

金属-块状半导体的接触电阻率 ——四点结构模型

陈 存 礼

(南京大学物理系)

1981 年 12 月 26 日收到

提 要

本文提出一种测量金属-半导体体样品的接触电阻率 ρ_c 的方法——四点结构模型。四个金属电极的排列不受任何限制，导出了 ρ_c 的表达式。如果样品不是半无限大，而是有一定厚度的薄片，则必须进行修正，给出了修正因子。根据这个模型，进行实验测量和计算，所得结果与文献报道的一致。

金属-半导体的欧姆接触无论在半导体的器件制造还是半导体物理和材料的性能研究方面都是极其重要的。接触的好坏直接影响着器件的质量和材料的物理性能。接触电阻率 ρ_c 是标志金属-半导体欧姆接触优劣的一个重要参量。测量 ρ_c 的方法已有不少报道^[1]，其中线形传输线模型^[2,3]和圆形传输线模型^[4,5]是测量适合于器件的金属-薄半导体层的 ρ_c 的常用方法。但是，对于像 Hall 效应、磁阻与材料的补偿度等半导体物理和材料研究所需要的金属与半导体体样品接触的 ρ_c 的测量却很少有报道。本文提出一种测量这类接触电阻率 ρ_c 的方法——四点结构模型。

如图 1 所示，设 a_1, a_2, a_3, a_4 分别为四个圆形金属电极 1, 2, 3, 4 与半无限大的半导体样品接触的半径，它们之间的距离分别为 $s_{12}, s_{13}, s_{14}, s_{23}, s_{24}$ 和 s_{34} 。让电流 i 由 1 进入样品，由 2 流出，用 i_{12} 表示。

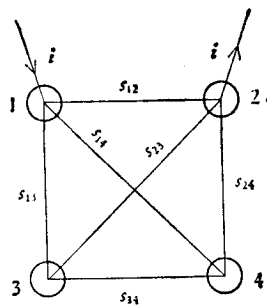


图 1

在具有电阻率为 ρ 的半无限大样品上，离开通电流接触中心的距离为 r 处的某点的

浮置电位 $V_f^{(6)}$ 是

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

于是

$$R_{12} = \frac{V_{12}}{i_{12}} = R_{c_1} + R_{c_2} + \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2a_1} + \frac{\pi}{2a_2} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{12} - a_1} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{12} - a_2} \right], \quad (2)$$

$$R_{13} = \frac{V_{13}}{i_{12}} = R_{c_1} + \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2a_1} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{13} - a_1} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{12} - a_2} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{23} - a_2} \right], \quad (3)$$

$$R_{14} = \frac{V_{14}}{i_{12}} = R_{c_1} + \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{\pi}{2a_1} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{14} - a_1} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{12} - a_2} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{24} - a_2} \right], \quad (4)$$

$$R_{34} = \frac{V_{34}}{i_{12}} = \frac{\rho}{2\pi} \left[\frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{13} - a_1} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{14} - a_1} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{24} - a_2} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{23} - a_2} \right]. \quad (5)$$

式中 R_{c_1} 和 R_{c_2} 分别为圆形金属电极 1 和 2 与半无限大样品的接触电阻, V_{12} , V_{13} , V_{14} 和 V_{34} 则分别表示在 i_{12} 时, 电极 1 和 2, 1 和 3, 1 和 4 以及 3 和 4 之间的电压。

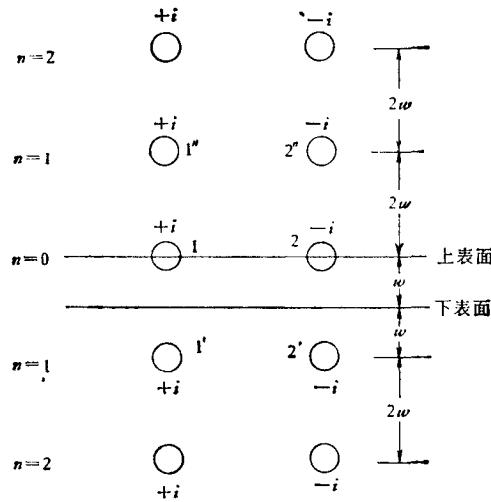


图 2

1) 如果接触半径 a 足够小, 则 $V_f = \frac{\rho i}{2\pi a} \sin^{-1} \frac{a}{r} \approx \frac{\rho i}{2\pi a} \cdot \frac{a}{r} = \frac{\rho i}{2\pi r}$, 这就是通常点接触的情况。

如果样品不是无限厚,而是有一定厚度的薄片,则上式必须进行修正.

如图 2 所示,厚度为 w 的薄片底部是一绝缘界面,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 $2'$ 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 中只画出开始几个映象). 把这些映象都考虑进去,就有

$$R'_{12} = \frac{V'_{12}}{i_{12}} = R_{c_1} + R_{c_2} + \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{12} - a_1} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{12} - a_2} \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{2nw} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{2nw} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{\sqrt{(s_{12} - a_1)^2 + (2nw)^2}} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{12} - a_2)^2 + (2nw)^2}} \right] \right\}, \quad (6)$$

$$R'_{13} = \frac{V'_{13}}{i_{12}} = R_{c_1} + \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \left[\frac{\pi}{2a_1} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{13} - a_1} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{12} - a_2} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{23} - a_2} \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{2nw} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{\sqrt{(s_{13} - a_1)^2 + (2nw)^2}} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{12} - a_2)^2 + (2nw)^2}} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{23} - a_2)^2 + (2nw)^2}} \right] \right\}, \quad (7)$$

$$R'_{14} = \frac{V'_{14}}{i_{12}} = R_{c_1} + \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \left[\frac{\pi}{2a_1} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{14} - a_1} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{12} - a_2} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{24} - a_2} \right] + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{2nw} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{\sqrt{(s_{14} - a_1)^2 + (2nw)^2}} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{12} - a_2)^2 + (2nw)^2}} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{24} - a_2)^2 + (2nw)^2}} \right] \right\}, \quad (8)$$

$$R'_{34} = \frac{V'_{34}}{i_{12}} = \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \left[\frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{13} - a_1} - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{s_{14} - a_1} + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{24} - a_2} - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{s_{23} - a_2} \right] \right\}$$

$$\begin{aligned}
& + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{\sqrt{(s_{13} - a_1)^2 + (2n\omega)^2}} \right. \\
& - \frac{1}{a_1} \sin^{-1} \frac{a_1}{\sqrt{(s_{14} - a_1)^2 + (2n\omega)^2}} \\
& - \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{23} - a_2)^2 + (2n\omega)^2}} \\
& \left. + \frac{1}{a_2} \sin^{-1} \frac{a_2}{\sqrt{(s_{24} - a_2)^2 + (2n\omega)^2}} \right] \}. \quad (9)
\end{aligned}$$

式中带撇的符号表示样品不是无限厚而是厚为 ω 的大薄片的值。

当 $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = a$, 且 $s_{12} = s_{13} = s_{24} = s_{34} = s$ 时, $s_{14} = s_{23} = \sqrt{2}s$, $R_{11} = R_{22} = R_c$, 这时 (2)–(5) 式变为

$$R_{12} = 2R_c + \frac{\rho}{\pi a} c_{12}, \quad (10)$$

$$R_{13} = R_{24} = R_c + \frac{\rho}{\pi a} c_{13}, \quad (11)$$

$$R_{14} = R_{23} = R_c + \frac{\rho}{\pi a} c_{14}, \quad (12)$$

$$R_{34} = \frac{\rho}{\pi a} c_{34}. \quad (13)$$

这里

$$c_{12} = \frac{\pi}{2} - \sin^{-1} \frac{a}{s - a}, \quad (14)$$

$$c_{13} = \frac{\pi}{4} - \sin^{-1} \frac{a}{s - a} + \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{a}{\sqrt{2}s - a}, \quad (15)$$

$$c_{14} = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \sin^{-1} \frac{a}{\sqrt{2}s - a}, \quad (16)$$

$$c_{34} = \sin^{-1} \frac{a}{s - a} - \sin^{-1} \frac{a}{\sqrt{2}s - a}. \quad (17)$$

而 (6)–(9) 式则变为

$$R'_{12} = 2R_c + \frac{\rho}{\pi a} c'_{12}, \quad (18)$$

$$R'_{13} = R'_{24} = R_c + \frac{\rho}{\pi a} c'_{13}, \quad (19)$$

$$R'_{14} = R'_{23} = R_c + \frac{\rho}{\pi a} c'_{14}, \quad (20)$$

$$R'_{34} = \frac{\rho}{\pi a} c'_{34}. \quad (21)$$

此处

$$c'_{12} = c_{12} + F_{12}, \quad c'_{13} = c_{13} + F_{13}, \quad c'_{14} = c_{14} + F_{14}, \quad c'_{34} = c_{34} + F_{34},$$

$$F_{12} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin^{-1} \frac{a/w}{2n} - \sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} \right], \quad (22)$$

$$F_{13} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin^{-1} \frac{a/w}{2n} - 2 \sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} + \sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\sqrt{2} \frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} \right], \quad (23)$$

$$F_{14} = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin^{-1} \frac{a/w}{2n} - \sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\sqrt{2} \frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} \right], \quad (24)$$

$$F_{34} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} - \sin^{-1} \frac{a/w}{\sqrt{\left(\sqrt{2} \frac{s}{w} - \frac{a}{w}\right)^2 + (2n)^2}} \right]. \quad (25)$$

这里对样品的厚度 w ，四个金属电极的大小 a 和它们之间的距离 s 有一定的要求。

表 1

s/w		0.2	0.5	1	2	5	10
$\frac{a}{w} = 0.02$	F_{12}	0.00010	0.00067	0.00251	0.00754	0.01994	0.03183
	F_{34}	0.00011	0.00065	0.00200	0.00405	0.00577	0.00635
$\frac{a}{w} = 0.04$	F_{12}	0.00015	0.00123	0.00484	0.01488	0.03976	0.06359
	F_{34}	0.00020	0.00127	0.00398	0.00812	0.01158	0.01273
$\frac{a}{w} = 0.06$	F_{12}	0.00018	0.00169	0.00700	0.02201	0.05945	0.09528
	F_{34}	0.00027	0.00185	0.00594	0.01221	0.01742	0.01912
$\frac{a}{w} = 0.08$	F_{12}	0.00017	0.00206	0.00899	0.02895	0.07901	0.12691
	F_{34}	0.00032	0.00239	0.00786	0.01632	0.02329	0.02554
$\frac{a}{w} = 0.10$	F_{12}		0.00235	0.01081	0.03568	0.09846	0.15848
	F_{34}		0.00289	0.00976	0.02046	0.02919	0.03197
$\frac{a}{w} = 0.20$	F_{12}		0.00268	0.01754	0.06633	0.19392	0.31544
	F_{34}		0.00478	0.01873	0.04145	0.05920	0.06443
$\frac{a}{w} = 0.30$	F_{12}			0.02068	0.09207	0.28656	0.47114
	F_{34}			0.02667	0.06296	0.09007	0.09742
$\frac{a}{w} = 0.40$	F_{12}			0.02081	0.11299	0.37659	0.62587
	F_{34}			0.03331	0.08498	0.12187	0.13095
$\frac{a}{w} = 0.50$	F_{12}				0.12921	0.46421	0.77992
	F_{34}				0.10745	0.15466	0.16503

由(14)式知 $s \geq 2a$, 但若 $s = 2a$, 则 $R_{12} = 2R_c$, 这是不合理的. 所以必须要 $s > 2a$. 再看(22)式, 又要求 $\frac{a}{w} \leq 2$.

从(10)–(13)式和(18)–(21)式中分别任意组合两式, 即可求出接触电阻 R_c , 从而可得接触电阻率 ρ_c . 例如由(10)和(13)式可得

$$\rho_c = R_c \pi a^2 = \frac{\pi a^2}{2} \left(R_{12} - R_{34} \frac{c_{12}}{c_{34}} \right). \quad (26)$$

由(18)和(21)式可得

$$\begin{aligned} \rho_c &= R_c \pi a^2 = \frac{\pi a^2}{2} \left(R'_{12} - R'_{34} \frac{c'_{12}}{c'_{34}} \right) \\ &= \frac{\pi a^2}{2} \left(R'_{12} - R'_{34} \frac{c_{12} + F_{12}}{c_{34} + F_{34}} \right). \end{aligned} \quad (27)$$

修正因子 F_{12} 与 F_{34} 经计算机计算后的结果列于表 1, 并绘制成图 3 和图 4 的曲线.

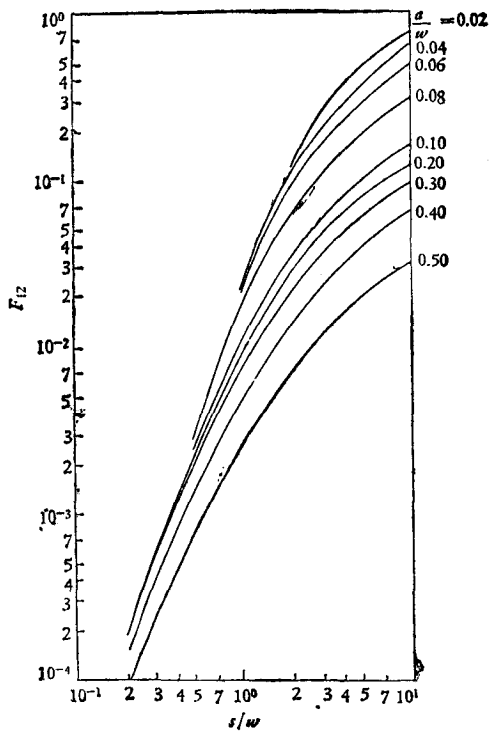


图 3

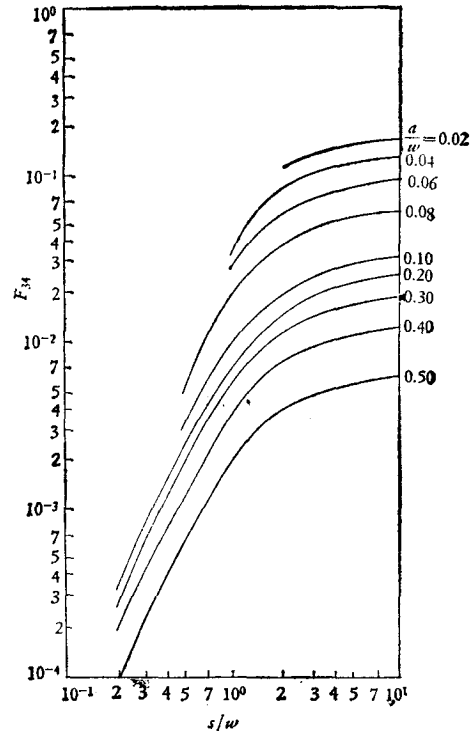


图 4

用电阻率为 $(5-6) \times 10^{-3} \Omega \text{cm}$ 的 P 型 $\langle 111 \rangle$ 抛光硅单晶片, 经蒸 Al、光刻等平面工艺后, 制成半径 $a = 50 \mu\text{m}$ 的四点结构阵列进行测量, 所得结果列于表 2. 表中 ρ_c 的值有两列, 12–34 表示用 R'_{12} 和 R'_{34} 相组合而得的结果, 而 13–34 则表示用 R'_{13} 和 R'_{34} 组合的结果. 与文献 [7] 报道的 $0.005 \Omega \text{cm}$ 电阻率的 P 型硅蒸上 Al 后的接触电阻率 ρ_c 为 $5.2 \times 10^{-3} \Omega \text{cm}^2$ 的结果相一致.

表 2

样品几何参数(μm)	ρ (Ωcm)	$\rho_c(\Omega\text{cm}^2)$	
		12—34	13—34
$a = 50; w = (313-323);$	$(5.03-5.68) \times 10^{-3}$	$(5.21-6.58) \times 10^{-3}$	$(5.60-5.91) \times 10^{-3}$
$s_2 = 1400;$			
$s_{13} = s_{24} = 1500;$	$\bar{\rho}$	$\bar{\rho}_c$	
$s_{14} = s_{23} = \sqrt{s_{12}^2 + s_{13}^2} = 2051.83$	5.32×10^{-3}	5.85×10^{-3}	5.77×10^{-3}

本方法不仅适用于 Si, 对 Ge, GaAs 和 InP 等半导体材料同样适用。

参 考 文 献

- [1] H. H. Berger, *J. Electrochem. Soc.*, **119** (1972), 507.
- [2] H. H. Berger, *Solid-Stat. Electron.*, **15** (1972), 145.
- [3] 陈存礼、范仁永, *半导体学报*, **4**(1983), 502.
- [4] G. K. Reeves, *Solid-Stat. Electron.*, **23** (1980), 487.
- [5] 陈存礼, *半导体学报*, **4**(1983), 191.
- [6] P. J. Severin and H. Bulle, *J. Electrochem. Soc.*, **122** (1975), 133.
- [7] 平间 恒, *电子技术(日)*, **22**(1980), 118.

SPECIFIC CONTACT RESISTANCE OF METAL-BULK SEMI- CONDUCTOR—FOUR-POINT CONFIGURATION MODEL

CHEN CUN-LI

(Department of Physics, Nanjing University)

ABSTRACT

In this paper, a method to measure the specific contact resistance ρ_c of M-S bulk sample—the four-point configuration model—is presented. The location of four circular metal electrodes is arbitrary and the equations for specific contact resistance ρ_c have been derived. It is shown that if the sample is not semi-infinite but has a definite thickness, the equation must be modified with some correction factors. According to this model, we carried out some measurements and calculations, the results are in good agreement with that of reference [7].