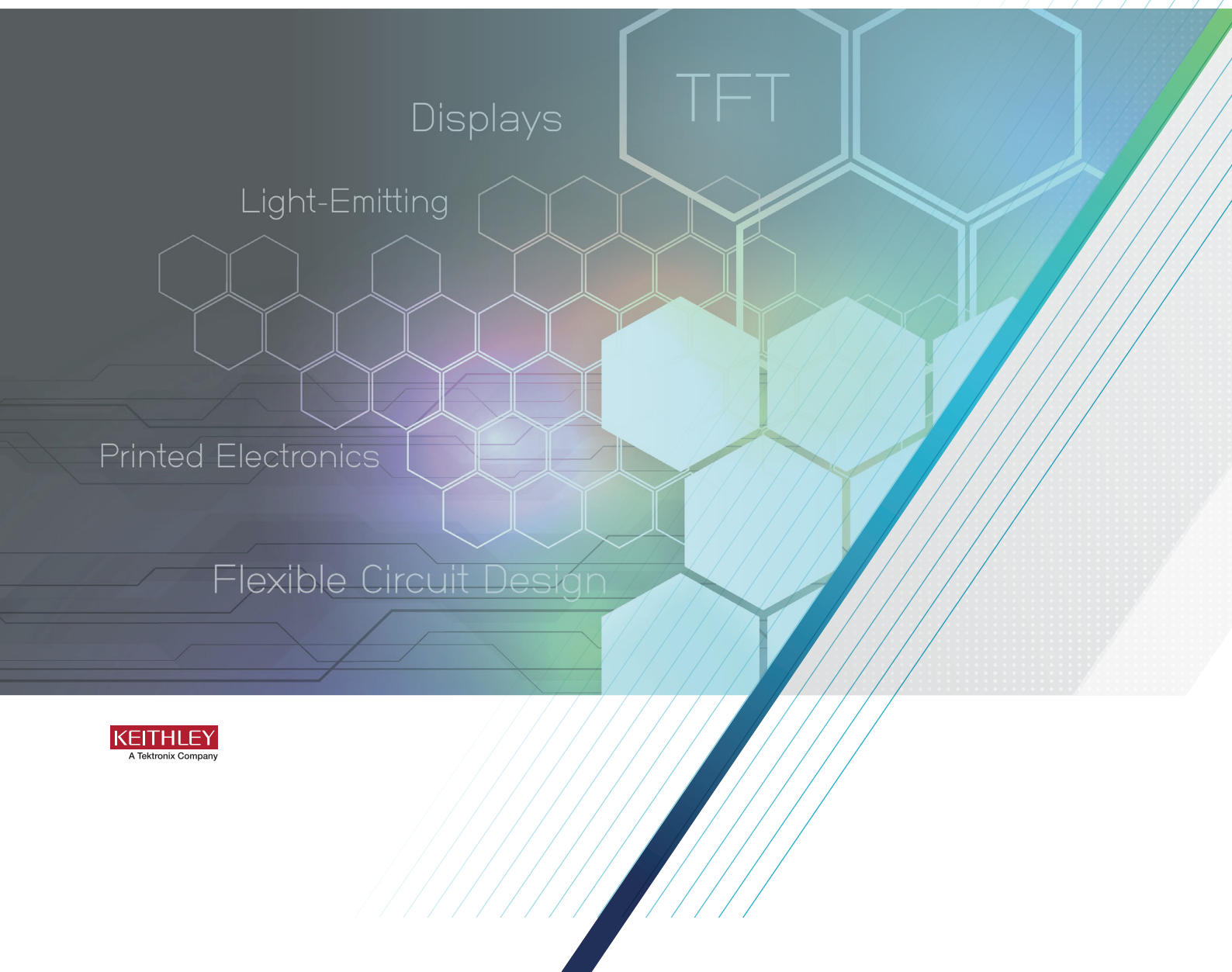


有机 FET 的 DC I–V 和 AC 阻抗测试

应用指南



KEITHLEY
A Tektronix Company

Tektronix®

引言

有机半导体器件是为替代传统半导体器件而开发的，因为它们采用的材料成本更低，制造成本更低，可以印刷到纸和玻璃等物体的表面，可以用于柔性印刷电路设计中。这些器件用在各种各样的应用中，包括显示器、医疗器械、照明、传感器、内存器件、电池和太阳能电池。有机场效应晶体管 (OFET) 就是最常见的有机半导体器件之一。

OFET 研究一般力求优化器件性能，如载流子迁移率和开 / 关电流比。DC I-V 技术用来确定输出和转移特点、滞后效应、偏压、栅极泄漏电流等。AC 阻抗技术可以揭示与器件相关的关键信息，如载流子迁移率、阈值电压、平带电压和电荷效应。

本应用指南概括介绍怎样使用 4200A-SCS 参数分析仪优化 OFET 的 DC I-V 和 AC 阻抗测量。我们将讨论时间参数、降噪、屏蔽、正确布线及实现最佳效果的其他重要测量考虑因素。

有机场效应晶体管 (OFET)

OFET 是一种场效应晶体管，采用有机半导体材料作为器件源极端子和漏极端子之间的通道。有机薄膜晶体管 (OTFT) 是 OFET 中的一种，在本应用指南中，我们将这两种 FET 作为同义词使用。**图 1** 是一个栅极位于底部的 OFET。有机半导体放在电介质上方，电介质做在栅极端子上方。两个金属触点位于有机半导体顶部，作为源极端子和漏极端子。这三个器件端子连接起来，执行电学测量。

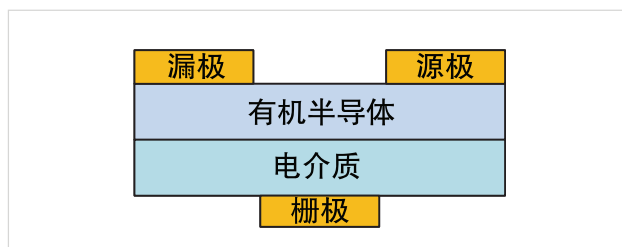


图 1. 底部栅极有机场效应晶体管。

使用 4200A-SCS 进行电气测量

4200A-SCS 系统包括多项测试，在有机 FET 上进行最常用的电学测量。我们可以在 Test Library 测试库中找到进行 DC I-V、超低频率 C-V 和高频 C-V 测量的这些测试，具体方式是：进入 Clarius 软件 Select 视图，搜索关键字“ofet”或“organic”；也可以在 Search 字段中使用关键字“ofet”或“organic”，在 Project Library 项目库的 Organic FET Characterization Project (ofet) 中找到所有这些测试。**图 2** 是这个项目的截屏。除系统提供的测试外，用户还可以根据自己的应用和测量要求，简便地创建自己的测试和项目。

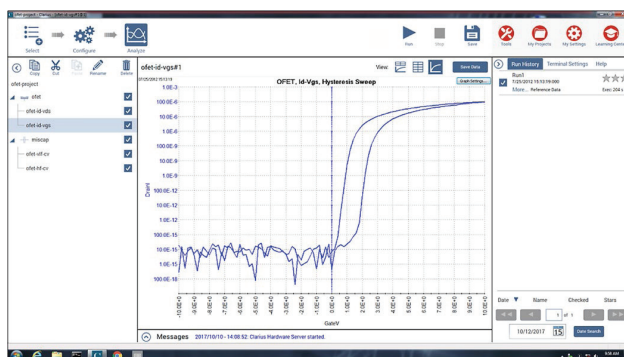


图 2. 有机 FET 表征项目截屏。

电流 – 电压测量

有机器件的 I-V 特点可以用来提取器件的许多参数，研究制造工艺的效应，确定触点的质量。Test Library 测试库和 Organic FET Characterization 有机 FET 表征项目包括多项测试，可以测量 OFET 的输出特点 (ID-VDS) 和传递特点 (ID-VGS)。

图 3 是使用两台 SMU(4200-SMU、4201-SMU、4210-SMU 或 4211-SMU) 并选配 4200-PA 前置放大器，测量 OFET 的转移特点的 DC I-V 测试配置。这些 SMU 能够同时提供和测量电流和电压。它们拥有皮安灵敏度，可以限流，防止损坏器件。在这个图中，SMU1 连接到 OFET 的栅极上，SMU2 连接到漏极端子上。源极端子连接到接地单元 (GNDU) 上，如果必需从 OFET 这三个端子供电和测量的话，源极端子也可以连接到第三台 SMU 上。

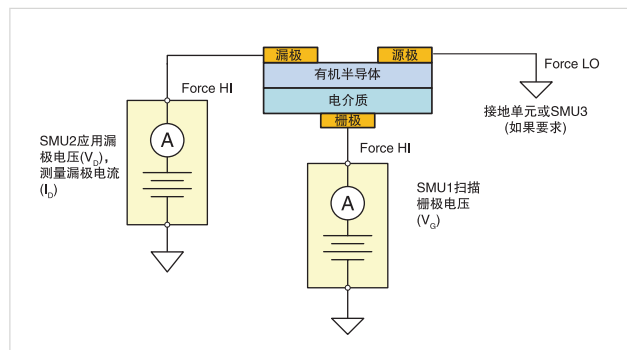


图 3. 测量 OFET 的 DC I-V 特点的电路图。

一旦 SMU 连接到 OFET 上，我们可以使用 Test Library 测试库中的 Organic FET Drain Current vs. Gate Voltage (ofet-id-vgs) 测试生成转移特性。在这项测试中，SMU2 应用恒定的漏极电压 (VD)，测量漏极电流 (ID)；SMU1 扫描栅极电压 (VG)。**图 4** 显示了漏极电流测量结果，它与 OFET 的栅极电压相关。我们使用软件中的 Dual Sweep 双扫描功能执行滞后扫描。注意，配有前置放大器的 SMU 可以执行从飞安 fA 到毫安的几十种电流测量。

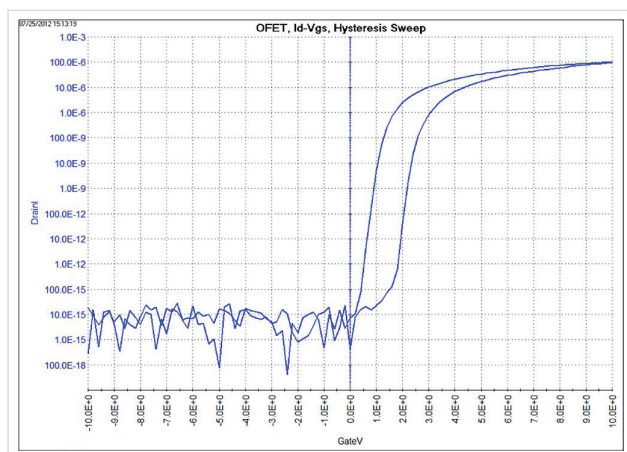


图 4. OFET 的 ID-VGS 曲线。

在 Clarius 软件中，可以简便地重新配置连接到 OFET 每个端子的 SMU，来执行其他测试。通过在软件中改变 SMU 参数，还可以测量输出特点 ID vs. VD。我们也可以使用 Test Library 测试库中预先配置好的 Organic FET Output Characteristics (ofet-id-vds) 测试。通过步进提高栅极电压，测量相对于漏极电压的漏极电流，可以生成漏极家族曲线。图 5 显示了使用 ofet-id-vds 测试测量 p 型 OFET 的 ID-VDS 曲线的结果。

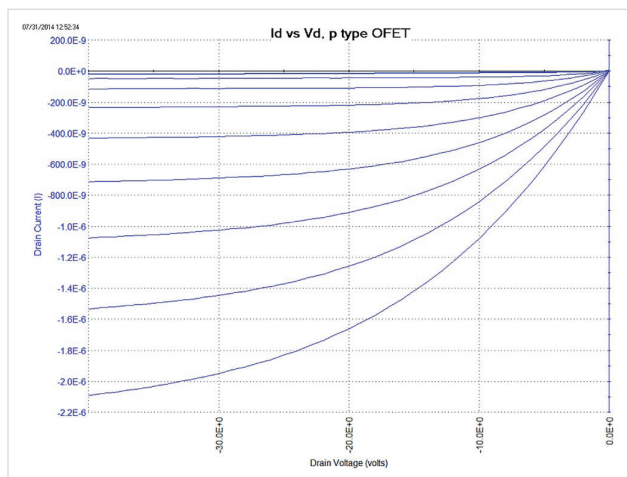


图 5. p 型 OFET 的输出特点。

优化 DC I-V 测量

在使用 4200A-SCS 对有机 FET 进行 DC 测量时，下面的技术将改善测量质量。

消除引线 and 接触电阻：在使用电缆把 SMU 连接到器件上时，电缆的串联电阻可能会导致测量误差。在使用长连接电缆和高电流时，电缆电阻的效应尤其有害，因为与实测电压相比会出现明显压降。

如图 6 所示，在进行 2 线或本地传感连接时，电缆电阻引起的压降被增加到 DUT 的电压测量中。在这种情况下，电流流经两条电缆及 DUT，导致三次压降，SMU 电压表都测到了。为了从测量中消除电缆电阻，我们对器件采用 4 线或远程传感连接，如图 6 右半部分所示。在这种情况下，SMU 电压表只测得 DUT 的压降。

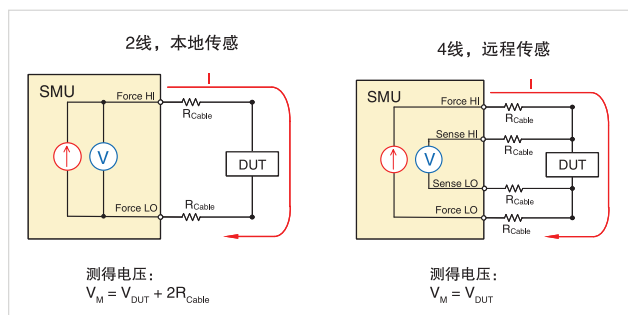


图 6. 本地传感与远程传感比较。

使测量中的噪声达到最小：各种来源都可能会产生噪声，包括 AC 抽取和静电干扰。当噪声源叠加在被测量的 DC 信号上时，测量结果就会有噪声，进而会导致测量不准确或波动。

最常见的外部噪声抽取形式是 60 Hz (或 50 Hz) 工频周期抽取，在靠近荧光灯时经常会发生这种情况。几毫伏的噪声并不少见。吉时利采用一种技术，称为 Line-Cycle Integration 工频周期积分，来最大限度地

降低 60 Hz (或 50 Hz) 工频捡拾的效应。在积分时间或测量窗口等于工频周期的整数倍时，工频周期噪声会平均化。我们可以使用 Test Settings 测试设置窗格中的 Speed 速度设置，来调整这个模数转换间隙时间 (测量窗口)。

在测量低电流时，静电干扰是导致测量噪声的另一个原因。在带电物体接近被测电路时，会发生这种耦合。在高阻抗电路中，这种电荷不会迅速衰减，可能会导致测量不稳定。读数错误既可能是 DC 静电场引起的，也可能是 AC 静电场引起的，因此静电屏蔽有助于使这些场效应达到最小。

静电屏蔽可能只是一个简单的金属盒，从外面把测试电路包起来。但在实验室杂物箱内处理时，这会很难，其通常与有机器件一起使用。探针台通常包括一个静电 /EMI 屏蔽装置或选配的黑匣子。如图 7 所示，屏蔽装置包着器件，连接到测量电路 LO 上，也就是 SMU 的 Force LO 端子。Force LO 端子是 SMU 三同轴电缆的外部屏蔽层，也位于接地单元 (GNDU) 中 4200A-SCS 的后面板上。所有电缆都必需是低噪声且屏蔽的。每台 SMU 带有两条低噪声三同轴电缆。

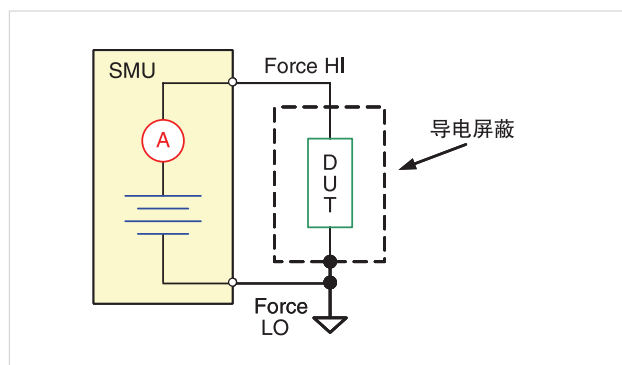


图 7. 导电屏蔽包着被测器件。

提供充足的稳定时间：由于器件泄漏电流通常要测量非常低的电流 (<1 nA)，所以必需允许充足的稳定时间，以保证在应用电压偏置后测量能够稳定。影响测量电路稳定时间的部分因素包括：电缆，测试夹具，开关，探针，DUT 电阻和电容，SMU 的电流范围。

为了保证读数稳定，在测量前可以在电压步长里增加额外的延时。在 Clarius 软件的 Test Settings 测试设置窗格中，可以简便地调节这个延时。

超低频率电容 – 电压技术

除测量非常小的电流外，可以使用带两台前置放大器的 SMU，来测量超低频率 C-V (VLF C-V)。可以在 10 mHz ~ 10 Hz 的测试频率中进行 C-V 扫描和 C-t 测量。**图 8** 是用来生成低频阻抗测量的两台 SMU 配置的简化示意图。这种配置要求一台 4200A-SCS 参数分析仪，带有两台 SMU 和两个 4200-PA 前置放大器，被测器件连接各一。SMU1 输出 DC 偏置及叠加的 AC 信号，测量电压；SMU2 测量得到的 AC 电流，同时提供 0V DC。

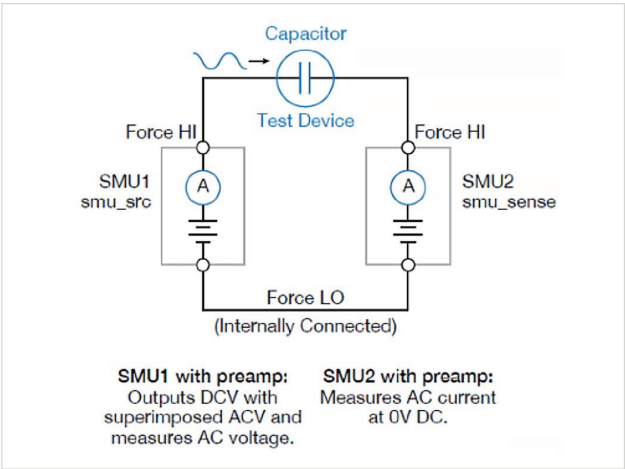


图 8. 超低频率 C-V 测量连接图。

在强加电压时，我们会在多个周期上同时获得电压和电流测量。从得到的电压和电流正弦曲线之比的离散傅立叶变换 (DFT) 中，可以提取 DUT 阻抗的幅度和相位。可以在变化的频率 (10 mHz ~ 10 Hz) 上采集窄带信息，测量 DUT 的复合阻抗。得到的输出参数包括：

阻抗 (Z)，相位角 (θ)，电容 (C)，电感 (G)，电阻 (R)，电抗 (X)，消耗因数 (D)。

由于超低频率方法只适用于有限的频率范围，因此被测器件 (DUT) 的电容应位于 1 pF ~ 10 nF 范围内。表 1 汇总了 VLF C-V 指标。如需了解完整的技术指标及与这一技术有关的更详细的信息，请参阅吉时利应用指南：“[使用 4200A-SCS 参数分析仪对高阻抗器件执行超低频率电容 – 电压测量](#)”。

表 1. 典型的测量准确度²

| 频率 | 测得电容 | C 准确度 @ 300 mV rms ¹ | C 准确度 @ 30 mV rms ¹ |
|---------|--------|---------------------------------|--------------------------------|
| 10 Hz | 1 pF | 10% | 13% |
| | 10 pF | 10% | 10% |
| | 100 pF | 5% | 5% |
| | 1 nF | 5% | 9% |
| | 10 nF | 5% | 5% |
| 1 Hz | 1 pF | 2% | 2% |
| | 10 pF | 1% | 2% |
| | 100 pF | 2% | 1% |
| | 1 nF | 2% | 1% |
| | 10 nF | 2% | 2% |
| 100 mHz | 1 pF | 2% | 3% |
| | 10 pF | 2% | 2% |
| | 100 pF | 2% | 2% |
| | 1 nF | 1% | 2% |
| | 10 nF | 2% | 1% |
| 10 mHz | 1 pF | 5% | 10% |
| | 10 pF | 1% | 2% |
| | 100 pF | 1% | 1% |
| | 1 nF | 1% | 1% |
| | 10 nF | 2% | 2% |

备注

- ±20V 最大值包括 DC 偏置 AC 测试信号峰值电压。最大负偏置电压 = -20 + (AC 电压 *)。最大正偏置电压 = 20 - (AC 电压 *)。
- 测试器件的消耗因数必须 DX < 0.1。显示的所有数据适用于 DC 偏置电压 = 0V。

所有技术指标适用于：23°C ± 5°C，校准后一年内，相对湿度 5%~60%，预热 30 分钟后。

有机 FET 的 VLF C-V 表征

可以在不同类型的器件上使用执行 VLF C-V 测量的内置软件，包括有机 FET 和 MIS 电容器件。**图 9** 显示了在 OFET 上在栅极端子和漏极端子之间执行 C-V 扫描的结果，测试频率为 0.25 Hz，我们使用了 Test Library 测试库中的 Organic FET Very Low Frequency C-V Sweep (ofet-vlf-cv) 测试。

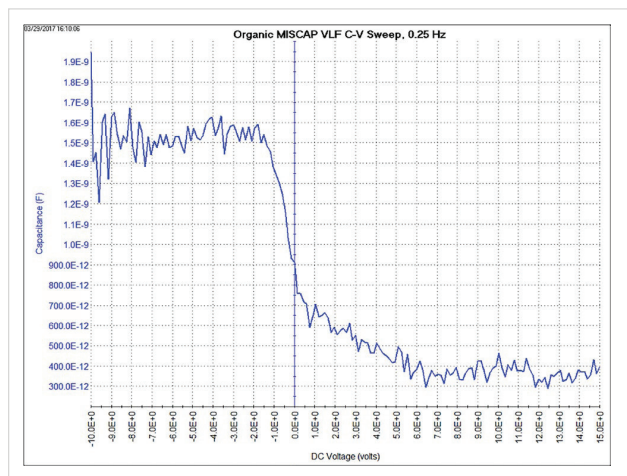


图 9. OFET 超低频率 C-V 扫描，测试频率为 0.25 Hz。

高频率电容 – 电压测量

除 DC I-V 和 VLF C-V 测量外，测量 OFET 的电容可以提供与器件相关的信息，包括栅极电容和载流子迁移率。**图 10** 显示了 4210-CVU 或 4215-CVU 电容电压单元与 OFET 的连接。在这种配置中，栅极到漏极电容是相对于栅极电压测量的。

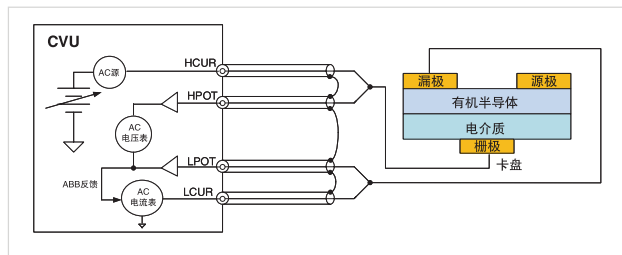


图 10. CVU 与 OFET 连接图。

我们使用 Test Library 测试库中的 Organic FET C-V Sweep (ofet-hf-cv) 测试，在 OFET 的栅极端子和漏极端子之间生成一个 -10 V 到 10 V 的 C-V 扫描。C-V 扫描结果如**图 11** 所示。

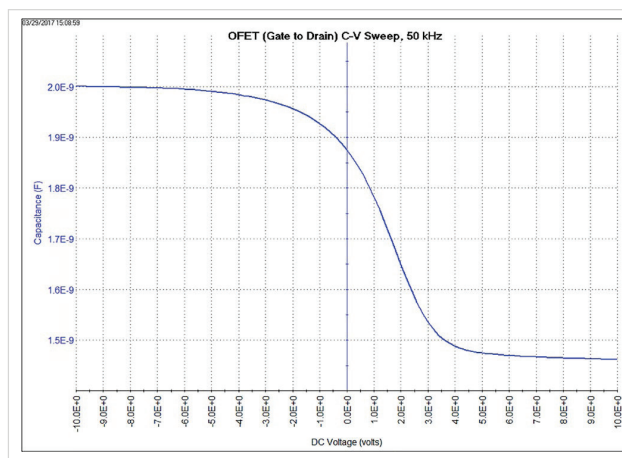


图 11. OFET 高频 C-V 扫描。

优化电容测量

以下指引有助于改善使用 4200A-SCS 进行电容测量的质量：

执行开路补偿 (适用于 <10 pF 的测量)：开路校正功能补偿线缆和连接中的电容偏置。执行校正分两步完成：先执行校正，然后在测试内部启用。

在 Clarius 软件中执行校正时，先选择屏幕顶部的 Tools 工具，然后选择 CVU Connection Compensation 连接补偿。对开路校正，选择 Measure Open 测量开路。探头必须抬起，或者从测试夹具中移出 DUT。一旦从 Tools 工具菜单中采集了校正数据，那么在 Terminal Settings 测试设置窗格中选择 Open Compensation 开路补偿，启用校正。

选择适当的保持和扫描延时：在应用电压步长后所有内部电容完全充满时的器件状态称为“均衡”。如果电容测量是在器件处于均衡状态前进行的，那么这些测量的结果可能会不准确。

为选择适当的延时，使用 Sampling Test Mode 采样测试对器件应用 DC 电压，绘制电容随时间变化图。从图中观察稳定时间。观察到的这个均衡时间可以作为保持时间，也就是预加压电压在扫描开始或采样模

式开始前输出的时间。观察到的时间还可以作为扫描延时，应用到扫描的每一步中。扫描延时可能不需要像保持时间那么长。用户需要试验或检验特定测试在 Test Settings 窗格中使用的时间是否适当。

使用正确的屏蔽连接：在 1 MHz 以上的测试频率测量 AC 阻抗时，在连接同轴电缆的屏蔽层时要尽可能靠近器件。这可以减少屏蔽层的环路面积，最大限度地降低电感。这还有助于保持传输线效应。如果屏蔽层没有连接在一起，那么可能会发生偏差。

在 Test Settings 窗口中选择适当的 Speed Mode 速度模式：Speed Mode 速度模式功能可以调节稳定时间，测出测量的窗口 (模数转换间隙)。对小的电容，可以使用 Quiet 静默模式或 Custom Speed 自定义速度模式，效果会最好。

总结

适当的仪器和测量技术可以最优化地对有机 FET 进行电气表征。4200A-SCS 为执行 OFET 电气表征提供了理想的工具，因为其拥有集成硬件、交互软件和各种分析功能。测试系统包括多种内置工具，如开路校正、参考视频、帮助功能、时序控制，帮助科研人员最大限度地缩短设置时间，尽快实现最佳测量结果。



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

北京市朝阳区酒仙桥路6号院
电子城·国际电子总部二期
七号楼2层203单元
邮编：100015
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) 3168 6695
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，敬请登录：WWW.TEK.COM.CN

© 泰克公司版权所有，侵权必究。泰克产品受到已经签发及正在申请的美国专利和外国专利保护。本文中的信息代替所有以前出版的材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。本文中提到的所有其它商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

040320 SBG 1KC-61313-0

