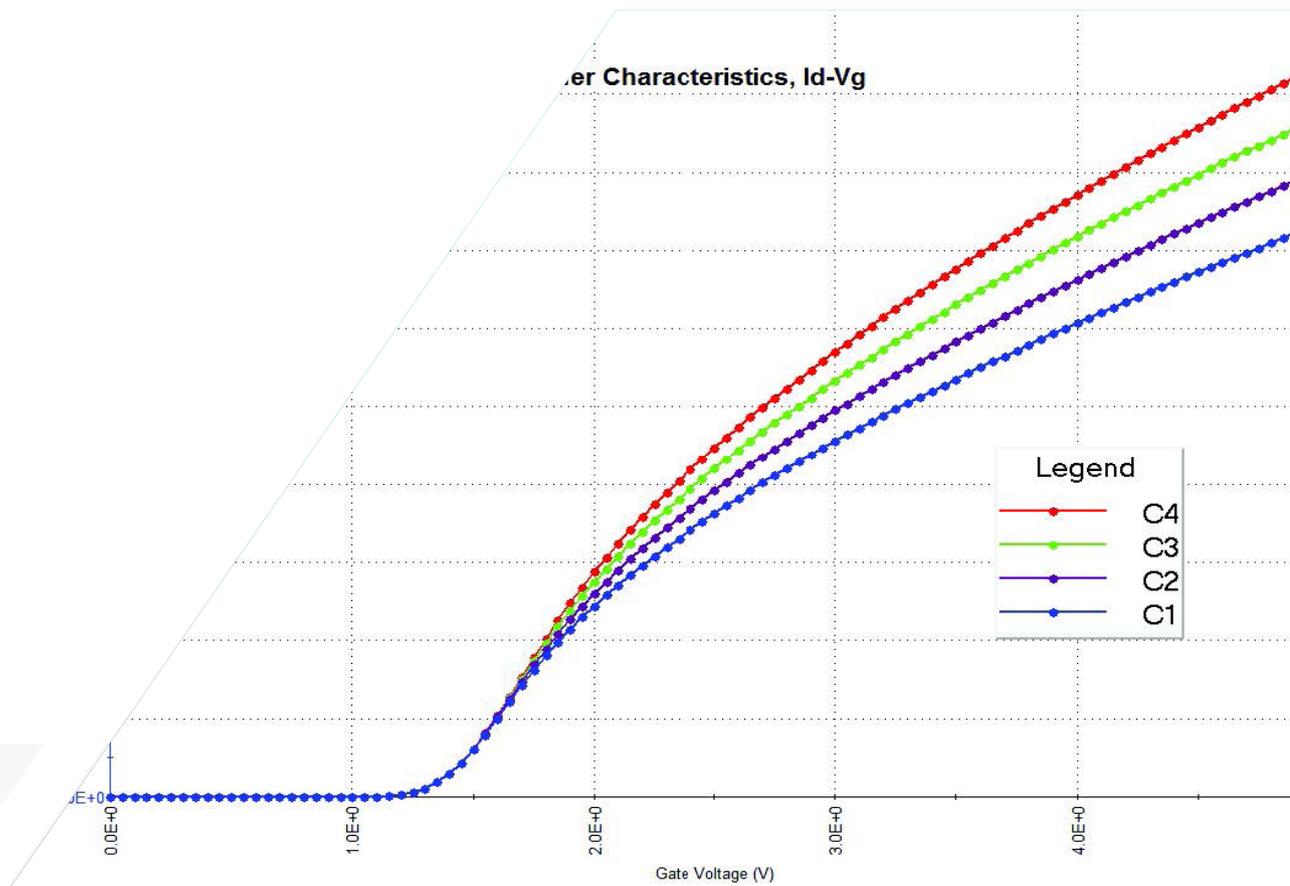




基于4200A-SCS参数分析仪FET生物传感器的直流I-V特性研究

应用指南



简介

由于半导体生物传感器的低成本、迅速反应、检测准确等优点，对于此类传感器的研究和开发进行了大量投入。特别是基于场效应晶体管 (FET) 的生物传感器或生物场效应管，它们被广泛用于各种应用：如生物研究，即时诊断，环境应用，以及食品安全。

生物场效应管将生物响应转换为分析物，并将其转换为可以使用直流 I-V 技术轻松测量的电信号。输出特性 (I_d - V_d)、传输特性 (I_d - V_g) 和电流测量值相对于时间 (I - t) 可以与分析物的检测和幅度相关。

根据设备上的终端数量，可以使用多个源测量单元 (SMU) 轻松完成这些直流 I-V 测试。SMU 是一种既可以输出又可以测量电流和电压的仪器，可以用来对 FET 的栅极和漏极施加电压。如图 1 所示，Keithley 4200A-SCS 参数分析仪是多个 SMU 与交互式软件相结合的集成系统。这种可配置的测试系统将这些测量

简化为一个集成系统，包括硬件、交互软件、图形和分析功能。

本应用说明描述了典型的生物场效应管，描述了如何将 SMU 和被测器件进行电气连接，定义了常见的直流 I-V 测试和用于进行测量的仪器，并解释了测量注意事项以达到最佳测量结果。



图 1. 4200A-SCS 参数分析仪

生物场效应管 /BioFET 传感器

生物晶体管传感器包含一个晶体管和一个生物敏感层，用于检测类似于生物分子等生物成分。图 2 显示了一个简化的图，说明了生物晶体管传感器是如何工作的。

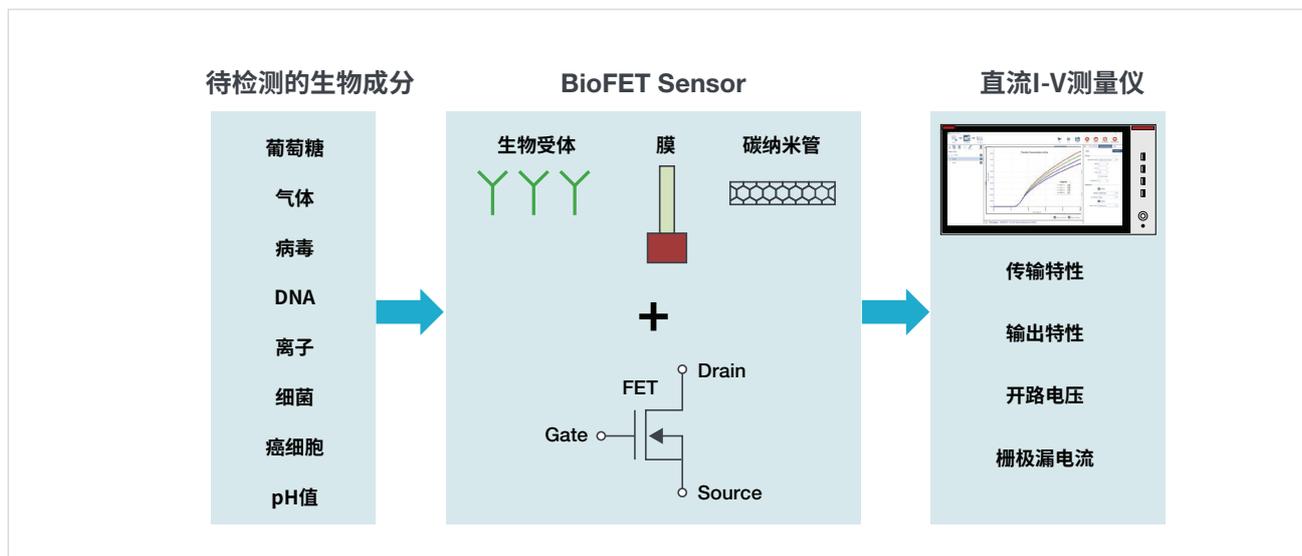


图 2. 使用生物传感器和直流 I-V 测量仪器检测和测量生物成分

使用生物传感器，生物成分如葡萄糖、病毒、PH 值或癌细胞等被传感元件（如生物受体、传感膜或碳纳米材料）检测，这些传感元件是生物传感器的一部分。该装置将对被分析物的生物反应转化为电信号。生物元件的检测和浓度与流过晶体管的漏极电流有关。然后使用直流 I-V 测量仪器测量 FET 的电信号。这些测量仪器与测量传统晶体管的测量仪器是一样的。

在这些设备上执行的常见直流 I-V 测试包括传输特性、输出特性、阈值电压、开路电位和设备的栅极漏电流。

MOSFET 概述

许多生物晶体传感器基于 MOSFET 或金属氧化物半导体 FET，这是一个带有绝缘栅极的三端或四端 FET。

图 3 显示了一个 n 沟道 MOSFET 或 nMOS 晶体管，具有四个端子：栅极、漏极、源极和体极（块体）。源极和漏极触点是大量掺杂 n+ 的区域。衬底为低掺杂材料 p-。栅极用一层很薄的氧化层（通常是 SiO₂）与通道绝缘。

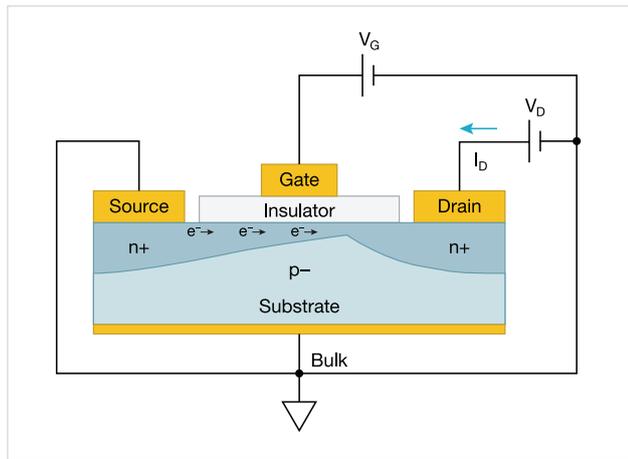


图 3. MOSFET 简化电路

当电压源连接到栅极和漏极端并施加偏置电压 V_g 和 V_d 时，在源极和漏极端之间形成导电通道。电流开始从漏极流向源极。电流流动的方向与带负电的电子的运动方向相反。栅极电压与载流子一起控制通道。

如图 4 所示，电路中的两个电源可以替换为 SMU。SMU 可以提供电压和测量电流，以确定 MOSFET 的 I-V 特性。在本例中，一个 SMU 连接到栅极端子上，施加栅极电压并测量栅极泄漏电流。第二个 SMU 连接到漏极端，施加漏极电压并测量由此产生的漏极电流。

除了加载电压和测量电流外，还可以远程控制 SMU 改变电压源的极性，并设置合适的钳位电流，以防止过大的电流损坏设备。

根据 I-V 测量需求，SMU 也可以连接到 MOSFET 的 Source 和 Bulk 端。本示例中，Source 端和 Bulk 端分别连接在 SMU 的 LO 终端上。

当使用多个 SMU 时，SMU 的时间必须同步，这在 4200A-SCS 参数分析仪内会自动完成。

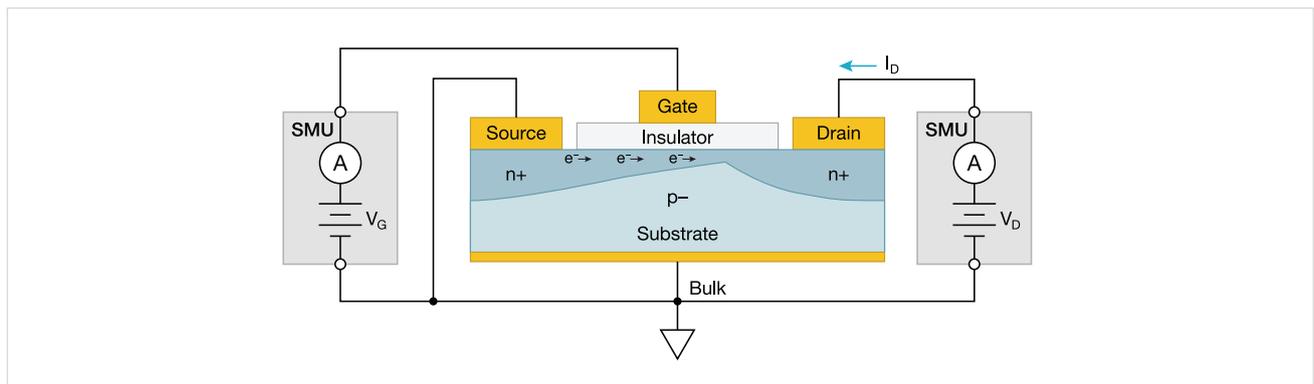


图 4. 使用 SMU 测试 MOSFET 的直流 I-V 特性

BioFETs 示例

在本节中，将提供常见生物场效应管的示例以及如何与这些器件进行电气连接。这些例子包括背栅生物场效应管、扩展栅极 FET 和离子敏感型 FET。

Back-Gated BioFET

在背栅生物场效应管中，如图 5 所示，电和化学绝缘材料将半导体层与导电通道分开。当生物受体暴露于特定的分析物或生物元素时，FET 的 I-V 特性将受到影响。在这种情况下，漏极电流与生物因素有关，如病原体或其他生物分析物。

电路中的两个 SMU 用于偏置和表征器件。一个 SMU 连接到栅极，第二个 SMU 连接到漏极。源端可以连接到 4200A-SCS 的接地单元，也可以连接到第三个 SMU。

在这个例子中，SMU1 提供栅极电压，也可以用来测量栅极泄漏电流。有时使用电源来加载栅极电压，SMU 的使用提供了一个优势，因为它还可以测量栅极泄漏电流，这有助于研究器件的 I-V 特性。栅极电压用于控制通道宽度，并可用于增加对分析物的灵敏度，因此更容易测量漏极电流。SMU2 连接到漏极端并施加漏极电压 (V_D) 并测量漏极电流 (I_D)。

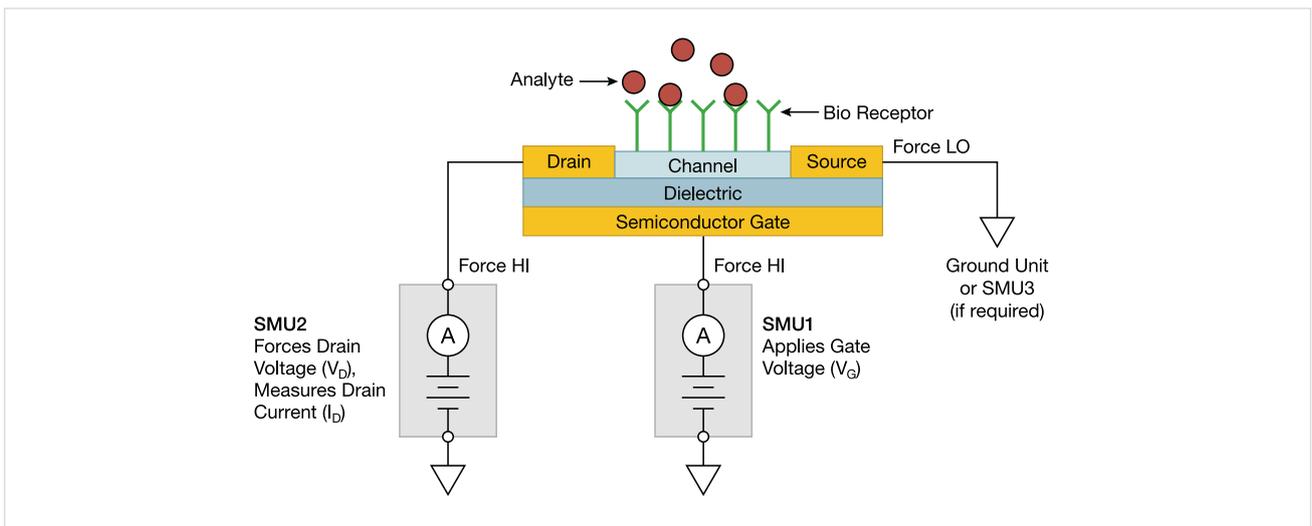


图 5. 背栅 BioFET

扩展栅 FET(EGFET)

图 6 显示了一个扩展栅 FET，它包括一个传感结构和一个 MOSFET。在这种生物场效应管中，传感结构和 MOSFET 在物理上分为两部分。由于 MOSFET 与传感元件是分离的，因此可以使用市售的 MOSFET 作为传感器。

EGFET 有一个与 MOSFET 栅极直接接触的工作电极。工作电极在电解质溶液中也有传感膜，用于检测分

析物。在这种配置中，SMU1 连接到参考电极并输出参考电压 (V_{REF})。该电压用于控制 FET 的通道宽度。SMU2 施加漏极电压 (V_D) 并测量漏极电流 (I_D)。

与背栅 FET 一样，由两个 SMU 测量的 MOSFET 的转移特性 (I_D vs. V_{REF}) 将根据分析物而变化。SMU 也可以用来测量输出特性 (I_D vs. V_D) 和器件的栅漏电流。

EGFET 的一些应用包括检测特定分子，如葡萄糖、pH 值和离子种类。

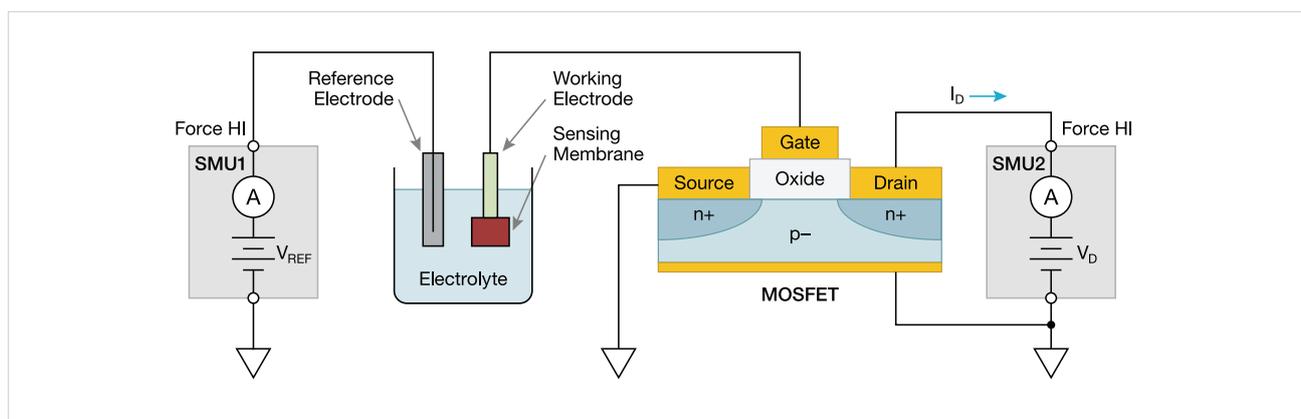


图 6. 扩展栅 FET

离子选择 FET(ISFET)

如图 7 所示，离子选择场效应晶体管 (ISFET) 用于测量溶液中的离子浓度。离子浓度与流过晶体管的漏极电流有关。ISFET 广泛应用于生物医学领域，如 pH 值监测、葡萄糖测量和抗体检测。

ISFET 与 EGFET 一样，由传感结构和 MOSFET 组成。与 EGFET 不同的是，传感元件和 FET 在物理上不是分开的，而是结合在一起的。ISFET 具有与 MOSFET 相同的基本结构，包括栅极、漏极和源极。然而，传统的 MOSFET 的金属栅极被溶液中的参考电极和离子

敏感膜所取代。这个例子展示了一个硅沟道，但该沟道也可以由石墨烯、硅纳米线或碳纳米管等其他材料制成。

在本例中，参考电极连接到 SMU1，施加电压并测量栅极电流。栅极电压在基准电极和衬底之间施加，并在 FET 的漏极和源极之间形成反转层。FET 的漏极连接到 SMU2，加漏极电压并测量漏极电流。背部端接有需要时用于连接 ISFET 的衬底和 GNDU 的 Force LO。当电解质溶液的离子浓度变化时，FET 的漏极电流也随之变化，并由 SMU2 测量。

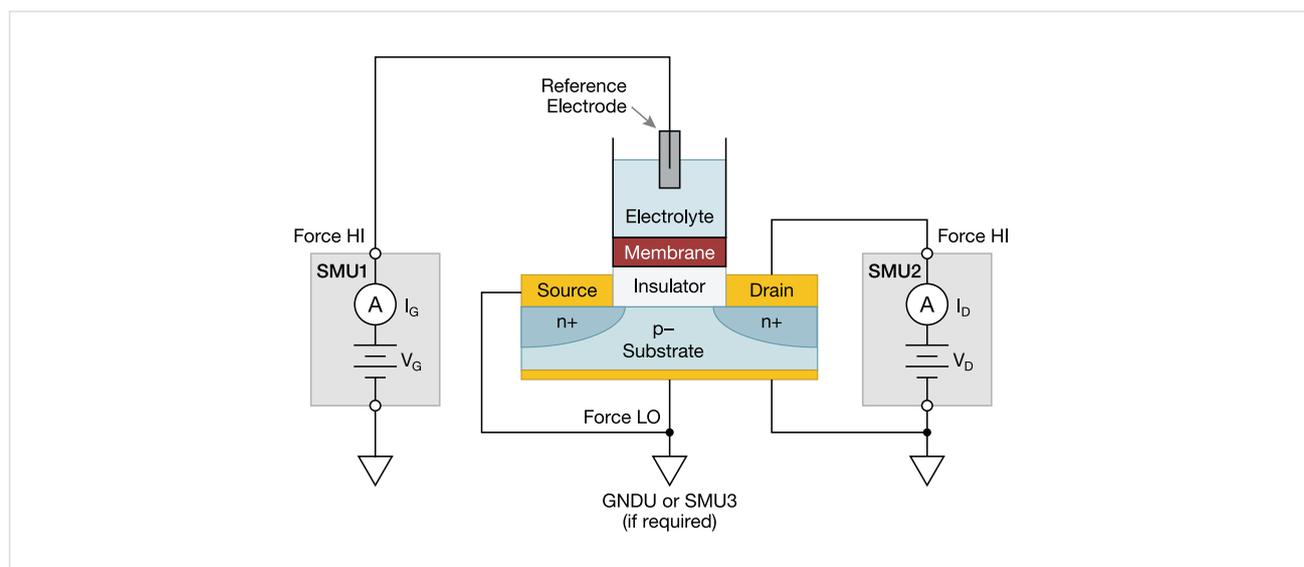


图 7. ISFET

直流 I-V 测量

本节描述了用于表征生物场效应管的常见直流 I-V 测量，包括传输特性 (I_d - V_g)、输出特性 (I_d - V_d) 和漏电流与时间测量 (I_d - t)。

传输特性 (I_d - V_g)

生物场效应管上最常见的电气测量可能是传输特性，它绘制漏极电流与栅极电压的关系。转移特性通常与正在研究的病原体或其他生物因素的浓度有关。

在这个测试中，一个 SMU 扫描栅极电压，第二个 SMU 在恒定漏极电压下测量产生的漏极电流。图 8 显示了四条不同的曲线，代表了四种不同浓度的病原体。这些曲线是使用 4200A-SCS 参数分析仪生成的。

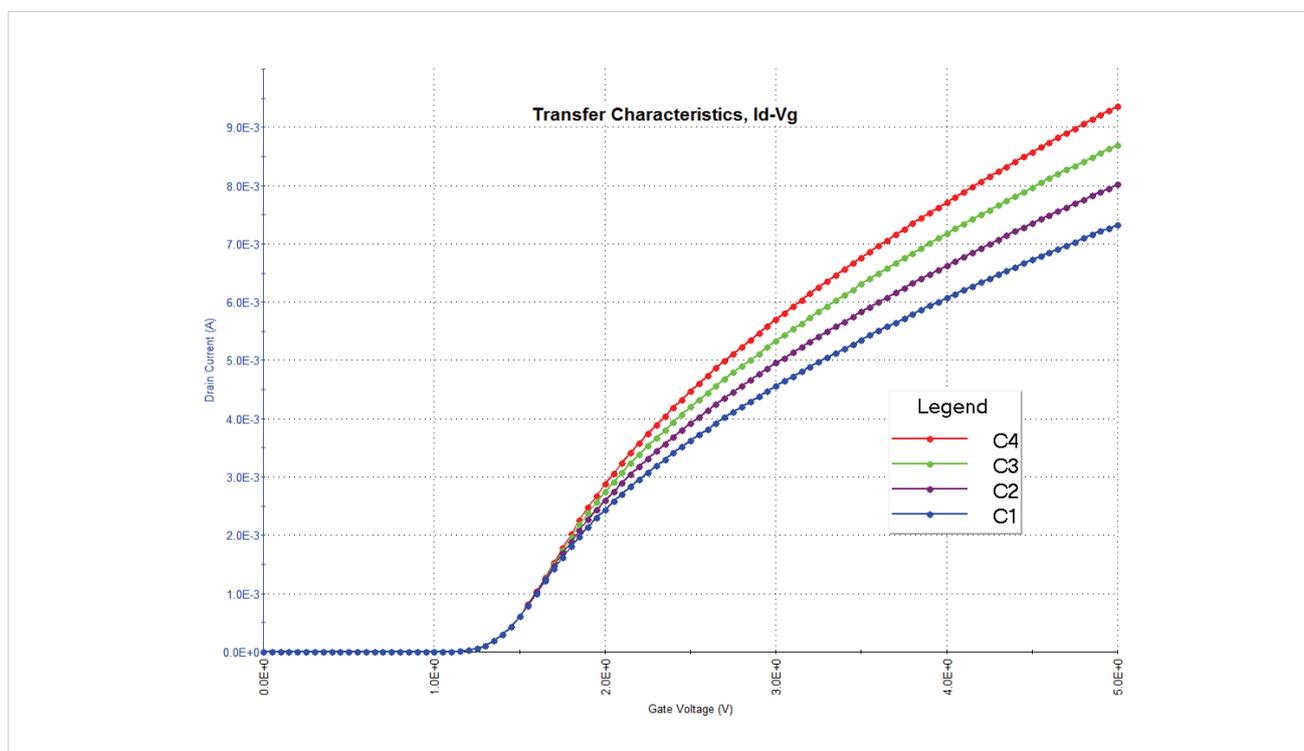


图 8. 转移特性

Clarius 软件库中附带了一个 FET 传输特性的测试，以及一个对传输和输出特性都进行测试的项目。这些测试和项目可以通过在软件的 Select 视图中在 Library 的搜索栏中输入 biofet 来找到。这个测试的 Configure 截图如图 9 所示。

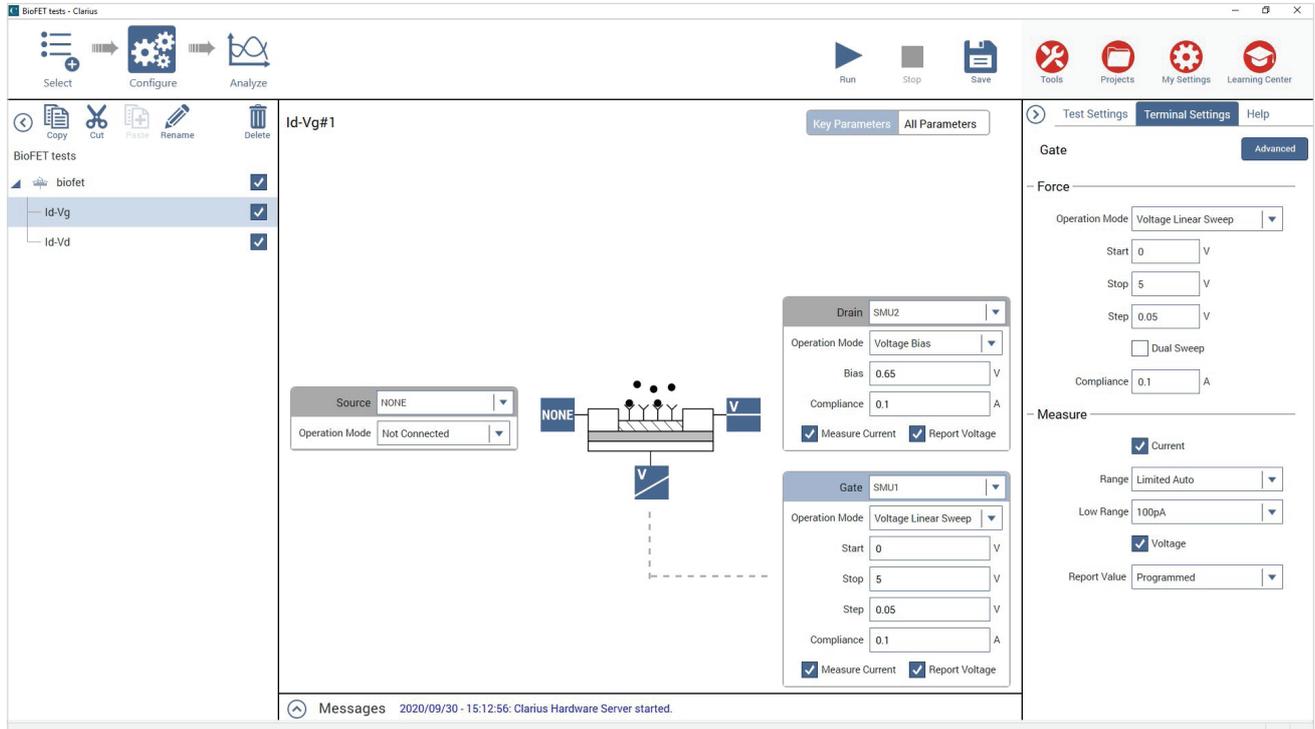


图 9. 在 Clarius 软件中配置测试视图以测量生物晶体管的 Id-Vg

输出特性 (I_d - V_d)

另一种常见的测试是确定 FET 的输出特性，即漏极电流与漏极电压的相关函数，如图 10 所示。这些曲线是使用 4200A-SCS 参数分析仪中的两个 SMU 生成的。

在这种情况下，SMU1 连接栅极提供步进电压，而连接漏极的 SMU2 则扫描电压并测量产生的电流。

为了测试 FET 的功能，多个栅极阶跃可以生成一系列曲线，并显示漏极电流对栅极电压的依赖关系。或者，栅极电压可以保持恒定，但对生物组分进行改变，以观察不同组分或浓度如何影响漏极电流。

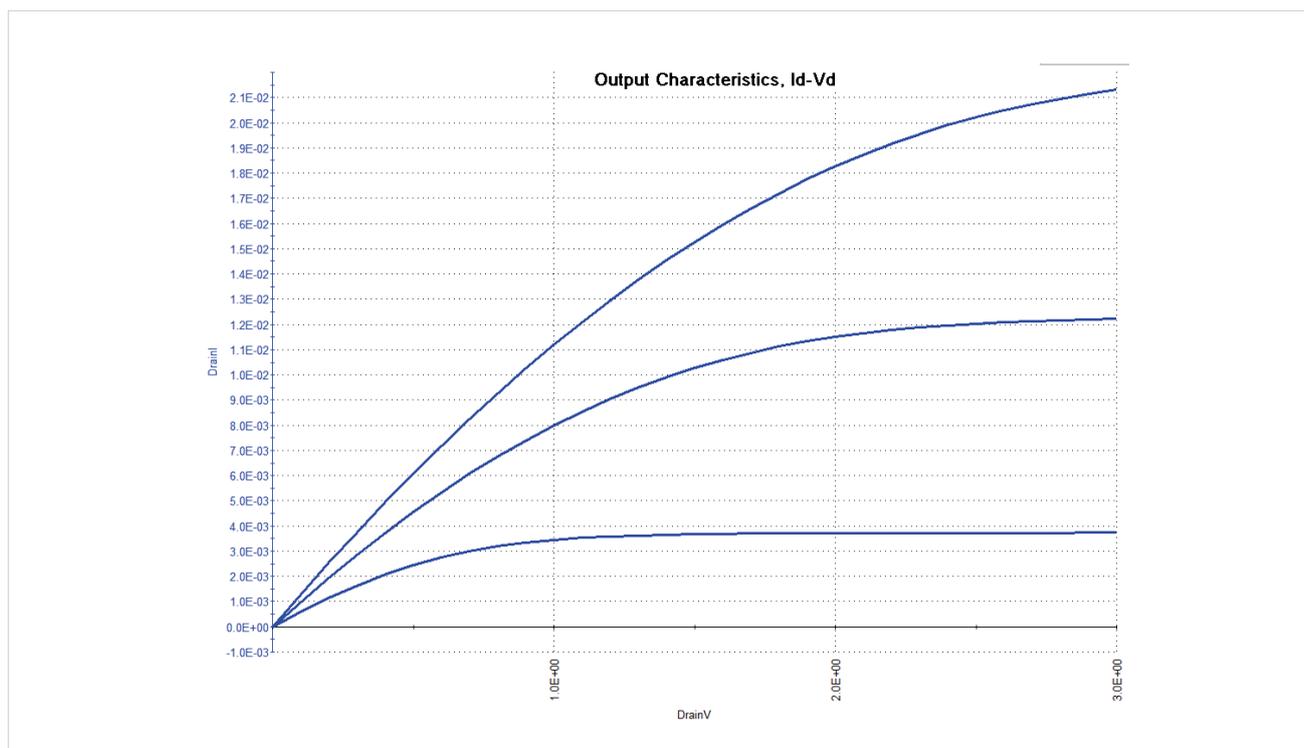


图 10. 输出特性

漏极电流 vs. 时间 (Id-t)

通过绘制漏极电流随时间的函数图，可以监测生物晶体管传感器的动态响应，如图 11 所示。漏极电流的大小会随着分析物浓度的变化而变化。

在这种应用中，当漏极电流被测量时，栅极和漏极电压偏置都保持恒定，因此只有分析物在变化。

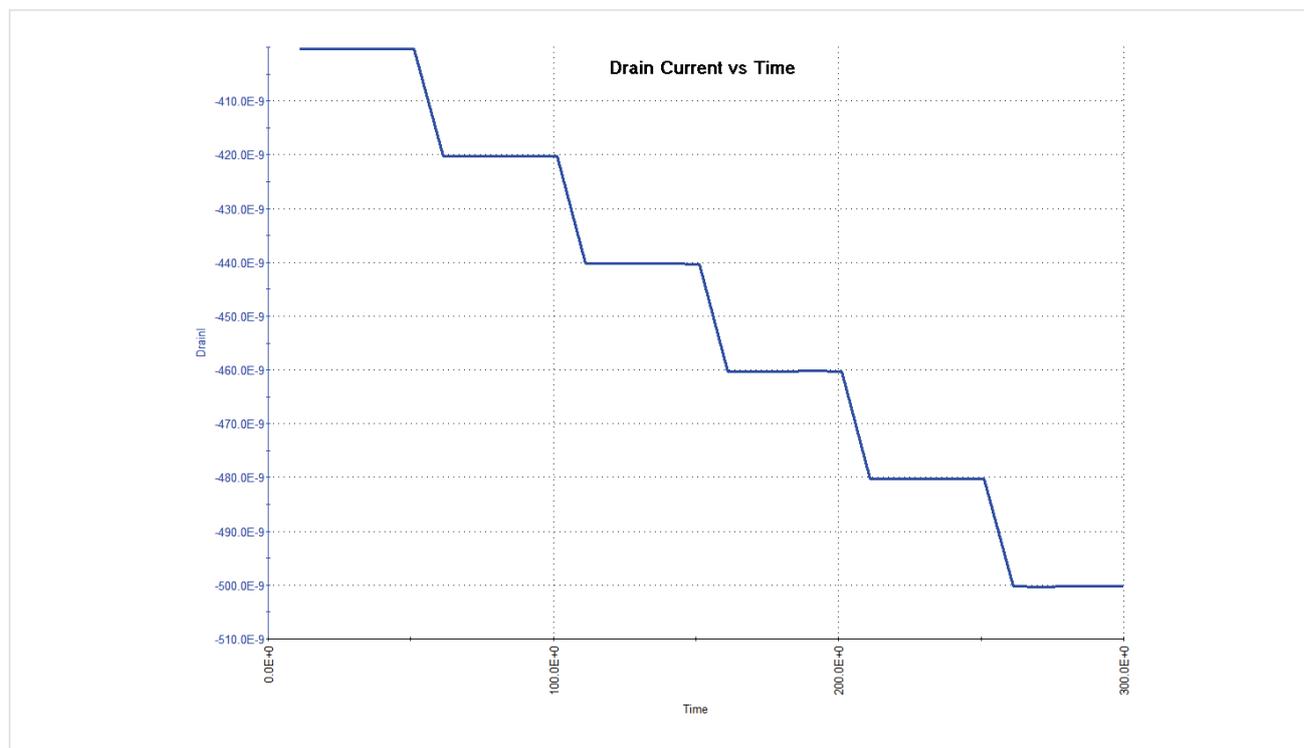


图 11. 漏极电流与时间趋势图

测量优化

在本节中，将描述实现最佳测量的方法，包括进行空白测试 / 空测，以最大限度地减少噪声读数，允许足够的稳定时间，以及规范使用以避免损坏设备。

运行“空白”测试：一旦系统设置好，运行“空白”或空测以确保一切设置和配置正确是一个好方法。这个测试将通过测量设备的 I-V 特性来建立一个基线电流，以确保它在没有添加任何生物成分的情况下是正常工作的。在添加生物组件之前，可以根据需要对测试电路和设置进行调整。根据设备的类型不同，这个操作可能是可执行的也可能是不可能的。

最小化噪声读数：噪声可能是测量低电流时最常见的问题之一。生物晶体管的漏极电流或栅漏电流可以在 nA 和 pA 范围内。噪声可能由几种原因引起，可能需要一些实验来确定其来源。

当带电物体接近被测电路时，会产生静电干扰。在高阻抗电路中，这种电荷不会迅速衰减，可能导致测量结果不稳定。错误的读数可能是由于直流或交流静电场造成的，因此静电屏蔽将有助于最大限度地减少这些场对测试的影响。

静电屏蔽可以只是一个简单的金属盒，将测试电路封闭起来。探针台通常包括一个静电 /EMI 屏蔽或可选的暗盒。屏蔽应连接到测量电路 LO 端，即 SMU 的 Force LO 端子。Force LO 端子位于 SMU 三轴电缆的外屏蔽层或位于 GNDU 上。所有电缆都需要采用低噪声设计并屏蔽。每个 42XX-SMU 配有两根低噪声三轴电缆。

另一种降噪方法是控制外部噪声源。这些噪声源是由马达、电脑屏幕或实验室或试验台内或附近的其他电气设备产生的干扰。它们可以通过屏蔽和过滤或通过去除或关闭噪声源来控制。

综上所述，为了最大限度地减少噪声读数：

- 让所有带电物体，包括人、导体远离测试电路的敏感区域
- 避免在测试区域附近移动和振动
- 控制或消除外部噪声源
- 增加测量的积分时间，可以在 Clarius 的测试设置窗口中使用自定义速度模式进行调整
- 用导电外壳将被测设备屏蔽，并将外壳与测试电路公共端子 (Force LO) 连接，如图 12 所示。屏蔽可以只是一个简单的金属盒或网状屏幕，将测试电路封闭起来。

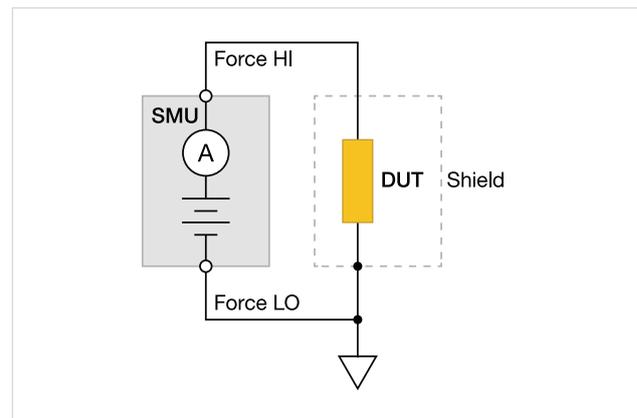


图 12. 导电屏蔽壳连接到 Force LO

限制电流：为了防止在进行 I-V 表征时损坏设备，设置钳位值以限制可以流过设备的电流。这可以在 Clarius 软件中通过将每个 SMU 的当前钳位值设置为安全水平来完成。这是一个可编程限制，以确保电流不超过用户定义的水平。

提供足够的稳定时间：当测量低电流 ($<1\mu\text{A}$) 时，需要允许足够的稳定时间，以确保在施加或改变电流或电压后测量的稳定性，例如当扫描栅极电压和测量漏极电流时。影响电路稳定时间的因素包括测试电路的分流电容和器件电阻。分流电容包括电缆、测试夹具、探头和开关矩阵。

测量电路的稳定时间可以通过绘制电流与时间到阶跃电压的关系来确定。稳定时间可以通过图形直观地确定。一旦确定了稳定时间，该值可以用作 Clarius 软件的测试设置窗口中的电压扫描延迟时间。

结论

基于 fet 的生物传感器由于其成本低、反应快、检测准确等优点，研究和开发得到了加强。生物 ofet 将对分析物的生物响应转换成可以通过直流 I-V 仪器轻松测量的电信号。4200A-SCS 参数分析仪中的 SMU 用于执行生物场效应管的 I-V 表征。使用适当的仪器设置和应用适当的测量技术将导致最佳的测量结果。

关于进行最佳低电流测量的更多信息可以在 Keithley *低电平测量手册* 中找到，该手册可以从 Tek.com 网站下载



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：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) 8620 3028
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) 8836 0984
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718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

KEITHLEY

A Tektronix Company

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。

102620 SBG 1KC-73757-0

