

测量半导体材料电阻率的 四探针公式的普遍形式

陈 存 礼

(南京大学物理系)

1984年10月29日收到

提 要

测量电阻率的四探针法公式中,要求是点接触而且探针的排列有一定的形状。实际上,接触总有一定的大小。本文考虑到接触面积大小的影响,并让四根探针排列成任意形状,导出了测量电阻率和薄层电阻的关系式。而直线四探针、方形四探针只不过是本公式的两个特例。

一、引 言

半导体材料(体样品或薄片)的电阻率和扩散、外延、离子注入等薄层材料的薄层电阻(又称方块电阻)的测量,已有不少方法。用得最为广泛的是四探针法(直线四探针^[1]与方形四探针^[2]),它要求探针与样品的接触必须是点接触。理论上,一个几何上的点是没有大小的,而实际上所有的点接触都有一定大小的接触面积。本文考虑到接触面积的大小,并让四根探针排列成任意形状,推导出测量电阻率和薄层电阻的关系式。直线四探针和方形四探针只不过是这个普遍形式中的两个特例。并以实验加以论证。

二、大块样品的电阻率公式

设想一块半无限大的半导体材料,四个金属圆形电极1,2,3,4呈任意形状与之相接触,如图1所示。 a_1, a_2, a_3, a_4 分别为此四个接触电极的半径,而它们之间的距离则分别为 $s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{23}, s_{24}$ 和 s_{34} 。

现在让电流 i 由1进入样品,由2流出,用 i_{12} 表示。由于在具有电阻率为 ρ 的半无限大样品上,离通电流接触中心的距离为 r 处的某点的浮置电位 V_f ^[3]是

$$V_f = \frac{\rho i}{2\pi a} \sin^{-1} \frac{a}{r}, \quad (1)$$

因而^[4,5]

$$R_{12,34} = \frac{V_4 - V_3}{i_{12}}$$

$$= \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{a_1} \left(\sin^{-1} \frac{a_1}{s_{14} - a_4} - \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{13} - a_3} \right) + \frac{1}{a_2} \left(\sin^{-1} \frac{a_2}{s_{23} - a_3} - \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{24} - a_4} \right) \right\}. \quad (2)$$

于是

$$\rho = 2\pi R_{12,34} \left\{ \frac{1}{a_1} \left(\sin^{-1} \frac{a_1}{s_{14} - a_4} - \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{13} - a_3} \right) + \frac{1}{a_2} \left(\sin^{-1} \frac{a_2}{s_{23} - a_3} - \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{24} - a_4} \right) \right\}. \quad (3)$$

这就是普遍情况下测量体材料电阻率的四探针公式。

如果我们让四个与半导体样品相接触的金属电极的大小一样,即令

$$a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a,$$

则(3)式变为

$$\rho = 2\pi a R_{12,34} \left\{ \sin^{-1} \frac{a}{s_{14} - a} - \sin^{-1} \frac{a}{s_{13} - a} + \sin^{-1} \frac{a}{s_{23} - a} - \sin^{-1} \frac{a}{s_{24} - a} \right\} \quad (4)$$

现在把它应用到四根探针排列在一条直线上的直线四探针情况,即设 $s_{14} = s_{23} = s_{34} = s$, $s_{13} = s_{24} = 2s$, 于是

$$\rho = \pi a R_{12,34} \left\{ \sin^{-1} \frac{a}{s - a} - \sin^{-1} \frac{a}{2s - a} \right\}. \quad (5)$$

如果接触是点接触,即令 $a \ll s$, 这时

$$\rho = 2\pi s R_{12,34}.$$

就是通常的直线四探针测量体样品的公式。

同样可把(4)式应用到方形四探针的情况,即设 $s_{12} = s_{23} = s_{34} = s_{14} = s$, 于是

$$\rho = \pi a R_{12,34} \left\{ \sin^{-1} \frac{a}{s - a} - \sin^{-1} \frac{a}{\sqrt{2}s - a} \right\}. \quad (6)$$

如果也是点接触,即令 $a \ll s$, 这时

$$\rho = \frac{2\pi s}{2 - \sqrt{2}} R_{12,34}.$$

这也就是通常的方形四探针测量体样品电阻率的公式。

三、有一定厚度的薄片电阻率

如果样品不是无限厚,而是有一定厚度的薄片,则(3)式必须要进行修正。如图2所示,厚度为 w 的薄片底部是一个绝缘界面,它的影响是使电流源1和2在另一侧有一个等距离的映象1'和2'。由于薄片样品上表面的界面也是一个绝缘界面,它同样会使1'和

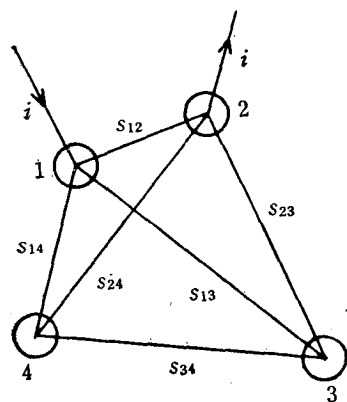


图 1

2' 产生等距离的映象 1'' 和 2''。结果在样品上、下两边将有无穷多个映象 (图 2 中只画出开头几个映象)。把这些映象都考虑进去就有

$$R'_{12,34} = \frac{V'_4 - V'_3}{i_{12}} = \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{a_1} \left(\sin^{-1} \frac{a_1}{s_{14} - a_4} - \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{13} - a_3} \right) + \frac{1}{a_2} \left(\sin^{-1} \frac{a_2}{s_{23} - a_3} - \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{24} - a_4} \right) \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{a_1} \left(\sin^{-1} \frac{a_1}{\sqrt{(s_{14} - a_4)^2 + (2nw)^2}} - \sin^{-1} \frac{a_1}{\sqrt{(s_{13} - a_3)^2 + (2nw)^2}} \right) + \frac{1}{a_2} \left(\sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{23} - a_3)^2 + (2nw)^2}} - \sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{24} - a_4)^2 + (2nw)^2}} \right) \right] \right\}. \quad (7)$$

当四个电极的 $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$, 且等距地排成一条直线时,

$$\rho = \pi a R'_{12,34} / \left\{ \sin^{-1} \frac{a}{s - a} - \sin^{-1} \frac{a}{2s - a} \right\} + CF_L. \quad (8)$$

式中

$$CF_L = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} - \sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\frac{2s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} \right] \quad (9)$$

如果四个电极排成一正方形, 则

$$\rho = \pi a R'_{12,34} / \left\{ \sin^{-1} \frac{a}{s - a} - \sin^{-1} \frac{a}{\sqrt{2}s - a} \right\} + CF_s. \quad (10)$$

式中

$$CF_s = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} - \sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\sqrt{2} \frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} \right] \quad (11)$$

这里必须有 $\frac{a}{w} \leq 2$, 以及 $s > 2a$.

修正因子 CF_L 与 CF_s 经计算机计算后的结果列于表 1, 并绘制成图 3. 文献[1]中已经给出有一定厚度薄片的直线四探针公式, 它的结果与我们 (8) 式中 $a \ll s$ 时所得的结果完全一致. 文献[2]中有一定厚度薄片的方形四探针公式的 (27) 式与我们这里 (10) 式中 $a \ll s$ 时所得的结果也完全一致.

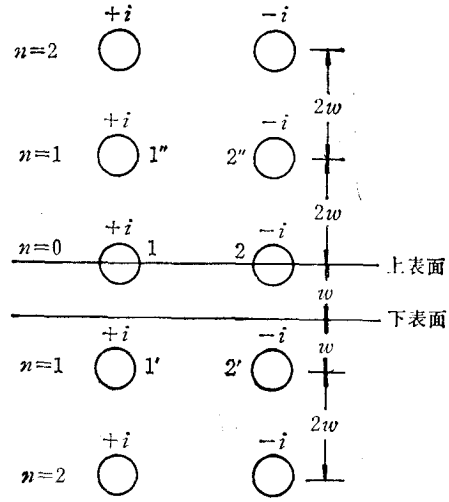


图 2

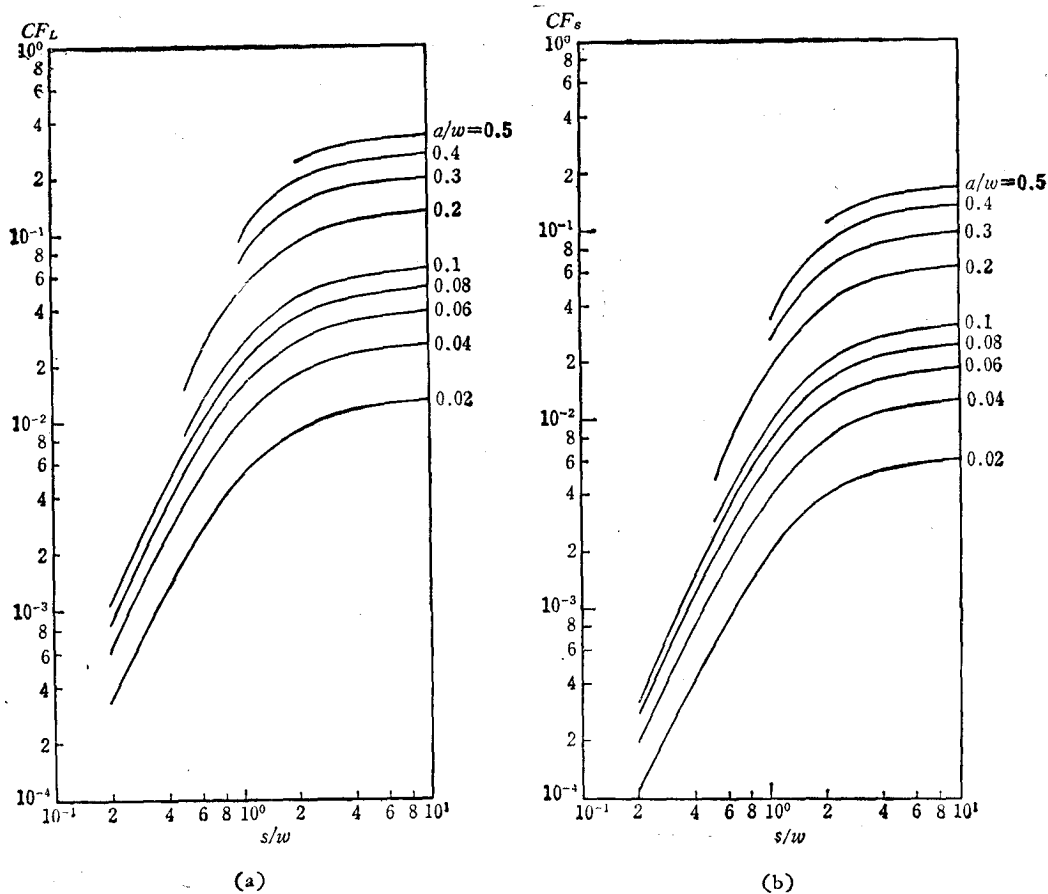


图 3

表 1

s/w		0.2	0.5	1	2	5	10
$\frac{a}{w} = 0.02$	CF_L	0.00033	0.00184	0.00503	0.00893	0.01189	0.01288
	CF_S	0.00011	0.00065	0.00200	0.00405	0.00577	0.00635
$\frac{a}{w} = 0.04$	CF_L	0.00061	0.00361	0.01004	0.01791	0.02384	0.02579
	CF_S	0.00020	0.00127	0.00398	0.00812	0.01158	0.01273
$\frac{a}{w} = 0.06$	CF_L	0.00085	0.00531	0.01501	0.02695	0.03584	0.03874
	CF_S	0.00027	0.00185	0.00594	0.01221	0.01742	0.01912
$\frac{a}{w} = 0.08$	CF_L	0.00104	0.00693	0.01996	0.03604	0.04790	0.05172
	CF_S	0.00032	0.00239	0.00786	0.01632	0.02329	0.02554
$\frac{a}{w} = 0.10$	CF_L		0.00846	0.02487	0.04519	0.06002	0.06472
	CF_S		0.00289	0.00976	0.02046	0.02919	0.03197
$\frac{a}{w} = 0.20$	CF_L		0.01486	0.04880	0.09180	0.12151	0.13033
	CF_S		0.00478	0.01873	0.04145	0.05920	0.06443
$\frac{a}{w} = 0.30$	CF_L			0.07139	0.13989	0.18456	0.19684
	CF_S			0.02667	0.06296	0.09007	0.09742
$\frac{a}{w} = 0.40$	CF_L			0.09219	0.18950	0.24926	0.26428
	CF_S			0.03331	0.08498	0.12187	0.13095
$\frac{a}{w} = 0.50$	CF_L				0.24066	0.31570	0.33267
	CF_S				0.10745	0.15466	0.16503

四、薄层样品

对于象扩散, 外延或离子注入等薄层样品, 通常电极的半径 a 总是比它们的厚度要大得多, 因而与电极相距为 $r (r > a)$ 的任一点和接触之间的电势差^[6]为

$$V_{r0} = \frac{\rho_t I}{2\pi} \ln \frac{a}{r}. \quad (12)$$

式中 ρ_t 为样品的薄层电阻. 在四个圆形接触排列成任意形状的情况下,

$$R_{12,34} = \frac{V_4 - V_3}{i_{12}} = \frac{\rho_t}{2\pi} \ln \frac{(s_{24} - a_4)(s_{13} - a_3)}{(s_{14} - a_4)(s_{23} - a_3)}.$$

于是薄层电阻

$$\rho_t = 2\pi R_{12,34} / \ln \frac{(s_{24} - a_4)(s_{13} - a_3)}{(s_{14} - a_4)(s_{23} - a_3)}. \quad (13)$$

若四个电极的 $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$, 并且等距离地排成一条直线时,

$$\rho_t = \pi R_{12,34} / \ln \frac{2s - a}{s - a}.$$

如果是点接触, 即 $a \ll s$, 这时

$$\rho_t = \frac{\pi}{\ln 2} R_{12,34}. \quad (14)$$

若在方形四探针的情况, 则有

$$\rho_t = \frac{2\pi}{\ln 2} R_{12,34}. \quad (15)$$

(14) 与 (15) 式是通常直线四探针和方形四探针测量薄层电阻的公式, 显然这仅是 (13) 式的两个特例.

五、实验结果和讨论

用两种样品进行实验, 分别测量电阻率 ρ 和薄层电阻 ρ_t .

表 2

测量模式	接触面积	$\rho(\Omega\text{cm})$	$\bar{\rho}(\Omega\text{cm})$	偏差	$\rho_s(\Omega/\square)$	$\bar{\rho}_s(\Omega/\square)$	偏差
直线	计及	$(4.62-4.93)\times 10^{-3}$	4.84×10^{-3}	13.0%	12.36—13.36	12.85	18.2%
	不考虑	$(5.22-5.54)\times 10^{-3}$	5.47×10^{-3}		14.61—15.79	15.19	
方形	计及	$(4.64-4.90)\times 10^{-3}$	4.75×10^{-3}	14.5%	12.15—12.93	12.52	21.8%
	不考虑	$(5.31-5.61)\times 10^{-3}$	5.44×10^{-3}		14.80—15.75	15.25	
直线四点探针	点接触($s=1000\mu\text{m}$)	$(4.90-5.06)\times 10^{-3}$	4.98×10^{-3}		12.95—13.01	12.97	
	计及 $a^*=4\mu\text{m}$	$(4.79-4.95)\times 10^{-3}$	4.87×10^{-3}		12.91—12.97	12.93	
样品几何参数		体样品 $a=94.4\mu\text{m}$, $w=335\mu\text{m}$, $s=678.5\mu\text{m}$			薄层样品 $a=143.6\mu\text{m}$, $s=678.5\mu\text{m}$		

用于测量 ρ 的样品是标称电阻率为 $5 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$ 的 P 型 $\langle 111 \rangle$ 硅单晶抛光片, 精确测得其 ρ 为 $4.90-5.06 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$, 平均值为 $4.98 \times 10^{-3} \Omega \text{ cm}$. 经蒸 Al, 光刻等平面工艺在硅片上制成 $a = 100 \mu \text{ m}$, $s = 700 \mu \text{ m}$ 的圆形阵列图形, 以直线和方形两种模式进行测量. 由于制版和光刻腐蚀等工艺的精度误差, 对所得图形作了仔细测量后发现

$$a = 94.4 \mu \text{ m}, s = 678.5 \mu \text{ m}.$$

测得的结果列于表 2.

$10 \Omega \text{ cm}$ 的 N 型 $\langle 111 \rangle$ 硅单晶抛光片, 先扩散一薄层硼, 用直线四点探针测其薄层电阻 ρ_s , 然后再用平面工艺制成 $a = 150 \mu \text{ m}$, $s = 700 \mu \text{ m}$ 的圆形阵列图形. 同样以直线和方形两种模式测量其 ρ_s , 所得结果也列于表 2 中.

由表 2 可见, 考虑到全薄电极与硅片的接触面积, 无论是电阻率 ρ 还是薄层电阻 ρ_s , 与直线四点探针所测得的结果符合得很好. 如果我们也考虑到直线四点探针与样品的接触面积, 根据以前我们对扩展电阻^[7]的工作, 估计其有效接触半径 $a^* = 4 \mu \text{ m}$, 则结果更为一致.

在我们的测量样品中, 若不计及接触面积的影响, 换句话说, 认为是点接触, 则所得结果明显偏大. 方形的比直线的偏离大, 接触半径 a 越大, 偏离也越大. 最小的要偏大 13%, 最大的竟达 22%. 若接触半径再大, 则影响更为严重. 计及接触电极的面积, 这在许多方面例如在测量金属-半导体欧姆接触的重要参量接触电阻率^[5,6]时是必须考虑的.

参 考 文 献

- [1] L. B. Voldes, *Proc. I. R. E.* **42** (1954), 420.
- [2] A. Uhlie, *Bell System Technical Journal*, **34** (1955), 105.
- [3] P. J. Severin and H. Bulle, *J. Electrochem. Soc.*, **122** (1975), 133.
- [4] P. J. Severin, *Philips Res. Rept.*, **26** (1971), 359.
- [5] 陈存礼, 物理学报 **33**(1984), 1314.
- [6] 陈存礼, 半导体学报, **4**(1983), 191.
- [7] 陈存礼, 半导体学报, **3**(1982), 208.

GENERAL EQUATION OF FOUR PROBES METHOD FOR RESISTIVITY MEASUREMENT OF SEMICONDUCTOR MATERIALS

CHEN CUN-LI

(Department of Physics, Nanjing University)

ABSTRACT

The equation of four probes method for resistivity measurement requires point contacts and a definite configuration of probes array. In fact, the contacts are always with definite dimension. In this article, we drive the equations of measuring resistivity and surface sheet resistance, taking into account the contact dimension and putting the location of the four probes arbitrary. The in-line four probes and the square array four probes are two specific examples for the equations.