

使用4点共线探测和6221直流和交流电流源
测量电阻率并确定半导体材料的导电类型

引言

电阻率和导电类型是半导体的基本特性，也是材料研究和晶圆制造的关键参数。半导体的电阻率主要取决于体掺杂，但可以通过器件处理修改。电阻率可以影响器件的串联电阻、阈值电压、电容量和其它参数。半导体材料电阻率测量是常规电气测试之一。而且，确定晶圆的导电类型（或多数载流子的极性）是研究和制造的常规测量。4点共线探测和适当的测试设备可用于确定电阻率和导电类型。

此应用笔记说明了如何用4点共线探测和6221直流和交流电流源测量电阻率并确定半导体材料的导电类型。

4点共线探测法测量电阻率

4点探测法或Kelvin探测法是测量半导体材料电阻率的常用方法。两个探针用于源电流，另外两个探针用于测量电压。用4个探针去除由探针电阻、每个探针的扩展电阻以及每个金属探针与半导体材料之间接触电阻产生的测量误差。此方法需要用4个等间距的探针接触未知电阻值的材料。这组探针放在材料中央，如图1所示。

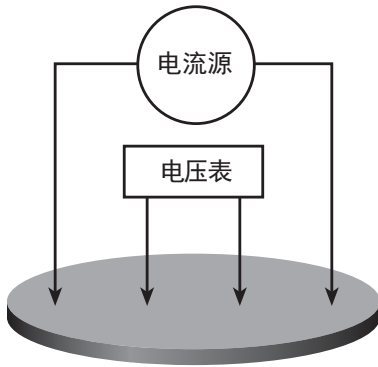


图1. 4点共线探测电阻率方法

外侧两个探针源电流，另外内侧两个探针感测样品两端的电压降。体电阻率用下式计算：

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

其中： ρ = 体电阻率 ($\Omega \cdot \text{cm}$)

V = 测量电压 (V)

I = 源电流 (A)

t = 样品厚度 (cm)

k = 校正因子，基于探针间距与晶圆直径的比值以及晶圆厚度与探针间距的比值¹。

6220直流电流源或6221交流和直流电流源结合电压表（例如2000型DMM）能测量大多数标准掺杂的半导体材料的电阻率。6220和6221能输出从皮安至100mA的宽范围电流。对于较低电阻材料的分析而言，2000型DMM能用2182A纳伏表代替。差分静电计测量法用于分析较高阻值的材料。

测量高阻半导体材料

测量高阻样品的电阻率常需要使用4个隔离探针和范德堡测量法。但是，如果4点探头的探针间隔良好，那么就可实现这些测量。这种测量还需要源高输出阻抗电流并进行差分电压测量。

图2是4点共线探针测量设置更实际的电路表示。此电路包括每个探针的接触电阻或扩展电阻 (r_1 至 r_4)，电流源从L0至地的有限电阻 (R_c) 与电压表从L0至地的有限电阻 (R_v) 以及电压表的输入电阻 (R_{in})。取决于测量的材料，接触电阻 (r_1 , r_2 , r_3 , 和 r_4) 可以是测量电阻 (R_c) 的300倍或以上。高接触电阻意味着该电流源的箝位电压应比预期高得多，而且此电压表的输入电阻必须更高。

¹ 校正因子可以在标准4点探针电阻率测试程序中查到（例如SEMI MF84-02——用4点共线探针测量硅圆片电阻率的测试方法。此标准原由ASTM国际公布，名称为ASTM F 84-67T。）

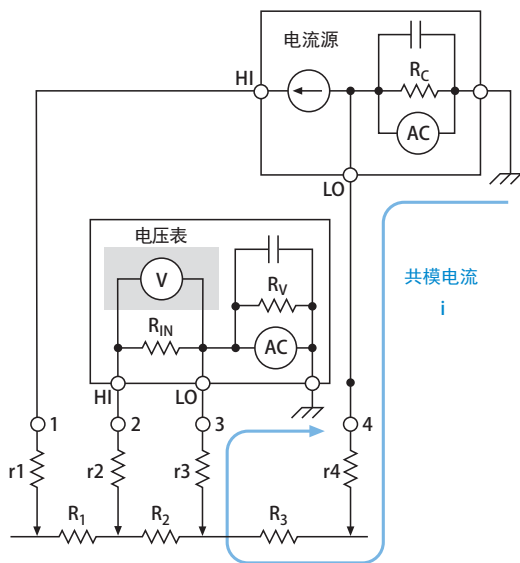


图2. 4点探测法的实际电路

共模电流 (i) 是电压表和电流源的LO端子对地不完全隔离的结果。如图2所示，交流电流将从电流源的LO端子流至样品再到电压表的LO端子然后返回到地。 r_3 两端形成的电压降会在电压表测量探针2和3之间电压降时使测量结果出现误差。随着样品电阻增大，由于共模电流产生的误差会越来越大而且也越来越有必要使用差分电压表。

如图3所示，用两台静电计消除了此共模问题。电压表会读取两台静电计的输出缓冲区之差，即等于 R_3 两端的电压。单位增益缓冲器具有极高的输入阻抗，所以 r_3 上会流过极小的共模电流并能轻松计算出 R_3 的电阻值。缓冲器可以是一对JFET运算放大器或两台单位增益输出的静电计。

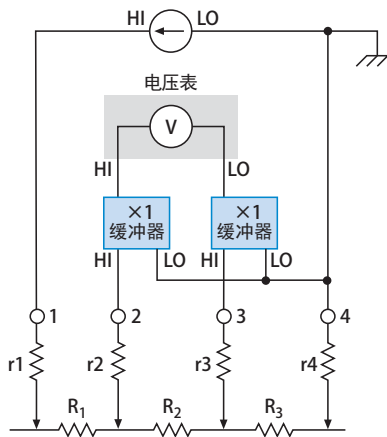


图3. 进行4点探针差分测量

图4是实际的高阻测量系统原理图，包括两台静电计（6514）、DMM（2000）和电流源（6220或6221）。在此电路中，静电计用作单位增益缓冲器。DMM测量两台静电计输出端之间的电压差。如果静电计用于防护模式，此测量的建立时间要快得多。防护削弱了电路中寄生电容的影响，所以充电时间要快很多。如果可能，应使用三同轴电缆以确保防护尽可能地靠近材料连接。

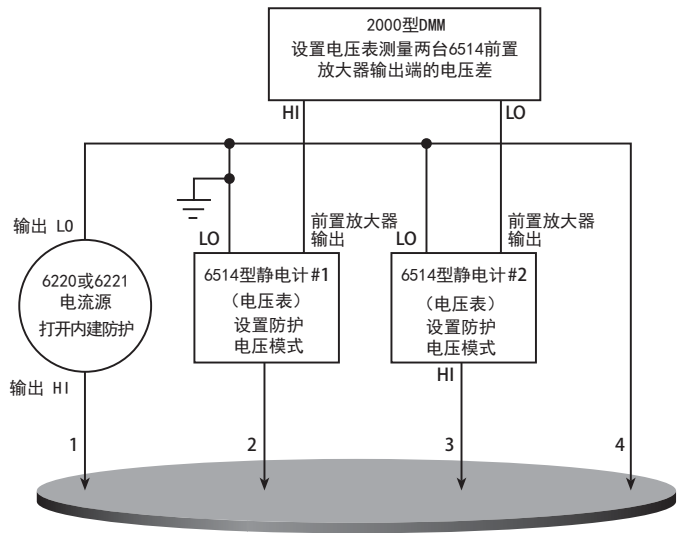


图4. 高电阻4点探针测量系统

6220和6221都具有极高的输出阻抗，都有内建防护。正如用静电计时使用防护可以缩短测量时间，因为电缆电容不再会影响测量时间常数。

6220/6221和6514的HI端子是3接线柱母头三同轴连接器，所以重要的是使用公头三同轴电缆连接测量仪器。某些4点探针能与三同轴电缆一起订购。将全部3台测量仪器的LO端子（在后面板上的香蕉安全插座）接至探针4。确保这些仪器中只有一个LO端子连至后面板上的地。

确定半导体材料的导电类型

确定导电类型的方法有几种。高电阻率材料使用整流法；低电阻率材料使用热电法。这两种方法都需要使用4点共线探针、交流电流源和直流电压表。

整流法。这种方法要在半导体材料的接触点上根据交流整流信号的极性确定主要载流子的符号。图5说明了这种设置。当4点共线探针接触晶圆时，在每个探针与晶圆的接触面上就形成一个金属-半导体“二极管”。交流电流源接在前两个探针之间，直流电压表用于感测探针2和3之间电压的极性。在探针2的金属半导体肖特基“二极管”可以是正向偏压或者反向偏压，主要取决于电流极性和导电类型。因此，电压表会读出p型材料的正电压和n型材料的负电压。

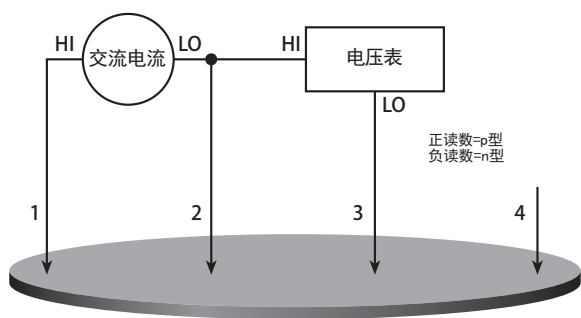


图5. 使用整流模式确定导电类型的电路

为进一步说明此概念，示波器与电压表并联。示波器产生的波形如图6所示。探针2连接至示波器的HI端子；探针3连接至LO端子。如图6的迹线所示，p型材料与探针2连接的金属-半导体“二极管”在波形的顶部反偏并在波形底部导通。对于p型材料而言，当探针2相对于探针1的交流电压是正值时（大的正电压），探针2的金属-半导体结是反向偏压。当探针2相对于探针1的交流电压是负值时（小的负电压），探针2的金属-半导体结是正向偏压。因此，探针2和探针3之间电压表的直流电压平均读数为正值就表明是p型材料。

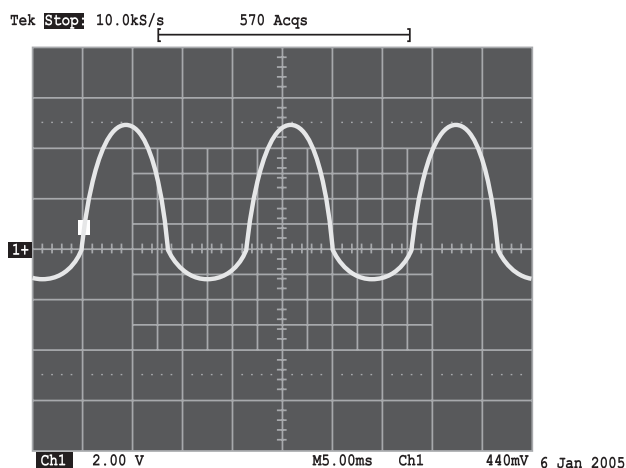


图6. P型材料的示波器迹线

为实现再现此测试设置的最佳测量结果，应使用6221交流和直流电流源的60Hz（或50Hz）线路频率测试信号。2000型DMM或6514型静电计都可以测量直流电压降。电压表的积分时间应设置为1 PLC（电力线周期）。

交流电流的幅度取决于材料的电阻率，但是电流应当足够大才能为二极管提供正向偏压。如果存在可接受的整流动作，即直流电压表读数大于0.5V时，整流法能有效地工作。当电压读数小于0.5V时，应使用热电模式。

热电压法。对高掺杂（低电阻率）材料，探针2和探针3之间形成的电压会很小，那么整流模式不再有效。在这种情况下，热电压法通过材料温度差产生的热电（或Seebeck）电压极性确定导电类型。图7是此设置的电路图。

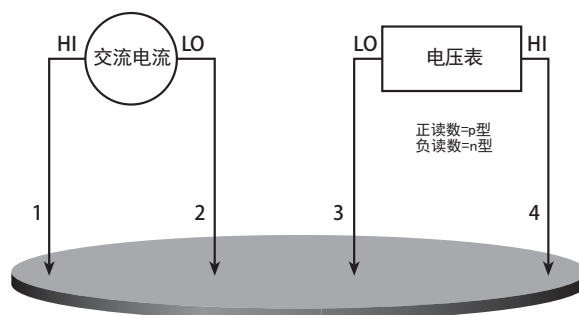


图7. 热电压法示意图

使用热电压法时，流过探针1和探针2的交流电流会使半导体产生焦耳热。由于热生载流子从材料的热区扩散至冷区，因而在探针3和探针4之间产生了Seebeck电压。这种扩散造成冷区载流子浓度不平衡，进而产生了阻止进一步扩散的电场。载流子从热探针（探针3）向冷探针（探针4）的扩散会持续进行，直到形成的电场能够克服载流子继续扩散的趋势。例如，在p型材料中，热生空穴扩散至冷探针建立的正空间电荷阻止进一步扩散。因此，冷探针（4）相对热探针是正极性的。因此，对p型材料，电压表将读出正电压。反之，对n型材料，电压表将读出负电压。

误差源和测量考虑

成功完成电阻率测量需要考虑几种潜在的误差源，对高阻材料尤其如此。

- **静电干扰。**当带电物体靠近不带电物体时会出现静电干扰。通常，干扰的影响不明显，因为在低电阻条件下电荷会迅速消散。但高阻材料不会使电荷迅速消失，所以测量可能不稳定。读数不正确可能由直流或交流静电场造成。

构建静电屏蔽包围灵敏电路能最小化这些电场的影响。屏蔽用导电材料制成并总是连接至SMU的低阻抗端子（FORCE LO）。电路的连接线也必须做好屏蔽。

- **漏电流。**对于高阻样品，漏电流会降低测量质量。漏电流是由电缆、探针和测试夹具的绝缘电阻引起。使用良绝缘体，降低湿度，使用防护能最小化漏电流。防护是连接至电路中低阻抗点的导体，其电位与被防护的高阻抗导线电位几乎相同。6220/6221和6514都能配置为防护模式工作。参考测量仪器的指示手册获取进一步信息在防护设置和连接。防护应当从4200-SCS开始并尽可能地靠近样品。使用三同轴电缆和夹具可以保证样品高阻抗端子的防护。而且，由于电缆电容不再影响测量时间常数，所以防护连接缩短了测量时间。
- **光。**光电效应产生的电流会降低测量质量，尤其是高阻样品。为了防止出现这种情况，样品应当放置在暗室中。
- **温度。**热电压也可能影响测量准确度。如果样品温度不一致，会引起温度差。由源电流引起的样品发热也会生成热电压。由源电流产生的热量更可能影响低阻样品，因为需要更大的测试电流才容易完成电压测量。而且，实验室环境的温度波动也可能影响测量。半导体具有相对较大的温度系数，所以使用校准因子可以补偿实验室的温度变化。

测试系统安全性

许多电气测试系统或测量仪器都能测量或输出危险的电压和功率电平。而且，在单错误条件下（例如，设置错误或仪器故障），甚至在系统提示当前无危险的情况下，也可能输出危险电平。因此极为重要的是，在任何时候都要保护操作人员远离这些高压和高功率电平等危险情况。

保护方法包括：

- 设计测试装置，防止操作人员接触到任何危险电路。
- 确保被测器件完全封闭，保护操作人员免受飞溅碎片的伤害。例如，在施加过高电压或功率时，电容器和半导体器件都有可能爆炸。
- 操作人员可能触碰到的全部电气连接都必须双重绝缘。双重绝缘可以在其中一个绝缘层失效后仍然确保操作人员的安全。
- 当测试装置盖打开时，使用可靠性高的失效-安全互锁开关断开电源。
- 尽可能使用自动机械手，让操作人员无需接触测试装置内部，也无需打开防护。
- 为所有系统用户提供正确的培训，让他们都明白各种潜在危险，知道如何保护自己不受伤害。

测试系统设计工程师、集成工程师和安装工程师的职责是确保对操作人员和维护人员的保护到位而且有效。

延伸阅读

W. A. Keenan, C. P. Schneider和C. A. Pillus, "Type-All System for Determining Semiconductor Conductivity Type (确定半导体导电类型的全类型系统)," 固态技术, 51-56, 1971年3月。

ASTM F42-93. Standard Test Methods for Conductivity Type of Extrinsic Semiconducting Materials (非本征半导体材料的导电类型标准测试方法)。Annual Bk. ASTM St., 1997.

SEMI MF84-02: Test Method for Measuring Resistivity of Silicon Wafers With an In-Line Four-Point Probe (硅圆片电阻率的4点共线探测法)

D. K. Schroder, Semiconductor Material and Device Characterization (半导体材料和器件特性分析)。New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998.

吉时利仪器, Low Level Measurements Handbook (低电平测量手册), 第6版, 俄亥俄州克里夫兰市, 2004年。

说明书如有变动不另行通知。

所有吉时利的注册商标或商标名称都是吉时利仪器的财产。

所有其它注册商标或商标名称都是相应公司的财产。

此版本为中文译本，仅供参考。

您购买或使用前请务必详细阅读本文件的英文原件，详见www.keithley.com/data?asset=50280。

KEITHLEY

美国吉时利仪器公司

全国免费电话：400-650-1334/800-810-1334

邮箱：china@keithley.com • 网址：www.keithley.com.cn