

# 实验一 四探针法测电阻率

## 引言

电阻率是反映半导体材料导电性能的重要参数之一。测量电阻率的方法很多，四探针法是一种广泛采用的标准方法。它的优点是设备简单操作方便，精确度高，对样品的形状无严格要求。

本实验的目的是：掌握四探针测试电阻率的原理、方法和关于样品几何尺寸的修正，并了解影响测试结果的因素。

## 原理

在一块相对于探针间距可视为半无穷大的均匀电阻率的样品上，有两个点电流源 1、4。电流由 1 流入，从 4 流出。2、3 是样品上另外两个探针的位置，它们相对于 1、4 两点的距离分别为  $r_{12}$ 、 $r_{42}$ 、 $r_{13}$ 、 $r_{43}$ ，如图 1 所示。在半无穷大的均匀样品上点电流源所产生的电力线具有球面对称性，即等势面为一系列以点电流源为中心的半球面，如图 2 所示。

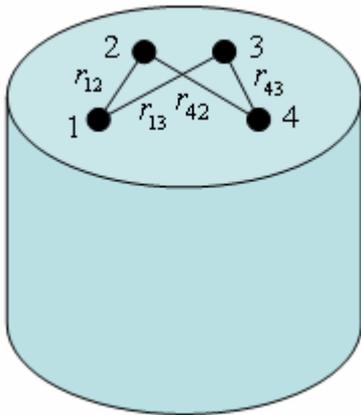


图 1 位置任意的是探针

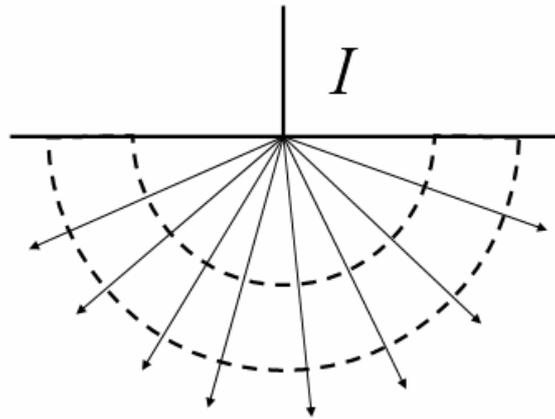


图 2 半无穷大样品上点电流源的半球等势面

若样品电阻率为  $\rho$ ，样品电流为  $I$ ，则在离点电流源距离为  $r$  处的电流密度  $J$  为：

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (1)$$

又根据

$$J = \frac{\varepsilon}{\rho} \quad (2)$$

其中， $\varepsilon$  为  $r$  处的电场强度，有 (1)、(2) 式得

$$\varepsilon = \frac{I\rho}{2\pi r^2} \quad (3)$$

根据电场强度和电势梯度得关系及球面对称性可得

$$\varepsilon = -\frac{dV}{dr}$$

取  $r$  为无穷远处得电势  $V$  为零，则有

$$\int_0^{V(r)} dV = \int_{\infty}^r -\varepsilon dr$$

$$V(r) = \frac{I\rho}{2\pi} \frac{1}{r} \quad (4)$$

式(4)代表一个点电流源对距  $r$  处点的点势的贡献。在图 1 的情况, 2、3 两点的电势应为 1、4 两个相反极性的电电流源的共同贡献, 即:

$$V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{42}} \right) \quad (5)$$

$$V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{43}} \right) \quad (6)$$

2、3 两点的电势差为

$$V_{23} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{42}} - \frac{1}{r_{13}} + \frac{1}{r_{43}} \right)$$

由此可以得出样品的电阻率为:

$$\rho = \frac{2\pi V_{23}}{I} \left( \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{42}} - \frac{1}{r_{13}} + \frac{1}{r_{43}} \right) \quad (7)$$

这就是利用四探针法测量电阻率的普遍公式。只需测出流过 1、4 探针的电流; 2、3 探针间的电势差  $V_{23}$  以及四根探针之间的距离, 就可利用 (7) 式求出样品的电阻率。

最常用的是直线型四探针。四根探针的针尖在同一直线上, 并且间距相等, 都是  $S$ , 见图 3 所示。

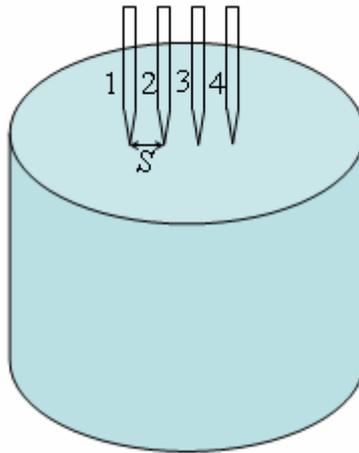


图 2 直线型四探针

此时公式 (7) 变为

$$\rho = 2\pi S \frac{V_{23}}{I} \quad (8)$$

以上公式是在半无穷大样品的基础导出的。实际上只要样品厚度及边缘与探针之间的最近距离大于 4 倍探针间距, (8) 式就具有足够的精确度。若此条件不满足就需进行修正。修正后的计算公式为:

$$\rho = \frac{2\pi S}{B_0} \frac{V_{23}}{I} \quad (9)$$

式中  $B_0$  为修正系数，已有人对一些常用的样品情况对  $B_0$  的数值作了计算，列表以供查找。

通常选择电流

$$I = \frac{2\pi S}{B_0} \times 10^{-3}$$

由 (9) 式知，这时  $V_{23} \times 10^3$  就是电阻率的数值。电流  $I$  要选择适当。电流太小，检测电压有困难；电流太大会由于非平衡载流子注入或发热引起电阻率降低。

半导体材料的电阻率随温度变化很灵敏。例如电阻率为  $10 \text{ cm}$  的硅单晶，当温度从 23 上升到 28 时，其电阻率大约增加 4%。因此必须在样品达到热平衡的情况下进行测试，并记录测试温度。

对于高阻半导体样品，光电导效应和探针与半导体形成金—半肖特基接触的光生伏特效应可能严重地影响电阻率测试结果，因此对于高阻样品，测试时应该特别注意避免光照。

对于热电材料，为了避免温差电动势对测量的影响，一般采用交流两探针法测电阻率。

在半导体器件生产中，通常用四探针法来测量扩散层的薄层电阻。在 p 型或 n 型单晶衬底上扩散的 n 型杂质或 p 型杂质形成 pn 结。由于反向 pn 结的隔离作用，可将扩散层下面的衬底视作绝缘层，因而可由四探针法测出扩散层的薄层电阻  $R_s$ ，当扩散层的厚度  $< 0.53S$ ，并且晶片面积相对于探针间距可视作无穷大时，样品薄层电阻为

$$R_s = \frac{\pi V}{\ln 2 I} \quad (10)$$

若不能将晶片的面积视作无穷大，也需要对 (10) 式进行修正，修正系数见列表，包括单面扩散和双面扩散的情况。

扩散层的薄层电阻  $R_s$  不仅和扩散层的厚度（即扩散结深  $x_j$ ）有关，而且和扩散层中的杂质浓度分布  $N(x)$  有关，其关系如下：

$$R_s = \frac{1}{\int_0^{x_j} N(x) q \mu dx} \quad (11)$$

其中  $q$  为电子电荷， $\mu$  为扩散层中多数载流子的迁移率。对于不同的扩散条件外， $N(x)$  具有不同的分布方式，通常有高斯分布和余误差分布两种。可由测得的扩散层薄层电阻  $R_s$ 、扩散结深  $x_j$  及衬底杂质浓度  $N_0$ ，再根据实际的扩散条件确定出的杂质浓度分布力式便可算出扩散层的表面杂质浓度。实际工作中，已将薄层电阻、结深、衬底浓度、表面杂质浓度的关系绘制成图表。由测得的扩散层薄层电阻、结深和衬底杂质浓度可以很方便地查出扩散层的表面杂质浓度。这对半导体器件的生产有重要指导意义。

## 实验方法

测试装置如图 4 所示。它包括三个主要部分：四探针探头；电流可调的直流恒流源；电压测试仪。下面分别对此三部分进行说明。

1. 四探针探头 探头的四根探针等距离地排在一直线上。探针针尖的曲率半径为 25—50  $\mu\text{m}$ ，探针间距要固定(通常为 1mm 左右)，游移度要小。为了使探针和样品形成较好的欧姆接触，减少非平衡载流子的注入，探针和被测样品之间加一定压力(每根探针压力为 100—200 克重)，探针要用导电性能好的硬质、耐磨金属制成，并要求探针与待测半导体材料有较低的接触电势差，通常可用钨、碳化钨、钨钽合金、合金钢等作为探针材料。探针之间电绝缘性能要好。

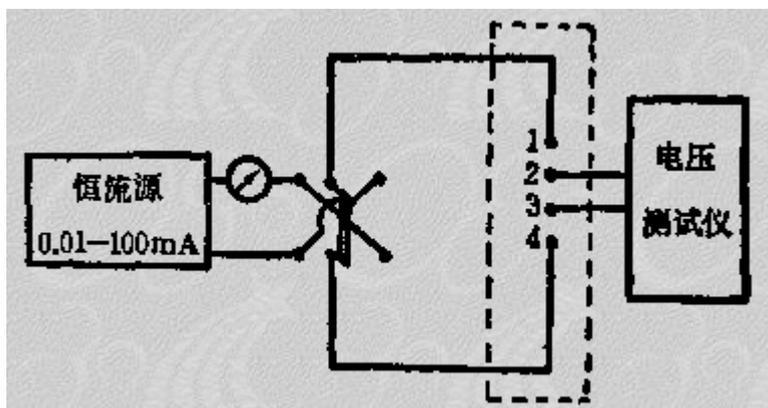


图 4 四探针测试装置示意图

2. 恒流源 所谓恒流源就是指电源内阻很大，流出来的电流大小与负载电阻变化无关的电源。最简单的恒流源就是普通的电源输出端串联一个大电阻。日前常用运算放大器来构成恒流源。

3. 电压测试仪 由于探针很尖，探针和样品接触时探针和样品之间的电阻很大，为了避免它对测试的影响，通常用电位差计或高内阻数字电压表来测量 2, 3 两探针间的电位差，对样品不同的电阻率范围需选用不同型号的电位差计和检流计。电位差计测试范围是  $10^{-4}\text{V} - 1\text{V}$ 。

另外还需有一个温度计，测量环境温度。

## 实验步骤

1. 按原理连接测试线路。
2. 用金钢砂研磨样品，获得新鲜磨毛的测试平面，以使探针针和样品实现较好的欧姆接触。
3. 对所给样品用四探针测试电阻率(改变电流方向求平均值)，用千分尺及读数显微镜测量样品的尺寸及探针离开样品边缘的最近距离，由此对测试结果给予适当的修正，记下测试时的环境温度。
4. 改变测试电流并观察电流过大会造成什么后果。
5. 观察光照对不同电阻率样品测试结果的影响。
6. 对单晶衬底上扩散型号相反的杂质的扩散层进行测试。

## 实验结果

1. 进行电阻率的计算及修正。
2. 对比样品电流不同时测试结果的变化，并讨论测试时样品电流选择的原则。
3. 试分析不同电阻率样品测试时光照的影响。
4. 根据样品尺寸及扩散情况计算扩散层薄层电阻。

## 思考题

1. 能否用四探针法测量 $n/n^+$ 外延片及 $p/p^+$ 外延片外延层的电阻率?
2. 能否用四探针法测量 $n/p$ 外延片外延层的电阻率?
3. 为什么测量单晶样品电阻率时测试平面要求为毛面, 而测试扩散片扩散层薄层电阻时测试面可为镜面?

附录:

几种不同几何形状样品的四探针修正系数, 测试不同电阻率样品时所需电流数值, 硅和锗单晶的电阻率温度系数随样品室温电阻率的变化和样品导电类型的判断, 请参考“孙恒慧, 包宗明, 半导体物理实验, 高等教育出版社, 1985”的 30-38 页。

来源: 孙恒慧, 包宗明, 半导体物理实验, 高等教育出版社, 1985