

孙 洵 等编

微电子

测试结构

华东师范大学出版社

微 电 子 测 试 结 构

孙 洸 等编

华东师范大学出版社

期限表

请于下列日期前将书还回

[illegible]

北京卡片商店1001

十小洲池八寸山脈仕山脈

上海新华书店发行 吴县光福印刷厂印刷

850×1168 1/32 印张 5.75 字数 135 千字

1984年11月第一版 1984年11月第一次印刷

印数: 0,001—10,000

书号: 15135 · 003 定价: 1.00 元

TN407
1

262082

前 言

自从大规模集成电路发展以来, 测试结构和由若干测试结构组成的测试图形已成为半导体器件制备中必不可少的检测工具。无论物理参数、工艺参数、器件参数或电路参数, 都可以利用测试图形进行测量检验。利用测试结构还可以评价工艺的合格率和产品的成品率。随着硅片直径的增大, 各种参数的均匀性至为重要, 利用测试结构还可以准确有效地检验其均匀度。在复杂电路的加速试验和失效分析有困难时, 也可以利用测试结构提供有关器件可靠性的讯息。我们总结了几年来对测试结构的研究工作, 编写了这本书, 对于从事这方面工作的同志, 也许会有有一定的参考价值。

本书第一章及附录由桂力敏同志编写, 第二至第四章由孙汾同志编写, 第五章由许春芳同志编写, 第六、第七章由范焕章同志编写, 第八章由汪宗禹同志编写。所有插图均由贺德洪同志绘制。

由于我们所做工作有限, 水平不高, 书中难免有错误和缺点, 务希读者批评指正。

编 者

一九八三年九月

目 录

第一章 薄层电阻测试结构及其应用	1
§ 1.1 薄层电阻测试结构的基本原理	1
§ 1.2 四端十字形测试结构	6
§ 1.3 薄层电阻测试结构的测试方法	14
§ 1.4 六种薄层电阻测试结构测量结果的比较	16
§ 1.5 薄层电阻测试结构的应用实例	23
§ 1.6 测量体电阻率的平面四探针测试结构	28
第二章 掩模套准测试结构	36
§ 2.1 掩模套准误差的分析	36
§ 2.2 掩模套准测试结构	42
§ 2.3 掩模套准误差测试实例	47
第三章 金属—半导体接触电阻测试结构	56
§ 3.1 接触电阻和接触电阻率	56
§ 3.2 接触电阻测试结构	58
§ 3.3 平面接触和传输线模型	61
§ 3.4 铝—硅和铝—多晶硅接触电阻测量结果一例	69
§ 3.5 单窗口测试结构在工艺控制中的应用实例	74
第四章 随机缺陷测试结构	79
§ 4.1 用于工艺分析及评价的随机缺陷测试结构	79
§ 4.2 硅栅 CMOS/SOS 工艺的分析和评价	82
§ 4.3 最佳设计规则	90
§ 4.4 类存储器随机缺陷测试结构	94
第五章 MIS 结构在半导体工艺检测中的应用	100
§ 5.1 MIS 结构表面场效应简述	100
§ 5.2 MIS 结构在工艺检测中的应用	104
§ 5.3 MIS 结构 $C-V$ 技术中应注意的几个问题	114

第六章 集成栅控二极管测试结构	122
§ 6.1 栅控二极管	122
§ 6.2 集成栅控二极管测试结构	129
第七章 栅控晶体管和四极晶体管测试结构	138
§ 7.1 栅控晶体管的特性分析	138
§ 7.2 栅控晶体管试验实例	141
§ 7.3 用四极晶体管区分表面复合和体内复合	147
§ 7.4 用四极管测量发射区下基区的薄层电阻及预示器件的可靠性	152
第八章 测试结构参数的自动测量系统	156
§ 8.1 四探针二方位自动测试	156
§ 8.2 探针与测试图形压点的标准化	153
§ 8.3 测试图形参数自动测量的计算机控制	164
附 录	168

第一章 薄层电阻测试结构及其应用

目前国内微电子工业中多采用直线阵列等间距四探针作为监控薄层掺杂浓度的手段。由于试片大小不一,修正系数不够严格,因此常会对相同的掺杂,用不同的探针测量结果不相一致。为了获得准确的结果,可用根据范德堡(VDP)原理制成的各种薄层电阻测试结构。由于测试结构可以小到制版及光刻能力所及的范围,故可用来测定微区薄层电阻,研究晶片掺杂的分布情况。本章将介绍 VDP 结构的基本原理及其等效电路;十字形测试结构的数值分析及其归一化误差;测试结构的测试方法和测试中的干扰问题;不同形状薄层测试结构性能的比较;VDP 结构在测量掺杂均匀度及测量导电层线宽中的应用;最后讨论一下测试方法与 VDP 结构相类似的平面四探针测试结构。

§ 1.1 薄层电阻测试结构的基本原理

1.1.1 范德堡测试结构的基本原理

设有一任意形状的平的薄层样品如图 1-1 所示,厚度均匀,表面无孤立空洞,周围有四个接触点 A、B、C、D。当电流从 A 点注入 B 点流出,测得 C 点和 D 点之间的电位差为 $(V_D - V_C)$, 定义 $R_{AB,CD}$ 之值如下:

$$R_{AB,CD} \equiv \frac{V_D - V_C}{I_{AB}} \quad (1-1)$$

若电流改由 B 点注入, C 点流

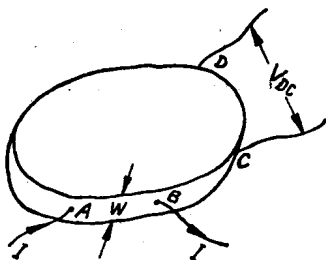


图 1-1 任意形状的四触点薄层示意图

出,测得 D 、 A 两点之间的电位差为 $(V_A - V_D)$, 同样定义 $R_{BC, DA}$ 为:

$$R_{BC, DA} \equiv \frac{V_A - V_D}{I_{BC}}. \quad (1-2)$$

注意 $R_{AB, CD}$ 及 $R_{BC, DA}$ 之量纲虽为电阻, 但不是通常定义的电阻.

若 W 为样品的厚度, ρ 为其电阻率, 则下列关系式成立:

$$\exp(-\pi R_{AB, CD} W / \rho) + \exp(-\pi R_{BC, DA} W / \rho) = 1, \quad (1-3)$$

上式可以通过一特殊样品予以证明. 如图 1-2 所示的半无限大薄层样品, 沿边有四个接触点 A 、 B 、 C 、 D , 间隔为 a 、 b 和 c , 当电流由 A 点

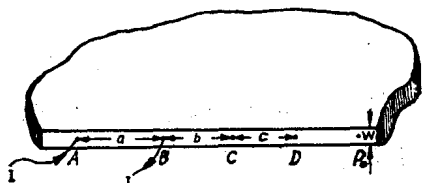


图 1-2 厚度为 W 的半无限大导电薄层, A 、 B 、 C 、 D 是四个接触点

流入从 B 点流出时, 在远离

触点的薄层内部, 电流线应平行于表面, 其等势面可看成是半圆柱面, 它们的公共轴线通过电流注入点并垂直于表面. 假设 V 是离轴为 r 处的电势, 根据欧姆定律其值将为

$$dV = -E dr = -\rho j dr = -\frac{\rho I}{\pi W} \frac{dr}{r}, \quad (1-4)$$

式中 E = 电场强度,

j = 电流密度,

ρ = 薄层的平均电阻率.

假定电势的参考点取在同一边界面上某一点 P_0 , a_0 、 b_0 、 c_0 分别为 A 、 B 、 C 距 P_0 点的距离, 于是积分(1-4)式得 A 、 B 二处电流在 C 点引起的电势各为:

$$V_{C, A} = - \int_{a_0}^{a+b} \frac{\rho I}{\pi W} \frac{dr}{r} = - \frac{\rho I}{\pi W} \ln \frac{a+b}{a_0},$$

$$V_{C, B} = - \int_{b_0}^b \frac{\rho(-I)}{\pi W} \frac{dr}{r} = \frac{\rho I}{\pi W} \ln \frac{b}{b_0},$$

相加得
$$V_C = V_{C, A} + V_{C, B} = \frac{\rho I}{\pi W} \ln \frac{a_0 b}{b_0 (a+b)}.$$

同理有 $V_D = V_{D,A} + V_{D,B} = \frac{\rho I}{\pi W} \ln \frac{a_0(b+c)}{b_0(a+b+c)}.$

故

$$\frac{V_D - V_C}{I_{AB}} = R_{AB, CD} = \frac{\rho}{\pi W} \ln \frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)}. \quad (1-5)$$

若电流改由 B 点注入, C 点流出, 同样可得

$$\frac{V_A - V_D}{I_{BC}} = R_{BC, DA} = \frac{\rho}{\pi W} \ln \frac{(a+b)(b+c)}{ca}. \quad (1-6)$$

将(1-5)式和(1-6)式相加, 又因

$$(a+b)(b+c) = (a+b+c)b + ca,$$

故得 $\exp(-\pi R_{AB, CD} W / \rho) + \exp(-\pi R_{BC, DA} W / \rho) = 1.$

对于任意形状的样品, 可以用复变函数方法求解而得到(1-3)式.

将 ρ 写成下列形式:

$$\rho = \frac{\pi W}{\ln 2} \frac{R_{AB, CD} + R_{BC, DA}}{2} f\left(\frac{R_{AB, CD}}{R_{BC, DA}}\right), \quad (1-7)$$

这里 f 是修正因子, 是 $R_{AB, CD}/R_{BC, DA}$ 的函数. 将(1-7)式代入(1-3)式可以解得(附录 1):

$$\frac{R_{AB, CD} - R_{BC, DA}}{R_{AB, CD} + R_{BC, DA}} = \frac{f}{\ln 2} \operatorname{arc} \cosh \left\{ \frac{\exp(\ln 2 / f)}{2} \right\}. \quad (1-8)$$

利用迭代法可以解出(附录 2):

$$f = 1 - \left(\frac{R_{AB, CD} - R_{BC, DA}}{R_{AB, CD} + R_{BC, DA}} \right)^2 \frac{\ln 2}{2} - \left(\frac{R_{AB, CD} - R_{BC, DA}}{R_{AB, CD} + R_{BC, DA}} \right)^4 \left\{ \frac{(\ln 2)^2}{4} - \frac{(\ln 2)^3}{12} \right\}. \quad (1-9)$$

若以 $R_{AB, CD}/R_{BC, DA}$ 为横坐标, f 为纵坐标, 根据(1-9)式可以画出图 1-3. 比值 $R_{AB, CD}/R_{BC, DA}$ 随样品形状及 A 、 B 、 C 、 D 的位置变化而定. 如果样品制作对称, 而且四个接触点安排在对称位置上, 则可以使 $R_{AB, CD} = R_{BC, DA}$, 这时修正因子 f 接近于 1. 一般 $(R_{AB, CD}/R_{BC, DA}) \leq 1.1135$ 时, $1 - f < 0.1\%$, 故(1-7)式变为:

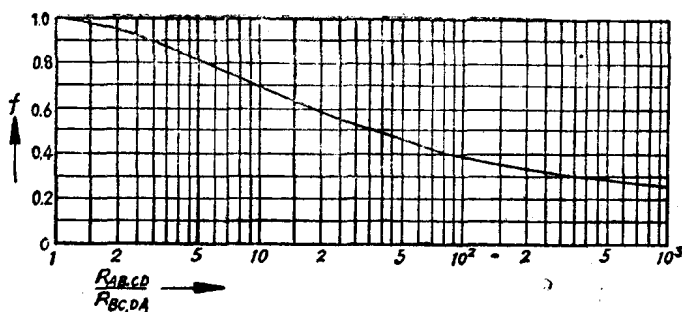


图 1-3 函数 f 与测试样品电阻比值的关系图

$$\rho = \frac{\pi W}{\ln 2} \frac{R_{AB,CD} + R_{BC,DA}}{2} = \frac{\pi W}{\ln 2} \frac{V}{I}$$

相应的薄层电阻 R_s 为:

$$R_s = \frac{\rho}{W} = \frac{\pi}{\ln 2} \frac{V}{I} = 4.532 \frac{V}{I}. \quad (1-10)$$

在微电子工业的制版和平面工艺技术中, 完全可以做到使 $R_{AB,CD}$

和 $R_{BC,DA}$ 接近相等, 不

需附加任何工艺条件即

可在四个探针接触区实

现欧姆接触。利用这种

结构测得的薄层电阻值

比较准确可靠, 用来诊

断工艺的稳定性 and 均

匀性也十分有效。图 1-4

是一只测量基区薄层电

阻的范德堡结构, 环绕

基区扩散的发射区充当

沟道隔离环, 在基区和

沟道隔离环之间的集电

区氧化物上面有一栅极

, 在栅极上施加偏压

可以控制表面情况。

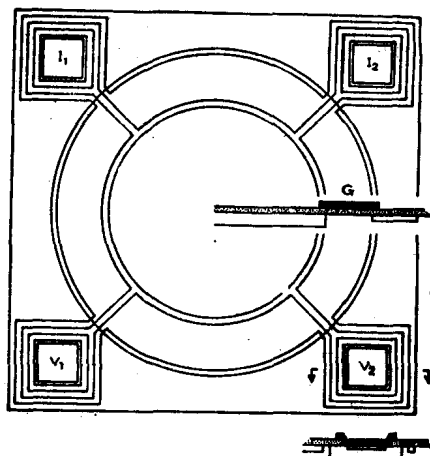


图 1-4 测量基区薄层电阻的范德堡结构

沟道隔离环, 在基区和沟道隔离环之间的集电区氧化物上面有一栅极, 在栅极上施加偏压可以控制表面情况。

1.1.2 范德堡测试结构的等效电路

范德堡测试结构的等效电路如图 1-5 所示。图中 A 、 B 、 C 、 D 表示薄层电阻器的四个端点， R_1 代表感兴趣区域的电阻， R_2 是臂电阻， R_3 是压点之间的表面分路电阻，它可以用标明为 G 的栅极加以控制，一个压点和靠近的扩散面 E 之间的表面电阻用 R_3^* 表示。整个结构由 P-N 结与衬底隔离，衬底为 S 。若臂电阻 R_2 可以忽略，且表面无漏电流即 R_3 为无穷大，则等效电路可以简化为图 1-6。若电流 I 是通过 A 点流入，从相邻的 B 点流出，则从简

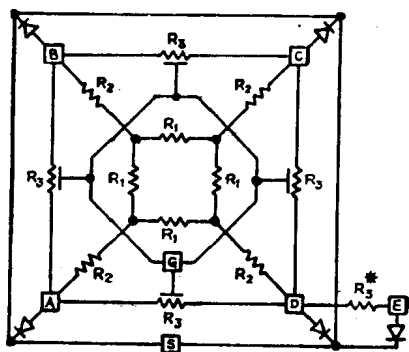


图 1-5 一个对称的、周围加栅的、并由 P-N 结与衬底隔离的 VDP 测试结构的等效电路

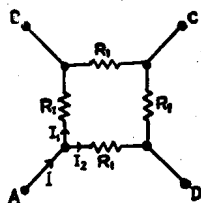


图 1-6 简化的等效电路

化等效电路可以算得

$$I_2 = \frac{I}{4},$$

故 C 、 D 两点之间的电位差为

$$V = I_2 R_1 = \frac{I}{4} R_1$$

或

$$\frac{V}{I} = \frac{R_1}{4}. \quad (1-11)$$

此式和(1-10)式非常接近，故 $R_1 \simeq R_2$ 。

根据网络理论可以求得图 1-5 所示的等效电路的 R 之解为 (暂不考虑栅极和 R_3^*):

$$R = \frac{V}{I} = (8G_1^3G_2G_3 + 16G_1^3G_3^2 + G_1^2G_2^2 + 8G_1^2G_2^2G_3 + 20G_1^2G_2G_3^2 + 2G_1G_2^2G_3 + 8G_1G_2^2G_3^2 + G_2^2G_3^2) \div (4G_1^3G_2^3 + 32G_1^3G_2^2G_3 + 80G_1^3G_2G_3^2 + 64G_1^3G_3^3 + 12G_1^2G_2^2G_3 + 64G_1^2G_2^2G_3^2 + 80G_1^2G_2G_3^3 + 12G_1G_2^2G_3^2 + 32G_1G_2^2G_3^3 + 4G_2^2G_3^3). \quad (1-12)$$

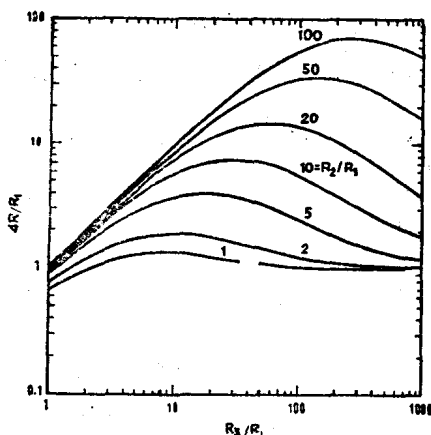


图 1-7 对图 1-5 所示的等效电路的评价图

上式中 $G_1 = R_1^{-1}$, $G_2 = R_2^{-1}$, $G_3 = R_3^{-1}$. 当 $R_3 \rightarrow 0$, $R_3 \rightarrow \infty$ 时, $G_2 \rightarrow \infty$, $G_3 \rightarrow 0$, 将此条件代入 (1-12) 式就得到 (1-11) 式. 对不同的 R_2 和 R_3 的数值, 代入 (1-12) 式算出 R 并用 $R_1/4$ 归一化得结果如图 1-7 所示. 由图可见, 当表面漏电流可忽略时 (即 $R_3 \gg R_1$), 只要臂电阻 R_2 不太大, $4R/R_1$ 均接近于 1, 这就证明图 1-5 确是对称 VDP

结构的满意的等效电路. 当简化为图 1-6 所示的等效电路时, R_1 就是要测的 R_s .

§ 1.2 四端十字形测试结构

随着微电子工业的发展, 要求把薄层电阻测试结构做得尽可能小. 为此, 发展了其它形状的薄层电阻测试结构, 主要有各种方形十字结构如图 1-8 所示. 其中希腊 (Greek) 十字形结构, 从工艺上来看可以做得最小.

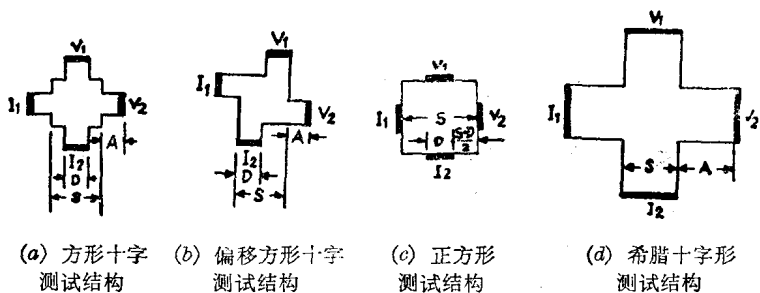


图 1-8 几种十字形测试结构示意图

这些结构本身可以做得很小，但接触处无法符合 VDP 结构所要求的点接触。它们和 VDP 结构偏离程度如何，近年来有关文献中进行了不少分析，现作一简单介绍。

1.2.1 十字形测试结构的数值分析

对于一正方形的薄层电阻，可以用图 1-9 所示的等效电路来模拟。图中 G_1 是相邻结点之间的电导， G_2 是相对结点之间的电导。假如有电流均匀地流过正方形，也就是二条边处于等电位，显然正方形的薄层电导 G_s (即 $1/R_s$) 为

$$G_s = 2(G_1 + G_2). \quad (1-13)$$

如果我们设想把要研究的测试结构划成许多小方块电阻，整个结构就由它们串联并联而成，则整个薄层就可以由这样许多等效电路组合而成的一个电阻网络来模拟。设想由四个方块组合的九端等效电路如图 1-10 所示，很容易看出，它是由四个等效电路连接起来的。其相接部分电阻并联，即电导相加为 $2G_1$ ，如果有一均匀电流横向通过，则 7、1、8 端为等电位，6、2、5 端为等电位，故关系式 $G_s = 2(G_1 + G_2)$ 仍然成立。因此，可以推论，用这样的等效电路来模拟，再分得细一些也是可以的，例如图 1-11 所示的 25 端等效电路。根据需要还可以继续加密。不论模拟网络的节点密度如何，其内部各处均符合九端等效电路。

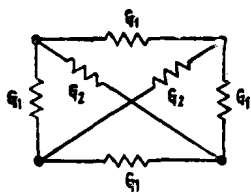


图 1-9 正方薄层电阻器的等效电路

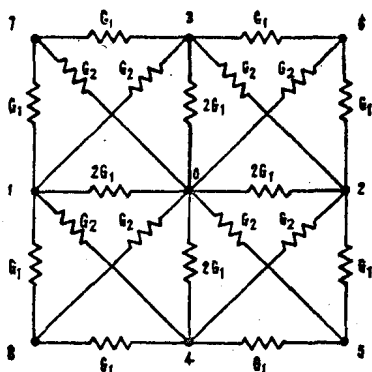


图 1-10 九端等效电路

现用克希霍夫定律来分析图 1-10 的九端等效电路中结点“0”处的电流情况。如无其它电流注入, 则应有

$$\sum_{n=1}^8 i_n = 0,$$

$$i_n = G_n(V_n - V_0).$$

将图 1-10 中所标出的等效电导值代入上式, 得:

$$\begin{aligned} & 2G_1(V_1 - V_0) + 2G_1(V_2 - V_0) + 2G_1(V_3 - V_0) \\ & + 2G_1(V_4 - V_0) + G_2(V_5 - V_0) + G_2(V_6 - V_0) \\ & + G_2(V_7 - V_0) + G_2(V_8 - V_0) = 0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{即} \quad & 2G_1(V_1 + V_2 + V_3 + V_4 - 4V_0) + G_2(V_5 + V_6 \\ & + V_7 + V_8 - 4V_0) = 0. \end{aligned} \quad (1-14)$$

这里 $V_0, V_1, \dots$ 就是图 1-10 中九个结点上的电位。

现在再进一步研究导电薄层上某一点 P_0 的电位 V_0 和邻近各点的电位之间的关系。在没有电荷积累的稳恒电流场中, 应符合拉普拉斯方程 $\nabla^2 V = 0$ 。为了进行数值解, 用差分方程代替拉普拉斯方程。从九点有限差分逼近拉普拉斯方程得出电压 V_0 的表式(附录 3)。当 $x_0 = y_0 = 0, x = y = 1$ 时, 此表式为:

$$20V_0 - 4(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) - (V_5 + V_6 + V_7 + V_8) = 0. \quad (1-15)$$

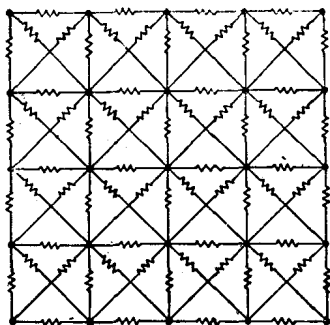


图 1-11 二十五端等效电路

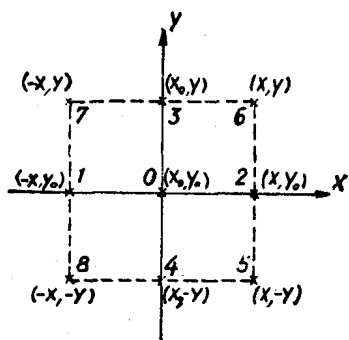


图 1-12 九点差分示意图

此式应与(1-14)式相当，再利用(1-13)式得到 G_s 与 G_1 、 G_2 之关系如下：

$$G_1 = \frac{G_s}{3}, \quad G_2 = \frac{G_s}{6}.$$

代入(1-14)式得

$$\frac{G_s}{6} [4(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) + (V_5 + V_6 + V_7 + V_8) - 20V_0] = 0. \quad (1-16)$$

由此可见，在连续导电薄层上各点电位和等效电路阵列上各节点的电位相当。只要在等效电路阵列各点应用克希霍夫定律列出一系列方程组，解方程即可求得薄层电阻。至于一个等效电路阵列究竟要取多少结点来模拟才有足够精度，原则上是愈多愈好，但愈多则计算的工作量愈大，所以只要达到一定的精度就可以了。

这样，薄层电阻器可以概念化为一个具有大量内部分支及结点和四个接触的电阻网络，再应用电路转换可将内部结点压缩为如图 1-13 所示的六电阻等效电路。

因为所研究的薄层电阻器具有旋转对称性，用 R_1 表示相邻两个接触之间的电阻，用 R_2 表示对面两个接触之间的电阻。在数值解中，加 V_0 于一个接触上，其余三个接触接地。因对称关系 $I_0 =$

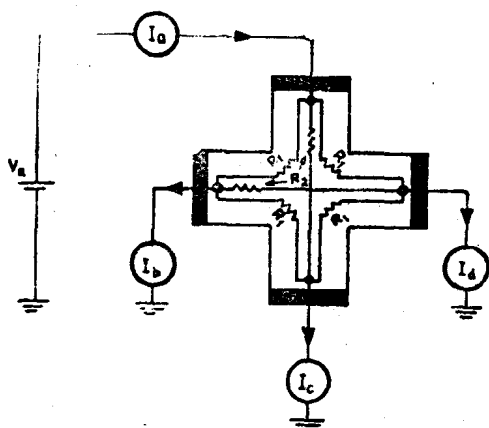


图 1-13 六电阻等效电路

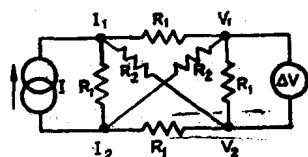
I_d , 电阻 $R_1 = V_a/I_b$, $R_2 = V_a/I_c$, I_b 和 I_c 之值可从数值分析把接触处每一结点的电流加起来而获得. 总电流 $\Sigma I = I_a - I_b - I_c - I_d$ 应尽可能小.

在测量时, 图 1-13 的等效电路可画成如图 1-14 所示的形式. 设从 I_1 、 I_2 两点送入的电流为 I , 计算 V_1 、 V_2 两点的电位差 ΔV , 得

$$\frac{\Delta V}{I} = \frac{R_1(R_2 - R_1)}{4(R_1 + R_2)}, \quad (1-17)$$

若此结构很好近似于对称的 VDP 结构, 将此 $\Delta V/I$ 代入 (1-10)

式得



$$R_s(\text{计算}) = (\pi/\ln 2) \frac{\Delta V}{I}, \quad (1-18)$$

则
$$R_s(\text{计算}) = R_s = \frac{1}{G_s}.$$

图 1-14 六电阻等效电路的
测量方位

总之, 对于一个新的测试结构, 若要研究所用的计算方法是否恰当和应该采用多少结点比较合适, 可以将这种测试结构的四个接触简化

为处于结构四角对称位置上的四个点接触，然后选择一定密度的结点数，通过计算得出 ΔV 和 I ，再观察 $\Delta V/I$ 是否收敛到 $R_s \ln 2/\pi$ ，若能收敛到 $R_s \ln 2/\pi$ ，就可以认为所选择的结点数是合适的，也就可以估算具有扩展接触的新结构的 R_s (计算)了。

1.2.2 十字形测试结构的归一化误差

实际的测试结构均有一定的臂长和臂宽， $R_s(\text{计算}) \neq R_s$ 。令 E 表示它们之间的归一化误差：

$$E = \frac{R_s - R_s(\text{计算})}{R_s}, \quad (1-19)$$

从上式有

$$R_s = R_s(\text{计算}) / (1 - E), \quad (1-20)$$

所以 $R_s(\text{计算})$ 是小于真实的薄层电阻值的。

对几种不同的测试结构，不同的臂长和臂宽时的误差曲线示如图(1-15)。图中 A 是臂长， D 是臂宽， S 是中心正方形的边长。从图可见，对给定的 A/S 和 D/S 比值，偏移方形十字结构的误差小于或等于方形十字结构的误差。图 1-15(c) 的正方形是方形十字结构中 $A=0$ 的极限情况，用回归法拟合图中的数据点得到直线的表式为：

$$E = (0.595 \pm 0.015) (D/S)^{1.82 \pm 0.03}. \quad (1-21)$$

对于 $D/S < 0.6$ ，上式和实验数据符合很好。若 $D/S=0$ ， $E=0$ ，这就是说当接触为点接触时，结构是理想的 VDP 结构，故误差为零。从此图中也可以看出当 $D/S < 0.1$ 时，测得的薄层电阻的误差小于 1%。

另一种极限情况是 $D/S=1$ ，那就是希腊十字结构，见图 1-15(d)，图中直线的表式是：

$$E = (0.590 \pm 0.006) \exp[-(6.23 \pm 0.02) A/S]. \quad (1-22)$$