

激光技术在集成电路测试中的应用

王 威 礼
(北京大学物理系)

宋 菲 君
(北京信息光学仪器研究所)

摘 要

基于半导体光电导的基本物理现象,利用激光束在集成电路器件表面的扫掠,可测出诱导的光电流变化。通过微机信息处理系统可研究器件表面沟道或反型层、P-N 结的局部击穿,CMOS (互补金属氧化物半导体器件)随机存取器的锁位现象,还可进行运算放大器可靠性和超大规模集成电路逻辑状态的分析等。

激光微加工技术在半导体工业生产中已得到日益广泛的应用^[1],其中激光技术在大规模集成电路测试中的应用,更是令人瞩目^[2]。尽管这一技术还未完全成熟,但它已显示出广阔的前景。

近年来,单个半导体器件的集成度提高很快,每块电路含有数十万个元器件的超大规模集成电路已经出现。高速集成电路的时钟频率,按现有的设计和工艺水平推算,已达到 1 GHz 以上,然而集成电路测试设备的时钟频率却低于 200 MHz,其空间分辨率也达不到要求。因此,传统的测试技术无论在时间和空间的分辨率上都满足不了器件的要求。于是人们纷纷转向非接触的“光测”方法,期望以激光技术为基础,建立各种自动测试设备,使它们具有高速度、高分辨率和非破坏的特点,同时结构简单,操作方便,成本低廉。

半导体的光电导现象,早在上一世纪就被发现。长期以来,物理工作者一直在利用光对半导体电学性质的显著影响来检测半导体材料和器件的特性和缺陷,或利用这一效应来研究某些反常的物理现象。在技术上,一般利用激光束在器件表面扫掠,测出光电导效应诱导的光电流变化。通过微机信息处理系统的处理和分析,研究器件表面沟道或反型层^[3]、P-N 结的局部击穿^[4],研究 CMOS 随机存取器的锁位现象^[5],还可以进行运算放大器可靠性分析和

超大规模集成电路逻辑状态分析^[6,7]等。

一、基本原理和测量装置

当光点照射半导体器件表面时,如果光子的能量大于半导体禁带宽度,则伴随着光子的吸收,在半导体内部会激发出电子-空穴对,如图 1 所示。当产生的电子或空穴与 P-N 结的距离在扩散长度范围以内时,一部分电子和空穴通过正常的复合过程而消失,其余部分则会扩散到 P-N 结的耗尽区。在耗尽区内自建电场的作用下,空穴向 P 区运动,电子向 N 区运动,结果在外电路中形成可检测的光电流。光电流的大小与器件的结构和特性密切相关。

图 2 给出超大规模集成电路 (VLSI) 功能

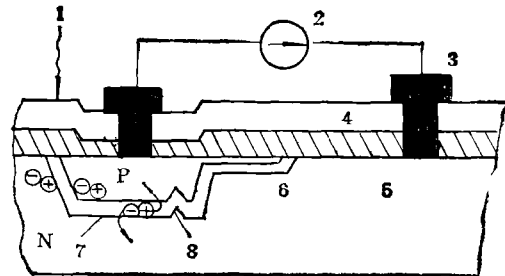


图 1 激光测试原理图

1. 激光扫描光点; 2. 光电流; 3. 铝电极; 4. 沉积玻璃保护层; 5. 热氧化 SiO_2 层; 6. 表面反型层; 7. 耗尽层; 8. 局部尖峰位置

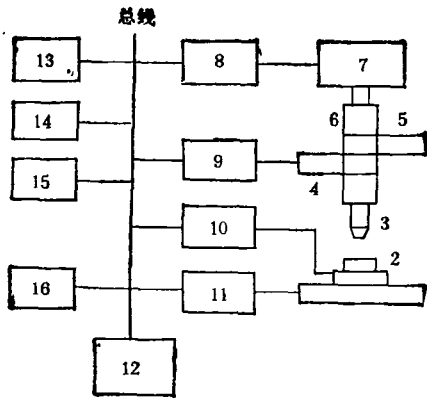


图 2 激光测试设备方框图

1. X-Y 移动平台; 2. 样品; 3. 物镜; 4. He-Ne 激光器; 5. 照明系统; 6. 光学系统; 7. 摄影仪; 8. 监视器; 9. 声光调制器; 10. 数据采集; 11. 平台移动控制; 12. 微机; 13. 磁盘; 14. 打印机; 15. 荧光屏; 16. 键盘

和逻辑缺陷测试系统的原理方框图。被测样品可按一般的封装工艺制作, 只不过封帽材料改用石英片或蓝宝石片, 以便透过激光, 同时保持气密性。处于半成品状态的器件也可用此系统进行测试。

样品放置在微机控制的 X-Y 精密平移工作台上, 功率为 2—4 mW 的 He-Ne 激光经显微物镜聚焦在样品表面, 形成微米量级的光斑。物镜在一套光电自动调焦系统(图中未画出)控制下, 沿光轴自动微量调节, 随时补偿在平移操作中由于样品表面不平和机械跳动引起的调焦误差。

照明系统由卤素灯和聚光镜、分光镜组成, 它照亮了样品, 使被测区域通过物镜放大后由电视摄影仪或 CCD 照相机接收, 并显示在监视器的屏幕上, 以便操作人员对激光照射的样品进行直视监测、定位和分析。为了增强识别效果, 还对接收图象进行边缘增强和假彩色处理等。

微安量级的光电流变化经放大后, 由瞬态数据采集装置采集, 并行输入到微机中进行信号处理, 按各种不同的测试程序和测试条件进行半导体特性、功能和逻辑状态的分析, 中间结果和最终结果可存入磁盘或由屏幕直接显示。

系统的参数如表 1 所示。

表 1

光学系统	激光输出功率	2—4 mW
	功率波动	≤0.1%
	显微物镜倍率/ 激光光斑尺寸	5X/12.7 μm 10X/6.3 μm 20X/1.6 μm 50X/1.0 μm
	监视系统	
监视系统	摄像器件	TV 摄影仪/CCD 照相机
	测区放大倍率	60X (10X 物镜+6X 转象镜)
	监视器件	12" 电视监视器
工作台	范围	50 mm × 50 mm
平移系统	最大速度	500 mm/s
	稳定时间	<50 ms
	定位精度	1 μm
	系统时钟	频率

为了避免激光长时间辐照引起的热效应, 以及激光输出功率波动引起的噪声、误触发等, 本系统中还专门设计了一套声-光调制系统, 其原理见图 3。

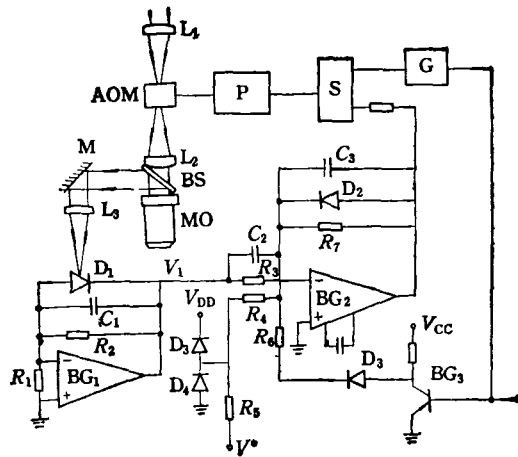


图 3 声-光调制系统原理图

- L_1, L_2 为透镜(构成望远系统); MO 为显微物镜; L_3 为聚光镜; M 为反光镜; BS 为分光镜; AOM 为声-光调制器; D_1 为光电器件; P 为功率放大器; BG_1, BG_2 为运算放大器; V_{DD} 为 +12 V; G 为高频信号发生器; V_{CC} 为 -12 V; S 为衰减器; V^* 为模拟控制电压

激光束经一倍望远系统 L_1, L_2 后射入显微物镜。声光调制器 AOM 位于 L_1, L_2 的公

共焦点激光束最细处。高频信号发生器G产生80 MHz 的高频信号,经衰减器S、功率放大器P后驱动AOM。AOM输出的一级衍射光的功率 P_1 为

$$P_1 = P_0 \sin^2(\eta/RV)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

式中 P_0 为输出功率的最大值, η 为声-光系数(约75—90%), R 为调制器输入阻抗(50—75 Ω), V 为激励电压有效值。

高频信号受到频率为100Hz、宽度为1 μ s的脉冲序列调制,因此样品只受到占空比极小的光脉冲的照射,有效地避免了激光连续辐照造成的局域加热。

由分光镜BS导出的部分激光经反光镜M、聚光镜L₃后聚焦在光敏元件D₁上。D₁具有负阻效应,它与电阻R₂并联后成为运算放大器BG₁的反馈电阻,C₁使BG₁具有积分效果。BG₁的输出电压V₁和模拟控制电压V*在运算放大器BG₂的反相输入端相加,合成电压经BG₂放大后输入衰减器S的反相控制端。当激光光强增大时,V₁下降,引起BG₂的输出电压变大,经负反馈,使AOM的驱动电压V下降,从而减低了AOM的输出光强,形成闭环。电容C₂和C₃用于校正反馈电路的幅频和相频特性。100Hz的调制信号可以从BG₃的基极加入。

该电路使低频的功率波动减小40 dB,使波动的幅度小于激光输出功率的0.1%,完全满足了精密测量对可靠性和稳定性的要求。

二、应用举例

1. 表面反型层和 P-N 结局部击穿检测

半导体结型器件中表面反型层如图1所示。反型层可以看成是正常P-N结沿表面的延伸。由于反型层紧贴表面,当光点扫掠这些表面区域时,受激电子-空穴对浓度很高,形成很强的光电流。所以,利用激光扫掠技术可以直观地描绘出反型层在表面下扩展的范围和空间电荷的分布。

同一方法还可用于研究P-N结的局部击

穿特性。在零偏压的条件下,当光点扫过图1中的P型层时,可以很容易地观察到N型层的尖峰位置引起的光电流增强效应。这是由于在该点P-N结更靠近表面所致。尖峰位置往往是首先发生局部击穿的点,这是影响器件击穿电压提高的重要因素。在反向偏压下,尖峰引起的光电流增强效应更为显著,这是由于光激发电子或空穴注入处于反向偏压的耗尽区所引起的雪崩倍增效应的结果。利用反向偏压的光电流增强效应,可以观察到零偏压下看不到或不明显的局部击穿点。激光探测技术可用于以确定导致P-N结击穿电压降低的诸因素,以便改善器件的性能。

2. CMOS 大规模集成电路的锁位分析

利用激光探测技术,还可以分析大规模集成电路,如64K静态随机存储器(CMOS电路),并进行定量锁位分析。

图4(a)为CMOS的等效电路,它是由N-P-N和P-N-P组成的复合晶体管。在光点照射在N形槽区时,除部分受激发的电子和空穴直接复合外,其余的电子和空穴分别流向V_{DD}和地。电子经过N型槽区和高掺杂的N⁺接触点流向V_{DD},而空穴既可经过N型槽区和高掺杂的P⁺接触点流向V_{DD},也可经过P型衬底和P⁺接触点流向地端。在N型槽区内的电子流会使P-N-P晶体管的基区电位下降,而在P型衬底内的空穴流却造成了N-P-N型晶体管的基区电位上升。当任一晶体管的基极电位达到或超过临界值时,寄生的闾流管就会导通。

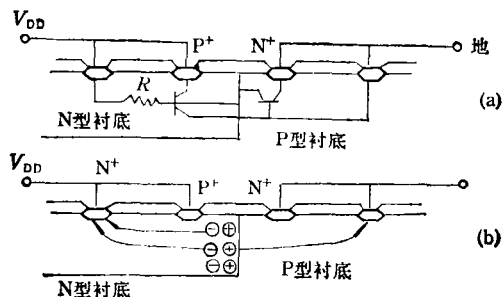


图4 (a) CMOS的等效电路;(b) CMOS锁位测定原理

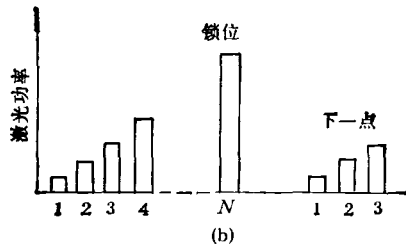
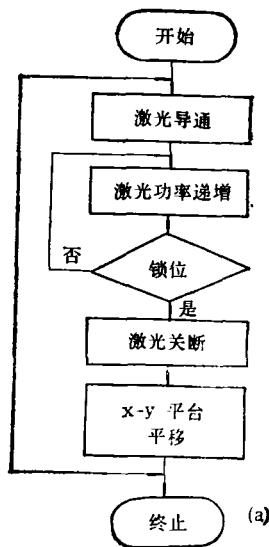


图5 CMOS 锁位测定

由于 CMOS 的锁位现象和光点位置、光脉冲功率有关，因此可以利用递增的激光脉冲

序列来进行定量分析。图 5(a) 为 CMOS 锁位测定的程序框图，图 5(b) 为脉冲序列示意图。激光探测的结果和电学测量的结果的一致性已得到证实^[8]。

3. 超大规模集成电路寄存器逻辑态的分析

激光扫描技术同样可用于进行大规模集成电路寄存器或其它器件的逻辑状态分析。在进行集成电路版图设计时，往往在待测点设置能透过激光的窗口。当小功率激光束经聚焦后扫描这些测点时，会产生微安量级的光电流变化，经数据采集系统采集，由微机按不同的程序进行各种逻辑态的分析。

激光测试技术也可用于其他高速集成电路，如 TTL (晶体管-晶体管逻辑电路)，ECL (发射极耦合逻辑电路) 和 NMOS (N 沟道金属氧化物半导体器件) 的测试和分析。

- [1] 邱明新、陆世楨、林成鲁, 物理, 16(1987), 275.
- [2] J. Mulady, *Semiconductor International*, 10(1987), 60.
- [3] R. E. McMahon, *Proc. IRPS*, (1972), 23.
- [4] C. Porter and D. Sawyer, *Phys. Failure Electron*, 5 (1967), 321.
- [5] T. Shiragasawa et al., *Proc. IRPS*, (1984), 63.
- [6] J. R. Haberer and J. J. Bart, *Proc. IRPS*, (1972), 106.
- [7] F. J. Henley, *Proc. IRPS*, (1984), 44.
- [8] F. Henley et al., *Proc. IRPS*, (1983), 122.

(上接第 530 页)

$N(\omega) \propto \omega^{d-1}$ (Debye 关系); 在 $\omega > \omega_c$ 的分形子频率范围, $N(\omega) \propto \omega^{D_f-1}$. 这个量对确定如分形网络的比热、热导率等性质是相当重要的. Alexander^[17] 等已把这个分形子理论应用到无序材料, 因为无序材料在短尺度内可能具有分形几何. 他们用分形子理论来解释无序材料的低温非 Debye 型热容和低温热导率曲线上出现的平台, 得到了较为满意的结果. 分形子理论可望在描述具有分形特性材料的其它动力学性质方面得到应用. 但问题远未得到解决, 还有许多问题有待澄清, 如分形子波函数的确切形状还不太清楚.

应用自相似分形概念可得到许多有意义的反常结果, 即使可以使旧有概念更新. 因此, 充分了解无机材料中自相似性是相当有意义的.

- [1] 南策文, 武汉工业大学学报, 9(1987), 347.
- [2] B. B. Mandelbort, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, San Francisco, (1982), 4.
- [3] 黄均, 物理, 15(1986), 269.
- [4] 姚凯伦, 物理, 15(1986), 663.
- [5] D. Stauffen, *Phys. Reports*, 54(1979), 1.
- [6] T. Nagutani, *J. Phys. A*, 18(1985), L625.
- [7] S. Alexander and R. Orbach, *J. Phys. Lett.*, 43(1982), L625.
- [8] 南策文, 电子元件与材料, No.5(1985), 37.
- [9] L. Niemeyer, L. Pietronero and H. J. Wiesmann, *Phys. Rev. Lett.*, 52(1984), 1033.
- [10] 南策文, 物理学报, 36(1987), 191.
- [11] 南策文、陈新政, 物理学报, 36(1987), 511.
- [12] H. Aoki, *Phys. Rev.*, B33(1986), 7310.
- [13] 诸培南, 硅酸盐学报, 14(1986), 247.
- [14] G. S. Grest and D. J. Srolovitz, *Phys. Rev.*, B30 (1984), 5150.
- [15] U. Even et al., *Phys. Rev. Lett.*, 52(1984), 2164.
- [16] P. Pfeifer and D. Avnir, *J. Chem. Phys.*, 79(1983), 3566.
- [17] S. Alexander et al., *Phys. Rev.*, B28(1983), 4615.