

微波无损法测半导体材料电阻率

王宗欣 赵蕙芬 胡鸣华

(复旦大学物理系)

1981年1月5日收到

1. 计算方法

采用介质波导作为微波传输线测量样品的电阻率时, 可将样品放在两根介质波导之间, 如图1所示, 可不必将样品切割成一定的形状, 且由于介质波导的截面尺寸比样品小得多, 因此可以较方便地确定同一块材料上不同部位电阻率的差异。

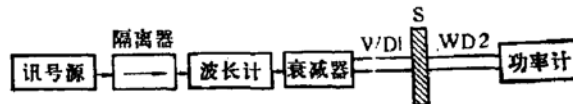


图 1

注: WD ——介质波导 S ——样品

此时系统的总透射系数的模数 $|T|$ 可由下式求得:

$$|T|^2 = \frac{(4k_z |\gamma_s|)^2}{A_1^2 \exp(2\alpha l) + A_2^2 \exp(-2\alpha l) - 2A_1 A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + 2\beta l)} \quad (1)$$

其中: l 为样品的厚度,

$$A_1 = \alpha^2 + (\beta + k_z)^2,$$

$$\varphi_1 = \text{tg}^{-1} \frac{2\alpha(\beta + k_z)}{\alpha^2 - (\beta + k_z)^2},$$

$$A_2 = \alpha^2 + (k_z - \beta)^2,$$

$$\varphi_2 = \text{tg}^{-1} \frac{2\alpha(\beta - k_z)}{\alpha^2 - (\beta - k_z)^2},$$

$$|\gamma_s| = \sqrt{\alpha^2 + \beta^2},$$

式中 α 为电磁波透过样品时的衰减常数, β 为相位常数. 它们与样品电导率 σ_s 的关系为:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2} (\sqrt{\omega^2\epsilon_s^2 + \sigma_s^2} - \omega\epsilon_s)}, \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2} (\sqrt{\omega^2\epsilon_s^2 + \sigma_s^2} + \omega\epsilon_s)}, \quad (3)$$

k_z 为介质波导中电磁波在 Z 方向的传播常数, 若矩形介质波导由高介电常数材料制成 ($\epsilon_d \gg 1$), 则当其以 E_{10}^y 模单模工作时, Z 方向传播常数 k_z 由下式算得:

$$k_z^2 = k_d^2 \left[1 - \frac{\pi^2}{(k_d a + 2)^2} - \left(\frac{\pi n_d^2}{n_d^2 k_d b + 2} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

其中 $k_d = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_d$, n_d 为介质波导材料的折射率.

a 、 b 分别为介质波导截面 X 、 Y 方向的边长.

令 A 为放入样品后功率衰减分贝数, 即插入损耗,

$$\text{则} \quad A = 10 \log \frac{1}{|T|^2} \text{ (dB)}. \quad (5)$$

$$\text{令} \quad \lambda_s = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_s}}.$$

λ_s 为电磁波在待测样品中的波长.

则当待测样品的厚度 $l > \frac{\lambda_s}{4}$ 时可用 (1)–(5) 式算出不同介电常数 ϵ_s 、不同电导率 σ_s 以及不同厚度 l 的透射系数模数 $|T|$, 并以此作成图表, 在测试时可从相应的图表中得知材料的电导率 σ_s .

当 $l < \frac{\lambda_s}{4}$ 时, 可以认为待测的介质薄片插入介质波导之间后, 工作模式仅受微扰, 但仍以 E_y^0 模在此薄片传输, 此时在薄片中的传播常数 $\beta = k_{zs}$, k_{zs} 由下式计算:

$$k_{zs}^2 = k_s^2 \left[1 - \frac{\pi^2}{(k_s a + 2)^2} - \left(\frac{n_s^2 \pi}{n_s^2 k_s b + 2} \right)^2 \right]. \quad (6)$$

其中 $k_s = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_s$, n_s 为待测材料的折射率.

于是仍可由 (1)–(5) 式算得薄的待测片的电导率 σ_s 与 $|T|$ 的关系. 但由于在计算时 (6) 式中仅考虑了薄片尺寸为 $a \times b$ 部份的影响, 薄片其他部份的影响可由测试结果中加一修正因子来表示. 通过上述计算测得的一些样品的电阻率与通常的四探针法测试结果进行比较, 证明上述计算方法基本上是可取的.

2. 测试结果及修正方法

将一些硅材料的测试结果和四探针法相比较, 见表 1. 其中 0.5mm 薄片在测试值后加进的修正因子为 0.2db.

使用该系统还可以直接观察同一基片上各部份电阻率的差异, 图 2 就是一个例子. 由图 2 可见在电阻率为 10–20 $\Omega \cdot \text{cm}$ 时, 整个系统的分辨能力为 0.1 $\Omega \cdot \text{cm}$. 由实验估计

表 1 微波法测电阻率与四探针法测试值比较

样品厚度 (mm)	5	3	2.8	2.8	2.8	2.8	2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
四探针法 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	11.2	17	61	42	29.5	8.1	23	50.5	40.3	32.4	19.1	15.7	12.7	7.8	4.88
微波法 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	9.5	14.2	60	38	26	7.1	17.5	50	41	34	17	15.5	12.5	8.2	5.5

得,被测部位与边缘距离大于 5mm 时,由边缘影响引进的误差小于 $0.1\Omega \cdot \text{cm}$ 。

系统稳定性的测试 反复测试同一样品的约同一部位 50 次,其结果列于表 2,所用测试基片与图 2 相同,由于此样品均匀性较差,给重复性测试带来一定的影响。

上述方法的测试精度与被测样品电阻率的范围、样品厚度有关,就其测试范围而言,对厚度为 0.3—0.5 mm 的薄片,其测试范围为 $0.5\Omega \cdot \text{cm}$ — $100\Omega \cdot \text{cm}$,要测高电阻率的薄片需要稳幅的讯号源和精密刻度的标准衰减器;而低于 $0.1\Omega \cdot \text{cm}$ 的薄片,可由测反射系数 R 来算得。厚度为 2—5mm 的样品,测试范围为 1 — $200\Omega \cdot \text{cm}$,即测高电阻率的样品,所选的厚度应大些。

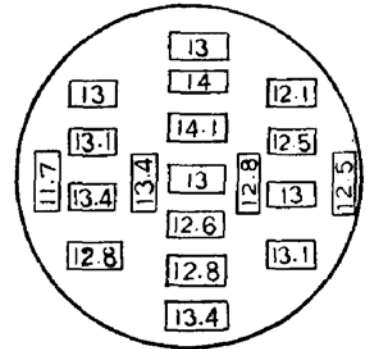


图 2 3mm 厚硅材料片(直径 40mm)上电阻率差异测试

表 2 重复性测试结果

电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)	13.9	14	14.1	14.2	14.3	14.4
测得次数	2	11	14	22	1	0

厚度为非整数时的修正方法 当使用已给厚度(整数)的 σ_s 、 A 图表时,可由下式进行修正:

$$\frac{d}{dl} \left| \frac{1}{T} \right|^2 = \frac{A_1^2 \alpha \exp(2\alpha l) - A_2^2 \alpha \exp(-2\alpha l) + 2A_1 A_2 \beta \sin(\varphi_1 - \varphi_2 + 2\beta l)}{8k_z^2 |r_s|^2} \quad (7)$$

如 $l = 3.1\text{mm}$ 厚的样品由实验测得 $A = 1.4\text{dB}$,并由图 3 中 $l = 3\text{mm}$ 的曲线查得

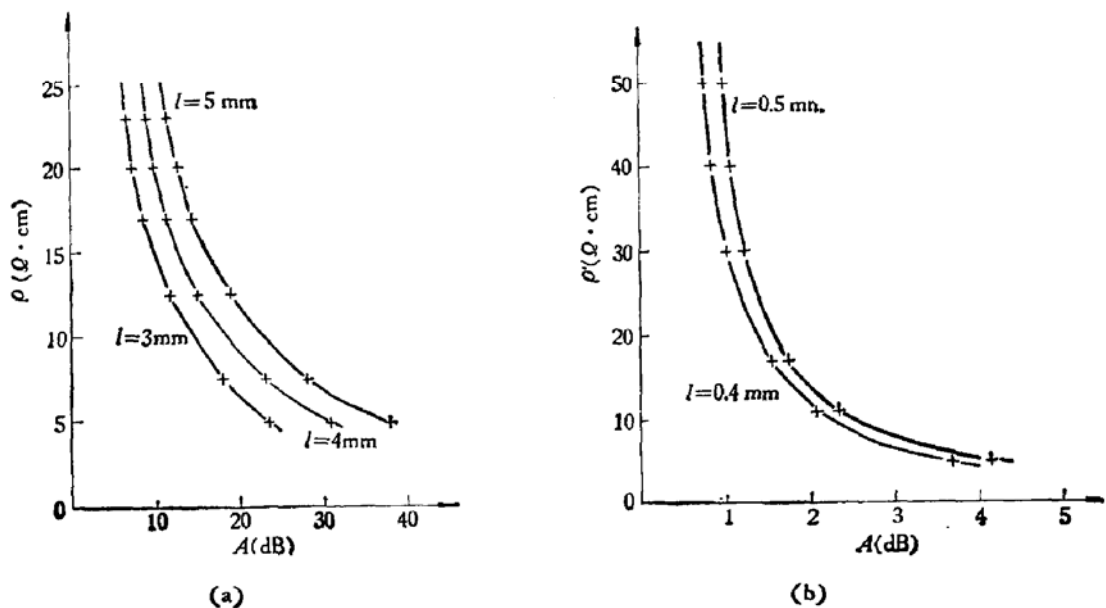


图 3

相应的电阻率 $\rho_s = 11\Omega \cdot \text{cm}$, 由 $a = 8.25\text{mm}$, $b = 4\text{mm}$, $f = 12.5\text{GHz}$ 时算得:

$$\frac{d \left| \frac{1}{T} \right|^2}{dl} = 21743(\text{m}^{-1}).$$

即当 $dl = 0.1\text{mm}$ 时, $d \left| \frac{1}{T} \right|^2 = 2.17$, 所以

$$A' = 10 \log \left(\frac{1}{|T|^2} - d \frac{1}{|T|^2} \right) = 13.6\text{dB}.$$

于是仍由图 3 中 $l = 3\text{mm}$ 的曲线查得 $A' = 13.6\text{dB}$ 时对应的电阻率 $\rho_s = 11.4\Omega \cdot \text{cm}$, 所以厚度偏差 $\frac{\Delta l}{l} = 3.3\%$ 时, 电阻率测试值的偏差 $\frac{\Delta \rho_s}{\rho_s} = 3.6\%$. 同样由计算可知, 当厚度为 3.5mm 时, 则可由 $l = 3\text{mm}$ 或 $l = 4\text{mm}$ 曲线中的任一条进行修正, 其结果是相近的.

本工作得到包宗明同志的很大帮助, 特此致谢.

参 考 文 献

- [1] J. Musil, F. Zaack, A. Burger and J. Karlovsky, European Microwave Conference, p. 66. (1974).
 [2] E. A. J. Marcatili, *Bell Syst. Tech. J.*, 48, 2071 (1969).

Non-destructive Measurement of Resistivity by Microwave

Wang Zongxin, Zhao Huifen and Hu Minghua

(Department of Physics, Fudan University)