

半导体电阻率的测量

概述

依据掺杂水平的不同，半导体材料可能有很高的电阻率。有几种因素可能会使测量这些材料电阻率的工作复杂化，其中包括与材料实现良好接触的问题。已经设计出专门的探头来测量半导体晶圆片和半导体棒的电阻率。这些探头通常使用硬金属，如钨来制作，并将其磨成一个探针。在这种情况下接触电阻非常高，所以应当使用四点同线 (collinear) 探针或者四线隔离探针。其中两个探针提供恒定的电流，而另外两个探针测量一部分样品上的电压降。利用被测电阻的几何尺寸因素，就可以计算出电阻率。

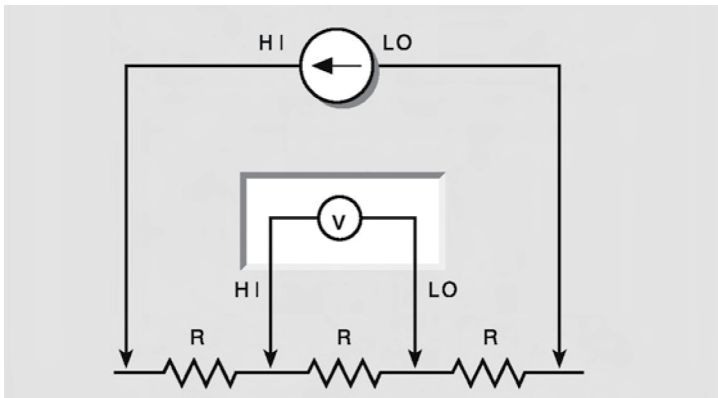
看起来这种测量可能是直截了当的，但还是有一些问题需要加以注意。对探针和测量引线进行良好的屏蔽是非常重要的，其理由有三点：

- 1 电路涉及高阻抗，所以容易受到静电干扰。
- 2 半导体材料上的接触点能够产生二极管效应，从而对吸收的信号进行整流，并将其作为直流偏置显示出来。
- 3 材料通常对光敏感。

四探针技术

四点同线探针电阻率测量技术用四个等距离的探针和未知电阻的材料接触。此探针阵列放在材料的中央。图 4-38 是这种技术的图示。

图 1. 四点同线探针法测量电阻率



已知的电流流过两个外部的探针，而用两个内部的探针测量电压。
电阻率计算如下：

$$\rho = \frac{\pi}{\ln 2} \times \frac{V}{I} \times t \times k$$

其中：V=测量出的电压（伏特）

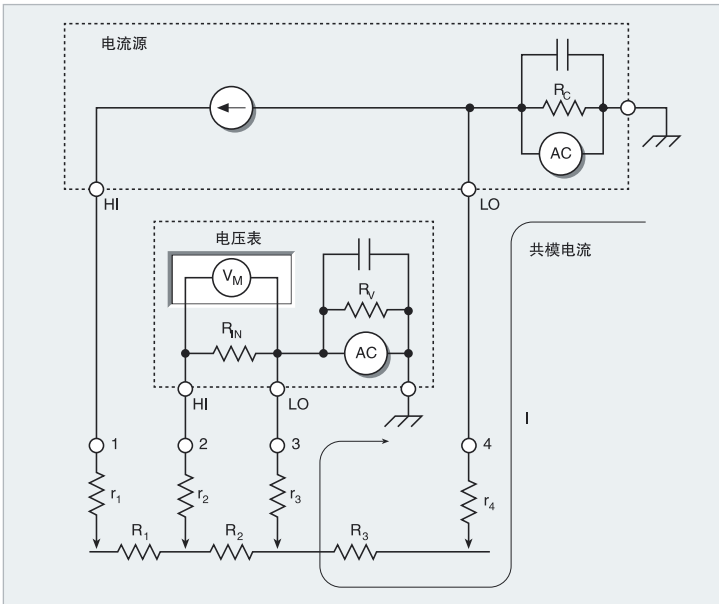
I=所加的电流（安培）

t=晶圆片的厚度（厘米）

k=由探头与晶圆片直径之比和晶圆片厚度与探头分开距离之比决定的修正因数。

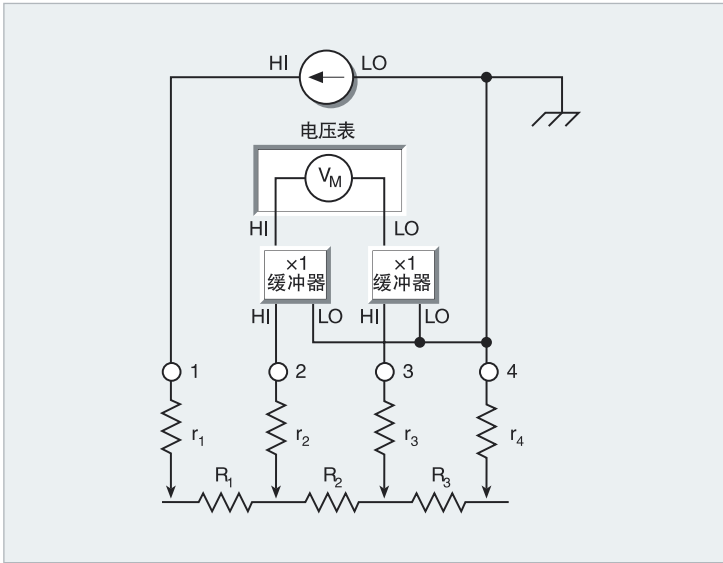
如图 1 所示，更实际的电路还包括每个探针的接触电阻和分布电阻（ r_1 到 r_4 ）、电流源和电压表从其 LO 端到大地的有限的电阻（ R_C 和 R_V ）和电压表的输入电阻（ R_{IN} ）。依据材料的不同，接触电阻（ r ）可能会比被测电阻（ R_2 ）高 300 倍或更高。这就要求电流源具有比普通期望数值高得多的钳位电压，而电压表则必须具有高得多的输入电阻。

图 2. 四点同线探针法的实际电路



电流源不是与大地完全隔离的，所以当样品的电阻增加时，就更需要使用差分式静电计。存在问题的原因是样品可能具有非常高的电阻（ $10^8\Omega$ 或更高），此数值和静电计电压表的绝缘电阻（输入 LO 端到壳地， R_v ）具有相同的数量级。如图 2 所示，这样就会有交流电流从电流源的 LO 端，经过样品，流到电压表的 LO 端，再流回地。当电压表测量探头 2 和探头 3 之间的电压降时，该交流电流在 r_3 上产生的电压降就会引起错误的结果。

图 3. 差分式四探针测量



使用两台静电计就解决了这个问题，如图 3 所示。电压表将读出两个静电计的缓冲输出之间的差值，该值等于 R_2 上的电压。数值 r_1 、 r_2 、 r_3 和 r_4 代表探头与样品材料接触的电阻。单位增益缓冲器具有很高的输入阻抗，所以几乎没有共模电流流过 r_3 ，于是可以很容易地计算出 R_2 的数值。该缓冲器可以是一对 JFET 运算放大器或者是两个具有单位增益输出的静电计。

为了避免泄漏电流，使用隔离的或者带保护的探头与样品接触。电流源应当处于保护模式。有关保护问题更详细的讨论请参见第 2.2.1 节。

范德堡 (van der Pauw) 技术

测量电阻率的范德堡 (van der Pauw) 技术也采用恒流的方法。这种方法在测量非常小的样品时特别有用, 因为这时样品的尺寸和接触点的距离并不重要。这种技术采用在扁平的、任意形状的样品上放置四个隔离的接触点。围绕样品进行八次测量。如图 4 所示。

然后计算两个电阻率值 ρ_A 、 ρ_B 如下:

$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} f_A t_s \frac{(V_2 + V_4 - V_1 - V_3)}{4I}$$

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} f_B t_s \frac{(V_6 + V_8 - V_5 - V_7)}{4I}$$

其中: ρ_A 和 ρ_B 是以欧姆为单位的电阻率

t_s 是以厘米为单位的样品的厚度

V_1 - V_8 代表电压表测量出的电压

I 是以安培为单位的流过样品的电流

F_A 和 F_B 是基于样品对称性的几何因数, 并与以下方程式所示的两个电压比 Q_A 和 Q_B 有关 (对于完美对称性的情况, $f_A = f_B = 1$)。

Q_A 和 Q_B 可以由测量出的电压计算如下:

$$Q_A = \frac{V_2 - V_1}{V_4 - V_3}$$

$$Q_B = \frac{V_6 - V_5}{V_8 - V_7}$$

并且, Q 和 f 的相互关系如下:

$$\frac{Q-1}{Q+1} = \frac{f}{0.693} \operatorname{arc} \cosh \left(\frac{e^{0.693/f}}{2} \right)$$

图 4. van der Pauw 电阻率测量

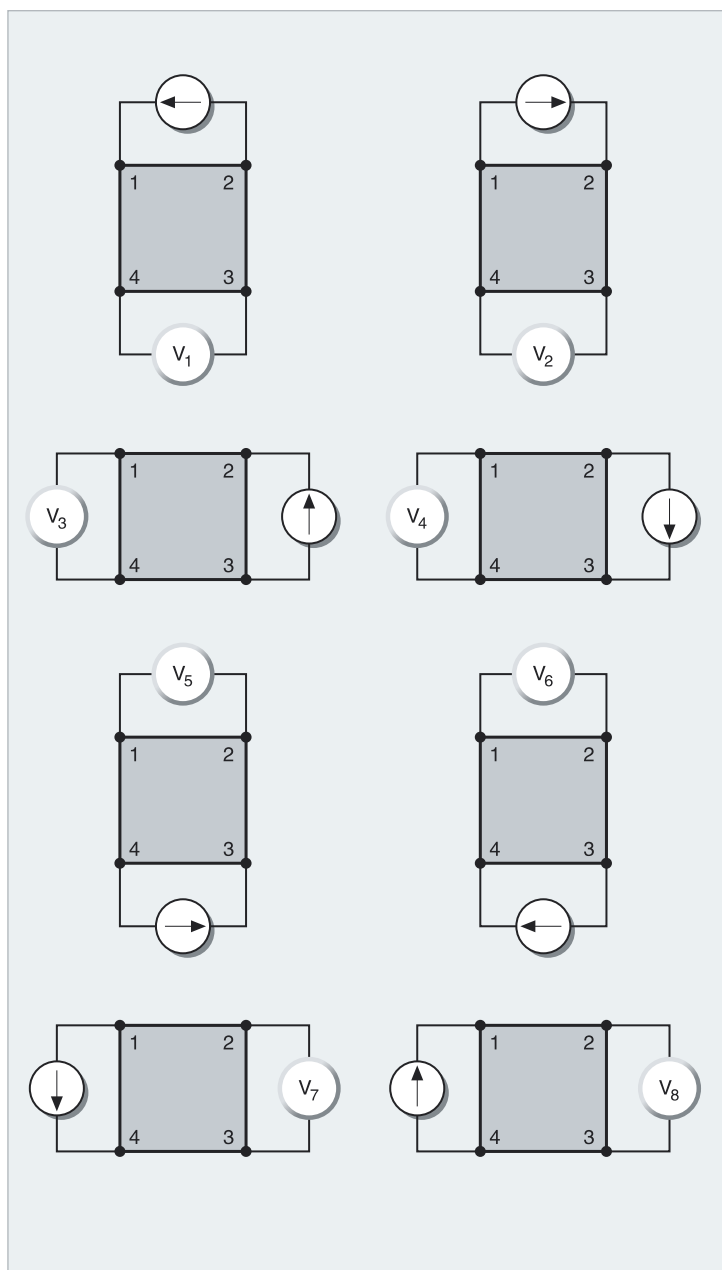
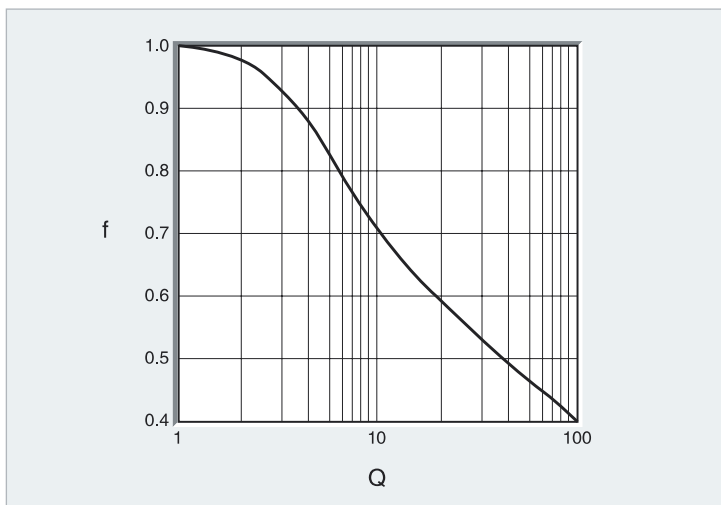


图 5. f-Q 曲线



注意，如果 ρ_A 和 ρ_B 相互之间不在 10% 之内，那么该样品就不够均匀，不能准确地确定电阻率，应当放弃使用这种方法。

一旦知道了 ρ_A 和 ρ_B ，则平均电阻率 (ρ_{AVG}) 就可以计算如下：

$$\rho_{AVG} = \frac{\rho_A + \rho_B}{2}$$

与四点同线探针法一样，如果样品电阻和电压表的绝缘电阻（电压表的公共端到地）是同一数量级的，就可能需要使用差分测量。如图 6a 所示，共模电流可能流过样品的 4 和 3 端子之间。图 6b 说明使用单位增益缓冲器和差分测量如何能够解决这个问题。现在，在 4 和 3 端子之间流过的共模电流非常小。

图 7 所示的系统使用吉时利公司的 7065 型霍尔效应卡进行 van der Pauw 测量。该系统包括下列仪器：7065 型霍尔卡、2000 型数字多用表、6220 型电流源、6485 型皮安计和 7001 型开关系统。使用霍尔效应卡将电流源和电压表自动切换到样品的所有各边。这样就不再需要进行 4 次连接和断开测试引线的工作。此外，该卡还具有内置的单位增益缓冲器，很容易对高电阻率样品进行差分测量。如果再加上一个受控

的磁场，还能用这个系统来确定样品的霍尔系数。

图 6a: 由共模问题引起的误差测量

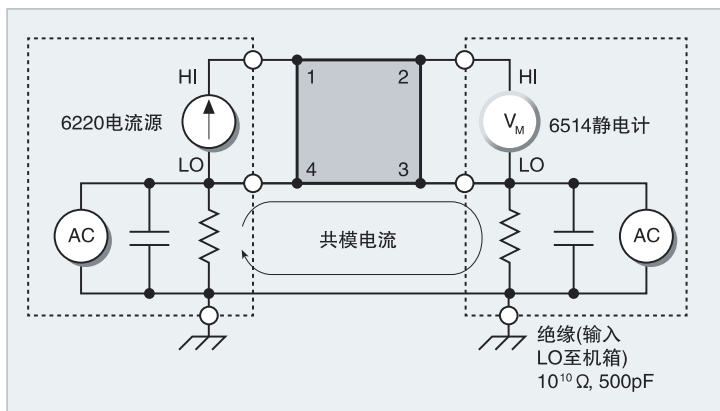
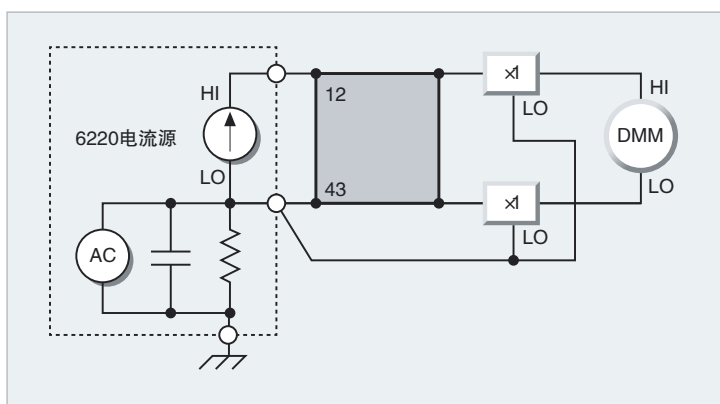


图 6b: 利用差分测量消除共模误差



4200-SCS 型半导体特性测试系统能够使用四点同线探针法或 van der Pauw 法测量电阻率。测量高电阻样品需要使用输入阻抗非常高 ($>10^{14} \Omega$) 的电压表和能够输出非常小电流 ($<1\text{nA}$) 并具有高输出阻抗的电流源。4200-SCS 能配置成具有多个 SMU, 每个 SMU 都具有高输入阻抗 ($>10^{16} \Omega$)、并能准确地输出弱电流, 所以非常适合这种应用工作。

可以用配置四个 SMU 和四个前置放大器的 4200-SCS 来进行 van der Pauw 法的电阻率测量。每个 SMU 连到样品的一边, 如图 8 所示。交互测试软件模块 (ITM) 用来控制各个 SMU 的功能。

图 7. van der Pauw 法测量系统

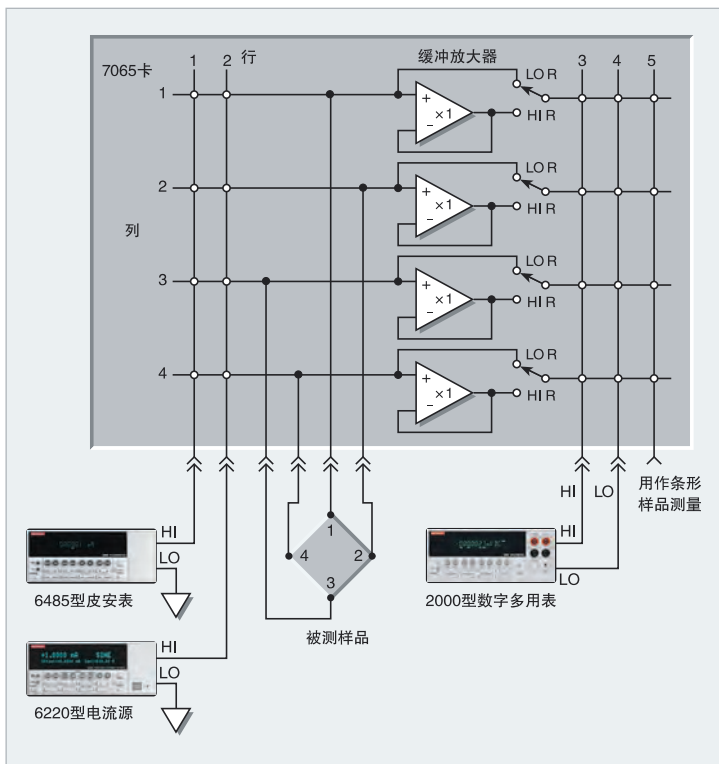
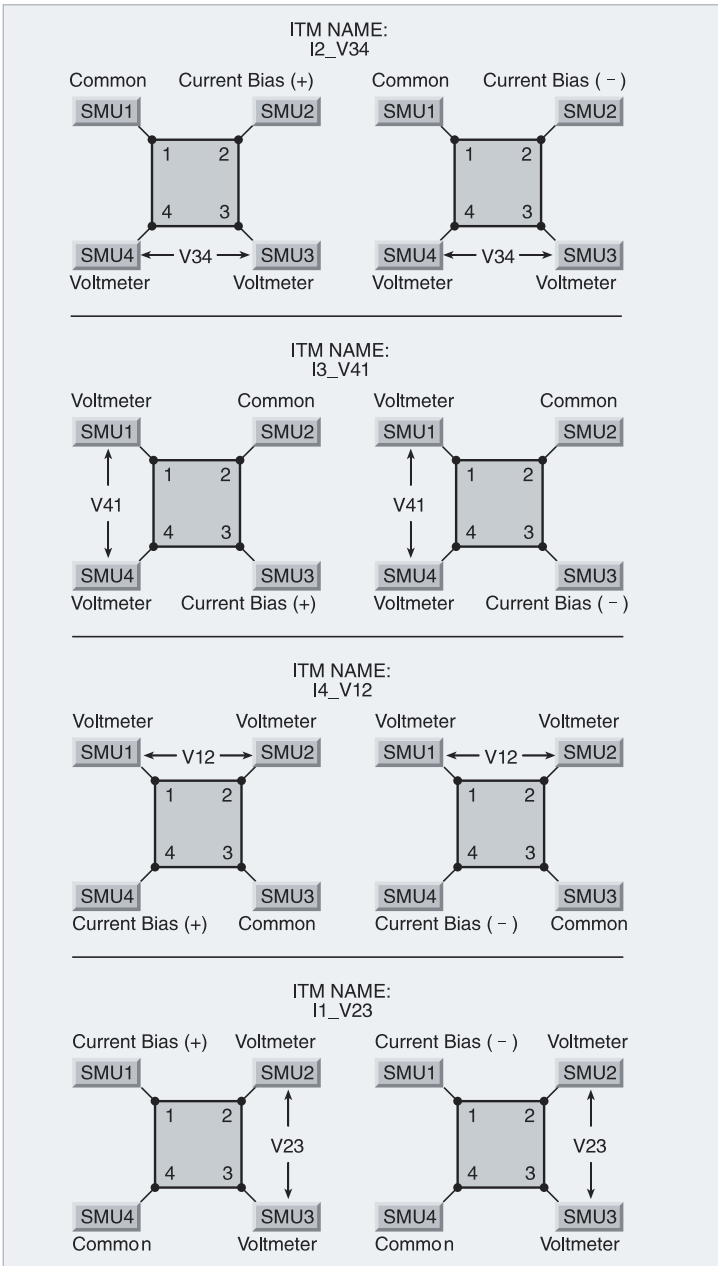


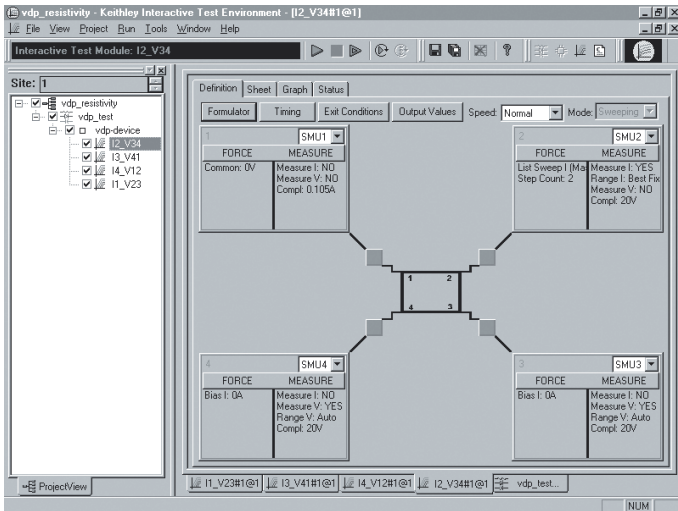
图 8. 用于 van der Pauw 法测量的 4200-SCS 型 SMU 配置情况



通过交互式编程，每个 SMU 的功能都能自动地改变为电流源、电压表或者公共端，以便在样品的各个边上输出电流和测量电压。交互地改变每个 SMU 的功能就不需要使用外部的开关将电流源和电压表切换到样品的各个端子上。

吉时利公司 4200-SCS 测量 van der Pauw 电阻率的“方案”可以从吉时利公司获得。图 9 显示出该方案的屏幕显示情况。在这个例子中，SMU1 配置为公共端，SMU2 为电流偏置，SMU3 和 SMU4 则配置为电压表。

图 9. 4200–SGS 在 van der Pauw 电阻率测量应用中的屏幕显示



还可以用一个电磁铁与 4200-SCS 配合来确定霍尔系数。