

聚焦离子束刻蚀性能的研究

谢 进 江素华 王家楫 唐雷钧 宗祥福

(复旦大学国家微分析中心, 上海 200433)

摘要: 对聚焦离子束(FIB)的基本刻蚀性能进行了实验和研究。通过扫描电镜对FIB刻蚀坑的观测,给出了在不同材料上(硅、铝和二氧化硅)FIB的刻蚀速率及刻蚀坑的形貌同离子束流大小的关系。由于不同材料的原子结合能、原子量及晶体结构等因素对离子束溅射产额的影响,从而影响着离子束的刻蚀速率;随着离子束流的增大,刻蚀速率并非线性增加,且刻蚀坑的形貌越来越不均匀,对此也作了系统的分析和探讨。

关键词: 聚焦离子束; 集成电路; 刻蚀; 溅射

PACC: 8160C; 6855

中图分类号: TN 305

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2001)02-0151-05

1 引言

随着集成电路工艺向亚微米、深亚微米领域迈进, 电路的尺寸越来越小。与此相关的工艺诊断和失效分析工作, 特别是制样技术变得更加困难和艰巨。传统的扫描电镜和透射电镜制样技术对于尺寸很小的观察点很难定位, 每次制样的时间长、工作繁琐、成功率很低。且现有的微分析技术难以将微观分析和微细加工结合在一起, 不能对微结构进行加工修正。近年来发展起来的聚焦离子束(FIB)技术集形貌观察、定位制样和电路修正等功能于一身, 大大提高了IC失效分析的精度和速度, 使传统的微分析技术有了新的突破^[1,2]。FIB采用高能离子束作为一次束, 因而具有以下一些独特的功能: (1)高速溅射刻蚀, (2)高分辨成像和精密定位制样, (3)反应增强刻蚀和薄膜淀积, (4)离子束多晶分析等。

尽管FIB性能卓越, 具有广泛的应用前景, 但它基本的刻蚀性能和工作机理等方面还有待于进一步的研究、测定。1987年 Melngailis 研究认为离子束的溅射产额与靶材料的密度、刻蚀深度成正比, 与离子束流密度成反比^[3]。在国内有关FIB设备研制的报道已有很多^[4-6], 文献[7]也曾探讨了FIB在VLSI设计中的应用。但有关其刻蚀机理和性能的

研究还未见报道。本文将通过一系列实验, 探讨FIB在IC工艺中一些常用材料上的刻蚀性能。通过这些基础研究, 无疑将会进一步提高FIB在实际中的应用水平。

2 实验与测试

实验所用仪器为美国 Fei 公司的 FIB200xp 聚焦离子束系统。为了使实验结果更具代表性, 选择了铝(Al)、硅(Si)和二氧化硅(SiO₂), 分别代表金属、半导体和绝缘体。这三种材料也是构成 IC 的最基本的要素。其中, 硅为(100)面取向的单晶硅, 铝和二氧化硅是采用和 IC 相同的工艺淀积在硅衬底上, 分别为多晶和无定型态。所有样品经丙酮和去离子水在超声波中反复清洗三次, 每次时间为 5min, 清洗完毕后在红外线下烘干待用。将试样放入 FIB 样品室内, 选择不同大小束流在样品表面刻蚀出一定大小和深度的矩形坑, 并记录下相应的刻蚀时间。而后在抛光机上研磨出蚀坑的垂直剖面, 蚀坑的形貌和大小在扫描电镜下观察。由于铝材料较软, 不宜用砂纸研磨, 所以直接用 FIB 制样观察。

FIB 刻蚀参数的设定: 离子发射电流 2.2 μA, 加速电压 30kV, 样品数量各为 5 个; 束流选择: 150、350、1000、2700 和 6600 pA。

谢 进 男, 1968 年出生, 讲师, 主要从事微电子材料与器件的微分析技术研究。

2000-01-24 收到, 2000-04-25 定稿

©2001 中国电子学会

3 结果与分析

3.1 实验结果

铝、硅和二氧化硅在不同离子束流下的蚀坑面貌以及刻蚀速率分别如图1、图2、图3和图4所示。(注:铝样品在观察时,样品架转了45°)

3.2 分析讨论

3.2.1 刻蚀速率与离子束流大小的关系

从图4各材料的刻蚀速率与离子束流大小的关系中可以看出,离子束流增大时,各材料的刻蚀速率都随其增加,但增涨的幅度有所不同,总的刻蚀速率是:铝>二氧化硅>硅。

在溅射现象中,最基本的参量是溅射系数(S),它以每个入射离子所溅射出的原子数表示。因此,离

子束的刻蚀速率与各材料的溅射系数密切相关。溅射系数除了与入射离子的性质有关外,还与被轰击样品材料的原子结构、原子量和结合能等因素有关。对于单体材料,溅射系数可由下式近似地给出^[8]:

$$S = 4.24 \times 10^{-8} n_0 R^2 E_0 M_1 M_2 / (M_1 + M_2)^2$$

$$\exp(-10.4(\sqrt{M_1}/(\sqrt{M_1 + M_2})E_B))$$

式中 E_B 为样品的原子结合能; R 是碰撞截面; M_1 、 M_2 分别代表入射离子和靶的原子量。

由于铝和硅的原子量分别为26.98和28.09,两者非常相近,由此造成的对入射系数的影响不是很大。但铝为面心立方的金属晶体,原子成键形式为金属键,结合能较低为3.34eV。而硅为金刚石结构的共价晶体,原子间都通过很强的共价键结合在一起,结合能为4.64eV,且溅射系数与结合能 E_B 呈指数关系变化。对于同样的离子束流,铝显然要比硅容易溅射。因此,铝的刻蚀速率比硅快。

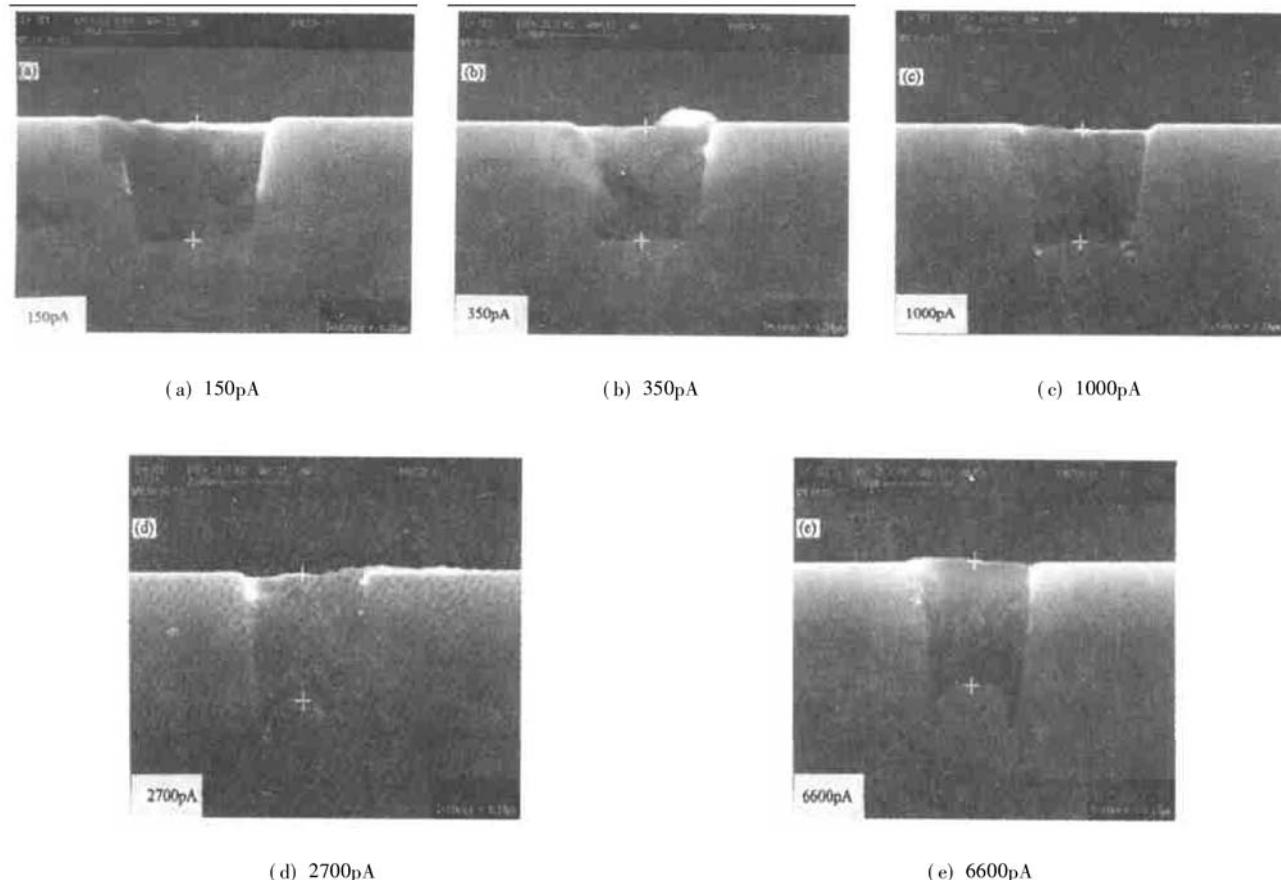


图1 硅样品上刻蚀坑的面貌

FIG. 1 Micrograph of Craters in Si Sample

实验表明^[8], 对于许多金属(如 Si、Mo、W、Zr、Sn、V、Nb、Ta 和 U 等), 其氧化物的溅射产额要比单体时高(这主要是溅射过程中释放出的氧原子对溅射产额有一定的增强作用). 且集成电路工艺中生成的二氧化硅为无定形态, 与其晶体结构相比, 氧化层密度降低, 结构较为疏松^[9]. 因而, 实验所用的二氧化硅材料的刻蚀速率要比单晶硅高.

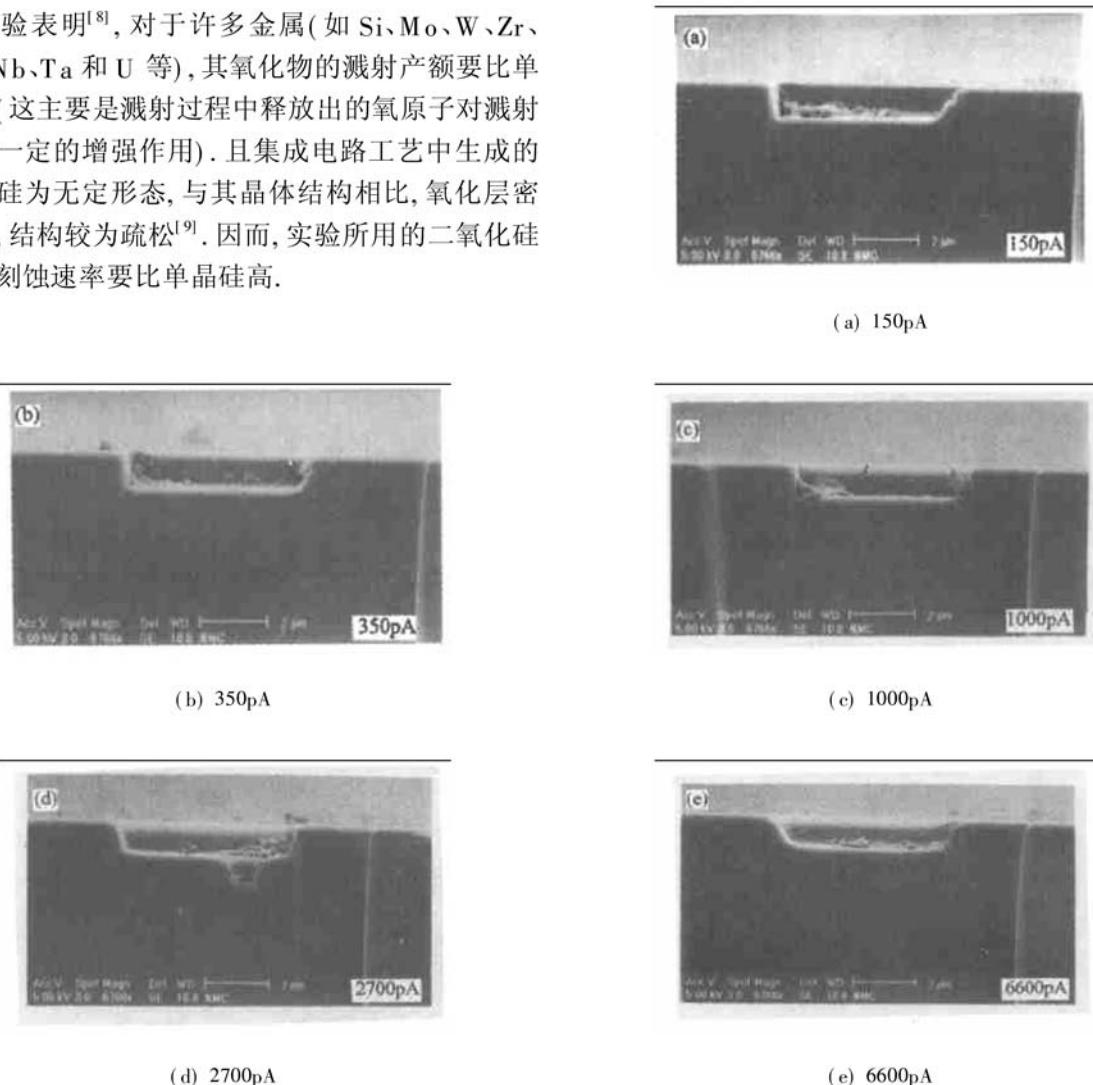


图 2 二氧化硅样品上刻蚀坑的形貌
FIG. 2 Micrograph of Craters in SiO_2 Sample

根据 Melngailis 等人的理论^[3], 溅射产额与被溅射材料的密度成正比关系. 众所周知^[10], 金属铝和硅的密度分别为 2.69 和 $2.33\text{g}/\text{cm}^3$, 由此而得出的结论应是: 铝的刻蚀速率比硅快. 这与我们从结合能出发讨论出的结果是一致的. 对于热生长的二氧化硅, 其密度约在 $2.24\text{--}2.27\text{ g}/\text{cm}^3$ 之间, 低于硅的密度, 但实验表明其刻蚀速率却比硅快. 显然, Melngailis 的理论对于化合物来说还不能很好的吻合, 需进一步加以修正.

另外, 从图 4 的 $I-V$ 关系曲线上可以看到: 随着离子刻蚀束流的不断增大, 刻蚀速率增长的趋势逐渐减缓, 这可能与被刻蚀材料的重淀积有关: 在离子束的作用下, 蚀坑内的粒子被溅射到坑外. 同时, 也

有一部分溅射出的粒子受到坑壁的反射和其它粒子的碰撞后, 又回到了坑中, 造成重淀积的现象. 重淀积的程度与坑的深度和被溅射出的粒子的数量成正比例关系, 也即与溅射刻蚀的离子束流大小成正比例关系. 因此, 随着离子束流的不断增大, 蚀坑的加深, 重淀积的粒子逐渐增多, 使刻蚀速率有所减缓.

3.2.2 蚀坑的形貌

从图 1 硅的蚀坑形貌中可以看到, 坑的底部不是很平整: 中间隆起, 边缘有所凹陷, 存在着一个高度差 Δh . 随着入射离子束流的增大, 这一现象越来越明显, 如表 1 所示. 这可能与以下因素有关.

首先, 由于重淀积的存在, 随着坑的加深, 在坑的边缘处被溅射出的粒子受到坑壁的反射后则易趋

向于朝坑的中间运动,造成坑的中间重沉积现象更为明显。而铝和二氧化硅的样品因刻蚀坑较浅,这种现象不太明显。其次,离子束溅射刻蚀时,其行为是离子束在特定区域内作“S”形扫描,在坑的边缘被扫描的几率较大,也会导致坑的边缘凹陷。

另外,随着离子束流的增大,其束斑也相应增加,必然会导致束斑内部离子束能量的不均匀分布变得更加显著。这也将对刻蚀效果的均匀性产生一定影响。

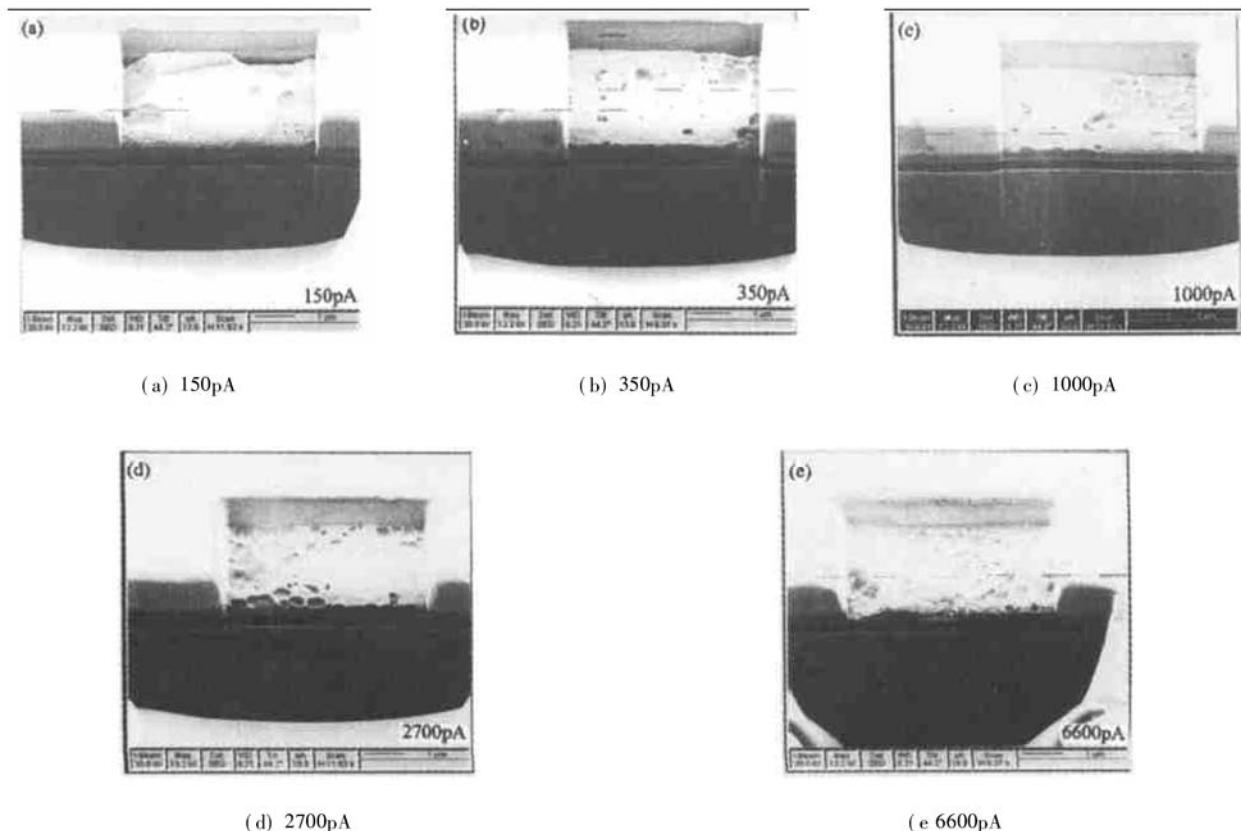


图 3 铝样品上刻蚀坑的形貌

FIG. 3 Micrograph of Craters in Al Sample

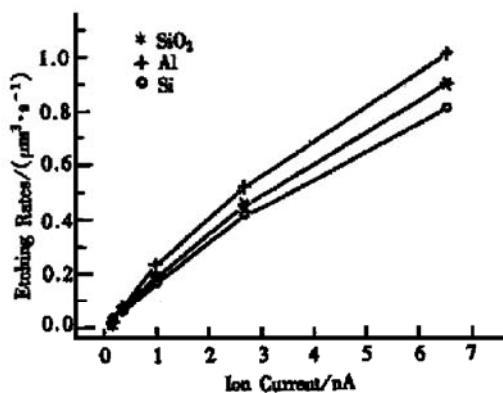


图 4 刻蚀速率与离子束流的关系

FIG. 4 Relationship Between Ion Current and Etching Rates

表 1 蚀坑的平整度与刻蚀束流的关系

Table 1 Relationship Between Ion Current and Degree of Smooth in Crater Bottom

Ion current/pA	150	350	1000	2700	6600
Δh/μm	0.05	0.13	0.65	1.09	2.22
Δh · h⁻¹/%	1.5	4.0	20.6	34.2	80.8

实验所用的铝材料为多晶,晶粒较大(μm 级),因不同的晶粒其取向不一样,溅射产额就有所不同。因而各个晶粒的刻蚀速率有较大区别,致使蚀坑底部坑洼不平,晶界非常明显。

由于现在集成电路的尺寸越来越小,蚀坑的形貌将对 FIB 的加工精度有着很大的影响。例如,在用 FIB 对集成电路芯片中的铝线进行割断时,如果

蚀坑深浅不均匀将导致铝条的某些区域已经切透,而另外一些区域还良好地连接在一起,从而达不到预期的效果。因而,控制离子束的工作参数显得尤为重要的。为保证 FIB 微细加工的精度,在对 IC 芯片修正打孔或切割时,应尽量选择小一些的刻蚀束流,将离子束在样品表面聚焦到最佳状态,以减小束斑;同时,工作时应选择离子束的 BOX 扫描方式,这有助于提高刻蚀的均匀性;由于在 IC 中,上铝线上覆盖的钝化层要比下铝线上的钝化层薄的多。因此,在打孔和割断时,应尽量选择在上铝上进行,较浅的刻蚀有助于提高蚀坑的均匀性;另外,在反应气体增强刻蚀中,由于溅射出的粒子能即时被反应气化、随真空系统抽走,因此不存在重淀积现象,可以使蚀坑的均匀性大大提高。

5 结论

通过对聚焦离子束刻蚀性能的研究,可以得出以下结论:

(1) 对于硅、铝和二氧化硅这三种材料,离子束的刻蚀速率不一样,分别为 $V_{Al} > V_{SiO_2} > V_{Si}$, 这主要是和材料的原子结合能、原子量以及材料的晶体结构等因素有关。

(2) 随着离子束流的增大,刻蚀速率并非线性增

加,而是增长趋势逐渐减缓,这与溅射时粒子的重淀积有关。

(3) 随着离子束流的增大,蚀坑的加深,蚀坑的形貌越来越不均匀。可以通过调节离子束流和扫描方式,选择反应增强刻蚀等措施加以改进。

参考文献

- [1] J. C. Morgan, European Semiconductor, 1996, **18**(3): 49—50.
- [2] Zhaohui Cheng, T. Sakamoto, M. Takahashi, Y. Kuramoto et al., J. Vac. Sci. & Technol. B, 1998, **16**(4): 2473—2478.
- [3] John Melngailis, J. Vac. Sci. & Technol. B, 1987, **5**(2): 479—493.
- [4] XIAO Min, Appl. Tech. Letter for Plasma, 1996, (9): 9—11.
- [5] YU Xuedong, BI Jianhua, Vacuum Science and Technology, 1997, **7**(3): 167—174.
- [6] WANG Xuechao, WANG Jianru and WANG Rongjun, Vacuum Science and Technology, 1997, **17**(6): 400—405.
- [7] CHANG Xu, Chinese Journal of Semiconductors, 1999, **20**(6): 510—513 (in English).
- [8] 染野 檉, 安盛岩雄, 表面分析, 北京: 科学出版社, 1983, 27.
- [9] XIA Hailiang and ZHANG Ankang, Fabrication Process for Semiconductor Devices, Science and Technology Publishing House of Shanghai, 1988, 46.
- [10] YANG Fujia, WANG Yansen and LU Fuqian, Atomic Physics, Publishing House of Fudan University, 1993, 415.

Investigation on Etch Performance of Focused Ion Beam

XIE Jin, JIANG Su-hua, WANG Jia-ji, TANG Lei-jun and ZONG Xiang-fu

(National Microanalysis Center, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Focused Ion Beam (FIB), an advanced technology combining micro-analysis with micro-processing, plays an important role in IC design and manufacture. The fundamental properties of FIB, such as the etch rates in different materials (for example in the substrate of silicon, aluminum or silicon oxide), have been studied by the detailed observation under the Scanning Electronic Microscope (SEM). The variations in etch rates and the crater topography with ion current have been investigated. The etch rates in different materials are influenced by their atomic binding energy, atomic weight, density and crystal structure, etc. With the growth of ion current, the etch rates in all materials do not increase linearly, while the crater topography becomes more and more irregular. The possible causes of these results are also discussed on the basis of sputtering mechanism.

Key words: focused ion beam; integrate circuit; etching; sputtering

PACC: 8160C; 6855

Article ID: 0253-4177(2001)02-0151-05

XIE Jin male, is engaged in the research on the reliability test and failure analysis of microelectronic materials and devices.

Received 24 January 2000, revised manuscript received 25 April 2000

© 2001 The Chinese Institute of Electronics