

## 实验 11 四探针法测量半导体电阻率和薄层电阻

### 【实验目的】

1. 理解四探针方法测量半导体电阻率和薄层电阻的原理；
2. 学会用四探针方法测量半导体电阻率和薄层电阻；
3. 针对不同几何尺寸的样品，了解其修正方法；
4. 了解影响测量结果准确性的因素及避免方法。

### 【仪器用具】

KDY-1 型四探针电阻率/方阻测试仪，p 型单晶硅棒（电阻率样品）、p 型单晶硅片（薄样品）和 p 型硅基底上的 n 型扩散片（薄层电阻样品）各一个，一台计算机。

### 【原理概述】

#### 1. 半导体材料体电阻率的测量

##### 1.1 半无穷大样品的情形

在电阻率分布均匀的半无穷大样品表面上，若电流  $I$  通过探针以点电流源的形式注入到半导体材料内部，则电流密度在材料内部是均匀分布的，具体是以探针尖为球心沿径向放射状分布。图 1 给出了半无穷大样品表面上点电流源  $I$  注入到样品内部的电流密度分布。由图 1 可知，距离点电源  $r$  处的电流密度可表示为：

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

根据欧姆定律，我们有  $J = \sigma E = \frac{E}{\rho}$  (2)

式中， $\sigma$  和  $\rho$  分别是材料的电导率和电阻率， $E$  是  $r$  处的电场强度。由(1)和(2)式不难看出电场强度  $E$  也具有球对称分布。

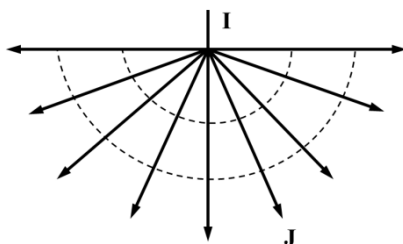


图 1 电流  $I$  以点电流源注入到半无穷大样品内部的电流密度分布

根据电场分布的球对称性以及电场  $E$  与电势  $V$  的关系，我们有

$$E = -\frac{dV}{dr} \quad (3)$$

取距离电流源无穷远处的电势为零，则距离电流源  $r$  处的电势可表示为

$$\int_0^{V(r)} dV = -\int_{\infty}^r E dr \Rightarrow V(r) = -\int_{\infty}^r \frac{\rho I}{2\pi r^2} dr = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad (4)$$

上式给出了半无穷大样品上距离点电流源  $r$  处的电势  $V(r)$  与探针电流  $I$  和样品电阻率  $\rho$  的关系式。

四探针法测量半导体材料体电阻率采用四根金属探针排成一列，并且四根金属探针的间距相等，均为  $S$ ，如图 2 所示。将四根金属探针压在一块半无穷大的半导体材料表面上，当 1、4 探针通以电流  $I$ （探针 1 为正极，探针 4 为负极），则 2、3 探针上测得的电压  $V_{23}$  可表示为

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{12}} - \frac{1}{r_{42}} \right) - \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{r_{13}} - \frac{1}{r_{43}} \right) = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{S} - \frac{1}{2S} - \frac{1}{2S} + \frac{1}{S} \right) = \frac{I\rho}{2\pi S} \quad (5)$$

进一步，半无穷大样品的体电阻率  $\rho$  可表示为：

$$\rho = 2\pi S \cdot \frac{V_{23}}{I} \quad (6)$$

由(6)式可知，只需测出 1、4 探针流过的电流  $I$ ，2、3 探针上测得的电压  $V_{23}$ ，以及探针间距  $S$ ，就可以由(6)式计算出半无穷大半导体材料的电阻率  $\rho$ 。(6)式虽然是在假定半无穷大样品的基础上推导出的公式，实际上，只要样品厚度及边缘与探针的最近距离大于四倍探针间距( $4S$ )，利用上式计算样品的电阻率就有足够的精度。如果该条件不满足，则可以使用包含修正因子  $B_0$  的公式来计算电阻率：

$$\rho = \frac{2\pi S}{B_0} \cdot \frac{V_{23}}{I} \quad (7)$$

对于各种常见的样品形状， $B_0$  的取值参见附录 1。

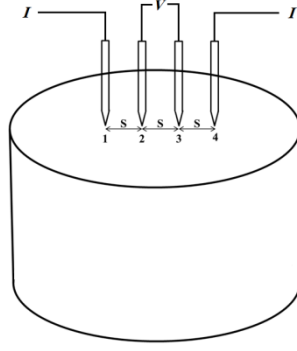


图 2 直线排列四探针测试半无穷大样品的电阻率的方法示意图

### 1.2 无穷大薄样品的情形

我们把厚度  $d$  远小于探针间距  $S$  而横向尺寸无穷大的样品称为无穷大薄样品。与点电源注入到半无穷大样品时电流密度呈球对称均匀分布不同，点电源注入到无穷大薄样品时电流密度呈柱对称均匀分布，如图 3 所示。类似前面的分析，点电流源  $I$  在距离  $r$  处形成的电场强度可表示为：

$$E = \frac{J}{\sigma} = \rho \cdot J = \frac{\rho I}{2\pi r d} \quad (8)$$

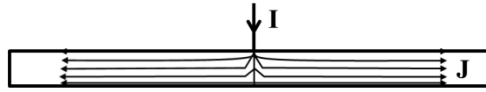


图 3 电流  $I$  以点电流源注入到无穷大薄样品内部的电流密度分布

取距离电流源 1 米处的电势为零，则距离电流源  $r$  处的电势可表示为

$$\int_0^{V(r)} dV = -\int_1^r E dr \Rightarrow V(r) = -\int_1^r \frac{\rho I}{2\pi r d} dr = -\frac{\rho I}{2\pi d} \ln r \quad (9)$$

上式给出了厚度为  $d$  的无穷大薄样品上距离点电流源  $r$  处的电势  $V(r)$  与探针电流  $I$  和样品电阻率  $\rho$  的关系式。

图 4 给出了用四探针测量无穷大薄样品电阻率的示意图。如图所示，与测量厚样品使用的测量方法相似，四根金属探针排成一列，且间距相等，均为  $S$ 。将四根金属探针压在无穷大薄样品表面上，当 1、4 探针通以电流  $I$ （探针 1 为正极，探针 4 为负极），则 2、3 探针上测得的电压  $V_{23}$  可表示为

$$V_{23} = V_2 - V_3 = \frac{I\rho}{2\pi d} (\ln r_{42} - \ln r_{12}) - \frac{I\rho}{2\pi d} (\ln r_{43} - \ln r_{13}) = \frac{I\rho}{2\pi d} \left( \ln \frac{r_{42} \cdot r_{13}}{r_{12} \cdot r_{43}} \right) = \frac{I\rho}{2\pi d} \ln 4 \quad (10)$$

进一步，无穷大薄样品的体电阻率  $\rho$  可表示为：

$$\rho = \frac{2\pi d V_{23}}{I \ln 4} = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{V_{23}}{I} \quad (11)$$

由(11)式可知，只需测出 1、4 探针流过的电流  $I$ ，2、3 探针上测得的电压  $V_{23}$ ，以及样品厚度  $d$ ，就可以由(11)式计算出无穷大薄样品的体电阻率  $\rho$ 。注意：对于无穷大薄样品，电阻率与探针间距  $S$  无关。

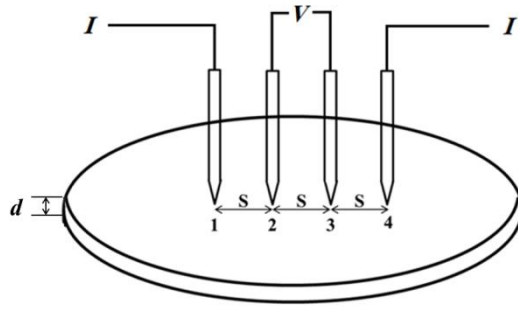


图 4 直线排列四探针测试薄样品的电阻率的方法示意图

## 2. 半导体薄层电阻（或方块电阻）的测量

四探针法除了可以测量硅片、硅锭等体材料的电阻率外，还可用来测量扩散层及外延层的薄层电阻。由于反向 PN 结的隔离作用，扩散层下的衬底可视为绝缘层，所以，四探针法可测量 P 型衬底上的 N 型薄层或者 N 型衬底上的 P 型薄层（即扩散片）的薄层电阻。所谓薄层电阻又称为方块电阻，是指表面为正方形的半导体薄层在电流方向上所呈现的电阻，如图 5 所示。如果扩散片的结深用  $x_j$  表示，根据定义，方块电阻  $R_{sq}$  可表示为：

$$R_{sq} = \rho \frac{L}{L \cdot X_j} = \frac{\rho}{X_j} \quad (12)$$

方块电阻的单位为  $\Omega/\square$ 。如果绝缘衬底上的半导体薄层的厚度为  $d$ ，根据(12)式，薄层电阻可表示为：

$$R_{sq} = \frac{\rho}{d} \quad (13)$$

将计算无穷大薄样品的体电阻率  $\rho$  的(11)式代入上式可得

$$R_{sq} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{V_{23}}{I} = 4.5324 \frac{V_{23}}{I} \quad (14)$$

实际中，只要薄层的厚度小于  $0.5S$ ，并且样品面积相对于探针间距  $S$  可视为无穷大时，就可以利用(14)式计算薄层电阻。如果不能将样品的横向面积视为无穷大，也需要使用包含修正因子  $B_0$  的公式来计算方块电阻：

$$R_{sq} = B_0 \frac{V_{23}}{I} \quad (15)$$

相应地，结深为  $x_j$  的扩散薄层的体电阻率可表示为：

$$\rho = R_{sq} \cdot X_j = B_0 \frac{V_{23}}{I} X_j \quad (16)$$

对于单面扩散样品的薄层电阻的修正系数  $B_0$  的取值参见附录 2。

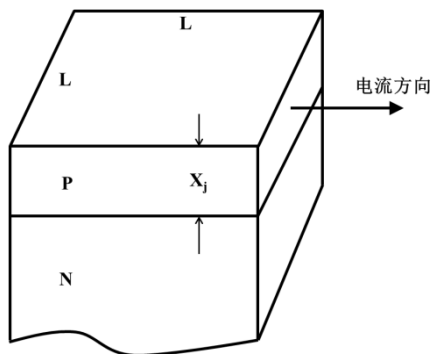


图 5 薄层电阻（或方块电阻）是指表面为正方形的半导体薄层在电流方向所呈现的电阻

## 【实验装置介绍】

### 1. 概述

KDB-1 型四探针电阻率/方块电阻测试仪（以下简称电阻率测试仪）是用来测量半导体材料（主要是硅单晶、锗单晶、硅片）电阻率，以及扩散层、外延层、ITO 导电薄膜、导电聚合物薄膜方块电阻的测量仪器。图 6 给出了 KDB-1 型电阻率测试仪的外观照片，它主要由测试主机（包括机箱、前面板和后面板）、测试架及四探针探头组成。前面板上装有电流表、电压表、电流调节电位器、恒流源开关及各种功能选择开关，后面板上装有电源开关、电阻率/方块电阻测试切换开关、四探针探头接口、计算机接口以及保险管等。

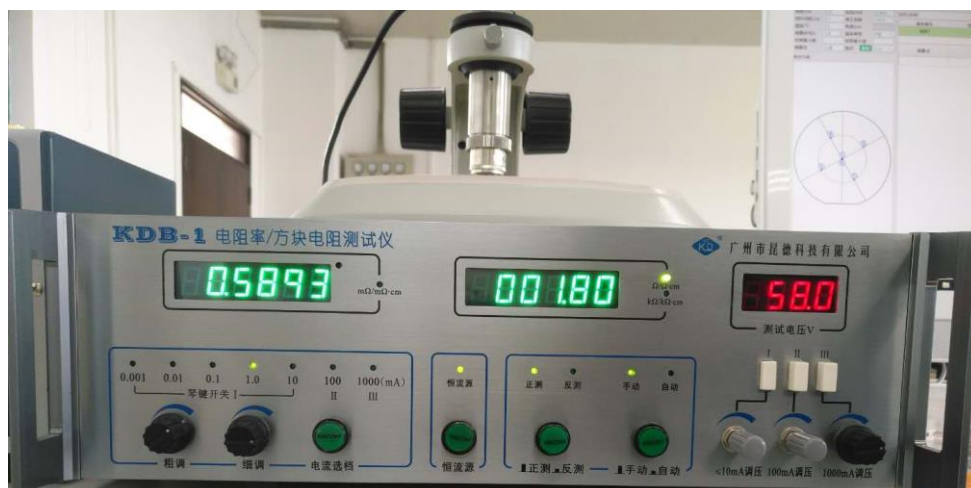


图 6 KDB-1 型四探针电阻率/方块电阻测试仪的外观照片

测试仪采用恒流源给 1、4 探针提供稳定的测量电流  $I$ ，2、3 探针测量电压  $V_{23}$ 。对于厚度及边缘与探针之间的最短距离大于 4 倍探针间距 ( $d > 4S$ ) 的样片或晶圆 (相当于半无穷大样品)，可使用(6)式 (即  $\rho = 2 \pi S V_{23} / I$ ) 直接计算样品的电阻率  $\rho$ ，无需进行厚度或直径等修正。对于本实验所用的 KDB-1 型电阻率测试仪，其探针的间距  $S = 1\text{mm} = 0.1\text{cm}$ ，由(6)式可知，如果测试电流选择  $0.628\text{mA}$ ，则电压表上显示的数值 (单位为  $\text{mV}$ ) 就是样品的电阻率值 (单位为  $\Omega \cdot \text{cm}$ )。

对于厚度及边缘与探针之间的最短距离小于 4 倍探针间距 ( $d < 4S$ ) 的硅晶圆 (或锗晶圆) 样片，生产实践中人们通常采用国家标准 GB/T1552-1995《硅锗单晶电阻率测定直排四探针法》对硅晶圆 (或锗晶圆) 的电阻率测试结果进行有限厚度和尺寸的修正。具体地说，人们常采用下面的公式来计算硅晶圆 (或锗晶圆) 的电阻率：

$$\rho = \frac{V_{23}}{I} \cdot d \cdot F_{SP} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D) \quad (17)$$

式中  $V_{23}$  是探针 2、3 测得的电压值 (单位  $\text{mV}$ )， $I$  是探针 1、4 上的电流值 (单位  $\text{mA}$ )， $d$  是被测样片的厚度 (单位  $\text{cm}$ )， $F_{SP}$  是探针间距修正系数， $F(d/S)$  是中心点测量时的厚度修正系数 (参见附录 3)， $F(S/D)$  是中心点测量时的直径修正系数 (参见附录 4)。需要强调的是，(17) 式与附录 3 和附录 4 的表格是一起使用的。

对于样品边缘与探针之间的最短距离大于 4 倍探针间距 ( $d > 4S$ ) 的扩散片，此时样品可以看成是无穷大薄样品，由计算无穷大薄样品方块电阻的式 (14) (即  $R_{sq} = \pi V_{23} / (I \cdot \ln 2)$ ) 可知，只要选取电流  $I = 3.14 / \ln 2 = 4.5324\text{mA}$ ，就可以从电压表上直接读出样品的方块电阻。需要说明的是，测量薄层电阻 (或方块电阻) 时，记得将后面板上的电阻率/方块电阻 ( $\rho / R$ ) 测试切换开关拨到  $R$  一侧。

对于厚度及边缘与探针之间的最短距离小于 4 倍探针间距 ( $d < 4S$ ) 的扩散片，也需要利用附录 3 和附录 4 中的厚度和直径修正系数对测试结果进行修正，具体的计算公式为：

$$R_{sq} = \frac{V_{23}}{I} \cdot F_{SP} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D) \quad (18)$$

同样，(18) 式也是与附录 3 和附录 4 的表格一起使用的。一般情况下， $F_{SP} = 1$ 。如果导电层非常薄，厚度修正系数  $F(d/S) = F(0) = 1$  (见附录 3)，如果样品横向面积很大，此时样品可以看成是无穷大薄样品，由计算无穷大薄样品方块电阻的式 (14) (即  $R_{sq} = \pi V_{23} / (I \cdot \ln 2)$ ) 可知，此时直径修正因子  $F(S/D) = F(0) = 3.14 / \ln 2 = 4.5324$  (见附录 4)。

需要强调的是，半导体材料的电阻率对温度的变化很灵敏，因此，测试材料的电阻率时必须记录测试的环境温度，最好对实测的电阻率进行温度修正，即将某一温度测得的电阻率修正到标准温度 23℃时的电阻率，电阻率的温度修正公式如下：

$$\rho_{23} = \frac{\rho_T}{F_T} \tag{19}$$

式中， $\rho_{23}$  是样品在标准温度 23℃时的电阻率， $\rho_T$  是样品在温度 T 时的电阻率， $F_T$  是样品的温度修正系数。附录 5 给出了单晶硅电阻率的温度修正系数表。

2. 使用方法

2.1 测试电流档位的选择

该测试仪一共提供了 1 μA、10 μA、100 μA、1mA、10mA、100mA、1000mA 七种恒定测试电流。电流档的选择采用循环步进式的选择方式，每按一次“电流选择按钮”，电流档位不断地在各档位间切换。需要说明的是，仪器通电后电流档自动设定在常用的 1mA 档。当探头接触上样品后，不断按下“电流选择按钮”，电流档只能在 1mA、10mA、100mA、1000mA 之间循环，此时要想选到 0.1mA、0.01mA、0.001mA 档，就必须关掉恒流源开关或者抬起四探针探头使之不与样品接触。表 1 列出了测试不同方块电阻或者电阻率的样品应该选择的测量电流值。如果样品的电阻率或方块电阻未知，需要从最小档测试电流测起，逐步加大测试电流，切勿从大档位电流开始测。

表 1 测试不同方块电阻或者电阻率的样品所需选择的测量电流参考值

测量电流选择（按红表下方琴键开关）	≤10mA					100mA	1000mA
按电流选档开关（使灯在所选档亮）	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
方阻测量范围 Ω/□	10 <sup>5</sup> ~10 <sup>6</sup>	10 <sup>3</sup> ~10 <sup>4</sup>	200~2500	20~250	2~25	0.01~0.1	0.0001~0.001
电阻率测量范围 Ω·cm	10 <sup>4</sup> ~10 <sup>5</sup>	10 <sup>2</sup> ~10 <sup>3</sup>	20~250	2.0~25	0.2~2.5	0.001~0.01	0.00001~0.0001
电流调节	测方阻：4.5324 mA；测薄片电阻率：根据片厚选测试电流（详见附表）						

电流表的读数方法如下：电流表显示 1.0000 时为本档满档电流，在 0.01mA 档显示：

1.0000，表示电流为： $0.01\text{mA} \times 1.0000 = 0.01\text{mA}$ 。在 0.01mA 档显示：0.6282，表示电流为： $0.01\text{mA} \times 0.6282 = 0.006282\text{mA}$ 。

### 2.2 测试电压档位的选择

如图 6 所示，仪器的电流档与电压档配对使用， $1\ \mu\text{A}$ —10mA 五个电流档对应操作  $\leq 10\text{mA}$  调压，100mA 对应于 100mA 调压，1000mA 对应于 1000mA 调压。在确定了测试电流档之后，选择与之匹配的测试电压（位于面板右边的红表）：旋转琴键开关下对应的旋钮，调节到所需测试电压  $V$ 。表 2 列出了与不同测试电流对应的测试电压调节范围。

表 2 不同测试电流对应的测试电压范围

$\leq 10\text{mA}$	100mA	1000mA
12V~80V	8V~36V	8V~15V

### 2.3 电阻率和方块电阻的直接读取

如图 6 所示，当探针头压在样品上时，前面板上靠左侧的两块显示绿字的主表（简称绿表）都会显示数值，此时单位灯亮的绿表上显示的数值为样品的电阻率或方块电阻值，而另一块单位灯不亮的绿表上显示的数值为测量电流的大小。当要直读电阻率时（其前提是机身后面板的转换开关必须拨到  $\rho$  处），需要根据样品厚度  $d$  和探针间距  $S$ （本实验使用的测试仪的探针间距为  $0.1\text{cm}$ ）来确定下一步操作：如果  $d > 4S$ ，则将电流表调至  $I = 2\pi S = 0.628\text{mA}$ ，就可从电压表上直接读取出样品的电阻率值（单位为  $\Omega \cdot \text{cm}$ ）；如果  $d \leq 4S$ ，需要根据样品厚度和探针间距查电流选择表（见附录 6），譬如样品的厚度为  $0.62\text{mm}$ ，由附录 6 查到的电流为 02781，将电流表调至  $I = 0.2781\text{mA}$ ，就可从电压表（单位指示灯亮的那块绿表）上直接读取出样品的电阻率值，哪个单位的指示灯亮就代表当前是哪个单位生效。

当要直读方块电阻（其前提是机身后面板的转换开关必须拨到  $R$  处）时，将测试电流调到  $4.5324\text{mA}$ ，就可从电压表（单位指示灯亮的那块绿表）上直接读取出样品的方块电阻值，哪个单位的指示灯亮就代表当前是哪个单位生效。

### 2.4 测试电压 $V_{23}$ 的读取

事实上，利用附录 6（电阻率直读电流选择表）直接根据样品厚度和探针间距选择出合适的测试电流，然后直接从电压表上读出电阻率值虽然方便快捷，但是，应用范围有很大限制，譬如附录 6 给出的表格只适用于半无穷大的硅片（硅片直径  $\geq 100\text{mm}$ ）。利用四探针电阻率/方块电阻测试仪对半导体材料进行测试时最常用的方法还是根据表 1 选择好测试电流，根据表 2 选择合适的测试电压，然后读取电压表（单位指示灯亮的那块绿表）上的  $V_{23}$



值。然后，利用(6)式或(7)式或(11)式或(17)式计算电阻率，利用(14)式或(15)式或(18)式计算方块电阻。

因为该仪器档位比较广，共分为 7 档，在不同档位下前面板上靠左侧的两块显示绿字的主表（简称绿表）的功能有所不同，具体地说，当在 0.001mA、0.01 mA、0.1 mA、1 mA、10 mA 五个档时，从左往右数第二块表代表电压表，读取电压  $V_{23}$  时要注意该表测得的真实的电压值的小数点固定在两位小数之前，譬如表上显示（忽略小数点的位置）01000，则真实电压读数为 10.00mV，以此类推。当在 100 mA、1000 mA 两个档时，从左往右数第一个表代表电压表，读取电压  $V_{23}$  时要注意该表测得的真实的电压值的小数点固定在三位小数之前，譬如表上显示（忽略小数点的位置）10000，则真实电压为 10.000mV；如显示 08620，则真实电压读数为 8.620mV，以此类推。

厂家之所以把“作为电压表的数字表设置为小数点位置随着档位的不同而不同”，是为了满足用户在不使用测试软件的情况下可以通过查表设置测试电流然后直读电阻率或方块电阻值。直读的测量结果虽然没有经过精确修正，但是仍可满足对测量精度没有特别严格要求的一般用户的需求。

## 2.5 配合专用 KDY 测试软件测量

该软件有“单组合四探针测圆片电阻率”、“单组合四探针测棒块电阻率”和“单组合四探针测薄层方块电阻”等功能，所谓单组合是指读取两个电压  $V_{23}$ 、 $V_{32}$  进行计算，是比较通用的测试方法。圆片是指厚度小于四倍探针间距（4S）的样品；薄层是指扩散层、外延层、离子注入层、化学气相沉积或其它制备工艺在绝缘衬底上制备的薄膜；棒块是指厚度大于四倍探针间距（4S）的样品；方片是指样品长度比其宽度和厚度大的多的长方形，且厚度小于或等于探针间距的样品（该公式对样品的要求严格，请谨慎使用）。测量方式有“单组合双向”、“正向”和“反向”三种，选择“单组合双向”就会分别读取正向和反向两个电压即  $V_{23}$  和  $V_{32}$ ，选择“正向”只读取  $V_{23}$  电压，选择“反向”只读取  $V_{32}$  电压。



图 7 KDY 测量软件输入参数界面照片

如图 7 所示，需要在软件界面的左侧输入以下参数：

- ①样品厚度（单位是厘米）：当鼠标停留在编辑框时会显示可输入范围；当单组合四探针测薄层方块电阻时，需要输入厚度（对于扩散片而言薄层厚度就是结深  $x_j$ ），如果厚度无法测量，请输入最小值 0.004 即可，因为当厚度足够小时，厚度修正系数约为 1，可忽略不计。
- ②测试电流：根据测试仪上电流表读数来填写。只需要选择合适的电流档位，调节旋钮，将电压表（单位指示灯亮的那块绿表）上的值调至 10mV 左右（该电压是国际、国家标准推荐的值），在软件操作界面上输入此时的电流值。注意：由于样品电阻率大小的不同，有时可能选用哪个电流档位都不能将电压调至 10mV 左右，此时就将电压调至最接近 10 即可。
- ③探针间距：对于本测试仪，探针间距  $S=0.1\text{cm}$ 。
- ④修正系数：为探针间距的修正系数。
- ⑤温度：测量样品时的环境温度，当鼠标停留在编辑框时会显示可输入范围。
- ⑥宽度（单位是厘米）：选择单组合测方片时需要填写。
- ⑦测量时间（单位是秒）：取正向、反向电压的间隔时间。可根据不同电阻率样品电压的稳定时间来选择，高阻时电压稳定时间长。
- ⑧晶体类型：分为 N 型和 P 型，根据样品的导电类型进行选择。
- ⑨结果最小值：设定电阻率或方块电阻的下限值，如果测量数据低于此设定值则报警提示。
- ⑩结果最大值：设定电阻率或方块电阻的上限值，如果测量数据高于此设定值则报警提示。
- ⑪直径：单组合测圆片时需要选择圆片的直径大小，该直径为国际标准 SEMI MF81 上直径修正表上提供的标准直径，有 2in, 4in, 100mm, 125mm, 150mm, 200mm 和 300mm 以及“其

他”几种选项，其中“其他”为标准直径之外的直径大小，其他直径适用于直径小于 2in 的圆片的中心点测量，可根据实际情况自行填写。

输入以上参数后，就可以进行测量。软件可自动对测试结果进行厚度、直径、探针间距等的修正。需要说明的是，在使用 KDY 测试软件进行测量之前，需要将探针压到样片的中心位置处，而且主机前面板上的“手动/自动”选择开关要切换到“自动”模式。此外，使用 KDY 测试软件进行测量时可以直接进行电阻率或者方块电阻的测量，无需把仪器后面板的  $\rho/R$  开关拨到相应的位置。

## 2.6 正测、反测

由于样品具有不均匀性，在测量时可在同一点分别进行正向和反向测量，然后对正向和反向测量的结果取平均值结果会更准确。如果使用 KDY 测试软件进行测量，只要用户选择了“双向”测量的模式，仪器会自动完成正向和反向测量。

## 3. 技术参数

### 3.1. 测量范围

方阻测量范围： $1 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^6 \Omega/\square$ ，最小分辨率  $1 \times 10^{-5} \Omega/\square$ ；

电阻率测量范围： $1 \times 10^{-6} \sim 2 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ ，最小分辨率  $1 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  或  $1 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ ；

### 3.2. 测试电压

1 $\mu$ A $\sim$ 10 mA 档：12 $\sim$ 80V 连续可调；

100mA 档：8 $\sim$ 36V 连续可调；

1000mA 档：8 $\sim$ 15V 连续可调。

### 3.3. 恒流源

该测试仪一共提供了 1  $\mu$  A、10  $\mu$  A、100  $\mu$  A、1mA、10mA、100mA、1000mA 七种恒定测试电流档位。以下是每种电流档位的输出电流范围：

1  $\mu$  A 电流档位的输出电流范围：0.2 $\mu$ A $\sim$ 1 $\mu$ A

10  $\mu$  A 电流档位的输出电流范围：2 $\mu$ A $\sim$ 10 $\mu$ A

100  $\mu$  A 电流档位的输出电流范围：20 $\mu$ A $\sim$ 100 $\mu$ A

1mA 电流档位的输出电流范围：0.2mA $\sim$ 1mA

10mA 电流档位的输出电流范围：2mA $\sim$ 10mA

100mA 电流档位的输出电流范围：20mA $\sim$ 100mA

1000mA 电流档位的输出电流范围：200mA~1000mA

### 3.4. 直流电压表

1μA~10mA 电流档下电压表的测量范围：0~199.99mV，分辨率：10μV；

100mA、1000mA 电流档下电压表的测量范围：0~19.999mV，分辨率：1μV。

### 【实验内容】

1. 测量 p 型硅棒横截面上五个位置处的电阻率，并计算电阻率分布的不均匀度。

打开 KDB-1 测试仪电源开关，仪器面板上的指示灯亮起，测试电流自动处于 1mA 档。使用游标卡尺测量硅棒的直径和厚度。将样品置于样品台上，旋转测试架上的手轮使探针头下降，与此同时，调整样品位置，使四根探针正好落在样品的测试点位置；当探针快要接触样品时，要缓慢旋转手轮，使探针缓慢轻压在样品上，以免损坏探针和样品；当听到主机传来“卡塔”一声、且前面板左侧的两块绿表（电流表和电压表）有数值显示，就说明探针与样品已接触好了，此时应立即停止旋转手轮。根据样品电阻率或方块电阻的分布范围和表 1 和表 2 推荐的测试电流和测试电压值，调解相应旋钮将测试电流和测试电压调节至合适的值（有时可能还需要切换电流档位），最终使测量  $V_{23}$  的电压表上出现尽可能多的有效数字，且电压值在测试电流不变的前提下能长时间保持稳定，记录此时的测试电流值和电压  $V_{23}$  值，由相应公式计算出电阻率或方块电阻，当然前提是背面板上的  $\rho/R$  开关要事先拨到相应位置。测量完毕，升起探针头，取走样品。

如图 8 所示，我们选取硅棒横截面上五个位置（中心点，距离圆心 1/3 半径处的 4 个点）进行电阻率的测量，由于测试点位置处的厚度  $d$  和探针距边缘的距离  $L$  都超过 4 倍探针间距（对于本实验仪  $S=0.1\text{cm}$ ），因此只要测试电流选取  $I=2\pi S=0.628\text{mA}$ ，则电压表上显示的数值（单位为 mV）就是样品的电阻率值（单位为  $\Omega\cdot\text{cm}$ ），无需进行修正。

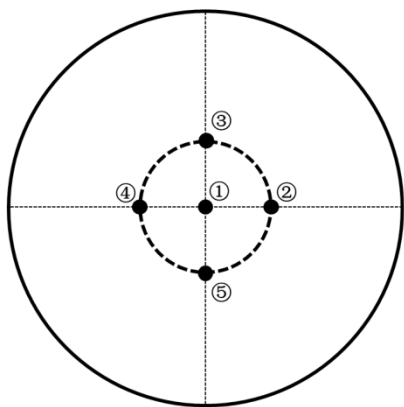


图 8 在硅棒横截面上的五个测试点的取法

为了减小测量误差，对同一点的测量分别进行正向和反向测量。采用下面的公式计算电阻率分布的不均匀度：

$$E = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\frac{1}{2}(\rho_{\max} + \rho_{\min})} \times 100\% \quad (20)$$

式中  $\rho_{\max}$  为所测五个点中电阻率的最大值， $\rho_{\min}$  为所测五个点中电阻率的最小值。此外，还要进行温度修正，根据附录 5 将测试结果修正到 23℃时的电阻率。

表 3 硅棒横截面上五个位置处的电阻率测试实验数据记录表

温度：		样品厚度：		样品直径：		
	测试电流/mA	正向电压/mV	反向电压/mV	电压平均值	电阻率 $\rho_T$	电阻率 $\rho_{23}$
位置①						
位置②						
位置③						
位置④						
位置⑤						
电阻率平均值：				电阻率不均匀度：		

2. 测量 p 型单晶硅片（薄样品）的电阻率。

使用螺旋测微器测量硅片的厚度  $d$ ，使用游标卡尺测量硅片的尺寸。由于我们准备的硅片近似为方形样品，取最短的边长作为硅片的直径  $D$ 。将探针压在硅片的中心位置处进行电阻率的测量。

方法一：根据附录 6 的电阻率  $\rho$  直读电流选择表设定合适的测试电流直接读出样品电阻率。

方法二：根据测试电流值和电压  $V_{23}$  值、硅片的有限厚度和尺寸，采用国家标准对测试结果进行修正，所使用的计算硅片电阻率的公式为：

$$\rho = \frac{V_{23}}{I} \cdot d \cdot F_{SP} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D) \quad (17)$$

式中探针间距修正因子  $F_{SP}$  取 1。同一位置的测量，正向和反向各测量一次。测量两个位置，第二次测量是在第一次测量完成之后将样品旋转 90°再测量一次。

表 4 硅片电阻率测试实验数据记录表

温度：	样品厚度 $d$ ：		样品直径 $D$ ：	
探针间距 $S$ ：	$d/S=$	$F(d/S)=$	$S/D=$	$F(S/D)=$

方法一：		测试电流：		直读电阻率：		
方法二	测试电流/mA	正向电压/mV	反向电压/mV	电压平均值	电阻率 $\rho_T$	电阻率 $\rho_{23}$
测量 1						
测量 2						
电阻率平均值：						

### 3. p 型硅基底上的 n 型扩散片的薄层电阻（或方块电阻）的测量

使用游标卡尺测量扩散片的尺寸，由于我们准备的扩散片近似方形样品，以最短的边长作为硅片的直径  $D$ 。将探针压在硅片的中心位置处进行方块电阻的测量。

方法一：不对测试结果进行厚度系数（此时厚度修正系数等于 1）和直径系数修正，将测试电流调到 4.5324 mA，从电压表（单位指示灯亮的那块绿表）上直接读取出样品的方块电阻值，哪个单位的指示灯亮就代表当前是哪个单位生效。

方法二：根据测试电流值、电压  $V_{23}$  值、扩散片的尺寸，采用国家标准对测试结果进行修正，所使用的计算扩散片方块电阻的公式为：

$$R_{sq} = \frac{V_{23}}{I} \cdot F_{SP} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D) \quad (18)$$

式中，厚度修正系数  $F(d/S)=F(0)=1$ （见附录 3）。直径修正系数  $F(S/D)$ 可由附录 4 的表格查得。一般情况下， $F_{SP}=1$ 。同一位置的测量，也是正向和反向各测量一次。同样测量两个位置，第二次测量是在第一次测量完成之后将样品旋转  $90^\circ$  再测量一次。

表 5 扩散片方块电阻测试实验数据记录表

温度：		样品结深： $X_j=d=1 \mu m$		样品直径 $D$ ：	
探针间距 $S=0.1cm$		$d/S=0$	$F(d/S)=1$	$S/D=$	$F(S/D)=$
方法一：		测试电流：		直读方块电阻：	
方法二	测试电流/mA	正向电压/mV	反向电压/mV	电压平均值	方块电阻
测量 1					
测量 2					
方块电阻平均值：					

### 4. 透明导电玻璃的薄层电阻（或方块电阻）的测量

本实验提供两种规格的透明导电玻璃供同学们测量方块电阻，一种是 FTO 导电玻璃，另一种是 ITO 玻璃，测试方法及要求与测试扩散片一致。

表 6 FTO 玻璃测试实验数据记录表

温度：		薄膜厚度：d=0.185 μ m		样品直径 D： 3cm	
探针间距 S=0.1cm		d/S=0	F(d/S)=1	S/D=	F(S/D)=
方法一：		测试电流：		直读方块电 阻：	
方法二	测试电流/mA	正向电压/mV	反向电压/mV	电压平均值	方块电阻
测量 1					
测量 2					
方块电阻平均值：					

表 7 ITO 玻璃测试实验数据记录表

温度：		薄膜厚度： d=1.2 μ m		样品直径 D： 3cm	
探针间距 S=0.1cm		d/S=0	F(d/S)=1	S/D=	F(S/D)=
方法一：		测试电流：		直读方块电 阻：	
方法二	测试电流/mA	正向电压/mV	反向电压/mV	电压平均值	方块电阻
测量 1					
测量 2					
方块电阻平均值：					

【注意事项】

利用四探针法测量样品电阻率时，需要注意以下事项：①取放样品时，应使用塑料镊子取放样品，避免用手直接接触样品，以免沾污样品。②对于晶体质量良好的单晶体材料（具有高的载流子寿命和迁移率），为了避免少子注入的影响，测试表面应适当打磨，以增加表面复合速度；对于扩散层或外延层的测试则无此必要，因为这种情况下的表面复合速度相对于薄的层厚度显然足够大。③对于高阻材料，由于光电导效应和探针与半导体接触形成的肖特基结的光生伏特效应可能会严重影响测量结果，测试应该在暗室中进行。④半导体材料的

电阻率对温度敏感，测试电流不宜过大，以防加热样品，使测量结果偏离实际值。此外，应使用温度系数修正将测得的电阻率折算到 23℃时的电阻率。⑤半无穷大样品是指样品厚度及探针距离边缘的最短距离远大于探针间距  $S$ ，一般要求大于  $4S$ ，如果这一条件不满足，必须使用含有修正系数的公式计算电阻率或方块电阻。

**【思考题】**

1. 电阻率和方块电阻的测量结果的误差来源有哪些？应如何避免？
2. 影响测量结果准确性的外界因素有哪些？应如何避免？

**【附录】**

1. 几种典型几何形状样品的体电阻率测试的四探针修正系数  $B_0$

**情形 1（四探针平行于样品边缘）：**样品为片状单晶，四探针针尖所连成的直线与样品的一个边界平行，探针与该边界的距离为  $L$ ，除样品厚度及该边界外，其余边界距探针的距离均可看作无穷远。



附表 1 情形 1（四探针平行于样品边缘）样品的修正系数  $B_0$  的取值

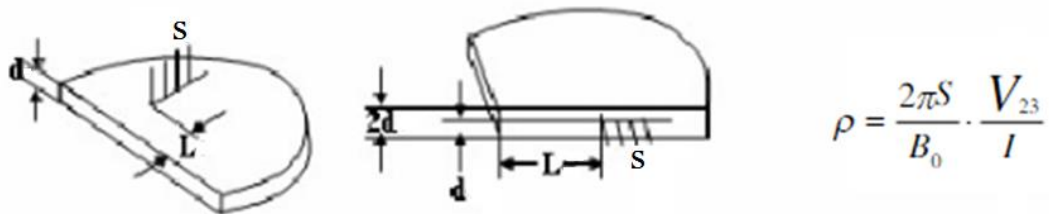
$s/d \backslash L/S$	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0
0.0	2.000	1.9661	1.8764	1.5198	1.1890	1.0379	1.0029	1.0004
0.1	2.002	1.97	1.88	1.52	1.19	1.040	1.004	1.0017
0.2	2.016	1.98	1.89	1.53	1.20	1.052	1.014	1.0094
0.5	2.188	2.15	2.06	1.70	1.35	1.176	1.109	1.0977
1.0	3.009	2.97	2.87	2.45	1.98	1.667	1.534	1.512
2.0	5.560	5.49	5.34	4.61	3.72	3.104	2.838	2.795
5.0	13.863	13.72	13.32	11.51	9.28	7.744	7.078	6.969
10.0	27.726	27.43	26.71	23.03	18.56	15.49	14.156	13.938

**备注：**（1）此表格适用于样品厚度  $d \geq 0.1S$ ，探针与边缘距离  $L \leq 10S$ 。（2）计算样品厚度  $d$ 、探针与边缘距离  $L$  与探针间距  $S$  的比值，如果计算结果不在表格中，应使用线性内插法计算



出与之对应的修正系数。

**情形 2（四探针垂直于样品边缘）：**样品为片状单晶，四探针针尖所连成的直线与样品的一个边界垂直，探针与该边界的最短距离为  $L$ ，除样品厚度及该边界外，其余边界距探针的距离均可看作为无穷远。

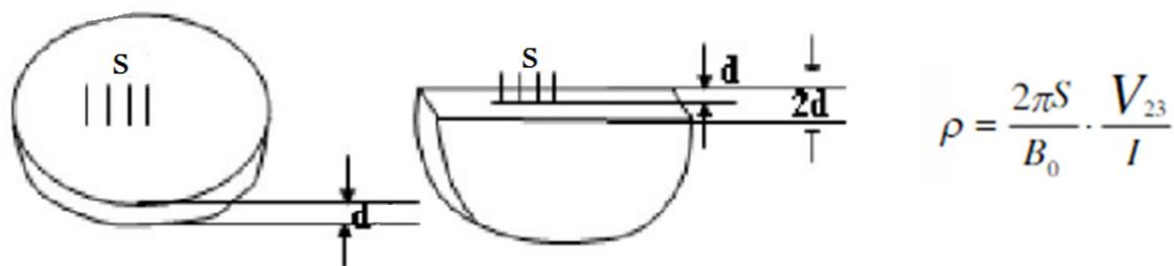


附表 2 情形 2（四探针垂直于样品边缘）样品的修正系数  $B_0$  的取值

$\begin{matrix} s/d \\ L/S \end{matrix}$	0	0.1	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0	10.0	$\infty$
0.0	1.4500	1.3330	1.2555	1.1333	1.0595	1.0194	1.0028	1.0005	1.0000
0.1	1.4501	1.3331	1.2556	1.1335	1.0597	1.0198	1.0035	1.0015	1.0009
0.2	1.4519	1.3352	1.2579	1.1364	1.0637	1.0255	1.0107	1.0084	1.0070
0.5	1.5285	1.4163	1.3476	1.2307	1.1648	1.1263	1.1029	1.0967	1.0939
1.0	2.0335	1.9255	1.8526	1.7294	1.6380	1.5690	1.5225	1.5102	1.5045
2.0	3.7236	3.5660	3.4486	3.2262	3.0470	2.9090	2.8160	2.7913	2.7799
5.0	9.2815	8.8943	8.6025	8.0472	7.5991	7.2542	7.0216	6.9600	6.9315
10.0	18.563	17.788	17.205	16.094	15.198	14.508	14.043	13.92	13.863

**备注：**(1) 此表格适用于样品厚度  $d \geq 0.1S$ ，探针与边缘距离  $L \leq \infty$ 。(2) 计算样品厚度  $d$ 、探针与边缘距离  $L$  与探针间距  $S$  的比值，如果计算结果不在表格中，应使用线性内插法计算出与之对应的修正系数。

**情形 3（薄样品）：**样品为片状单晶，除样品厚度外，样品尺寸相对于探针间距为无穷大。四探针垂直于样品表面测试，或者垂直于样品侧面测试。

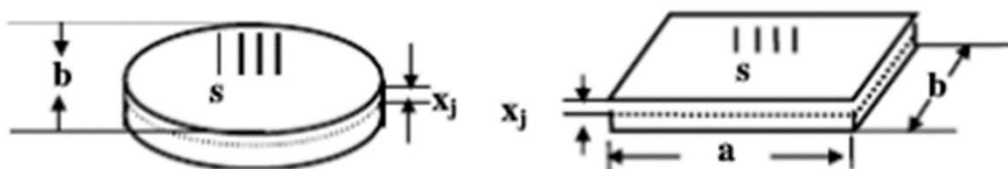


附表 3 情形 3（薄样品）样品的修正系数  $B_0$  的取值

S/d	$B_0$	S/d	$B_0$	S/d	$B_0$
0.1	1.0009	0.6	1.1512	1.2	1.7329
0.2	1.0070	0.7	1.2225	1.4	1.9809
0.3	1.0227	0.8	1.3062	1.6	2.2410
0.4	1.0511	0.9	1.4008	1.8	2.5083
0.5	1.0939	1.0	1.5045	2.0	2.7799
				2.5	3.4674

**备注:** (1) 此表格适用于样品厚度  $0.4S \leq d \leq 10S$ 。(2) 计算样品厚度  $d$  与探针间距  $S$  的比值, 如果计算结果不在表格中, 应使用线性内插法计算出与之对应的修正系数。

## 2. 单面扩散样品薄层电阻的修正系数 $B_0$



$$R_{sq} = B_0 \frac{V_{23}}{I} \quad ; \quad \rho = R_{sq} \cdot X_j = B_0 \frac{V_{23}}{I} X_j \quad ; \quad \frac{X_j}{S} < 0.5$$

附表 4 单面扩散样品薄层电阻的修正系数  $B_0$  取值表

b/S	圆	长方形			
		a/b=1	a/b=2	a/b=3	a/b $\geq$ 4
1.0				0.9988	0.9994
1.25				1.2467	1.2248
1.5			1.4788	1.4893	1.4893
1.75			1.7196	1.7238	1.7238
2.0			1.9454	1.9475	1.9475
2.5			2.3532	2.3541	2.3541

3.0	2.2662	2.4575	2.7000	2.7005	2.7005
4.0	2.9289	3.1137	3.2246	3.2248	3.2248
5.0	3.3625	3.5098	3.5749	3.5750	3.5750
7.5	3.9273	4.0095	4.0361	4.0362	4.0362
10.0	4.1716	4.2209	4.2357	4.2357	4.2357
15.0	4.3646	4.3882	4.3947	4.3947	4.3947
20.0	4.4364	4.4516	4.4553	4.4553	4.4553
40.0	4.5076	4.5120	4.5129	4.5129	4.5129
∞	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324	4.5324

备注: (1) 此表格适用于样品厚度  $0.4S \leq d \leq 10S$ 。(2) 计算样品厚度  $d$  与探针间距  $S$  的比值, 如果计算结果不在表格中, 应使用线性内插法计算出与之对应的修正系数。

3. 国家标准 GB/T1552-1995《硅、锗单晶电阻率测定直排四探针法》给出的中心点测量厚度修正系数表

$$\rho = \frac{V_{23}}{I} \cdot d \cdot F_{SP} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D)$$

附表 5 中心点测量厚度修正系数  $F(d/S)$  为圆片厚度  $d$  与探针间距  $S$  之比的函数

d/S	F(d/S)	d/S	F(d/S)	d/S	F(d/S)	d/S	F(d/S)
0.40	0.9993	0.60	0.9920	0.80	0.9664	1.0	0.921
0.41	0.9992	0.61	0.9912	0.81	0.9645	1.2	0.864
0.42	0.9990	0.62	0.9903	0.82	0.9627	1.4	0.803
0.43	0.9989	0.63	0.9894	0.83	0.9608	1.6	0.742
0.44	0.9987	0.64	0.9885	0.84	0.9588	1.8	0.685
0.45	0.9986	0.65	0.9875	0.85	0.9566	2.0	0.634
0.46	0.9984	0.66	0.9865	0.86	0.9547	2.2	0.587
0.47	0.9981	0.67	0.9853	0.87	0.9526	2.4	0.546
0.48	0.9978	0.68	0.9842	0.88	0.9505	2.6	0.510
0.49	0.9976	0.69	0.9830	0.89	0.9483	2.8	0.477
0.50	0.9975	0.70	0.9818	0.90	0.9460	3.0	0.448
0.51	0.9971	0.71	0.9804	0.91	0.9438	3.2	0.442
0.52	0.9967	0.72	0.9791	0.92	0.9414	3.4	0.399
0.53	0.9962	0.73	0.9777	0.93	0.9391	3.6	0.378
0.54	0.9958	0.74	0.9762	0.94	0.9367	3.8	0.359
0.55	0.9953	0.75	0.9747	0.95	0.9343	4.0	0.342
0.56	0.9947	0.76	0.9731	0.96	0.9318		

0.57	0.9941	0.77	0.9715	0.97	0.9293		
0.58	0.9934	0.78	0.9699	0.98	0.9263		
0.59	0.9927	0.79	0.9681	0.99	0.9242		

备注：(1)使用条件：圆形硅片，硅片厚度  $d \leq 4S$  的情况，中心点测量。(2)计算样品厚度  $d$  与探针间距  $S$  的比值，查出厚度修正系数  $F(d/S)$ 。如果计算出的  $d/S$  值不在表格中，应使用线性内插法计算出与之对应的  $F(d/S)$ 。

4. 国家标准 GB/T1552-1995《硅、锗单晶电阻率测定直排四探针法》给出的直径修正系数表

$$\rho = \frac{V_{23}}{I} \cdot d \cdot F_{SP} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D)$$

附表 6 直径修正系数  $F(S/D)$  为探针间距  $S$  与圆片直径  $D$  之比的函数

S/D	F(S/D)	S/D	F(S/D)	S/D	F(S/D)
0	4.5324	0.095	4.2039	0.19	3.45
0.005	4.5314	0.100	4.1712	0.195	3.4063
0.010	4.5284	0.105	4.1374	0.2	3.3625
0.015	4.5235	0.11	4.1025	0.21	3.2749
0.020	4.5167	0.115	4.0666	0.22	3.1874
0.025	4.508	0.12	4.0297	0.23	3.1005
0.030	4.4973	0.125	3.992	0.24	3.0142
0.035	4.4848	0.13	3.9535	0.25	2.9289
0.040	4.4704	0.135	3.9142	0.26	2.8445
0.045	4.4543	0.14	3.8743	0.27	2.7613
0.050	4.4364	0.145	3.8337	0.28	2.6793
0.055	4.4167	0.15	3.7926	0.29	2.5988
0.060	4.3954	0.155	3.7509	0.3	2.5196
0.065	4.3724	0.16	3.7089	0.31	2.4418
0.070	4.3479	0.165	3.6664	0.32	2.3656
0.075	4.3219	0.17	3.6236	0.33	2.2908
0.080	4.2944	0.175	3.5805	1/3	2.2662
0.085	4.2655	0.18	3.5372		
0.090	4.2353	0.185	3.4937		

备注：(1)使用条件：圆形硅片，硅片直径  $D \geq 3S$  的情况，中心点测量。(2)当  $S/D=0$  时，意味着样品横向面积很大，对于薄样品，厚度修正因子  $F(d/S)=F(0)=1$ （见附录 3），由计算无穷大薄样品电阻率的式 (11)（即  $\rho=\pi dV_{23}/(I \cdot \ln 2)$ ）可知，此时直径修正因子为  $F(S/D)=3.14/\ln 2=4.5324$ （见本表格）。对于厚样品，厚度修正因子  $F(d/S)=F(4)=0.342$ （见附录 3），由计算无穷大样品电阻率的式 (11)（即  $\rho=2\pi SV_{23}/I=0.5\pi dV_{23}/I$ ）可知  $F(d/S) \cdot F(S/D)=0.5 \times 3.14=1.57$ ，所以此时直径修正因子为  $F(S/D)=1.57 \div F(d/S)=1.57 \div 0.342=4.59 \approx 4.53$ （见本表格）。(3)当  $S/D=1/3$  时，最外侧的两个探针（即 1、4 探针）的间距正好等于硅片的直径，这是使用四探针能够测试的硅片的最小直径的极限情况。(4)附表 5 和附表 6 需一起使用。

5. 单晶硅电阻率的温度修正系数表

$$\rho_{23} = \frac{\rho_T}{F_T}$$

附表 7 单晶硅电阻率的温度修正系数表

<div><div>F<sub>T</sub></div><div>电阻率 ρ<sub>T</sub> (Ω·cm)</div><div>温度℃</div></div>	0.005	0.01	0.1	1	5~180	250~1000
10	0.9768	0.9969	0.9550	0.9097	≈0.9010	≈0.8921
12	0.9803	0.9970	0.9617	0.9232	≈0.9157	≈0.9087
14	0.9838	0.9972	0.9680	0.9370	≈0.9302	≈0.9253
16	0.9873	0.9975	0.9747	0.9502	≈0.9450	≈0.9419
18	0.9908	0.9984	0.9815	0.9635	≈0.9600	≈0.9585
20	0.9943	0.9986	0.9890	0.9785	≈0.9760	≈0.9751
22	0.9982	0.9999	0.9962	0.9927	≈0.9920	≈0.9919
23	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	≈1.0000	≈1.0000
24	1.0016	1.0003	1.0037	1.0075	≈1.0080	≈1.0083
26	1.0045	1.0009	1.0107	1.0222	≈1.0240	≈1.0249
28	1.0086	1.0016	1.0187	1.0365	≈1.0400	≈1.0415
30	1.0121	1.0028	1.0252	1.0524	≈1.0570	≈1.0581

6. 单晶硅片中心点测量电阻率 ρ 直读电流选择表（探针间距 0.1cm）

附表 8 单晶硅片中心点测量电阻率 ρ 直读电流选择表（探针间距 0.1cm）

<div><div>d</div><div>d</div><div>I</div></div>	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.1	00453	00498	00544	00589	00634	00680	00725	00770	00815	00861
0.2	00906	00951	00997	01042	01087	01133	01178	01223	01268	01314
0.3	01359	01404	01450	01495	01540	01586	01631	01676	01721	01767
0.4	01811	01857	01901	01947	01991	02036	02081	02126	02170	02215
0.5	02259	02304	02348	02392	02436	02479	02523	02567	02610	02653
0.6	02696	02739	02781	02824	02866	02907	02949	02990	03031	03072
0.7	03113	03153	03193	03233	03272	03311	03350	03388	03427	03464
0.8	03502	03539	03572	03612	03648	03684	03719	03754	03789	03823

0.9	03856	03890	03923	03956	03988	04020	04052	04083	04112	04144
$\begin{array}{c} d \\ d \quad I \end{array}$	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8					
1.00	04172	04697	05093	05378	05585					
2.00	05744	05850	05936	06007	06050					
3.00	06088	06117	06145	06164	06180					
4.00	06197									

备注：使用条件：硅片直径 $\geq 100\text{mm}$ ， $d \leq 4S$ ，中心点测量的情况。表中硅片的厚度  $d$  的单位

为 mm。 $\rho = \frac{V_{23}}{I} \cdot d \cdot F_{SP} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D)$ ；选择  $I = d \cdot F_{SP} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D)$ ，其中设  $F(S/D)=4.53$ ，

$F_{SP}=1.00$ ， $S=0.1\text{cm}$ 。