化及器件工艺中扩散或离子注入造成的电阻率分布。在这方面扩展电阻是最有效的手段。其中最常用的是两探针扩展电阻测试仪。它是用两根金属探针和半导体接触,通以电流 I ,在探针两端测得电压 V ,则扩展电阻就是

$$R_s = \frac{V}{I}. \quad (5)$$

理论计算表明,扩展电阻取决于两个探针接触点附近数倍接触半径范围内半导体的电阻率。若探针的接触直径很小(通常约 $5-7 \mu\text{m}$),而且两个探针接触点之间的距离也很小(通常约 $25-50 \mu\text{m}$),就可以用此方法测量半导体中电阻率的微区变化。如果将半导体磨一个斜角,还能测电阻率在深度方向的分布。探针材料、针尖的曲率半径及表面状况、探针接触硅片时的冲击力和接触后的静压力、半导体表面的状况等,都会影响测得的扩展电阻值 R_s 和样品电阻率 ρ 之间的关系。因此,在每一次测试过程中,必须严格保持以上条件都稳定、相同,才能测得可重复的有意义的结果。通常要定期用标准样块对测试仪器的 $R_s-\rho$ 关系进行标定,以此作为测试值和电阻率之间转换的依据。在测量深度分布时,还需要对测得值进行复杂的数值修正。

六、半导体损伤及缺陷的测试^[18,19]

半导体中的晶格缺陷和损伤的测试方法很多,已有大量文章报道了用X射线、电子显微镜、背散射椭圆偏振光、喇曼光谱等多种方法研究半导体中的缺陷和损伤。光声谱测试就是一种近期发展起来的新方法。光声测试原理是,当光照在半导体上时,半导体吸收光的能量,其中一部分能量可能以光的形式重新发射出去,另一部分可能转变为热能(非发光过程),从而使半导体温度升高。若光强以一定的频率周期性变化,半导体表面温度也相应地作周期性变化,这就引起周围空气胀缩产生声波,用微拾音器可以检测到这种声波。图5是光声测试设备

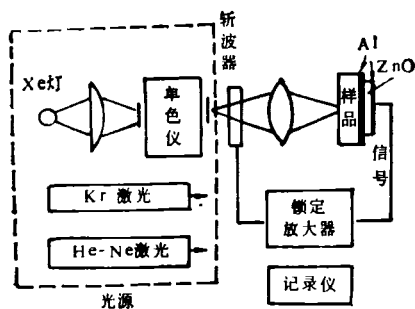


图5 光声测试设备框图

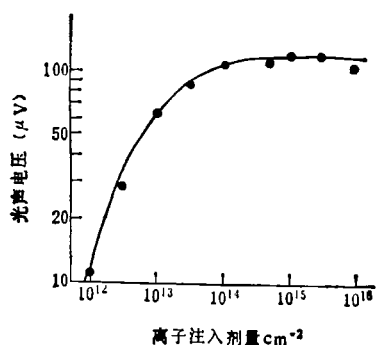


图6 GaAs 中 Si⁺ 注入剂量和光声信号幅度之间的关系

框图。光源可用 Xe 灯通过单色仪成为单色光，也可以用激光器。样品可以放在密封的声室中，用微拾音器检测光声信号。在有缺陷的地方，非发光复合比较强，吸收的光能量中转化成为热能的成分增大。因此，在有缺陷的地方光声信号就比较强。用 He-Ne 激光器发出的细小的光斑在硅片上扫描，可以得到光声信号强弱分布图。将这种图与 X 射线形貌图对照，发现两者之间有一定的对应关系。

离子注入技术是集成电路工艺中的重要技术，有许多工作研究了离子注入在半导体中造成的损伤。但从目前发表的文章来看，许多方法只能测得高剂量 ($> 10^3/\text{cm}^2$) 时的信息，而光声方法却能提供低剂量 ($\sim 10^{12}/\text{cm}^2$) 情况下

的信息。图 6 示出了 GaAs 中 Si⁺ 离子注入剂量和光声信号幅度的关系。最近在硅中磷离子注入损伤的测试方面也观察到光声谱可以检测到低于 $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2$ 剂量所造成的损伤^[20]。

集成电路硅片工艺检测技术涉及面很广，本文内容在深度和广度上都很局限，有兴趣作进一步研究的读者可以查阅文后所列参考文献。

参 考 文 献

- [1] 鸭下源一、长崎直之，电子材料(日)，18-9(1979)，22.
- [2] 中国科学院半导体研究所理化分析中心研究室著，半导体的检测与分析，科学出版社，(1984).
- [3] W. R. Runyan, *Semiconductor Measurements and Instrumentation*, New York, McGraw-Hill (1975).
- [4] R. Iscoff. *Semiconductor International*, 5-11 (1982), 39.
- [5] 岩谷福雄、铃木道夫、高见胜己，电子材料(日)，18-9 (1979)，34.
- [6] W. A. ベイリース, G. C. ダンカン, 电子材料(日)，20-2(1981)，82.
- [7] 吉瀬正典，电子材料(日)，22-9(1983)，26.
- [8] 大川潭二、大沢昭、本田耕一郎，电子材料(日)，20-2, (1981)，37.
- [9] F. Shimura et al., *Appl. Phys. Lett.*, 37(1980), 483.
- [10] K. Nauka et al., *Appl. Phys. Lett.*, 43(1983), 241.
- [11] P. S. Burggraaf, *Semiconductor International*, 5-3 (1982), 40.
- [12] 宇佐美 晶，电子材料(日)，20-2 (1981)，67.
- [13] 王宗欣、包宗明，复旦学报(自然科学版)，21-4(1982)，462.
- [14] D. L. Lile and N. M. Davis, *Solid State Electron.*, 18(1975)，699.
- [15] 包宗明、杨恒青、黄淑蓉，太阳能学报，2(1981)，81.
- [16] *Annual Book of ASTM Standards (Electronics)*, Part 43, F672-80, (1982).
- [17] 张敬海，硅材料质量与硅器件工艺，上海科学技术文献出版社，(1979)，111.
- [18] 御子柴宣夫，固体物理(日)，17-2 (1982)，19.
- [19] R. A. McFarlane and L. D. Hess, *Appl. Phys. Lett.*, 36(1980)，37.
- [20] 苏九令、包宗明等，半导体学报，6-2(1985)195.