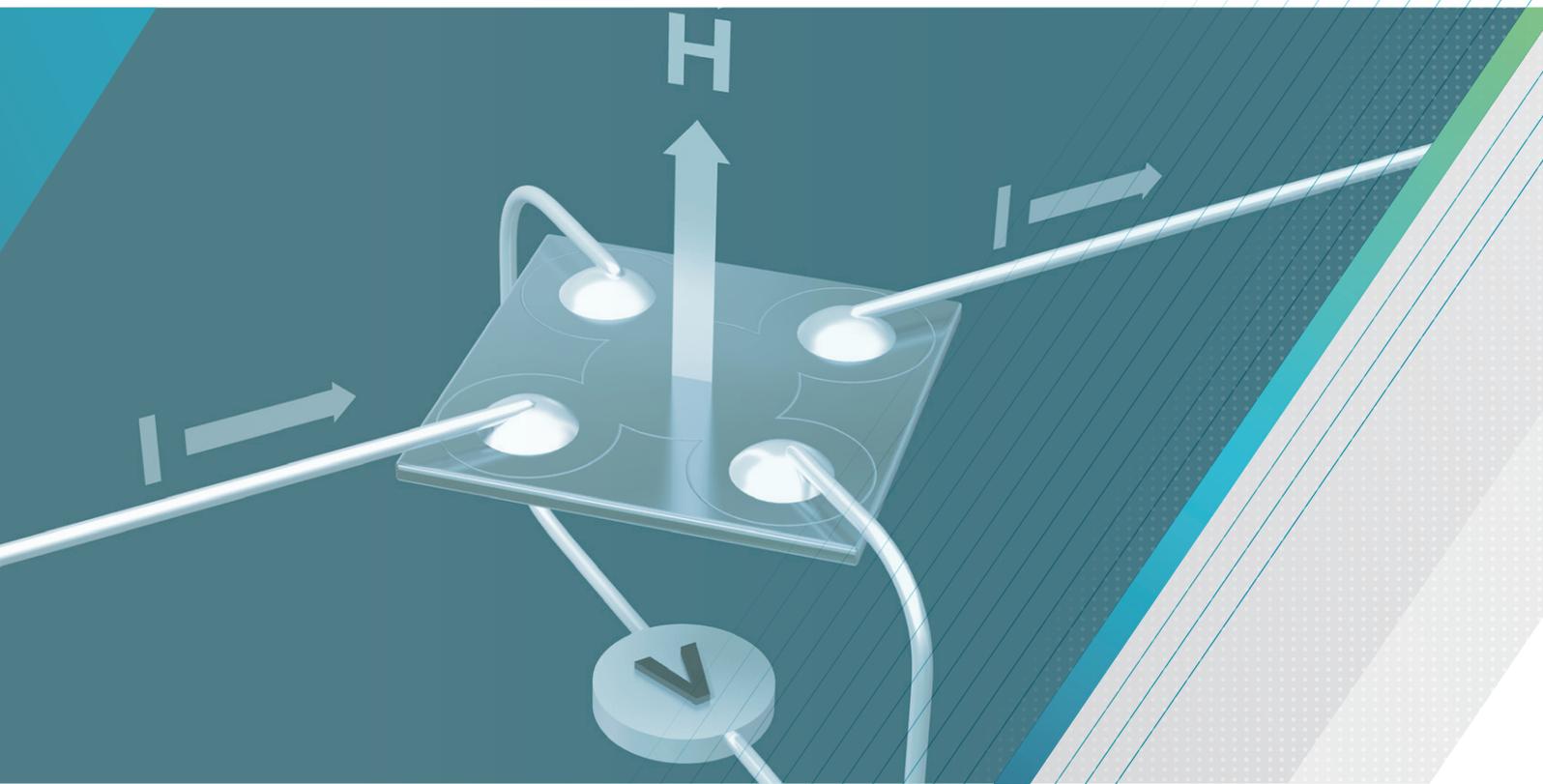


使用 4200A-SCS 参数分析仪 进行范德堡法电阻率和霍尔电压测量

应用指南



KEITHLEY
A Tektronix Company

Tektronix[®]

使用 4200A-SCS 参数分析仪 进行范德堡法电阻率和霍尔电压测量

引言

半导体材料研究和器件测试通常要测量样品的电阻率和霍尔电压。半导体材料的电阻率主要取决于体掺杂。在器件中，电阻率会影响电容、串联电阻和阈值电压。霍尔电压测量用来推导半导体类型 (n 还是 p)、自由载流子密度和迁移率。

为确定半导体范德堡法电阻率和霍尔电压，进行电气测量时需要一个电流源和一个电压表。为自动进行测量，一般会使用一个可编程开关，把电流源和电压表切换到样本的所有侧。4200A-SCS 参数分析仪拥有 4 个源测量单元 (SMUs) 和 4 个前置放大器 (用于高电阻测量)，提供了一个理想的解决方案，因为它可以自动进行这些测量，而不需可编程开关。用户可以使用 4 个中等功率 SMU (4200-SMU, 4201-SMU) 或高功率 SMU (4210-SMU, 4211-SMU)。对高电阻材料，要求使用 4200-PA 前置放大器。4200A-SCS 包括多项内置测试，在需要时把 SMU 的功能自动切换到电压表或电流源，在样本上进行一系列测量。霍尔电压测量要求对样本应用磁场。

4200A-SCS 包括交互软件，在半导体材料上进行范德堡法和霍尔电压测量。4200A-SCS Clarius+ 软件套件中提供了全面的程序库，除电阻率和霍尔电压测试外，还包括许多其他测试和项目。范德堡法和霍尔电压测试是在 Clarius V1.5 和 V1.6 中新增加的，这些特殊测试包括计算确定表面或体积电阻率、霍尔迁移率和霍尔系数。

本应用指南概括介绍了范德堡法和霍尔效应测量方法，以及怎样使用 4200A-SCS 标配的内置应用执行这些测量。

范德堡法电阻率测量概述

人们通常使用范德堡法 (vdp) 推导半导体材料的电阻率。这种四线方法用在拥有四个端子、均匀厚度的小的扁平形样本上。电流通过两个端子施加到样本上，透过相反的两个端子测量电压下跌，如图 1 所示：

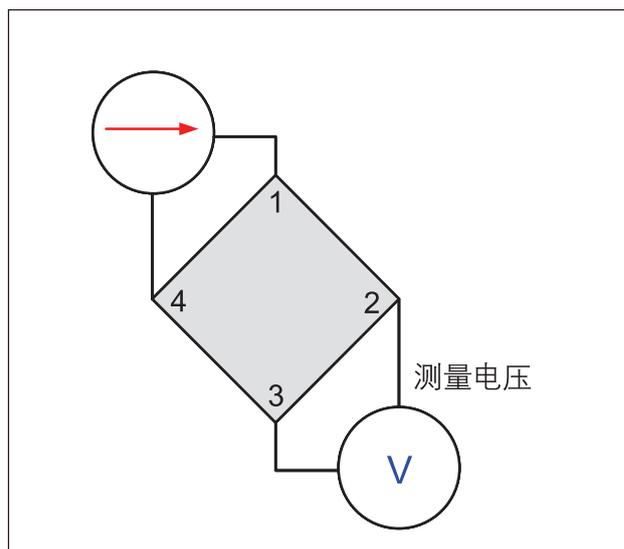


图 1. 范德堡法配置。

然后使用图 2 所示的 SMU 仪器配置，围着样本的边缘重复测量 8 次。

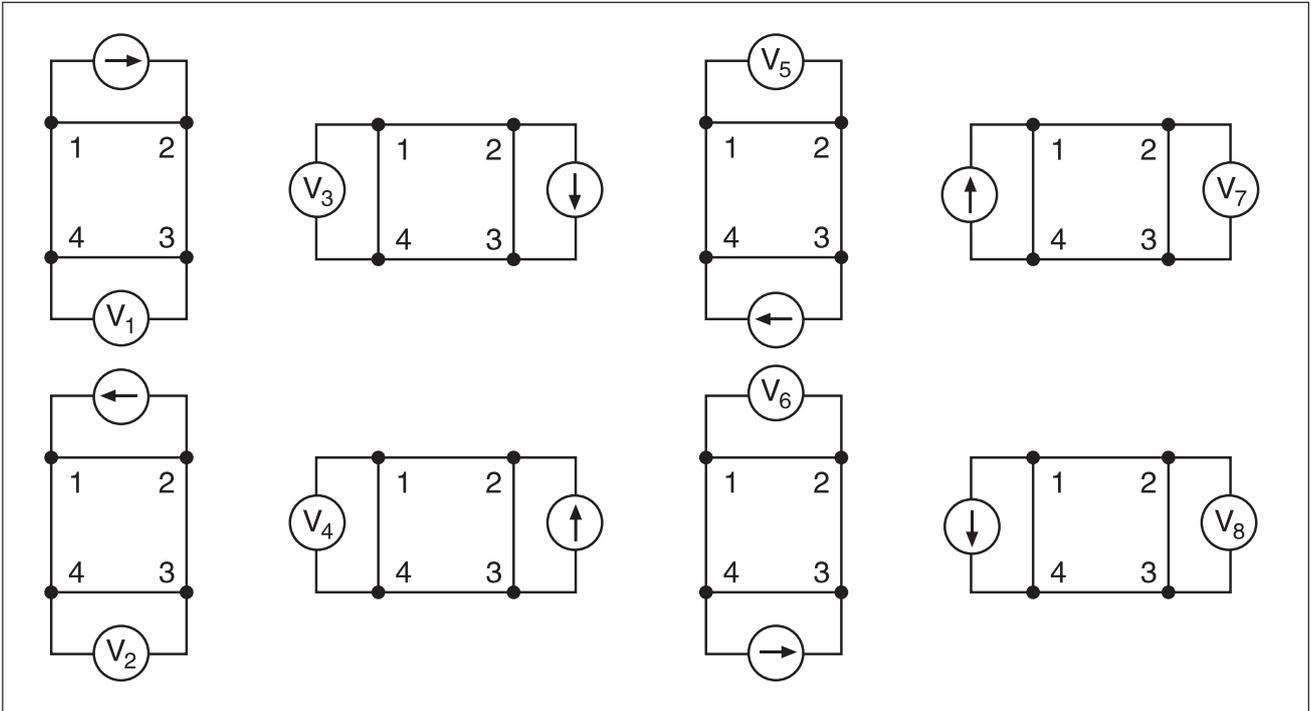


图 2. 范德堡法电阻率测量惯例。

然后使用这一串 8 项电压测量 (V1-V8) 和测试电流 (I) 来计算电阻率 (ρ), 公式如下:

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

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

其中: ρ_A 和 ρ_B 是体积电阻率, 单位为 ohm-cm

t 是样本厚度, 单位为 cm

V_1 - V_8 是电压表测得的电压

I 是流经样本的电流, 单位为 A

f_A 和 f_B 是样本对称度的几何因数, 与两个电阻比率 Q_A 和 Q_B 相关, 公式如下 (完美对称时 $f_A = f_B = 1$)。

Q_A 和 Q_B 使用测得的电压计算, 公式如下:

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

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

此外, Q 和 f 的关系如下:

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

图 3 是这个函数的图示。在计算出 Q 后，可以立即从这个图中找到“f”的值。

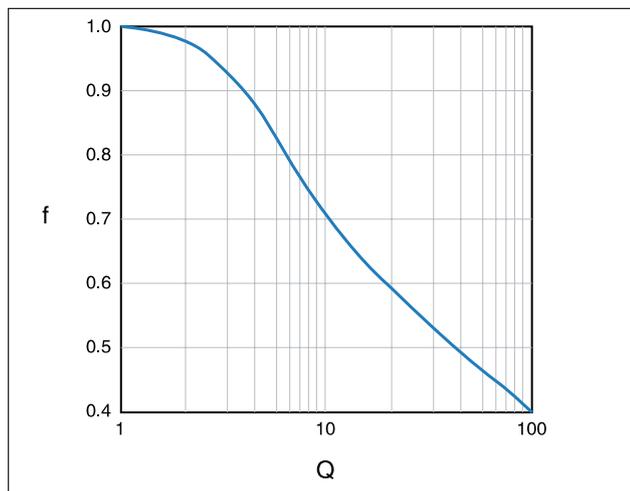


图 3. f 与 Q 关系图。

在知道了 ρ_A 和 ρ_B 之后，可以根据下面的公式得出平均电阻率 (ρ_{AVG}):

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

霍尔电压测量概述

霍尔电压测量对半导体材料表征具有重要意义，因为从霍尔电压和电阻率可以导出传导率类型、载流子密度和迁移率。在应用磁场后，可以使用下面的 I-V 测量配置测量霍尔电压：

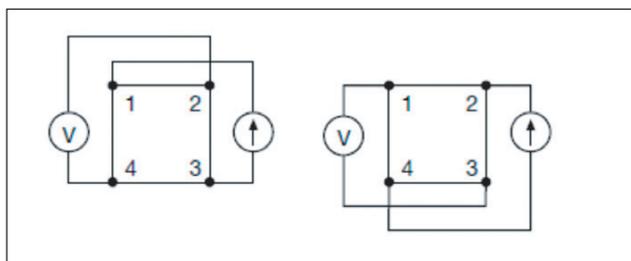


图 4. 霍尔电压测量配置。

把正磁场 B 垂直应用到样本，在端子 3 和端子 1 之间应用一个电流 (I_{31pBp})，测量端子 2 和端子 4 之间的电压下跌 (V_{24pBp})。颠倒电流 (I_{31nBp})，再次测量电压下跌 (V_{24nBp})。这种颠倒电流方法用来校正偏置电压。然后，从端子 2 到端子 4 应用电流 (I_{24pBp})，测量端子 1 和端子 3 之间的电压下跌 (V_{13pBp})。颠倒电流 (I_{24nBp})，再次测量电压下跌 (V_{13nBp})。

颠倒磁场 B_n ，再次重复这一过程，测量电压下跌 V_{24pBn} 、 V_{24nBn} 、 V_{13pBn} 和 V_{13nBn} 。

从 8 项霍尔电压测量中，可以使用下面的公式计算平均霍尔系数：

$$R_{HC} = \frac{t}{4BI} * (V_{24pBp} - V_{24nBp} + V_{24nBn} - V_{24pBn}) * (10^4)$$

$$I = I_{31pBp}, I_{31nBp}, I_{31nBn}, I_{31pBn}$$

$$R_{HD} = \frac{t}{4BI} * (V_{13pBp} - V_{13nBp} + V_{13nBn} - V_{13pBn}) * (10^4)$$

$$I = I_{24pBp}, I_{24nBp}, I_{24nBn}, I_{24pBn}$$

其中： R_{HC} 和 R_{HD} 是霍尔系数 (cm^3/C)

t 是样本厚度 (cm) (注：对数据表霍尔系数，不用应用厚度。)

B 是用 Tesla 表示的磁场通量密度 ($\text{V} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)

I 是电流 (A)

V 表示电压 (V)

10^4 是从 m^2 到 cm^2 的名数转换进率

在计算出 R_{HC} 和 R_{HD} 后，可以通过下面的公式确定平均霍尔系数 ($R_{H_{AVG}}$):

$$R_{H_{AVG}} = \frac{R_{HC} + R_{HD}}{2}$$

从范德堡法电阻率 (ρ_{AVG}) (表示为输出参数 Volume_Resistivity) 和霍尔系数 ($R_{H_{AVG}}$) 中，可以计算出霍尔迁移率 (μ_H):

$$\mu_H = \frac{|R_{H_{AVG}}|}{\rho_{AVG}}$$

使用 4200A 进行范德堡法和霍尔电压测量

4200A-SCS 配有四个 SMU 和前置放大器，简化了范德堡法和霍尔电压测量，因为它包含多项内置测试，可以自动完成这些测量。在使用这些内置测试时，四个 SMUs 连接到样本的四个端子上，如图 5 所示。对每项测量，每个 SMU 的功能会在电流源、电压表或公共之间变化。先测量八项测试中每项测试的电压下跌和测试电流，然后导出电阻率或霍尔系数。霍尔电压测量要求对样本应用一个磁场。

Clarius+ 测试库包括范德堡法和霍尔迁移率测量的测试。在 Select 视图中，可以使用屏幕右侧 Material 材料过滤器，在 Test Library 测试库中找到这些测试，如图 6 所示。选择测试，然后选择 Add 添加，可以把这些测试添加到项目树中。这些测试从 vdpulib 用户程序库中的用户模块创建。

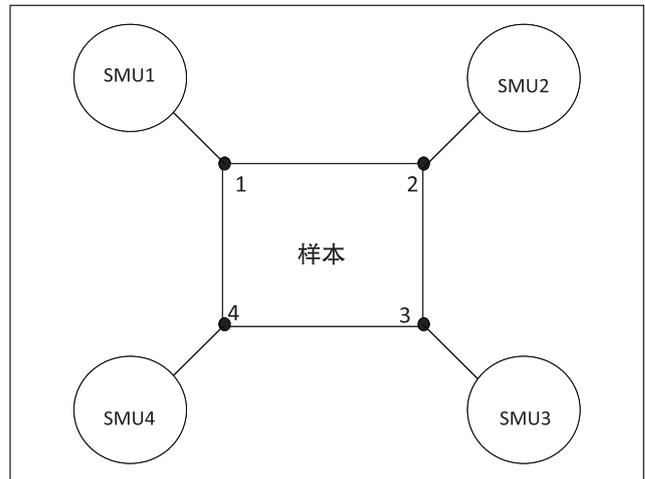


图 5. 四个 SMUs 连接到被测样本的四个端子上。

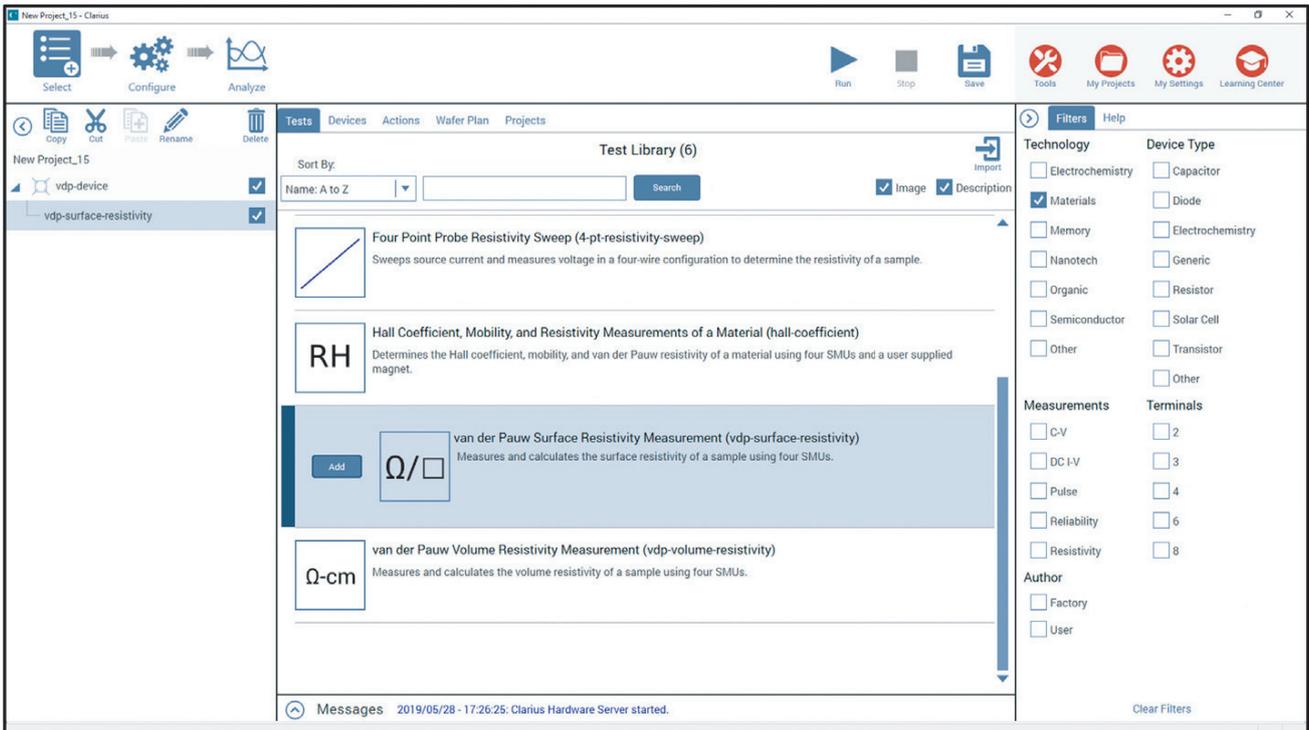


图 6. 选择范德堡法电阻率和霍尔系数测试。

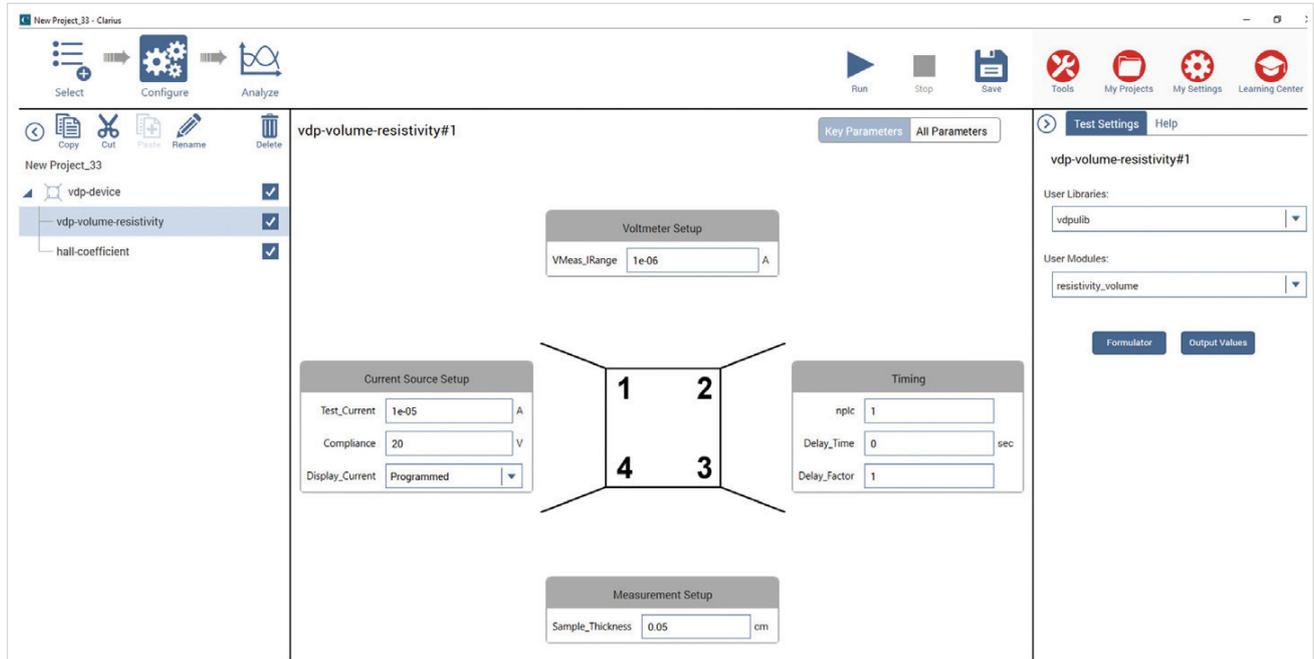


图 7. Configure 配置视图中显示的 vdp-volume-resistivity 测试。

使用范德堡法表面和体积电阻率测试

测试库有两项电阻率测试：**vdp-surface-resistivity** 和 **vdp-volume-resistivity**。**vdp-surface-resistivity** 测试测量和计算电阻率，单位为 Ω/square 。对 **vdp-volume-resistivity** 测试，用户必须输入样本厚度，然后计算出电阻率，单位为 $\Omega\text{-cm}$ 。对这两项测试，都强制应用电流，进行 8 项电压测量。

图 7 是 **vdp-volume-resistivity** 测试的 **Configure** 视图截图，用户可以根据样本要求输入。

表 1 列出了 vdp 测试的 Input 参数。

在输入了输入参数并执行测试后，可以对样本进行测量，每次测量时改变每个 SMU 的功能。每个 SMU 将配置成电流源（输出指定测试电流）、电压表（提供 0A）或公共。具体来说，对每项测试，一个 SMU 将作为电流源，一个 SMU 将作为公共，两个 SMU 将

输入	单位	默认值	范围
测试电流 (I)	A	1.00E-05	I 源值的全部范围
一致性	V	20	V 测量值的剑范围
Display_Current		编程值	编程值或测得值
SMU 定义为电压表时的电流范围	A	1e-6	I 源值的全部范围
nplc		1	0.01 ~ 10
Delay_Time	s	0	
Delay_Factor	N/A	1	0-100
样本厚度 (t)	cm	0.05	1e-7 ~ 1

表 1. 范德堡法测试的输入参数。

在用户指定延迟时间后测量电压。然后从两个 SMU 电压读数中计算出电压差。图 8 显示了这 8 项测量和 SMU 配置。

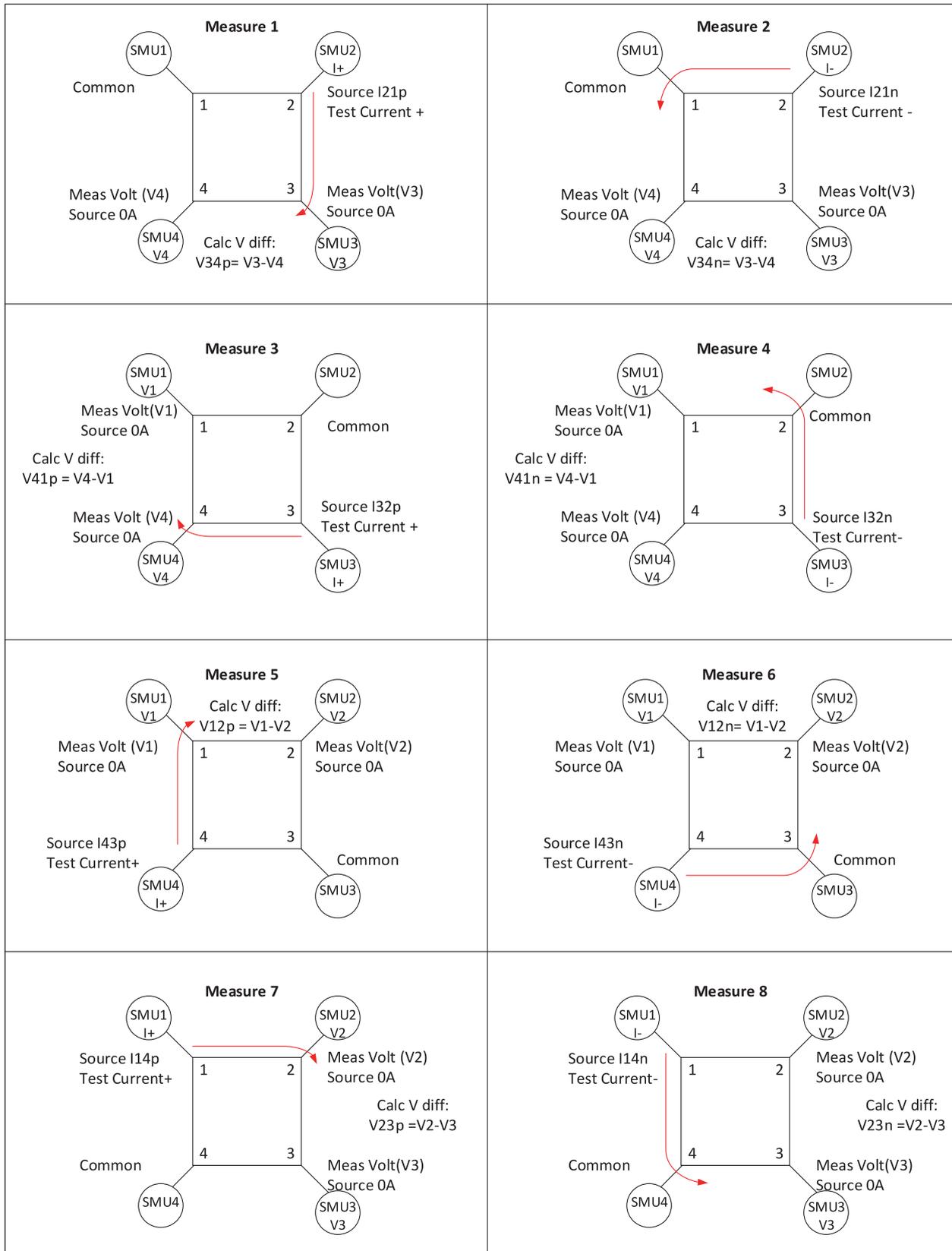


图 8. 8 项范德堡法测量的 SMU 配置。

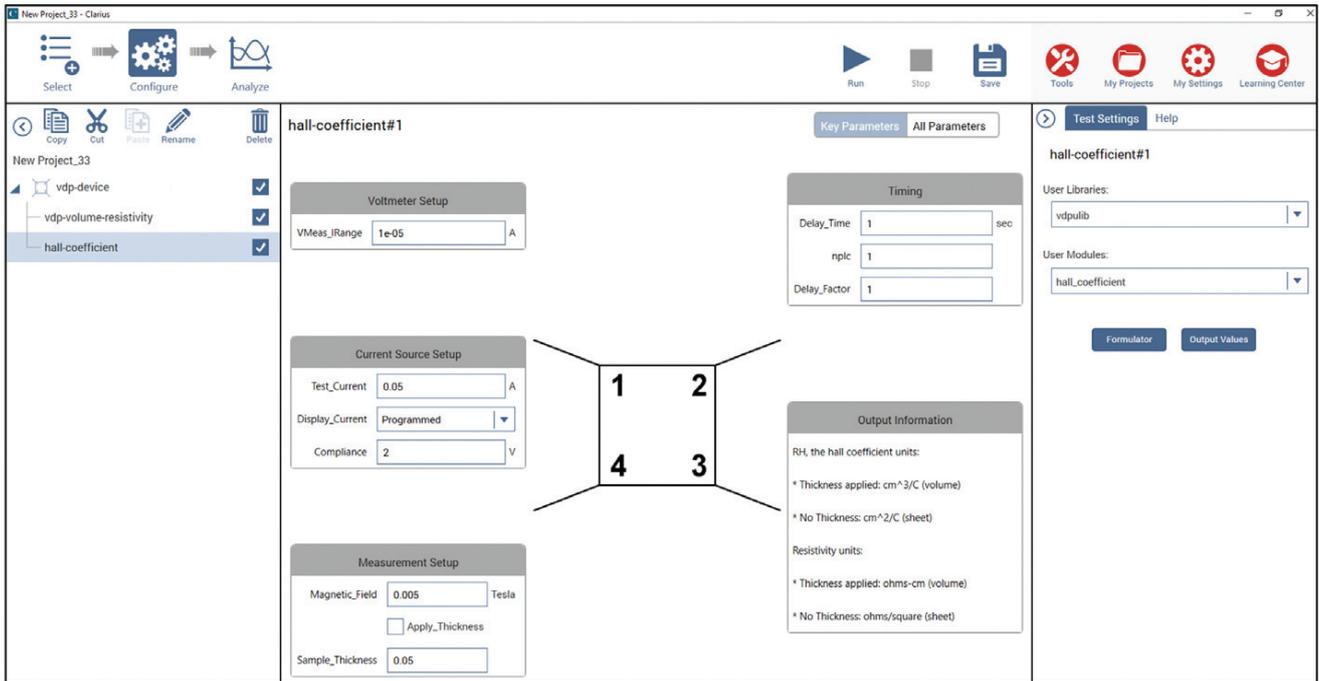


图 9. Configure 配置视图中显示的 hall-coefficient 测试。

从测试电流和 8 个电压差中，可以计算电阻率，公式如下：

$$\rho_A = \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) * t * \frac{(V34p - V34n + V41p - V41n)}{4 * I}$$

$$\rho_B = \left(\frac{\pi}{\ln 2} \right) * t * \frac{(V12p - V12n + V23p - V23n)}{4 * I}$$

$$\text{体积电阻率} = \rho = \frac{\rho_A + \rho_B}{2} \text{ ohm-cm}$$

$$\text{片电阻率} = \sigma = \frac{\rho}{t} \text{ ohm/square}$$

测试完成后，Analyzer 视图电子数据表中会显示电压差和电阻率。下面是返回值列表。

vdp 测试输出：

- 测试电流 I (编程值), V34p, V34n, V41p, V41n, V12p, V12n, V23p, V23n, ρA, ρB, ρ 或 σ
- 如果用户想测量测试电流，那么：I21p, V34p, I21n, V34n, I32p, V41p, I32n, V41n, I43p, V12p, I43n, V12n, I14p, V23p, I14n, V23n, ρA, ρB, ρ 或 σ

使用霍尔系数测试

使用四台 SMU 仪器，强制应用电流，使用正负磁场进行 8 项电压测量。磁场使用固定磁铁生成，会提示用户颠倒磁场。

可以在测试库中找到 **hall-coefficient** 测试，添加到项目树中。图 9 是测试截图。

下面描述了具体步骤，在执行 **hall-coefficient** 测试时：

1. 从测试库中选择 hall-coefficient 测试，可以在 Configure 配置视图中设置输入参数。表 2 列出了输入参数及其说明。
2. 在输入了输入参数后，可以执行测试。先在没有磁场的情况下进行电阻率测量，然后使用 Volume_Resistivity (ρ) 计算霍尔系数。

输入	单位	默认值	范围
Tesla 中的磁场 (B)	T	0.1	0.001 ~ 2
测试电流 (I)	A	1.00E-05	I 源值的全部范围
一致性	V	2	V 测量值的全部范围
Display_Current	工	编程值	编程值或测得值
SMU 定义为电压表时的电 流源范围	A	1e-6	I 源值的全部范围
nplc		1	0.01 ~ 10
Delay_Time	s	0	0.01 ~ 60
Delay_Factor	N/A	1	0-100
样本厚度 (t)	cm	0.05	1e-10 ~ 1
Apply_Thickness		否	是 / 否

表 2. hall-coefficient 测试的输入参数。

测量编号	磁通量	电流应用位置	电流名称	电压测量位置	电压名称
1	+B	3-1	I31pBp	2-4	V24pBp
2	+B	1-3	I31nBp	2-4	V24nBp
3	+B	2-4	I24pBp	1-3	V13pBp
4	+B	4-2	I24nBp	1-3	V13nBp
5	-B	3-1	I31pBn	2-4	V24pBn
6	-B	1-3	I31nBn	2-4	V24nBn
7	-B	2-4	I24pBn	1-3	V13pBn
8	-B	4-2	I24nBn	1-3	V13nBn

表 3. 电流源和电压测量名称。

- 在导出体积电阻率后，会提示用户打开 Tesla 中的正磁场 (B+)。提示信息为：
Please apply a magnetic field with positive polarity to the sample and then press OK to continue. 请对样本使用正极的磁场，然后按 OK 确定并继续。
- 按 OK 确定，然后使用 B+ 进行前四项测量。表 3 中给出了这些测量的定义。
- 在测量完成时，会提示用户改变磁场的极性 (B-)。提示信息为：
Please reverse the polarity of the magnetic field so that the magnetic field is negative and then press OK to continue. 请颠倒磁场的极性，使磁场为负，然后按 OK 确定并继续。
- 按 OK 确定，对 B- 重复四项测量。**表 3 中指明了这些测量，如图 10 所示。**
- 测量完成时，会显示以下提示：
Please remove any magnetic field from the sample and then press OK to continue. 请从样本中移出磁场，然后按 OK 确定并继续。
- 用户按 OK 确定，完成测试。
- 本节最后列明了输出参数。

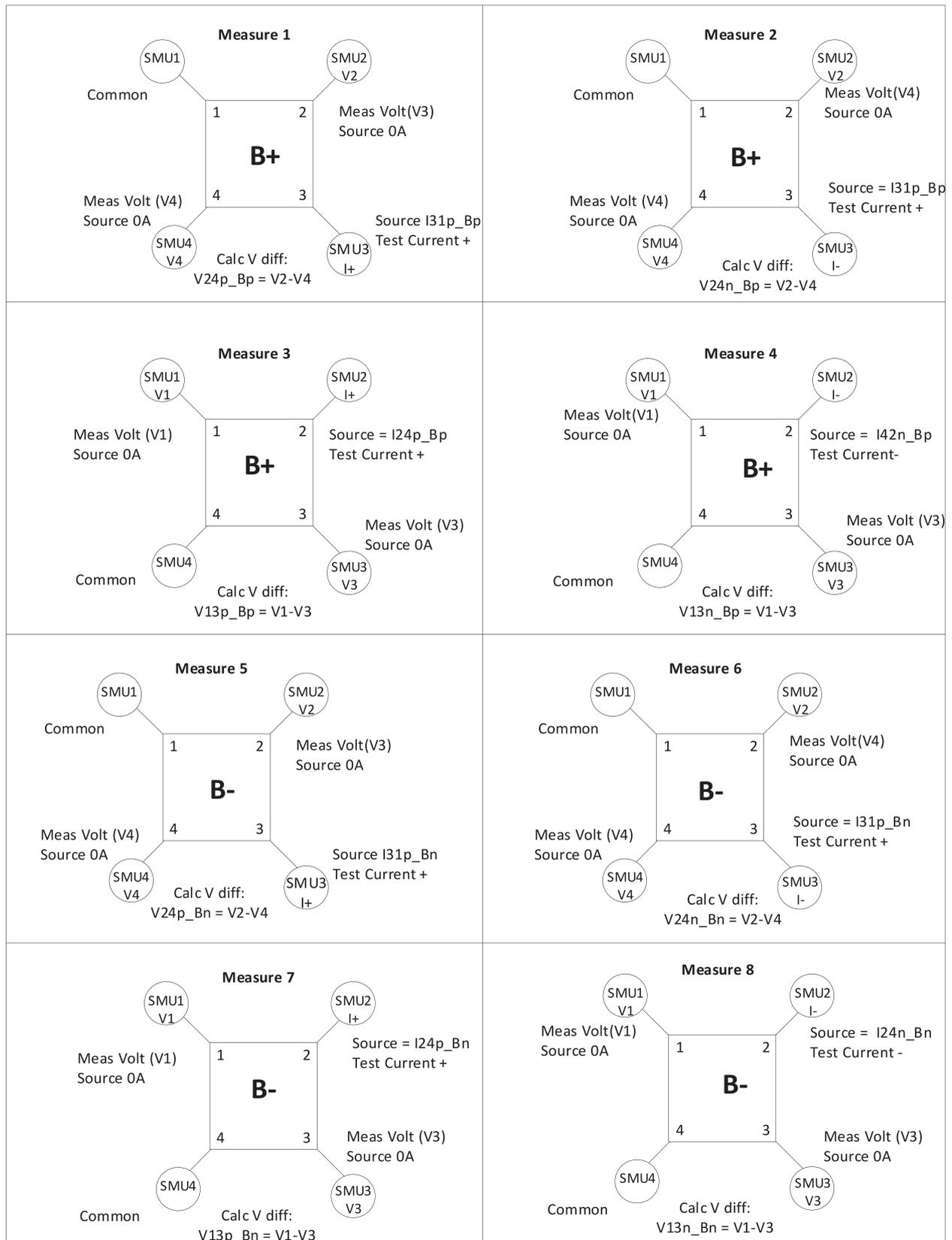


图 10. 8 项霍尔电压测量的 SMU 配置。

使用 4200A-SCS 参数分析仪 进行范德堡法电阻率和霍尔电压测量

hall-coefficient 测试的输出参数

下面列出了 hall-coefficient 测试的输出参数，也可以参阅 Clarius 中 Analyzer 视图的 Sheet 数据表：

RH, 迁移率, 电阻率, I21p, V34p, I21n, V34n, I32p, V41p, I32n, V41n, I43p, V12p, I43n, V12n, I14p, V23p, I14n, V23n, I31pBp, V24pBp, I31nBp, V24nBp, I31pBn, V24pBn, I31nBn, V24nBn, I24pBp, V13pBp, I24nBp, V13nBp, I24pBn, V13pBn, I24nBn, V13nBn, thickness_in_cm, RHC, RHD

注：对没有应用的厚度，电阻率的单位是 ohms/square，RH 的单位是 cm^2/C 。

错误来源和测量考虑因素

为成功地进行电阻率测量，我们必需考虑潜在的错误来源。

静电干扰

当带电物体放到不带电物体附近时，会发生静电干扰。通常情况下，干扰的影响并不显著，因为电荷在低电阻时会迅速消散。但是，高电阻材料不允许电荷迅速衰退，所以可能会导致测量不稳定。由于 DC 或 DC 静电场，可能会产生错误的读数。

为最大限度降低这些场的影响，可以构建一个静电场，密闭灵敏的电路。屏蔽由传导材料制成，一直连接到 SMU 仪器的低阻抗 (FORCE LO) 端子上。

还必须屏蔽电路中的线缆。4200A-SCS 带有低噪声屏蔽三芯同轴电缆。

泄漏电流

对高电阻样本，泄漏电流可能会劣化测量。泄漏电流源于电缆、探头和测试夹具的绝缘电阻。通过使用优

质绝缘体、降低湿度、使用保护装置等，可以最大限度地降低泄漏电流。保护装置是一种导体，它连接到电路中的低阻抗点上，电位几乎与被保护的高阻抗线的电位相同。SMU 的三芯同轴连接器的内部屏蔽应从 SMU 尽可能接近样本。使用三芯同轴电缆和夹具将保证能够保护样本的高阻抗端子。保护连接还会缩短测量时间，因为电缆电容不再影响测量的时间常数。

光线

光敏效应产生的电流可能会劣化测量，特别是在高电阻样本上。为防止这种效应，应将样本放在暗舱中。

温度

热电电压也可能会影响测量精度。如果样本温度不均匀，可能会产生温度梯度。源电流导致的样本变热也可能产生热电电压。来自源电流的变热更可能会影响低电阻样本，因为需要使用更高的测试电流，来使电压测量变得更容易。实验室环境中的温度波动也可能影响测量。由于半导体的温度系数相对较大，所以可能需要使用校正因数，补偿实验室中的温度变化。

载流子注入

为防止少数 / 多数载流子注入影响电阻率测量，两个电压传感端子之间的电压差应保持在 100mV 以下，理想情况下是 25mV，因为热电电压 kt/q 约为 26mV。在不影响测量精度的情况下，测试电流应尽可能低。

总结

通过使用四个 SMUs 和内置测试，可以利用 4200A-SCS 参数分析仪简便地在半导体材料上实现范德堡法测量。通过使用用户提供的磁铁，还可以确定霍尔迁移率。如果想测试低电阻材料，如导体，可以使用基于 Keithley 3765 霍尔效应卡的系统，包括 2182A 纳伏表。

参考书目

ASTM, F76-08。测量外来半导体单晶中霍尔迁移率和霍尔系数的标准方法。

范德堡法，用 L. J. A 方法测量任意形状的磁盘的具体电阻率和霍尔效应。Philips Rec.

Repts., 1958: 13 1. Schroder, Dieter K。

半导体材料和器件表征。John Wiley & Sons, Inc., 第三版，2015。

小信号测量，Keithley Instruments, Cleveland, Ohio, 2014. Rev. 02.2018



泰克官方微信

如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！

或登录泰克公司中文网站：www.tek.com.cn

泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835

泰克科技(中国)有限公司
上海市浦东新区川桥路1227号
邮编：201206
电话：(86 21) 5031 2000
传真：(86 21) 5899 3156

泰克北京办事处
北京市海淀区花园路4号
通恒大厦3楼301室
邮编：100088
电话：(86 10) 5795 0700
传真：(86 10) 6235 1236

泰克上海办事处
上海市长宁区福泉北路518号
9座5楼
邮编：200335
电话：(86 21) 3397 0800
传真：(86 21) 6289 7267

泰克深圳办事处
深圳市深南东路5002号
信兴广场地王商业大厦3001-3002室
邮编：518008
电话：(86 755) 8246 0909
传真：(86 755) 8246 1539

泰克成都办事处
成都市锦江区三色路38号
博瑞创意成都B座1604
邮编：610063
电话：(86 28) 6530 4900
传真：(86 28) 8527 0053

泰克西安办事处
西安市二环南路西段88号
老三届世纪星大厦26层L座
邮编：710065
电话：(86 29) 8723 1794
传真：(86 29) 8721 8549

泰克武汉办事处
武汉市洪山区珞喻路726号
华美达大酒店702室
邮编：430074
电话：(86 27) 8781 2760

泰克香港办事处
香港九龙尖沙咀弥敦道132号
美丽华大厦808-809室
电话：(852) 2585 6688
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，敬请登录：WWW.TEK.COM.CN

© 年泰克科技版权所有，侵权必究。泰克产品受到美国和其他国家已经签发及正在申请的专利保护。本资料中的信息代替此前出版的所有材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克科技公司的注册商标。本文中提到的所有其他商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

092419 AH 1KC-60641-1

