

平面型器件欧姆接触的衡量——圆 形传输线模型外推法

陈存礼 徐世晖

(南京大学物理系)

1985年9月12日收到

本文提出一个衡量平面型器件欧姆接触的新方法——圆形传输线模型外推法。样品无需台面绝缘，只须一次合金化即能完成测试结构图形。用圆形传输线模型导出了测量接触电阻率 ρ_c 的表达式，以硅和砷化镓两种半导体材料进行验证，与线性传输线模型的结果一致。讨论了接触电极之下与接触电极之外薄层电阻差异的影响。

一、引言

在半导体器件和集成电路中，欧姆接触是必不可少的。接触性能的好坏直接影响着器件的质量。接触电阻率（又称比接触电阻） $\rho_c (\Omega \text{cm}^2)$ 是欧姆接触质量优劣的一个定量标志，因而如何准确而简便的测量出金属-半导体欧姆接触的接触电阻率，对半导体器件的研究和制造来说是非常重要的。

对于像平面器件的薄层材料，首先由 Shockley^[1] 提出后经 Berger^[2] 进一步充实的线性传输线模型（TLM）是测量接触电阻率的常用方法。Proctor 等^[3]也提出一个四端测试结构，实际上这是 TLM 的一种变形。这些方法都需要有台面绝缘，样品的制备较为复杂。Cox 等^[4]提出的原则上也适用于薄层情况的方法，无需台面绝缘，但在样品的正反两面都需要合金化。Reeves^[5]提出的多环结构圆形传输线模型克服了这一缺点，然而运算繁琐。笔者^[6]曾提出一种四点结构圆形传输线模型，样品制备简单，无需台面绝缘，只需一次合金化，数据处理方便。

现本文提出一种测量平面型接触薄层材料的接触电阻率的新方法——圆形传输线模型外推法。它不仅具有上述的优点，而且还计及接触电极之下和接触电极之外的薄层电阻的差异。用硅和砷化镓两种半导体材料进行实验，并和线性传输线模型作了比较，所得结果是一致的。

二、理论

在具有薄层电阻为 ρ_s 的半导体薄层样品上，设有两个半径为 a 相距为 s 的圆形金属电极与之相接触，如图 1 所示，当两个电极通上电流 i 之后，测得的总电阻 R_m 为

$$R_m = R_{12} = 2R_c + 2R_s + R_b + R_0 \quad (1)$$

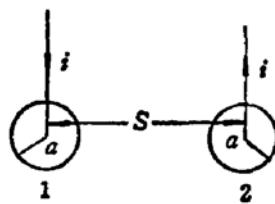


图 1

式中 R_c 为纵向电流引起的接触电阻， R_b 为横向电流扩展引起的接触电极之下的扩展电阻， R_t 为流经半导体体内的电流引起的两电极间的体电阻， R_o 为金属探针和测试装置等造成的附加电阻。

由于在薄层样品上距通电流电极为 $r(r > a)$ 的任一点与圆形接触之间的电势差为^[6]， $V_r = \frac{\rho_t i}{2\pi} \ln \frac{a}{r}$ ，因而

$$R_b = \frac{\rho_t}{\pi} \ln \frac{s-a}{a}, \quad (2)$$

接触电阻

$$R_c = \frac{\rho_t}{\pi a^2}. \quad (3)$$

式中 ρ_t 即为接触电阻率。

R_t 可通过圆形传输线模型(图 2)求出。现假设接触电极之下与接触电极之外的 ρ_t 相同(下面再讨论二者不相同的情况)，则有

$$dv(r) = i(r) \frac{\rho_t}{2\pi r} dr, \quad di(r) = v(r) \frac{2\pi r}{\rho_t} dr,$$

于是有

$$\frac{d^2v(r)}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dv(r)}{dr} - \frac{\rho_t}{\rho_c} v(r) = 0. \quad (4)$$

上式的解为：

$$v(r) = Al_0(\alpha r) + BK_0(\alpha r). \quad (5)$$

因而

$$i(r) = \frac{2\pi r}{\rho_t} [A\alpha l_1(\alpha r) - B\alpha K_1(\alpha r)],$$

式中

$$\alpha = \left(\frac{\rho_t}{\rho_c} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

$$l_0(\alpha r) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{2} \alpha r \right)^{2k}}{(k)!^2}, \quad (7)$$

为第一类零级变形的贝塞尔函数，

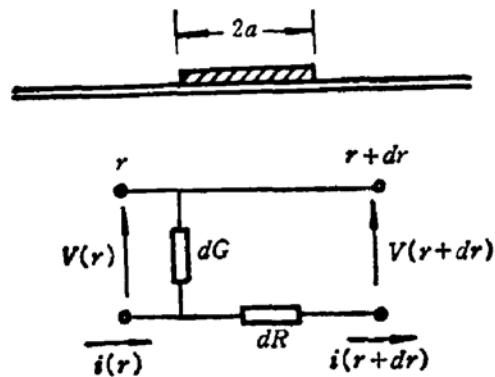


图 2

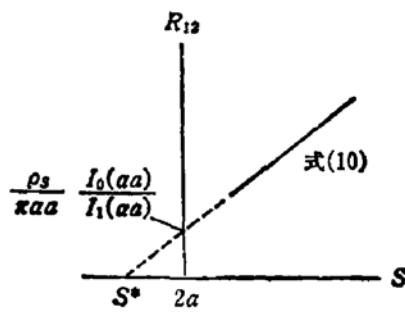


图 3

$$\alpha G = \frac{2\pi r}{\rho_s} dr \quad \alpha R = \frac{\rho_s}{2\pi R} dr$$

$$I_1(\alpha r) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{2}\alpha r\right)^{(2k+1)}}{k!(k+1)!}. \quad (8)$$

为第一类一级变形的贝塞尔函数，而 $K_0(\alpha a)$ 和 $K_1(\alpha a)$ 则分别为第二类零级和第 2 类一级变形的贝塞尔函数。

因为电流从金属电极流向半导体时，同时有纵向流动和横向扩展，于是

$$(R_e + R_s) = \left. \frac{v(r)}{i(r)} \right|_{r=a} = \frac{\rho_s}{2\pi a a} \left[\frac{I_0(\alpha a) + \frac{B}{A} K_0(\alpha a)}{I_1(\alpha a) - \frac{B}{A} K_1(\alpha a)} \right]$$

显然 $\frac{B}{A}$ 必须为零，否则会有一个“ αa ”值使 $(R_e + R_s)$ 变号，这是不合理的。所以

$$R_s = \frac{\rho_s}{2\pi a a} \frac{I_0(\alpha a)}{I_1(\alpha a)} - \frac{\rho_s}{\pi a^2}. \quad (9)$$

对于某一固定测试系统， R_s 为一定值，可以独立的测出并从总测量电阻中减去以消除误差，这样

$$R_{12} = \frac{v_{12}}{i_{12}} = \frac{\rho_s}{\pi a a} \frac{I_0(\alpha a)}{I_1(\alpha a)} + \frac{\rho_s}{\pi} \ln \frac{s-a}{a}. \quad (10)$$

这是以 R_{12} 和 $\ln s$ 为坐标轴的一条直线。可有两种方法求出接触电阻率 ρ_s （图 3）。

方法 1. 当外推直线至 $s = 2a$ 时，两电极间的体电阻 R_b 应为零，则

$$R_{12} \Big|_{s=2a} = \frac{\rho_s}{\pi a a} \frac{I_0(\alpha a)}{I_1(\alpha a)}. \quad (11)$$

结合斜率，求出 a 后，从而得到 ρ_s 。方法 2. 外推直线到 $R_{12} = 0$ ，可得一等效距离 s^* ，有

$$\ln \frac{a}{s^* - a} = \frac{1}{\pi a a} \frac{I_0(\alpha a)}{I_1(\alpha a)} \quad (12)$$

同样可得到 ρ_s 。

三、实 验

用硅和砷化镓两种半导体材料进行实验。

8—10Ωcm 的 P 型 ⟨111⟩ 直拉硅单晶抛光片，一分为二。一半扩磷后，在浅 N⁺ 层上（方块电阻为 5Ω/□）经蒸 Al 光刻等平面工艺做上圆形电极图形。一类图形是等直径等距离的方阵，电极直径 $\phi = 40\text{ μm}$ ，电极间距 150 μm。另一类是等直径不等间距图形，电极直径 $\phi = 50\text{ μm}$ ，间距从 150 μm 变化到 2000 μm。另一半硅片则以相同工艺条件做成线性传输线模型图形^[7,8]，以资比较。

⟨100⟩ 掺 Cr 半绝缘 GaAs 衬底，经注入硅和退火后也分成两半，按相同工艺条件一半做成圆形电极图形，另一半做成线性传输线模型图形。GaAs 上的欧姆接触材料是金锗镍合金。

测量的结果列于表 1。

表 1

圆 形 模 型 外 推				线性传输线模型		
	$\phi(\text{μm})$	$\rho_t(\Omega\text{cm}^2)$	$\bar{\rho}_t(\Omega\text{cm}^2)$	样品几何参数	$\rho_t(\Omega\text{cm}^2)$	$\bar{\rho}_t(\Omega\text{cm}^2)$
Si	40	方法 1 $(7.6-9.4)\times 10^{-6}$	7.9×10^{-6}	$l_1 = 71\text{ μm}$	$(5.1-11.0) \times 10^{-6}$	8.1×10^{-6}
		方法 2 $(7.0-9.2)\times 10^{-6}$	8.1×10^{-6}	$l_2 = 960\text{ μm}$		
	50	方法 1 $(7.5-9.1)\times 10^{-6}$	8.3×10^{-6}	$d = 41\text{ μm}$	$(0.9-3.3) \times 10^{-6}$	1.0×10^{-6}
		方法 2 $(7.0-10.8)\times 10^{-6}$	9.0×10^{-6}	$w = 41\text{ μm}$		
GaAs	30	$(2.1-2.7)\times 10^{-6}$	2.2×10^{-6}	$l_1 = 8\text{ μm}$ $l_2 = 97\text{ μm}$ $d = 74\text{ μm}$ $w = 193\text{ μm}$		

四、讨 论

由表 1 可见，圆形传输线模型外推法无论是用方法 1 还是方法 2，以及两种版面两种材料测得的结果与线性传输线模型的结果都是符合一致的。本方法是由一系列相等直径不同电极间距的测量值作直线拟合而成，这就自然地消除了部分偶然误差，而且无需台面绝缘，样品制备简单，测量和数据处理方便。

Keramidas^[9]提出一个对 Cox^[4] 进行修改原则上也适用于薄层样品的方法。他用一系列不同直径 d 不同间距 s 的圆形电极，测出两个电极间的总电阻

$$R_T = \frac{2\rho}{\pi d} \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{4t}{d} \right) + \frac{8\rho_c}{\pi d^2} + R_B + R_0,$$

得到一组 $R = f(s, d)$ 的曲线，通过延长直线至 $s = 0$ 以消除半导体材料的串联体电阻 R_B ，再由测量结果与 $\frac{1}{d^2}$ 作曲线，从斜率求出 ρ_c 。现在用我们的 Si 实验数据按他的方法进行计算。当样品很薄，即厚度 $t \ll d$ ，并且考虑到测试系统的影响时，

$$R_T = \frac{8\rho_t t^2}{\pi d^2} + \frac{8\rho_c}{\pi d^2} + R_B.$$

但是对平面型器件的薄样品，扩散深度或离子注入深度 t 仅在 $10^{-1} \mu\text{m}$ 量级，延长直线至两电极间距为零时， $R_B = 0$ ，

$$\rho_c = \frac{\pi d^2}{8} R_T - \rho_t t^2 \approx \frac{\pi d^2}{8} R_T,$$

得到 $\rho_c = 1.4 \times 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，比我们的结果偏大。这主要是 Cox 公式中厚度修正因子是实验上根据一定厚度 t 得出的经验结果，而并未考虑到薄层样品接触电极处的横向电流扩展。另外，其版面图形结构、测量和数据处理等都比本文方法复杂繁琐。

在薄层电阻为 ρ_t 的半导体薄层样品上，金属电极经合金化之后，其接触电极之下的薄层电阻已发生变化，设为 ρ_{tk} 。这时式 (10) 应为

$$R_{12} = \frac{\rho_{tk}}{\pi \alpha' a} \frac{I_0(\alpha' a)}{I_1(\alpha' a)} + \frac{\rho_t}{\pi} \ln \frac{s-a}{a}. \quad (10')$$

式中

$$\alpha' = \left(\frac{\rho_{tk}}{\rho_t} \right)^{1/2}. \quad (13)$$

如图 4 所示，当在圆形电极 1、2 间通电流 i_{12} 时，测得电极 2、3 间的电压 V_{23} ，于是

$$R_{23} = \frac{V_{23}}{i_{12}} = R_E + R_s + \frac{\rho_t \ln \frac{(s-a)^2}{a(2s-a)}}{2\pi} + R_0. \quad (14)$$

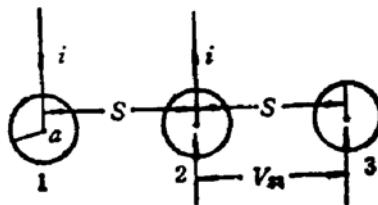


图 4

同样由于电流由金属电极流向半导体时，同时有纵向流动和横向扩展，因而

$$(R_E + R_s) = \frac{v(r)|_{r=a}}{i(r)|_{r=a}} = \frac{\rho_{tk}}{2\pi \alpha' a I_1(\alpha' a)}. \quad (15)$$

这样

$$\frac{R_C + R_S}{R_E + R_S} = I_0(\alpha' a). \quad (16)$$

计及接触电极之下与接触电极之外薄层电阻的差异，所得结果列于表 2。

表 2

圆 形 模 型 外 推					线 性 传 输 线 模 型			
	$\phi(\mu\text{m})$	$\rho_s(\Omega/\square)$	$\rho_{sk}(\Omega/\square)$	$\rho_c(\Omega\text{cm}^2)$	样品几何参数	$\rho_s(\Omega/\square)$	$\rho_{sk}(\Omega/\square)$	$\rho_c(\Omega\text{cm}^2)$
Si	40	11.2		7.44×10^{-6}	$l_1 = 71\mu\text{m}$	8.61		7.10×10^{-6}
		11.2	8.80	8.16×10^{-6}	$l_2 = 960\mu\text{m}$ $d = 41\mu\text{m}$ $w = 41\mu\text{m}$	8.61	1.97	2.19×10^{-6}
GaAs	30	186		2.17×10^{-6}	$l_1 = 8\mu\text{m}$	235		1.72×10^{-6}
		186	138	2.27×10^{-6}	$l_2 = 97\mu\text{m}$ $d = 74\mu\text{m}$ $w = 193\mu\text{m}$	235	59.3	6.49×10^{-6}

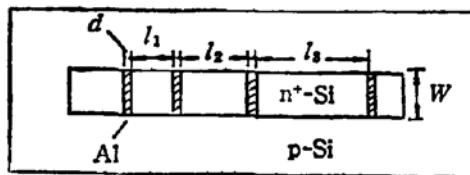


图 5

$l_1 = 26.9\mu\text{m}$, $l_2 = 467\mu\text{m}$, $l_3 = 960\mu\text{m}$, $d = 41\mu\text{m}$, $w = 41\mu\text{m}$

为了比较,我们也列入了线性传输线模型考虑 $\rho_{sk}^{[10]}$ 的测量结果。

由表 2 可见,在我们的圆形传输线模型外推法中,无论是 Si 或是 GaAs, 是否考虑接触电极内、外薄层电阻的差异,对所得的接触电阻率 ρ_c 基本上是一样的。但在线性传输线模型中,与文献[10]一样,两者之间的差别很明显。这或许是由于在式(14)中,我们把图 4 测量中所有能读出的电压都考虑了。但在线性传输线模型中,其端点电阻 R_E 中并未考虑接触电极之外的电压读数,因而接触电阻率明显变大。实际上,我们在如图 5 的线性传输线模型结构中,由间距为 $960\mu\text{m}$ 的两个电极通 24mA 的电流,竟在 $26.4\mu\text{m}$ 间距的两个电极间测出 0.96mV 的电压降。

GaAs 样品是上海冶金研究所六室吴鼎芬先生提供的。硅样品的制备是在南京元件 24 厂完成的。特此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] W. Shockley, Report No. AL-TOR-64-207, Air Force Atomic Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, September (1964).
- [2] H. H. Berger, *Solid-State Electronics*, 15, 145, (1972).
- [3] S. J. Proctor, L. W. Linholm, J. A. Mazer, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-30, 1535(1983).
- [4] R. H. Cox, H. Strack, *Solid-State Electronics*, 10, 1213, (1967).
- [5] G. K. Reeves, *Solid-State Electronics*, 23, 487, (1980).
- [6] 陈存礼, 半导体学报, 4, 191, (1983).
- [7] 陈存礼, 范仁永, 半导体学报, 4, 502, (1983).
- [8] 陈存礼, 电子学报, 12, 105, (1984).
- [9] Y. G. Keramidas, *Inst. Phys. Conf. Ser.* No. 45, 396(1979).
- [10] G. K. Reeves, H. B. Harrison, *IEEE Electron Device Lett.*, EDL-3, 111, (1982).

Judge of Ohmic Contact to planar Devices—Circular Transmission Line Model Extrapolation

Chen Cunli and Xu Shihui

(*Department of Physics, Nanjing University*)

Abstract

A new method—circular transmission line model extrapolation—for judging ohmic contact of planar devices are described. The mesa isolation of sample test configuration is not necessary, only one time metallization is needed. The equations to measure specific contact resistance ρ_c have been derived by circular transmission line model, and have also been verified by experiments in Si and GaAs. The results are in good agreement with in-line geometry transmission line model. The effects of the difference in the sheet resistance of the semiconductor layer directly under the contact and the sheet resistance of the layer outside the contact region are discussed.