

实验 16 四探针法测量半导体电阻率和薄层电阻

【实验目的】

1. 了解四探针法测量半导体材料电阻率和薄层电阻的原理；
2. 学会用四探针法测量半导体材料的电阻率和薄层电阻；
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。

【实验原理】

1. 半导体材料体电阻率的测量

1.1 半无穷大样品的情形

将电流 I 以点接触的形式注入到电阻率分布均匀的半无穷大半导体样品，电流密度在材料内部将以接触点为球心沿径向分布，如图 1 所示。距离接触点 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

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

式中， σ 和 ρ 分别是材料的电导率和电阻率， E 是 r 处的电场强度。

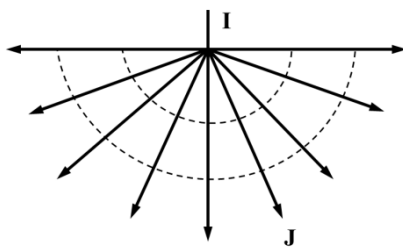


图 1 电流 I 以点接触的形式注入到半无穷大样品内部的电流密度分布

根据电场分布的球对称性以及电场强度 E 与电势 V 的关系，我们有

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

取距离点电源无穷远处的电势为零，则距离点电源 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源 r 处的电势 $V(r)$ 与探针电流 I 和样品电阻率 ρ 的关系式。

四探针法测量半导体材料的电阻率是将等间距一字排开的四根金属探针压在样品表面，

如图 2 所示，1、4 探针通电流（探针 1 为正极，探针 4 为负极），2、3 探针测电压。根据（4）式和电势叠加原理，2、3 探针上测得的电压 V_{23} 可表示为

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

式中， I 是流过 1、4 探针的电流强度， S 是探针间距。因此半无穷大样品的体电阻率 ρ 可写作

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

式中， ρ 以 $\Omega \cdot \text{cm}$ 为单位， S 以 cm 为单位，而 V_{23} 和 I 分别以 mV 和 mA 为单位。上式表明，只要测出流过 1、4 探针的电流强度和 2、3 探针之间的电压，就可以计算出半无穷大半导体样品的体电阻率。需要说明的是，虽然（6）式是在假设样品为半无穷大的基础上推导出来的，但是，当样品厚度和探针到样品边缘的最短距离均大于四倍探针间距（ $4S$ ）时，上式仍然成立。对于本实验，所使用的 KDB-1 型四探针电阻率/方块电阻测试仪的探针间距 $S=0.1\text{cm}$ ，所测的硅棒样品及测试点的位置均满足（6）式成立的条件，因此，可以根据实测的 I 和 V_{23} 利用（6）式计算硅棒样品的电阻率。此外，还可以把测试电流选取为 $I=2\pi S=0.628\text{mA}$ ，这样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 $\Omega \cdot \text{cm}$ ），这种方法也被称为直读法。显然，直读法的关键在于选取并使用正确的测试电流。

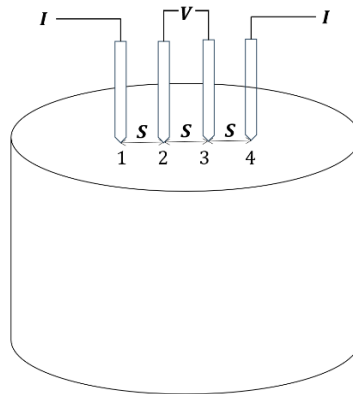


图 2 四探针法测量半无穷大样品电阻率的示意图

需要强调的是，半导体材料的电阻率对温度比较灵敏，因此，测试半导体材料的电阻率时不但要记录测试的环境温度，还要将该温度下的实测电阻率修正到 23°C 下的电阻率。电阻率的温度修正公式如下：

$$\rho_{23} = \frac{\rho_T}{F_T} \quad (7)$$

式中， ρ_{23} 是样品在 23°C 时的电阻率， ρ_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，可通过查附录 1 的表格得到。如果表格中没有包含实测温度，可通过线性插值法得到

与该温度对应的修正系数。

1.2 无穷大薄样品的情形

无穷大薄样品是指厚度 d 小于探针间距 S 而横向尺寸无穷大的样品。与点电源注入到半无穷大样品时电流密度呈球对称分布不同，点电源注入到无穷大薄样品时电流密度呈柱对称分布，如图 3 所示。类似于前面的分析，距离接触点 r 处的电场强度可表示为

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

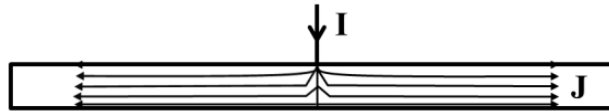


图 3 电流 I 以点接触的形式注入到无穷大薄样品内部的电流密度分布

取距离点电源 1 米处的电势为零，则距离点电源 r 处的电势可写作

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

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

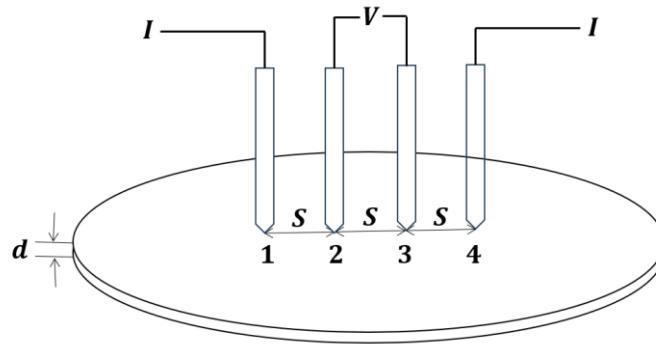


图 4 四探针法测量无穷大薄样品电阻率的示意图

与测试厚样品电阻率的方法类似，等间距一字排开的四根金属探针压在薄样品表面，如图 4 所示，1、4 探针通电流（探针 1 为正极，探针 4 为负极），2、3 探针测电压。根据（9）式和电势叠加原理，2、3 探针上的电压 V_{23} 可表示为

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

因此，无穷大薄样品的体电阻率 ρ 可写作

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

由上式可知，只要测出 1、4 探针流过的电流强度 I ，2、3 探针上的电压 V_{23} ，以及样品的厚度 d ，就可以利用(11)式计算出无穷大薄样品的体电阻率 ρ 。我们注意到，无穷大薄样品的电阻率与探针间距 S 无关，这是与厚样品电阻率计算公式不一样的地方。需要说明的是，虽然 (11) 式是在假设样品为无穷大的基础上推导出来的，但是，当探针到样品边缘的最短距离大于四倍探针间距 ($4S$) 时，上式仍然成立。此时的计算公式可写为

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \cdot \frac{V_{23}}{I} \approx 4.5324 \cdot \frac{V_{23}}{I} \cdot d \quad (12)$$

式中， d 是样品厚度，以 cm 为单位，而 V_{23} 和 I 分别以 mV 和 mA 为单位。

当样品的厚度不满足薄样品（譬如样品的厚度在 $0.4S$ 到 $4S$ 之间）或者探针到样品边缘的最短距离小于 $4S$ 时，就需要引入一个厚度修正因子 $F(d/S)$ 和一个直径修正因子 $F(S/D)$ 。此外，由于加工精度的问题，四根金属探针的间距也不可能完全相等，还需引入一个探针间距的修正因子 F_{sp} 。显然，每一台四探针测试仪都有一个特定的 F_{sp} 与之对应。考虑到以上修正因子，国家标准“硅单晶电阻率的测定——直排四探针法和直流两探针法”（GB/T1551-2021）给出的某一温度下薄样品（单晶硅片）电阻率的计算公式为

$$\rho(T) = \frac{V_{23}}{I} \cdot d \cdot F_{sp} \cdot F(d/S) \cdot F(S/D) \quad (13)$$

式中， T 是温度， $\rho(T)$ 是温度 T 下的电阻率， F_{sp} 是由厂家提供的探针间距修正因子， $F(d/S)$ 和 $F(S/D)$ 分别是厚度修正因子和直径修正因子，可通过先计算 d/S 和 S/D 的值再分别查附录 2 和附录 3 的表格得到。对于不在表格内的 d/S 或 S/D 值，可通过线性插值的方法计算与之对应的修正系数。如果薄样品很薄 ($d < 0.4S$)，厚度修正系数 $F(d/S) \approx 1$ （见附录 2）。如果样品的横向尺寸很大，可看作是无穷大薄样品，此时的直径修正因子 $F(S/D) \approx F(0) = \pi / \ln 2 = 4.5324$ （见附录 3）。

对于本实验，需要根据待测单晶硅片的厚度和直径（或边长），通过查附表 2 和附表 3 得到厚度修正因子和直径修正因子，然后利用(12)式计算硅片样品的电阻率。此外，还需要使用直读法给出硅片样品的电阻率。如果探针到硅片边缘的最短距离大于 $4S$ ，并且硅片的厚度 $d \leq 4S$ ，则可以通过查附表 4 得到直读电流的值，然后将它设置为测试电流，就可以从电压表上直接读出样品的电阻率。需要说明的是，附表 4 给出的直读电流不含小数点，其默认位置在从左到右第一位数字后面。譬如 00453 默认为 0.0453 mA，04172 默认为 0.4172 mA。

2. 半导体薄层电阻（或方块电阻）的测量

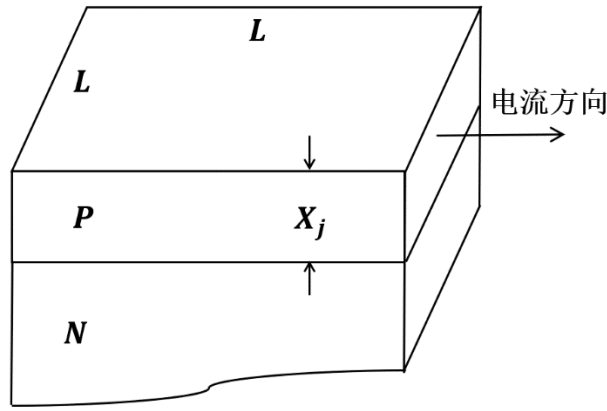


图 5 薄层电阻（或方块电阻）示意图

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、绝缘衬底上的半导体薄膜的薄层电阻。薄层电阻又称为方块电阻，是指平行于电流方向的正方形表面下的半导体薄层在电流方向上的电阻，如图 5 所示。对于扩散片（P 型衬底上的 N 型薄层或者 N 型衬底上的 P 型薄层）而言，由于 PN 结起着隔离的作用，顶部扩散层的厚度对应于 PN 结的结深 X_j 。根据定义，扩散层的薄层电阻（或方块电阻）可表示为（参见图 5）：

$$R_{sq} = \rho \frac{L}{L \cdot X_j} = \frac{\rho}{X_j} \quad (14)$$

结深 X_j 的单位为 cm，方块电阻的单位为 Ω/\square 。如果绝缘衬底上的半导体薄层的厚度为 d （以 cm 为单位），根据(14)式，方块电阻可表示为

$$R_{sq} = \frac{\rho}{d} \quad (15)$$

如果半导体薄层的厚度很薄（ $d < 0.4S$ ），而且探针到样品边缘的最短距离大于 $4S$ ，就可以把它看作是无穷大薄样品，把计算无穷大薄样品电阻率的公式（12）代入上式可得半导体薄层的方块电阻

$$R_{sq} = \frac{\rho}{d} = \frac{\pi}{\ln 2} \cdot \frac{V_{23}}{I} \approx 4.5324 \cdot \frac{V_{23}}{I} \quad (16)$$

由上式可知，如果半导体薄层可以视作无穷大薄样品，可以把测试电流设为 4.5324 mA，然后从电压表上直接读出样品的方块电阻。

如果半导体薄层的厚度不满足薄样品（譬如样品的厚度在 $0.4S$ 到 $4S$ 之间）或者探针到样品边缘的最短距离小于 $4S$ ，此时就需要将（13）式代入（15）式来计算半导体薄层的方块电阻，即

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

$F(d/S)$ 和 $F(S/D)$ 的取值同样需要查附录 2 和附录 3 的表格。

【仪器用具】

KDY-1 型四探针电阻率/方块电阻测试仪，电阻率样品（p 型单晶硅棒、p 型单晶硅片），薄层电阻样品（p 型单晶硅衬底上的 n 型扩散片、ITO 玻璃、TCO 玻璃）。

【实验装置介绍】

1. 测试仪器介绍

本实验使用 KDB-1 型四探针电阻率/方块电阻测试仪（以下简称四探针测试仪）进行两种样品（p 型单晶硅棒、p 型单晶硅片）的体电阻率测试和三种样品（p 型单晶硅衬底上的 n 型扩散片、ITO 玻璃、TCO 玻璃）的薄层电阻（或方块电阻）测试。图 6 给出了 KDB-1 型四探针测试仪的正面照片。如图所示，该测试仪主要由测试主机（包括机箱、前面板和后面板）、测试架（含样品台，探头高度调节手轮）及四探针探头组成。前面板有电流表、电压表、电流调节旋钮、电流选档开关、恒流源开关、恒流源电压表、琴键选择开关、恒流源电压调节旋钮等，后面板有电源开关、电阻率/方块电阻测试切换开关、四探针探头接口等。

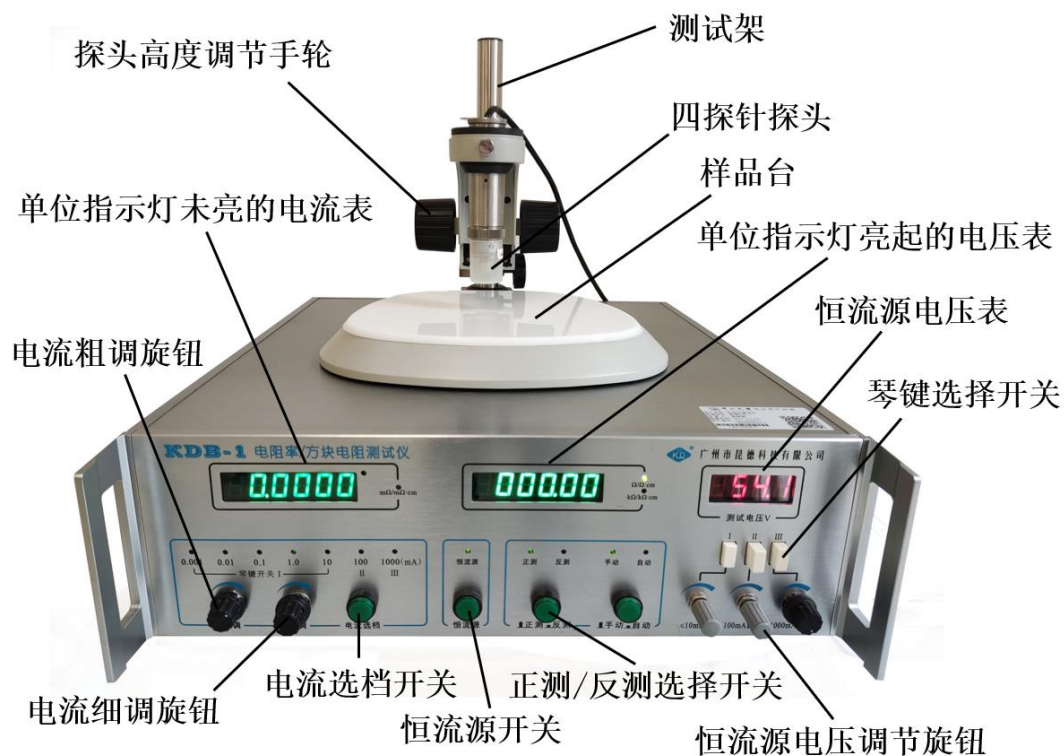


图 6 KDB-1 型四探针电阻率/方块电阻测试仪的正面照片

2. 四探针测试仪的使用方法

2.1 测试电流档位的选择以及测试电流 I 的读数

该测试仪提供了 $1\ \mu\text{A}$ 、 $10\ \mu\text{A}$ 、 $100\ \mu\text{A}$ 、 1mA 、 10mA 、 100mA 和 1000mA 共计 7 个电流档位,每个电流档位输出的电流强度的范围分别为 $0.2\ \mu\text{A}\sim 1\ \mu\text{A}$ 、 $2\ \mu\text{A}\sim 10\ \mu\text{A}$ 、 $20\ \mu\text{A}\sim 100\ \mu\text{A}$ 、 $0.2\text{mA}\sim 1\text{mA}$ 、 $2\text{mA}\sim 10\text{mA}$ 、 $20\text{mA}\sim 100\text{mA}$ 、 $200\text{mA}\sim 1000\text{mA}$ 。仪器开机后,电流档自动设置在 1mA 档。可通过“电流选择开关”选择不同的电流档位,每按一次“电流选择开关”,电流档将切换到下一个档位,从小到大,循环进行。需要说明的是,当探头与样品接触时,电流档只能在 1mA 、 10mA 、 100mA 和 1000mA 之间循环。若想在 7 个电流档之间循环,需要探头与样品脱离接触或关掉恒流源,然后再按下“电流选择开关”选择合适的电流档。针对不同方块电阻或者电阻率的样品,表 1 给出了厂家推荐使用的电流档位。由表 1 可知,该四探针测试仪的方块电阻测量范围为 $1\times 10^{-4}\sim 1\times 10^6\ \Omega/\square$,电阻率测量范围为 $1\times 10^{-5}\sim 1\times 10^5\ \Omega\cdot\text{cm}$ 。此外,电阻率或方块电阻大的样品应选择小的测试电流,而电阻率或方块电阻小的样品应选择大的测试电流。如果样品的电阻率或方块电阻未知,应从最小电流档开始测量,然后逐渐增加测试电流,直到所选电流档可以获得稳定的电流和电压读数。切勿从大电流档开始测量,以免损坏设备。

电流表的读数方法如下:电流表示数 \times 电流档位=电流读数。例如在 0.01mA 档显示 1.0000 时,表示电流为 $0.01\text{mA}\times 1.0000=0.01\text{mA}$;在 0.01mA 档显示 0.6282 时,表示电流为: $0.01\text{mA}\times 0.6282=0.006282\text{mA}$ 。

表 1 测试不同方块电阻或电阻率样品建议选择的测试电流档位

与测试电流对应的琴键开关	$\leq 10\text{mA}$					100mA	1000mA
电流档位 mA	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
恒流源输出电流范围	$0.2\ \mu\text{A}\sim 1\ \mu\text{A}$	$2\sim 10\ \mu\text{A}$	$20\sim 100\ \mu\text{A}$	$0.2\sim 1\text{mA}$	$2\sim 10\text{mA}$	$20\sim 100\text{mA}$	$200\sim 1000\text{mA}$
方阻测量范围 Ω/\square	$10^5\sim 10^6$	$10^3\sim 10^4$	$200\sim 2500$	$20\sim 250$	$2\sim 25$	$0.01\sim 0.1$	$0.0001\sim 0.001$
电阻率测量范围 $\Omega\cdot\text{cm}$	$10^4\sim 10^5$	$10^2\sim 10^3$	$20\sim 250$	$2.0\sim 25$	$0.2\sim 2.5$	$0.001\sim 0.01$	$0.00001\sim 0.0001$

2.2 恒流源电压档位的选择

由于前面板上的“电流调节旋钮”(见图 6)对恒流源输出电流的调节范围有限,测试仪还配备了“恒流源电压调节旋钮”(见图 6)。只有通过“电流调节旋钮”和“恒流源电压调节旋钮”的配合使用,才能让恒流源输出所需的任意大小的电流。前面板右上方是恒流源电压表,其下方有 3 个“恒流源电压档位选择开关”(即琴键开关 I、II 和 III),分别与 $\leq 10\text{mA}$ 、 100mA 和 1000mA 三个测试电流对应。当选择了 $1\ \mu\text{A}\sim 10\text{mA}$ 五个电流档位中的任意一个时,

应按下琴键开关 I；当选择了 100mA 电流档，应按下琴键开关 II；当选择了 1000mA 电流档，应按下琴键开关 III。通过调节琴键开关下方的“恒流源电压调节旋钮”，可调节与琴键开关及测试电流对应的恒流源电压。表 2 给出了厂家推荐的与不同测试电流对应的恒流源电压范围。

表 2 厂家推荐的与不同测试电流对应的恒流源电压范围

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

2.3 测试电压 V_{23} 的读取

利用四探针测试仪测量半导体材料的电阻率或方块电阻时，最常用的方法是根据表 1 选择合适的测试电流，根据表 2 选择合适的恒流源电压，通过调节“电流调节旋钮”和“恒流源电压调节旋钮”使恒流源输出大小合适的测试电流 I ，然后读取电压表上 V_{23} 的值，最后利用相关公式计算样品的电阻率或方块电阻。

需要说明的是，由于仪器设计的原因，前面板左侧的两块数字电表在不同电流档位下所起的作用不同。当使用 0.001mA、0.01 mA、0.1 mA、1 mA、10 mA 这五个电流档位中的任意一个时，从左边数起第一块电表为电流表，第二块为电压表。此时，真实的电压值有两位小数，即小数点后有两位数字。读取 V_{23} 时首先要忽略电压表上示数的小数点，然后把小数点放在两位小数之前。例如，假设电压表上显示 01.000，忽略小数点的读数为 01000，真实的电压值应读数为 10.00mV。当使用 100 mA 或 1000 mA 的电流档时，从左边数起第一块电表为电压表，第二块为电流表。此时，真实的电压值有三位小数。读取 V_{23} 时同样需要忽略电压表上示数的小数点，然后把小数点放在三位小数之前。例如，假设电压表上显示 100.00，忽略小数点的读数为 10000，真实的电压值应读数为 10.000mV。此外，还有一种区分左侧两块电表功能的简单方法：下压探针与样品接触，在选定的测试电流下，单位指示灯不亮的为电流表，而单位指示灯亮起的为电压表。

2.4 正测、反测

通过改变测试电流的方向，可对样品上同一个测试点分别进行正向和反向测量。如果两次测量得到的电压 V_{23} 的绝对值非常接近，说明所选的测试电流大小合适，测量结果也很准确。如果测试时使用了正向和反向测量， V_{23} 应取两次测量结果绝对值的平均值。

2.5 电阻率或方块电阻的直接读取

除了由测试电流 I 和测得的 V_{23} 利用相关公式计算样品的电阻率和方块电阻以外，对于某

些符合特定条件的样品，可以将测试电流设定为特定的值，然后直接从电压表上读出样品的电阻率和方块电阻，这种方法也被称为直读法。当然，测量样品的电阻率时，首先应将后面板上的“电阻率/方块电阻（ ρ/R ）测试切换开关”拨到 ρ 一侧。如果是测量样品的方块电阻，首先应将“电阻率/方块电阻（ ρ/R ）测试切换开关”拨到 R 一侧。直读法给出的测量结果虽然没有经过严格修正，但仍适用于对测量精度要求不高的场合。

采用直读法测量样品的电阻率或方块电阻，关键在于选择正确的测试电流。选择了正确的测试电流之后，就可以直接读取电压表上测得的 V_{23} （单位 mV ）作为样品的电阻率（单位为 $\Omega \cdot cm$ ）或方块电阻（单位为 Ω/\square ）。下面对直读法选取的测试电流做一个总结：(1)测量可近似看作是半无穷大样品（样品厚度和探针到样品边缘的最短距离均大于 $4S$ ）的电阻率时，可将测试电流设为 $I=2\pi S=0.628\text{ mA}$ 。(2)测试可近似看作是无穷大薄样品（探针到硅片边缘的最短距离大于 $4S$ ，并且硅片的厚度 $d \leq 4S$ ）的电阻率时，可通过查附表 4 得到直读电流的值。附表 4 给出的直读电流不含小数点，其默认位置在从左数起第一位数字后面。(3)测量可近似看作是无穷大的导电薄层（薄层厚度 $d < 0.4S$ ，探针到样品边缘的最短距离大于 $4S$ ）的方块电阻时，可将测试电流设置为 $I=3.14/\ln 2=4.5324mA$ 。

【实验内容】

1. 测量样品电阻率或方块电阻的操作步骤

打开 KDB-1 四探针测试仪后面板上的电源开关，此时恒流源已开启，测试电流自动处于 $1mA$ 档。根据测试目的，将测试仪后面板上的“电阻率/方块电阻测试切换开关”（ ρ/R 开关）拨到相应位置。将样品置于样品台上，旋转测试架上的手轮使探针下降，同时调整样品位置，使四根探针正好落在样品的测试点。当探针快要接触样品时，应缓慢旋转手轮，使探针缓慢轻压在样品上。当听到主机传来“咔嗒”一声、且前面板左侧的两块绿字电表有数值显示，即表示探针与样品已接触到位，应立即停止旋转手轮。根据表 1 和表 2 给出的推荐值，并通过选择合适的测试电流档位和恒流源电压档位，调节测试电流和恒流源电压旋钮，使测试电流达到合适的值，此时，电压表显示的 V_{23} 应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，而且正测和反测得到的 V_{23} 的绝对值差别也不大。记录此时的测试电流 I 和电压 V_{23} 的值，由相应公式计算样品的电阻率或方块电阻。测量完毕，升起探针，取走样品。

2. 测量 p 型硅棒的电阻率

p 型硅棒是厂家提供的标准样品，而且附带硅棒直径、硅棒厚度、导电类型、硅棒电阻率和推荐使用的测试电流等数据。使用厂家推荐的测试电流对硅棒横截面上五个不同位置处

（中心点和距离圆心 1/3 半径处的 4 个等距点）的电阻率进行测量，如图 7 所示。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。将实验结果记录到表 3 中，使用（6）式计算电阻率 $\rho(T)$ 。利用附录 1 将测得的电阻率修正到 23℃的相应值。此外，利用下面的公式计算电阻率分布的不均匀度。

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

(18)

式中 ρ_{\max} 和 ρ_{\min} 分别为所测电阻率的最大值和最小值。

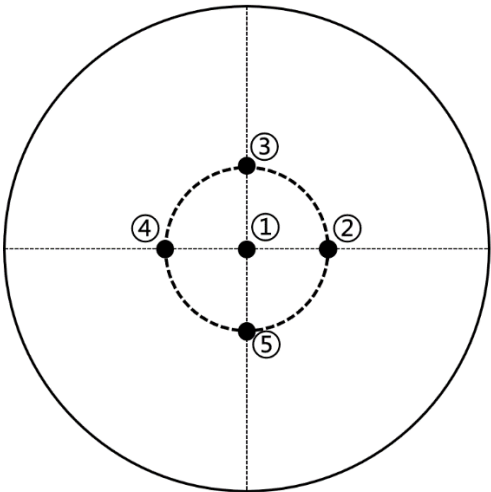


图 7 硅棒横截面上的五个测试点的取法

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 ρ_T	电阻率 ρ_{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：		

3. 测量 p 型单晶硅片（薄样品）的电阻率

单晶硅片的厚度 d 和尺寸由老师现场提供。由于待测硅片近似正方形，故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：直读法，根据样品厚度和附表 4 得到直读电流的值，并将其设置为测试电流，直接从电压表上读取样品的电阻率。

方法二：选择合适的测试电流 I 和测得的电压 V_{23} ，采用（13）式计算硅片的电阻率。对硅片

中心位置处的电阻率测量 5 次。每次测量完毕后，升起探针，将硅片逆时针旋转 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 进行下一次测量。同一位置正向和反向各测量一次，并将测量结果修正到 23°C 。填写表 4。

对测量结果进行不确定度分析：已知数字电压表的测试量程为 $0.2\text{mV}\sim 50\text{mV}$ ，分辨率优于 $\pm 0.05\%$ 。在 1mA 电流档，恒流源最大允许误差为 $\pm 0.02\text{mA}$ ；在 10mA 电流档，恒流源最大允许误差为 $\pm 0.1\text{mA}$ 。硅片厚度测量结果的相对不确定为 $\pm 0.2\%$ 。探针间距修正因子 F_{sp} 、样品厚度修正因子 $F(d/S)$ 和直径修正因子 $F(S/D)$ 引入的不确定度可以忽略。假定矩形分布来评估仪器精度引入的不确定度。计算硅片电阻率测量结果的相对不确定度。假设包含因子 $k=2$ ，给出扩展不确定度。

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：直读法		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 ρ_{T}	电阻率 ρ_{23}
测量 1						
测量 2						
测量 3						
测量 4						
测量 5						
电阻率平均值：						

4. 测量 p 型单晶硅衬底上的 n 型扩散片的方块电阻

扩散片的结深 x_j 和尺寸由老师现场提供。由于待测扩散片近似正方形，故取最短的边长作为扩散片的直径 D 。将探针压在扩散片的中心位置进行方块电阻的测量。

方法一：直读法，设置合适的测试电流，从电压表上直接读出样品的方块电阻。

方法二：根据测试电流、电压 V_{23} 以及扩散片的尺寸，利用（17）式计算扩散片的方块电阻。需要测量两个位置的方块电阻，即在第一次测量完成之后将样品旋转 90° 再测量一次。同一位置正向和反向各测量一次。将测量和计算结果记录到表 5 中。

表 5 扩散片方块电阻测试实验数据记录表

温度：		样品结深：		样品直径 D ：	
探针间距 $S=0.1\text{cm}$		$d/S=0$	$F(d/S)=1$	$S/D=$	$F(S/D)=$
方法一：直读法		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：					

5. 测量两种透明导电玻璃的方块电阻

本实验提供两种透明导电玻璃（FTO 导电玻璃和 ITO 玻璃）供大家进行方块电阻测试。样品的尺寸及透明导电薄膜的厚度见表 6 和表 7。测试方法及要求与测试扩散片一致，此处不再赘述。

表 6 FTO 玻璃方块电阻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：6cm	
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 玻璃方块电阻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：6cm	
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】

①应佩戴丁氰手套并使用塑料镊子取放样品，避免用手直接接触样品导致样品沾污。②对于高阻材料，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，因此测试应该在暗室中进行。③为了避免外在电磁信号对测量结果的影响，应在有电磁屏蔽的环境中进行测试。④半导体材料的电阻率对温度敏感，因此测试电流不宜过大也不宜长时间通电，以防样品升温影响测量结果。

【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？

【参考文献】

1. 孙恒慧，包宗明. 半导体物理实验. 高等教育出版社，1985.

2. 广州市昆德科技有限公司. KDY—1 型四探针电阻率/方阻测试仪使用说明书, 2017

3. 国家市场监督管理总局/国家标准化管理委员会发布. 中华人民共和国国家标准“硅单晶电阻率的测定——直排四探针法和直流两探针法”(GB-T 1551-2021), 2021-05-21 发布, 2021-12-01 实施.

4. 广州市昆德科技有限公司. 硅单晶电阻率测定方法(直流四探针法)培训教材.

附录

1. 单晶硅电阻率的温度修正系数表

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

附表 1 单晶硅电阻率的温度修正系数表

电阻率 ρ_T F_T 温度℃ ($\Omega \cdot \text{cm}$)	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

2. 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 2 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)适用条件：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，应使用线性插值法计算与之对应的 $F(d/S)$ 。

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 3 直径修正系数 $F(S/D)$ 为探针间距 S 与硅片直径 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)适用条件：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 $F(d/S)=F(0)=1$ （见附表 2），由计算无穷大薄样品电阻率的公式（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）。(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直径，这是四探针测试仪能够测试的最小硅片直径。

4. 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 4 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）

$\begin{matrix} d \\ d \end{matrix} \begin{matrix} I \\ I \end{matrix}$	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
$\begin{matrix} d \\ d \end{matrix} \begin{matrix} I \\ I \end{matrix}$	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：适用条件：探针与硅片边缘的最短距离大于 4 倍探针间距， $d \leq 4S$ ，中心点测量的情况。
表中硅片厚度 d 的单位为 mm。