

微区薄层电阻四探针测试仪及其应用^{*}

孙以材 孟庆浩

(河北工业大学电气信息学院 天津 300130)

摘要 用斜置的四探针方法,依靠显微镜观察,将针尖置于微区图形的四个角区,用改进的范德堡公式可以得到微区的薄层电阻。本文对测准条件作了分析。并用该仪器测定了硼扩散片的薄层电阻分布。在测试过程中应用微处理器,加快了计算速度。

关键词 微区薄层电阻 探针技术 改进范德堡法

1 引言

当今,计算机的不断更新换代,存储器容量的激增,作为其基础元件的集成电路已由超大规模向甚大规模阶段发展,图形日益微细化,电路尺寸不断缩小,线宽已从微米级缩小到亚微米级,对晶体的完美性、机械及电学特性提出更为严格的要求,特别是微区的电学特性及其均匀性更引起人们的关注。许多器件的重要参数与电阻率及掺杂有关,微区掺杂和电阻率不均匀性不仅影响材料而且影响器件的特性。用陪片的方法来控制片子的基区、发射区的掺杂已远远不能满足要求,我们采用的改进范德堡法是利用斜置的刚性探针,不要求等距、共线,只要求依靠显微镜观察,保证针尖在样品的四个角区边缘附近的一定界线内,用下面的改进范德堡公式,由四次电压电流轮流测量得到薄层电阻^[1~3]:

$$R_s = \frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 \frac{\pi}{2 \ln 2} \left(\frac{V_n + V_{n+1}}{I} \right) f \left(\frac{V_{n+1}}{V_n} \right) \quad (1)$$

其中 $f \left(\frac{V_{n+1}}{V_n} \right)$ 就是范德堡修正函数。

通过 A/D 转换读入四次电压值并存入单片机,根据式(1)利用单片机编程可以在测试过程中很方便地计算出 R_s 的值,同时通过观察单片机显示的电压值可以判断探针放置的位置是否合适,这样,大大加快了测试的速度,提高了准确性。

2 微区薄层电阻测量所用方法

常规的四探针法可分辨约 3 倍针距区域的电

阻率不均匀^[4],为保证探针刚性一般需毫米直径的探针,因此竖直四探针不能用于微区测定。常规直线四探针的 Rymaszewski 法对无限大样品、探针的游称、不等距不影响测量的结果。文献 [5] 和 [6] 一致认为,对有限尺寸矩形样品,只有当探针偏离中心对称位置时边缘效应才有影响。可测微区尺寸以容纳下探针为前提。

范德堡法可以应用于任何形状的样品^[7],但要求将触点制备在样品的边缘,故不能直接应用于微区测定。

扩展电阻法虽然可分辨 $10\mu\text{m}$ 的微区电阻率,但要求背面大面积欧姆接触,而且要求样品是体样品,因此,也不适合微区电阻的测定。美国国家标准 NBS 推荐的测试结构,虽然可以应用于微区薄层电阻的测试,但要求从样品伸出四个等长臂,在臂的末端制备四个大的金属电极以放置探针。因此测量区就被扩大到 $200\mu\text{m}$ 以上,而且关于臂的长宽合适比又存在两种截然相反的看法^[8,9]。

其它许多关于边缘效应的修正都要求精确知道探针与样品的相对几何位置^[10]。对微样品很难作这种测定,因而达不到修正的目的。

文献 [1, 2, 3] 介绍的改进范德堡法是利用四根斜置的刚性探针,不要求等距、共线,只要求依靠显微镜观察,保证针尖在样品的四个角区边界附近一定界限内,用改进的范德堡公式,由四次电压、电流轮流测量得到薄层电阻(公式中四次求和再除以 4 并非平均之意,而是必须这

* 国家自然科学基金资助课题,天津市发明三等奖(1998),天津市技术监督局认定(1997)

样做) R_s 表达式见公式(1), 其中的 $f\left(\frac{V_{n+1}}{V_n}\right)$ 是范德堡修正函数:

$$\frac{\frac{V_{n+1}}{V_n} - 1}{\frac{V_{n+1}}{V_n} + 1} = \frac{\cosh^{-1}\left[\left(\frac{1}{2}\right)\exp\left(\frac{\ln 2}{f}\right)\right]}{\frac{\ln 2}{f}}$$

I 是所用测试电流, V_n 是第 n 次测量所用的电压。图 1 示出该方法所推荐的四种测试图形结构, 其中阴影区域是允许放置探针的区域。

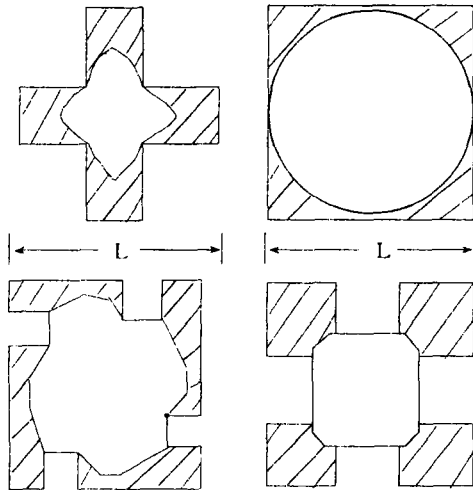


图1 推荐的四种测试图

该方法的特点是利用斜置的探针, 探针有足够直径以保证刚性。样品面上探针间距取决于针尖半径, 因此可以用于小至 $90\mu\text{m}$ 微区的薄层电阻的测定。不需要测量针尖与样品之间相对距离, 不需要用边缘效应修正, 不需要保证重复测量时探针位置的一致性, 探针的游移不影响测量结果, 不需要制备从微区伸出的测试臂和金属化电极, 简便、快捷、可行。有关原理已在文献 [1, 2, 3] 中给予证明。实验中已对大的方形硅片^[1]、矩形硅片^[6]、 $100\mu\text{m}$ 方形金触突以及图 1 所示 p Si 隔离微区进行测定验证^[1], 而且从理论上和实验上可推出范德堡公式^[1,2]:

$$\exp\left(-\frac{\pi V_1}{IR_s}\right) + \exp\left(-\frac{\pi V_2}{IR_s}\right) = 1$$

本文强调微处理器在 Mapping 技术中的应用。

3 测试条件分析

为保证测量时免受静电、电磁干扰, 采用屏蔽并让屏蔽接地, 因此读数稳定可靠。为消除探

针与样品间接触电势的影响, 采用电流正反两次测量再平均。测量中用 MCS51 单片机采样探针电压、自动计算, 立即显示薄层电阻。这不仅提高测试速度, 还对读数异常起监视作用, 不让探针落到图形外。并观察测量电流对薄层电阻的影响, 测量电压随电流成正比增加或减少。因单片机采样电压为几毫伏至 200 毫伏, 测量电流受到限制。

对半导体样品, 少子注入及焦耳热会影响测量结果。下面考虑这个问题。二维薄层样品中, 由探针点电流源注入少子时, 必须满足下列方程:

(1) 二维连续性方程

$$\frac{d\Delta P}{dt} = D\left(\frac{d^2\Delta P}{dx^2} + \frac{d^2\Delta P}{dy^2}\right) + \mu(E_x \frac{d\Delta P}{dx} + E_y \frac{d\Delta P}{dy}) + \frac{\Delta P}{\tau}$$

当忽略少子 ΔP 的扩散流并考虑稳定条件下:

$$\frac{d\Delta p}{dt} = 0, \text{ 上式简化为}$$

$$\mu(E_x \frac{d\Delta p}{dx} + E_y \frac{d\Delta p}{dy}) = -\frac{\Delta p}{\tau}$$

式中 μ 和 τ 分别为少子的迁移率和寿命。

(2) 以探针电流注入点为中心, 作一封闭的柱面, 依据欧姆定律

$\vec{E} = \vec{j} / \sigma$, 可以得到下面的表达式:

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oiint \frac{\vec{j}}{\sigma} d\vec{S} = \frac{1}{\sigma} I$$

考虑样品为无穷大薄层情况, 以探针为中心作封闭圆柱, 沿圆周有均匀的电场, 于是有

$$\oiint \vec{E} \cdot d\vec{S} = E \oiint dS = E \cdot 2\pi r \delta$$

δ 为样品的厚度。因此由上二式可得到

$$E = \frac{I}{2\pi\delta\sigma r} = \frac{IR_s}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}$$

式中 $R_s = \rho/\delta = 1/(\sigma\delta)$ 为样品的薄层电阻。以无穷大薄层中电流注入点为原点 O 的 $x y$ 平面上, 少子的下式分布满足连续性方程:

$$\Delta P = \Delta P_0 \left[\exp\left(-\frac{x}{2E_x \mu \tau} - \frac{y}{2E_y \mu \tau}\right) \right]$$

因为 $E_x = -\frac{d\Phi}{dx}, E_y = -\frac{d\Phi}{dy}$, 代入上式后, 得

$$\begin{aligned} \Delta P &= \Delta P_0 \exp\left[\frac{x}{2} \frac{d\Phi}{dx} \mu \tau + \frac{y}{2} \frac{d\Phi}{dy} \mu \tau \right] \\ &= \Delta P_0 \exp\left(\frac{dx}{4d\Phi \mu \tau} + \frac{dy^2}{4d\Phi \mu \tau} \right) \end{aligned}$$

$$= \Delta P_0 \exp\left(\frac{r}{2\mu\tau} \frac{dr}{d\Phi}\right)$$

用 $E = -\frac{d\Phi}{dr} = \frac{IR_S}{2\pi} \cdot \frac{1}{r}$ 代入上式得

$$\Delta P = \Delta P_0 \exp\left(-\frac{\pi r^2}{IR_S \mu\tau}\right)$$

也就是说,在无穷大薄层电阻情况下,少子按 r^2 的指数关系衰减。在二维情况下,要比一维情况下

$\Delta P = \Delta P_0 \exp\left(-\frac{x}{E_s \mu\tau}\right)$ 衰减快多了。图 2 示出了一维和二维两种情况下少子的相对衰减比较。

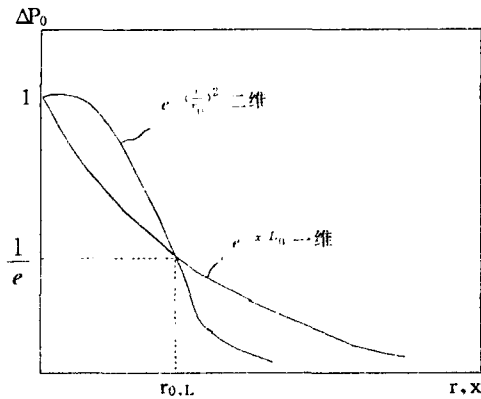


图2 注入的少子随距离的衰减

我们将当 $\Delta P = \frac{1}{e} \Delta P_0$ 时的距离称为牵引半径 r_0 :

$$r_0 = \sqrt{\frac{IR_S \mu\tau}{\pi}}$$

在二维情况下,当 $r = 2r_0$ 时, $\Delta P = \Delta P_0 / e^4 = 0.0183 \Delta P_0$, 也就是说,残余的少子只剩下不足 2%。注入的少子基本上存在于 $\frac{3}{2}r_0$ 以内,超过 $\frac{3}{2}r_0$ 少子几乎不存在了。这就与一维情况不同。 $L = E_s \mu\tau$ 一维牵引长度是注入的少子平均生存距离。下表示出少子的牵引半径与样品的薄层电阻和注入电流大小的关系。其中迁移率和少子寿命值取自文选^[13]。

表 1 牵引半径与样品薄层电阻和注入电流的关系

样品电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	10^{-2}	10^{-1}		
$\delta = 3.18\mu$ 时薄层电阻/ Ω	31.4	314		
$\mu_p / \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{S}^{-1}$	60	300		
少子寿命/ μS	0.3	0.7		
注入电流/ μA	100	1000	100	1000
牵引半径 $r_0 / \mu\text{m}$	1.34	4.24	14.5	45.8

当微区尺寸达到三倍牵引半径时,可以认为少子受电场的牵引影响便不大了。因而本文所用样品扩散电阻率为 $0.1 \Omega \cdot \text{cm}$, 一般选用 $160 \mu\text{A}$ 测试电流。对 150 微米微区将测量电流从 90 逐渐增至 1000 微安,所测薄层电阻相差在 $\pm 4\%$ 之内。Beuhler^[8]利用微范德堡电阻器测量薄层电阻时,观察到焦耳热的影响,并归因于过窄的测试臂导致电流密度过大而发热。因为我们的测试方法不要求从样品中引出测试臂,焦耳热效应不明显是可以理解的。本文 Mapping 技术中选用 $160 \mu\text{A}$ 测试电流。

4 单片机应用系统

在测量过程中,采用恒定电流,通过探针中的相邻两根探针如 1、4 让样品流过恒流,对面两根探针 2、3 在样品上接触点之间便产生一定的电势差 V_x ,并用它们测定这一电势差。

由于改进的范德堡法需四次轮换测量电压,加上范德堡修正函数计算复杂,因此应用单片机进行数据采集和运算处理是十分必要的,通过连接装置达到四次轮换的目的,将电压输出端分别接入 A/D 转换器的 V_x 端和接地, A/D 转换器再与 8031 的 P1 口相接(见图 3),用中断方式(采用外部中断 1)读入测量电压值并显示出来,通过按键将电压值存入 RAM 中。当四次电压都读入以后,按下计算键可以计算 R_s 的值并显示计算结果。

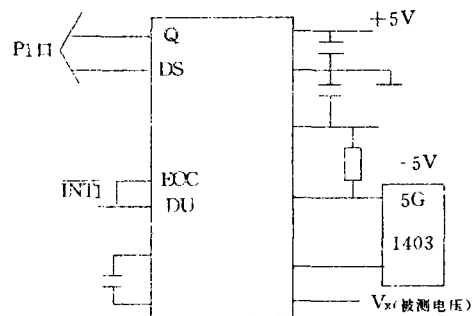


图3 A/D转换硬件部分

4.1 系统组成框图

系统组成框图如图 4 所示。连接装置的内部接线图如图 5 所示。

4.2 A/D 转换器

由于电压信号弱,故设计中采用了抑制工频干扰能力强、精度较高的 $3 \frac{1}{2}$ 位双积分 A/D 转换

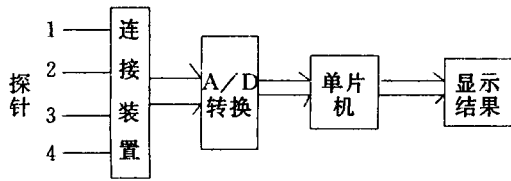


图4 系统组成框图

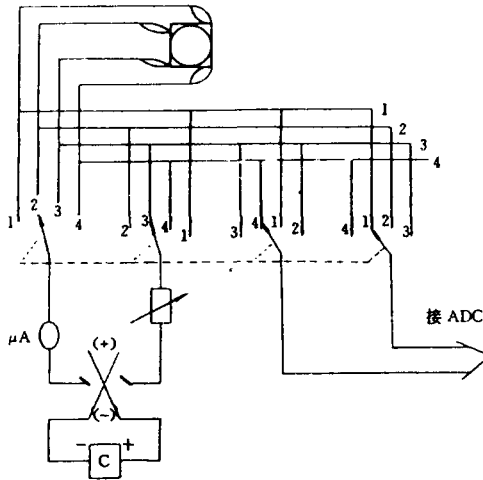


图5 连接装置内部接线图

器MC14433。MC14433A/D转换器的BCD码输出端 $Q_3 \sim Q_0$ 和位驱动输出端 $DS_4 \sim DS_1$ 直接连至8031的 P_1 口和 $P1.3 \sim P1.0$ 和 $P1.7 \sim P1.4$ 八条口线上，而A/D转换器的转换结果输出标志端EOC和实时输出控制端DU相连后共同接至单片机的外部中断请求输出 $\overline{INT1}$ ，这样，当A/D转换器每一转换周期的转换结果输出时，通过向单片机申请中断来实现读入电压。在此中断服务程序中，单片机通过P1口读取以BCD码表示的转换结果^[12]。

4.3 单片机主机系统

单片机主机系统包括以8031单片机为核心的8kB EPROM和8kB RAM构成的基本系统以及用8155作为接口的键盘、显示器部分，其硬件组成框图见图6。8kB EPROM 2764固化有整机的系统软件，8kB RAM 6264作为扩展的数据存储器，用以暂存工作程序所用的中间结果等。

8155作为键盘、显示器接口，其PA口作为选口，通过位驱动器完成对六位LED数字显示器的位选功能。PB口作为段选口，通过段驱动器完成对段码的选择及驱动功能。同时PB口还作为键盘的扫描口，PC口作为键盘的状态读入口，它

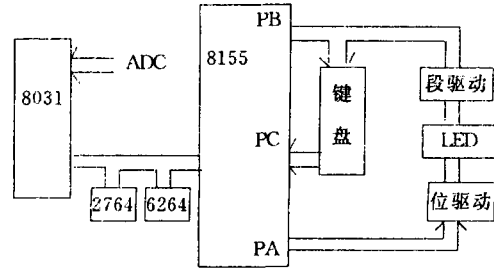


图6 主机系统框图

们共同完成对键盘的扫描和按键闭合信息的输入功能。

键盘共六个键，测量 $V_1 \sim V_4$ 键，计算 R_s 键和连续键。

4.4 系统软件设计

系统软件主要完成读入A/D转换的结果并读入RAM，根据电压值计算出电阻值 R_s 。运算过程采用浮点数运算。系统软件设计的框图如图7所示。

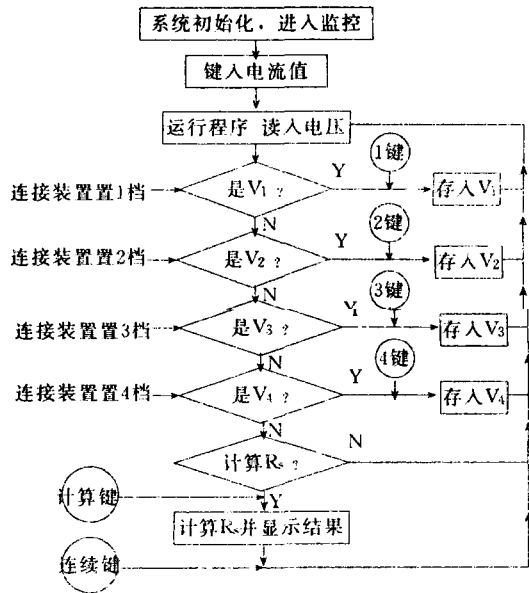


图7 系统软件设计框图

5 测试结果

所用样品为n-Si片，样品氧化光刻后开出相应图形，图形内进行硼扩散，深度为 $3\mu\text{m}$ ，然后对微区图形进行薄层电阻测量。显微镜将视场放大80倍即可。每次测量时用目视法将探针尖放置在图1所示阴影区内，尽量靠边，但决不能超越边界。

光刻板被划分为 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 的重复单元。每一单元中有25个图形，其尺寸为60、80、90、...、150、 $300\mu\text{m}$ 不等。

5.1 一个单元中各图形的测试结果比较

表1示出随机不同单元中两个图形的测试结果。可以看出,不同形状、尺寸、探针随机游移(但在允许区内)、范德堡修正函数 $f(V_{n+1}/V_n)$ 不同,同一单元中两个图形的测试结果是一致的。说明扩散的微区不均匀度不大。只选定一个或两个便可以代表这一单元的薄层电阻,必要时也作了加测。

表1 同一单元中两个图形的测试结果
(测试电流为 160μA)

形状	尺寸 /μm	四次轮换测得电压/mV				薄层电阻 /Ω
		V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	
苜蓿叶	150	12.2	3.4	17.3	6.3	251
十字形	300	3.9	12.1	9.2	11.3	249
苜蓿叶	150	15	1.2	20	5.8	247
十字形	300	12.2	5.5	9.9	10.1	262
苜蓿叶	150	12.3	5.4	13.6	6.6	334
十字形	300	7.3	16.7	6.9	17	317
苜蓿叶	150	12.9	5.9	16	6.4	270
十字形	300	5.4	14	7.6	12.5	264
苜蓿叶	150	9	17	8	4	260
十字形	300	2	14	7	19	256
苜蓿叶	150	7	10.5	10.7	8	255
十字形	300	9	10.6	7.7	10	255
苜蓿叶	150	16	11	6.5	4	256
十字形	300	11	6	10.7	10.6	272
苜蓿叶	150	22	6	15	9	341
十字形	300	8	19	3	23	341
苜蓿叶	150	14.6	22	3.6	9.1	321
十字形	300	9.5	11	6	24	328

注:线框内的两个图形为同一单元的图形

5.2 全片的测试结果

我们用 Beuhler (11) 曾使用的灰度法表示各单元的薄层电阻。图8示出全片的分布图。利用 Mapping 技术可以得到:

(1) 电阻率不均匀度 E

$$E = \frac{\Delta P}{R} = \frac{R_k - R_j}{1/2 \cdot (R_k + R_j)}$$

$$= \frac{360 - 190}{1/2 \cdot (360 + 190)}$$

$$= 0.62 = 62\%$$

(2) 全片薄层电阻平均值:

$$R_{\bar{r}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i = \frac{\sum_{j=1}^m R_j N_j}{\sum_{j=1}^m N_j}$$

$$= 278.2(\Omega \cdot cm)$$

式中 n 是全片被统计的单元数, R_i 是第 i 单元的薄层电阻, m 是全片被统计的灰度相同的总区域数, R_j 是第 j 个灰度相同的区域, N_j 是该第 j 个区

域中单元数。

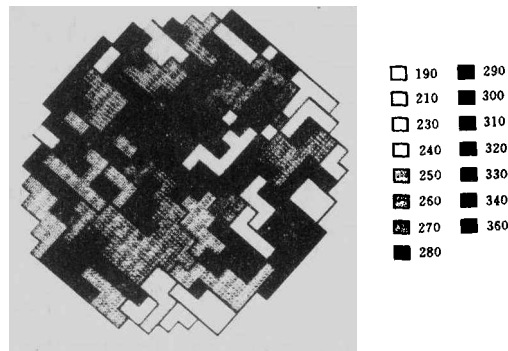


图8 全片分布图

可见,从 Mapping 图可以得到薄层电阻分布更为详细的信息,更有利于评价材料质量,并改进工艺。另外,在 8 英寸硅片的甚大规模集成电路的产生中,将微区图形制备在芯片间的划片区上,测量微区的薄层电阻以控制基区和发射区的掺杂浓度,则比陪片法好得多。

参考文献

- 1 孙以材,张林在.用改进的 Van der Pauw 法测定方形微区的方块电阻.物理学报,1994,43(4):530~539
- 2 Yicai Sun, Junsheng Shi, Qinghao Men. Measurement of Sheet Resistance of Cross Microareas Using a Modified van der Pauw. Semiconductor Sci & tech. 1996,11:805~811
- 3 Yicai Sun. Several Microfigures Suitable to the Measurement of Sheet Resistance for them. Materials and Process Characterization for VLSI. 国际会议文集,昆明,1994:11:124~126
- 4 Swartzendruber L J. Four-Point Probe Measurement of Nonuniformities in Semiconductor Sheet Resistivity. Solid-State Electronics, 1964;7:413~422
- 5 孙以材,石俊生.在矩形样品中 Rymaszewski 公式的适用条件的分析.物理学报,1995,44(12):1869~1878
- 6 宿昌厚.用四探针技术测量半导体薄层电阻的新方案.物理学报,1979,28(6):759~772
- 7 Van der Pauw L J. A method of Measuring Specific Resistivity and Hall Effect of Discs of Arbitrary Shape. Philips Research Reports, 1958,13(1):1~9
- 8 Beuhler M G, Grant S D, Thurber W R. An Experimental Study of Various Cross Sheet Resistor Test Structures. J. Electrochem Soc, 1978, 125(4): 645~649
- 9 David J M. Buehler M G. Numerical Analysis of

Various Cross Sheet Resistor Test Structure. Solid-State Electronics, 1978, 20: 539~543

10 Smith F M. Measurement of Sheet Resistivities with the Four-point probe. Bell Syst Tech J, 1958, 37: 711

11 Buehler M G, Grant S D, Thurber W R. Bridge and van der Pauw Sheet Resistors for Characterizing the

Line Width of Conducting Layers. J Electrochem Soc. 1978, 125(4): 650~654

12 张毅刚, 修林成, 胡振江. MCS51 单片机应用设计, 哈尔滨工业大学出版社, 1990: 287~290.

13 M. Neuberger et al, Silicon. AD 698342, Hughes Aircraft Company, Culver City, California, 1969.

Four Probe Instrument for Measuring Sheet Resistance of Microareas and Its Application

Sun Yicai Meng Qinghao

(College of Electricity and Information, Hebi University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract The sheet resistance of microareas can be obtained from a modified Van der Pauw formula by using a inclined four-probe technique. The tip of probes is put at the corners of the microarea by inspection through a microscope. The condition for precise measurement is analyzed. This instrument has been used for measuring the sheet resistance distribution for Boron diffusion chip. In the measurement process, a microprocessor was used to speed up the calculation processes.

Key words Sheet resistance for microareas Probe technique A modified Van der Pauw method

(上接第 49 页)

不会改变的, 即对仪器的分析不会产生影响。

(2) CA-1000 采用了内置专用键盘, 操作起来非常不顺手, 而仪器本身带有标准的 PC 机键盘的接口, 可选一个手感较好的电容键盘插进仪器后面的键盘插口, 并将旁边的转换开关扮至外接键盘的位置。

(3) 选配外接打印机。原机的热敏打印机不能打印汉字, 可选用一个 24 针的窄行打印机, 如 LQ-100 或 KXP-1121 等。(注意: 选用外接键盘和外接打印机均需在 CA-1000 操作程序中做相应的设置。)

3.2 软件

硬件的升级为软件的升级奠定了基础。软件的汉化主要是做了打印的汉化, 操作界面没有汉的原因是汉化之后使整机的速度变慢, 且有一定的难度。

(1) 首先安装 UC DOS 6.0, 并运行。

(2) 用 PCTOOLS 将 SABA 目录中的

附表:

```
CONFIG. SYS:
DEVICE=C: \DOS\SETVER. EXE
DEVICE=C: \DOS\HIMEM. SYS
DOS=HIGH
DEVICE=C: \DIS\RANDRIVER. SYS 80 512 16/E
```

'appalls' 文件中的测试项目名称用汉字取代, 并存盘退出。

(3) 将台头文件 'TESTA' 修改。

(4) 修改 'config. sys' 和 'Autoexec. bat' 文件。(修改后的 'config. sys' 和 'autoexec. bat' 见附表。)

(5) 重新启动机器。

这样就能在外接打印机中打印出中文检验报告单。改进工作使仪器的性能和仪器的操作灵活性有了很大的提高, 同时汉化的报告单使临床医生在阅读时更加方便。

4 结束语

大型仪器自己动手维修, 可节约大量的资金和停机待修时间; 适当的进行改进有时可以大幅度地提高性能。本文作者水平有限, 恳请同行予以批评指正。

```
AUTOEXEC. BAT:
C: \DOS\SMARTDRV/X
@ECHO OFF
PATH=C: \DOS: C: \UCDOS; C: \
CD\UCDOS CALL UC DOS CD\SABA
```

参考文献

1 SABA CA-1000 使用手册

2 SABA CA-1000 维修手册

3 《中国医疗器械杂志》1998 年 1—6 期