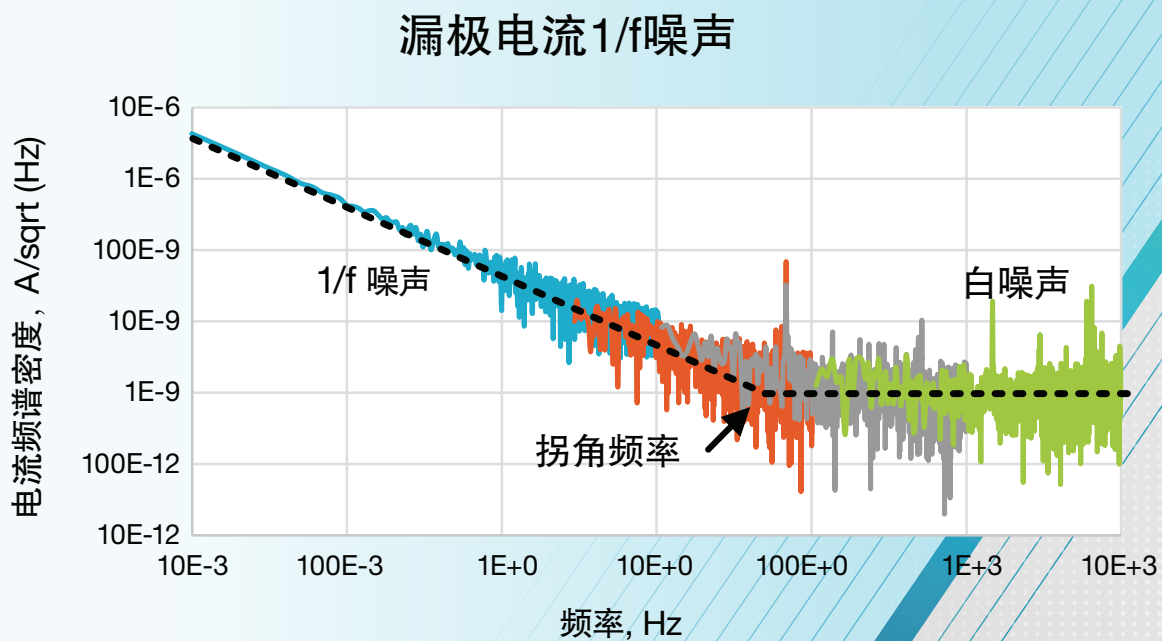


使用 4200A-SCS 参数分析仪 进行 1/f 电流噪声测量

应用指南



KEITHLEY
A Tektronix Company

Tektronix®

引言

电子器件本身就有各种不同的噪声源，包括热（约翰逊）噪声、散粒噪声、白（宽带）噪声和 1/f（闪烁效应）噪声。1/f 噪声是低频电子噪声，其中电流 (ISD) 或功率 (PSD) 频谱密度与频率成反比。许多元器件类型都会有 1/f 噪声，包括半导体器件、某些类型的电阻器、石墨烯之类的 2D 材料，甚至包括化学电池。为确定一种器件的 1/f 噪声，我们通常要测量电流相对于时间的关系，然后把数据转换到频域中。快速傅立叶变换 (FFT) 是把时域数据转换成频域数据的一种流行方法。

在测量设置中，噪声来自不同的来源，其中之一是测量仪器本身。为提取被测器件 (DUT) 的噪声特点，仪器噪声必须小于 DUT 噪声。

源测量单元 (SMU) 和脉冲测量单元 (PMU) 是吉时利 4200A-SCS 参数分析仪的两个模块，其在时域中测量及提供电流和电压。SMU 和 PMU 可以以恒定速率获得测量数据，然后可以使用 FFT 功能转换成频域中的参数，Clarius 软件的 Formulator 公式器内置了 FFT 功能。4200A-SCS 拥有全面的测试库，包括样例测试及 AC 参数计算，可以生成 1/f 噪声、电流频谱密度及基于 AC 的测量。

本应用指南阐述了怎样通过 4200A-SCS，使用 SMU 和 PMU 来进行 1/f 噪声测量。特别是下面这些图描述了 1/f 噪声基础知识，通过在特定范围上导出电流频谱密度 (ISD)，测量 MOSFET 的漏极电流 1/f 噪声，在 2 端子器件上配置 1/f 噪声测量，来确定仪器的噪声本底，另外我们还描述了内置 FFT 功能。

1/f 噪声

闪烁效应噪声或 1/f 噪声涵盖许多频率，但通常在 <100 Hz 下观测到。**图 1** 显示了器件典型的噪声电流频谱。对 1/f 噪声，频谱密度与频率成反比。但是，在 log-log 标度上，频谱密度和频率呈线性相关。热噪声或白噪声相对于频率仍保持不变。拐角频率是指 1/f 噪声曲线与热噪声相交的位置。

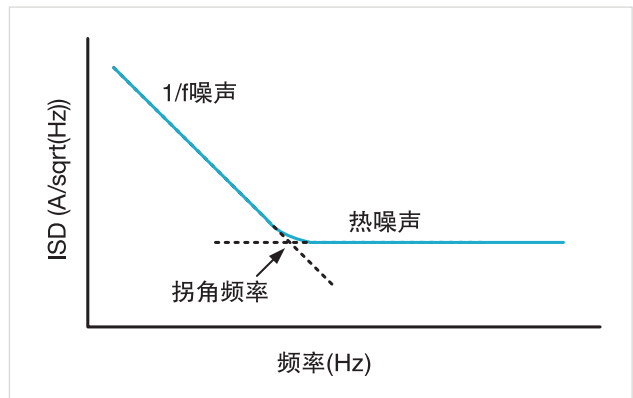


图 1. 一个器件典型的电流噪声频谱。

测量器件的 1/f 噪声

我们可以通过许多方式确定 1/f 噪声，**图 2** 展示了其中一种方法，它采用 DC 测试设备。在本例中，电压同时应用到 MOSFET 的栅极和漏极，电流表以给定采样率测量漏极电流。通过使用 FFT 计算，我们把电流表获得的基于时间的电流测量数据转换成电流噪声频谱密度 (ISD) 和频率。使用 FFT 功能要求电流测量和时间测量均匀隔开。

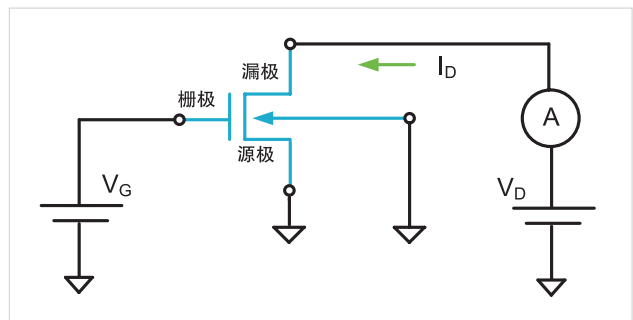


图 2. 测量 MOSFET 的 1/f 漏极电流噪声使用的电路。

如图3所示,电路中有两个电源可以换成两个SMU (或PMU 通道),其既可以提供电压,测量电流,还可以用来确定MOSFET的I-V特点。在本例中,SMU1连接到栅极端子上,应用栅极电压;SMU2连接到漏极端子上,输出漏极电压,测量漏极电流。

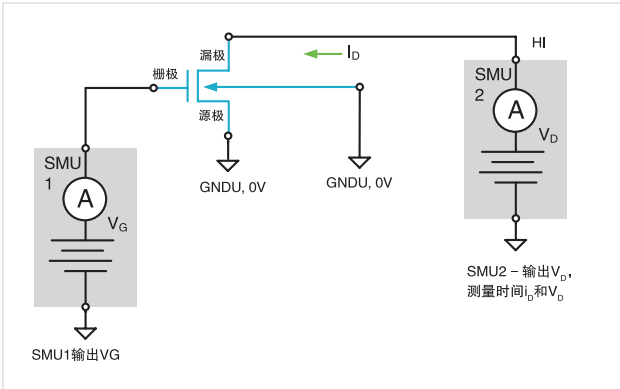


图 3. 使用两个 SMU 测量 1/f 漏极电流噪声。

4200A 的 SMU 拥有 6 位半分辨率,DC 噪声通常要低于 PMU。但是,获取 SMU 的电流测量的速度要低

于 PMU,因此带宽较低。PMU 可以获取高速电流测量,但会以产生噪声为代价。使用的仪器的噪声必须比预计的器件噪声充分低。最好的确定方式是使用开路推导出仪器的噪声(如下一节所述)。

使用开路确定 SMU 和 PMU 噪声

可以使用开路推导出 SMU 或 PMU 的仪器噪声。为确定其噪声,在 Force HI 端子和 Sense HI 端子上各放一个金属帽,让仪器预热一小时。如果仪器连接到探针台,要先抬起探针,然后开始测试。

Clarius 软件用来在噪声测试中控制仪器。下面几段描述了怎样在软件中对 SMU 和 PMU 配置 ISD 测试。

SMU 电流频谱密度相对于频率关系

Clarius Library 中的 SMU 电流频谱密度 (smu-isd) 测试从 SMU 获得的电流和时间测量中导出 ISD 相对于频率的关系。

图 4. smu-isd 测试使用的公式。

这项测试可以通过以下方式添加到项目树中：在 Test Library 中搜索 smu-isd，然后把它添加到项目树中。这项测试使用 Normal 正常速度模式在三个不同电流范围上测量开路。在 Formulator 中，FFT 公式推导出电流、功率、频率、带宽和 ISD 的实数部分和虚数部分，如图 4 中的截屏所示。Formulator 中 FFT 功能的具体细节参见附录 A。

由于电流是使用开路测得的，所以可以使用这项测试确定 SMU 的噪底。频率将视定时设置而变化。

我们通过计算推导出电流噪声密度，单位用 A/sqrt(Hz) 表示，这不同于单个 DC 测量的噪声，后者的单位用安培表示。如果用数字快速傅立叶变换表示，电流频谱密度的公式是：

$$ISD = \sqrt{(2 * PWR) / (PTS * BW)}$$

其中：PWR 是电流幅度的平方，或 $PWR = \text{Im}(I)^2 + \text{Re}(I)^2$

IIM = 使用 FFT 计算的电流傅立叶部分的虚数部分

IR = 使用 FFT 计算的电流傅立叶部分的实数部分

BW 是时间采样的带宽

PTS 是点数，应该是 2 的幂

带宽 (BW) 定义为 $1/dt$ ，其中 dt 是两个测量点之间的时间步长，假设所有测量之间的时间步长都是一个恒定值。从这项测试中，通过在 Formulator 中增加下面的公式，我们还可以推导出功率频谱密度 (PSD)：

$$PSD = (2 * PWR) / (PTS * BW)$$

图 5 显示了使用这项测试测量 0 V 时开路电流噪声生成的图表，其中包括四个不同的量程：100 mA、1 mA、1 μ A 和 1 nA。在这项测试中，我们没有使用默认的正常速度模式，而是使用 Custom Speed 自定义速度模式。通过自定义速度模式，用户可以进一步定义时间参数。

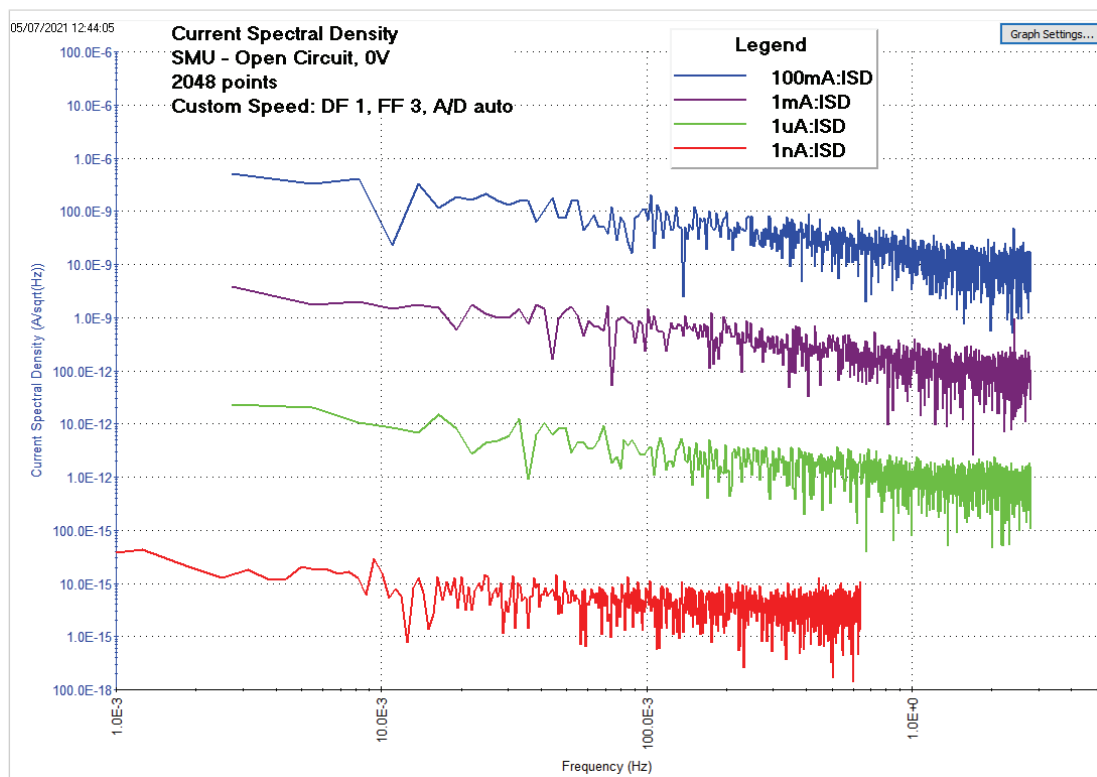


图 5. 从 SMU 测得的开路电流数据的电流频谱密度相对于频率关系。

SMU 测量速度在 Test Settings 测试设置窗口中控制。通过在自定义速度模式下调节参数，采样速率会变化，这决定了带宽。尽管不能直接为 SMU 设置测量时间，但我们可以测量计算时间、带宽和测试频率，并返回 Sheet。通过提高采样率，噪声会保持接近恒定，但 ISD 曲线会在频率轴上左移或右移，具体取决于采样率上升还是下降。

在设置速度模式时，通常要在每个测量的速度和噪声之间折衷。测量速度越快，噪声越高。所以在测量时采样率越慢，带宽越小，噪声越低。

这项测试中的读数是在固定的电流量程上获得的。使用固定量程而不是自动量程，对保持每个读数的测量时间恒定不变具有重要意义，这也是 FFT 计算的一项要求。

之所以使用采样测试模式，是因为需要输出一个恒定的偏置。在这种模式下，必须输入读数数量。尽管在使用 FFT 计算时我们希望有大量的读数，但这是不现实的。在本例中，我们获得了 2048 个读数，因为 2048 是 2 的幂。使用 FFT 会自动把读数数量降到第二低的 2 的幂。表 1 列出了 smu-isd 测试使用的公式。

表 1. smu-isd 测试使用的公式。

公式	说明
IIM	虚数电流阵列：IIM=FFT_I(AI,0)
IR	实数电流阵列：IR=FFT_R(AI,0)
PWR	功率：PWR=IIM ² + IR ²
FREQ	频率阵列：FREQ=FFT_FREQ(TIME, 5)
PTS	(FFT 计算的数据的)总点数： PTS=LASTPOS(IIM)
T	(FFT 计算的数据的)总测试时间：T=AT(TIME, LASTPOS(IIM))-AT(TIME, FIRSTPOS(IIM))
BW	带宽：BW=(PTS-1)/T
ISD	电流频谱密度：ISD=SQRT((2*PWR)/(PTS*BW))

PMU 电流频谱密度相对于频率关系

像 SMU 一样，我们也可以从电流和时间测量及 FFT 计算中导出 PMU 的 ISD。pmu-isd 测试使用开路计算 PMU 电流频谱密度，在 Test Library 测试库中可以找到这项测试，并添加到项目树中。这项测试是使用 *PMU_freq_time_ulib* 用户库中的 *PMU_sampleRate* 用户模块生成的。但是，同一用户库中的 *PMU_SMU_sampleRate* 用户模块也可以用于这项测试。通过这项测试，用户可以同时为 CH1 和 CH2 输入一个电压偏置，为 CH2 选择一个电流范围，指定测试时间和采样率。

图 6 显示了 pmu-isd 测试的 Configure 视图截图。

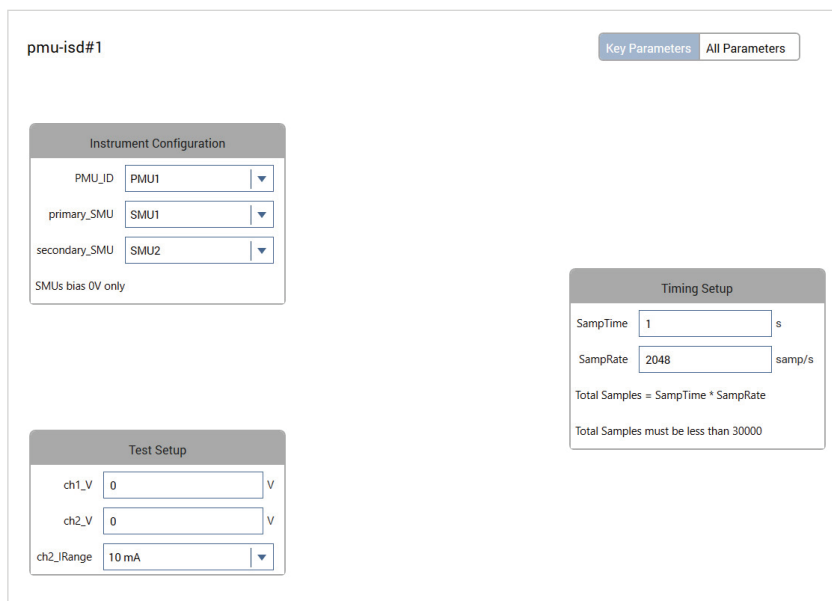


图 6. pmu-isd 测试的配置视图。

与 SMU 电流频谱密度测试一样，Formulator 有多个公式推导带宽、测试电流的实数部分和虚数部分、功率、频率和电流频谱密度。表 2 列出了 pmu-isd 测试使用的这些公式及说明。时序、范围、点数及其他设备等相关信息与推导 SMU 电流频谱密度时描述的信息类似。

图 7 中的截图显示了 PMU 在 100 nA、100 μA 和 10 mA 范围时的电流频谱密度相对于频率关系。由于我们是使用开路获得的数据，所以这个图显示了在指定采样率 (SampRate) 和总测试时间 (SampTime) 下获得的固定电流范围时计算得出的 PMU 噪声。

表 2. PMU 频谱密度测试使用的公式。

公式	说明
IIM	CH2 上的虚数电流阵列： IIM=FFT_I(MEASI_CH2,0)
IR	CH2 上的实数电流阵列： IR=FFT_R(MEASI_CH2,0)
PWR	功率：PWR=IIM ² + IR ²
FREQ	频率阵列：FREQ=FFT_FREQ(TIMEOUTPUT, 20)
PTS	(FFT 计算的数据的) 总点数：PTS=LASTPOS(IIM)
T	(FFT 计算的数据的) 总测试时间： T=AT(TIMEOUTPUT, LASTPOS(IIM))– AT(TIMEOUTPUT, FIRSTPOS(IIM))
BW	带宽：BW=(PTS–1)/T
ISD	电流频谱密度：ISD=SQRT(2*PWR/(PTS*BW))

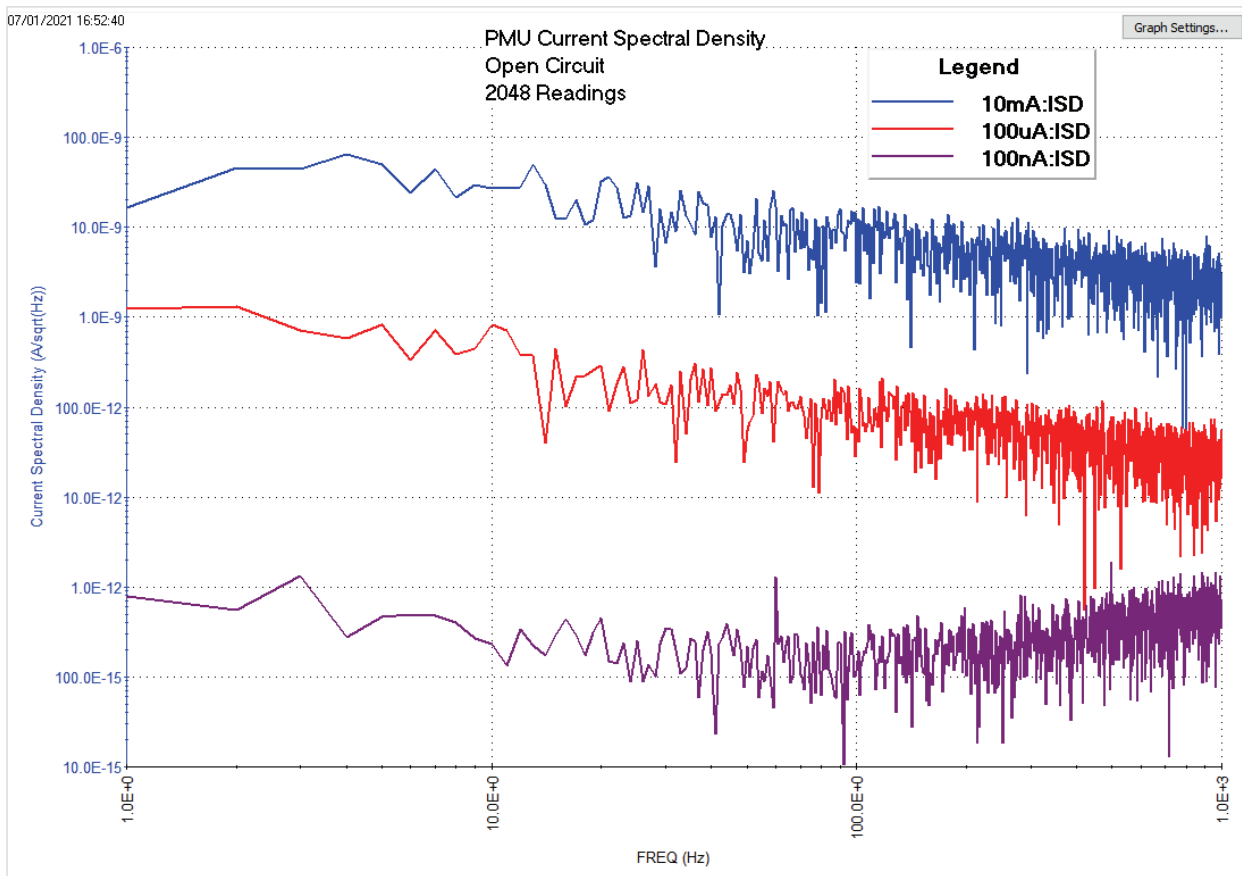


图 7. PMU 电流频谱密度。

对 pmu-isd 测试，CH1 和 CH2 上的电压都设为 0 V。在 Configure 视图中，用户输入总测试时间和采样率。点数等于采样率乘以总测试时间。选择输入参数，使总点数是 2 的幂，因为我们将要在数据上执行 FFT 计算。为实现最佳效果，最好使用最小 512 点、最大 4096 点。对例子中生成的曲线，我们使用采样时间 1 秒、采样率 2048 样点 / 秒。可以调节这些数字来改变频率，如下一节所述。

设置最小和最大测试频率

在使用 *PMU_sampleRate* 或 *PMU_SMU_sampleRate* 用户模块创建测试时，可以从总测试时间和总样点数中确定最小和最大测试频率。

最小测试频率用最大总测试时间 (SampTime) 的倒数推导得出：

$$\text{Freq}_{\min} = 1/\text{SampTime}$$

例如，如果总测试时间是 100 秒，那么最小频率等于：

$$\text{Freq}_{\min} = 1/100 = 10 \text{ mHz}$$

最大测试频率从采样率或每秒样点数中推导得出。根据内奎斯特定理，用该采样率除以 2，可以得出特定采样率能够获得的最大频率。例如，如果采样率是 1024 个样点 / 秒，那么最大频率是 512 Hz。

通过调节采样率和测试时间来扩大频率范围

在使用 *PMU_sampleRate* 或 *PMU_SMU_sampleRate* 用户模块时，可以使用多轮测试，扩大图表上的频率范围，因为每个测试都有自己的采样率。例如，图 8 中绘制的数据融合了 100 nA PMU 范围上获得的 5 种不同的开路测量测试的数据。每个测试有 1024 个点，但使用不同的测试时间和采样率执行测试。表 3 列出了每轮测试的颜色、总测试时间、采样率和图表的测试频率范围。通过调节定时参数，在 Run History 运行历史中检查多轮运行，可以扩展图表上的频率范围。

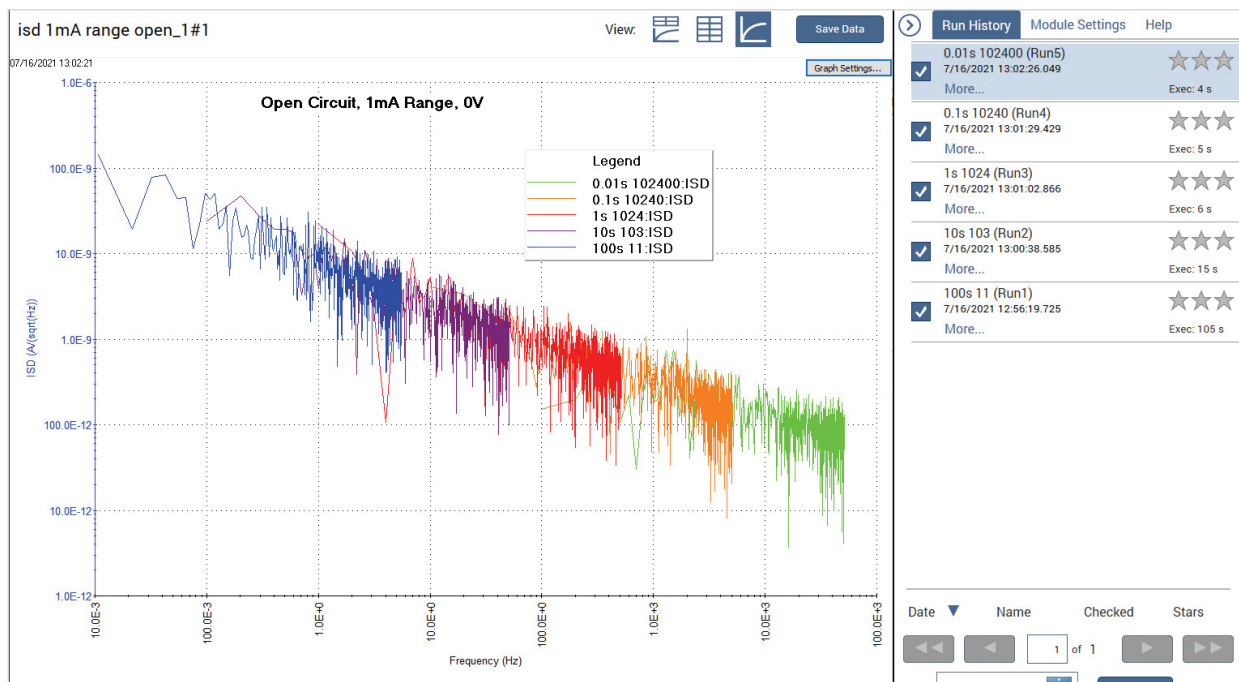


图 8. 检查多轮测试，扩展图表上的频率。

表 3. 图 8 中图表的定时参数。

Run #	图表颜色	总测试时间 (秒)	采样率 (样点 / 秒)	频率范围 (Hz)
Run 1	蓝色	100	11	0.01–5.5
Run 2	紫色	10	103	0.1–51
Run 3	红色	1	1024	1–512
Run 4	橙色	0.1	10240	10–5120
Run 5	绿色	0.01	102400	100–51200

确定 MOSFET 漏极电流的 1/f 噪声

Clarius 程序库中包括一个测试，可以确定 MOSFET 漏极电流的 1/f 噪声。这项测试即 *mosfet-isd*，它使用 SMU 偏置栅极，使用 PMU 偏置漏极，测量得到的漏极电流。SMU 的电压源的噪声低于 PMU，但 PMU 测量电流的速度要快于 SMU。记住，栅极上噪声将会被放大并被漏极的电流表检测到。

图 9 显示了使用 *mosfet-isd* 测试的电路图。SMU 连

接到栅极，PMU 连接到漏极。源极和衬底偏置电位端子连接到 GNDU，GNDU 输出 0 V。

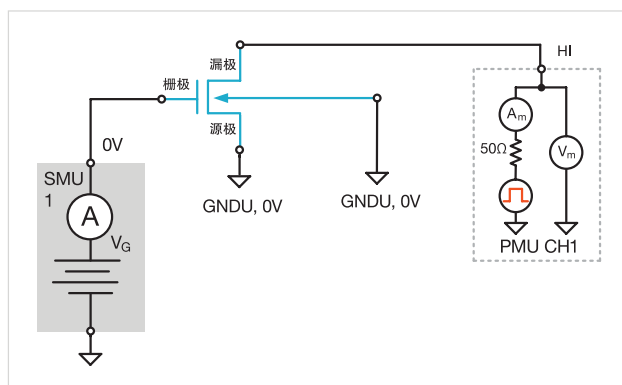


图 9. 使用 SMU 应用栅极电压，使用 PMU 测量漏极电流。

为实现这些测量，可以把 *mosfet-isd* 测试从 *Test Library* 复制到项目树中。这项测试是使用 *PMU_freq_time_ulib* 用户库中的 *PMU_SMU_sampRate* 用户模块创建的。图 10 是这项测试的配置视图。在这项测试中，用户设置 PMU 通道、SMU 编号、PMU 和 SMU 电压输出、PMU 电流量程、总测试时间和采样率。

mosfet-isd apps audit#1 Key Parameters All Parameters

Instrument Configuration

PMU_ID:

pmu_ch:

primary_SMU:

Timing Setup

SampTime: s

SampRate: samp/s

Total Samples = SampTime x SampRate

Total Samples must be less than 30000

Test Setup

pmu_V: V

smu_V: V

pmu_VRange: V

pmu_IRange:

图 10. *mosfet-isd* 测试的 Configure 视图。

在这项测试中，SMU 和 PMU 都输出恒定电压，PMU 则以配置的采样率在指定的时间周期内测量电流。得到的电流和时间返回到 Sheet 中，Formulator 中的公式利用 FFT 公式把基于时间的测量转换成基于频率的测量。特别是它会计算电流频谱密度 (ISD) 和频率。图 11 显示了在 MOSFET 上测量漏极电流噪声的结果。

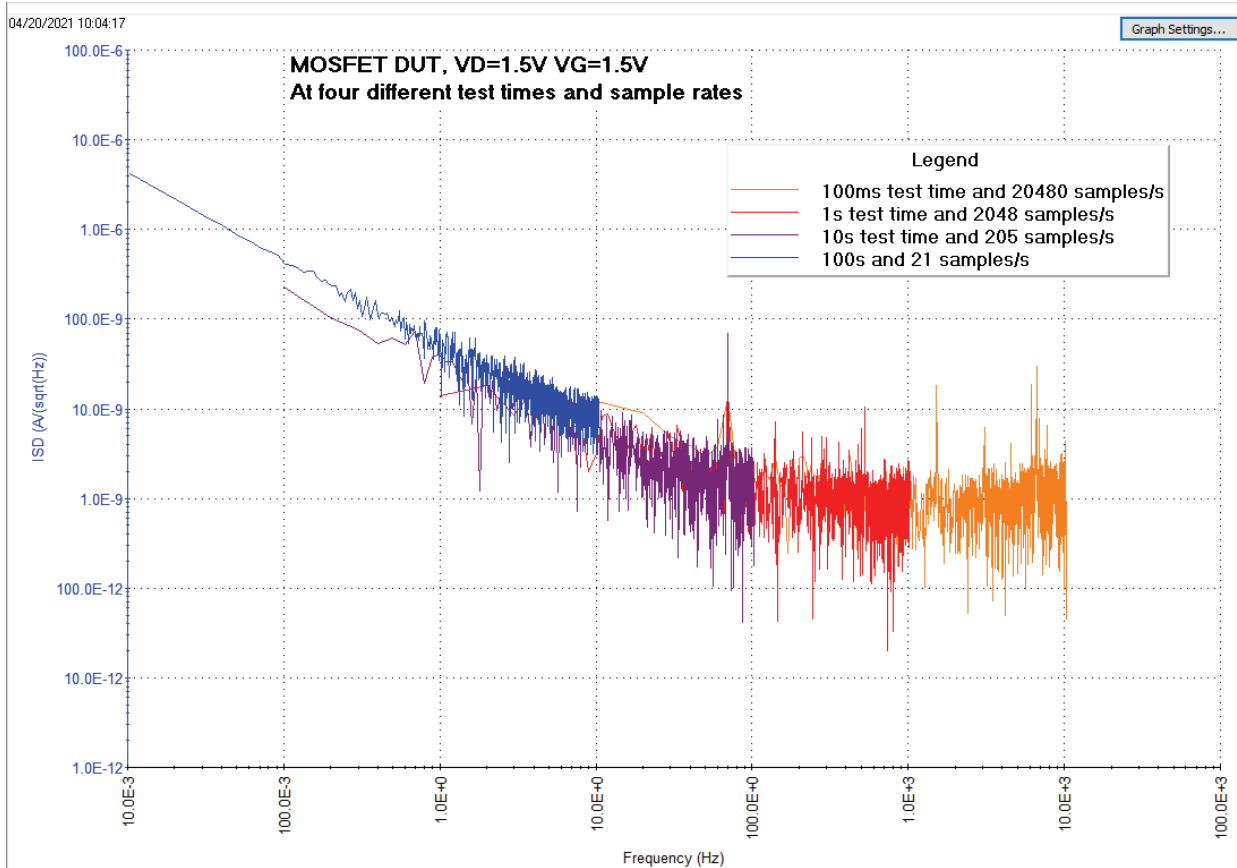


图 11. MOSFET 漏极电流 ISD 相对于频率关系。

作为另一种方案，也可以使用 SMU 偏置栅极，测量漏极电流，如图 12 中的配置所示。源极和衬底偏置电位端子连接到 GNDU。视定时设置和电流范围，带宽可以在大约 1 mHz 到 <50 Hz 之间。SMU 拥有 6 位半分辨率。通过使用新的 ITM 配置 SMU，增加 FFT 公式把电流测量转换到频域，我们可以简便地生成这项测试。

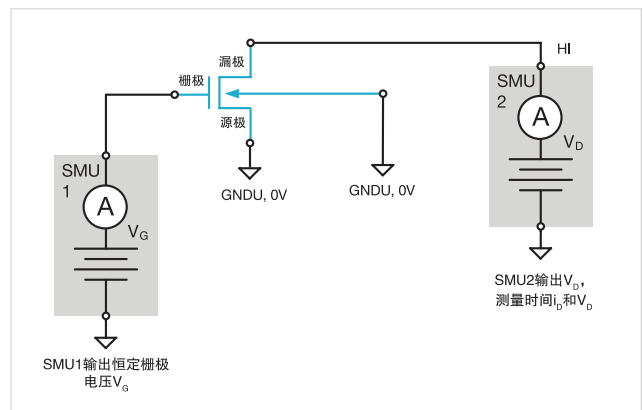


图 12. 把两个 SMU 连接到 MOSFET 的栅极和漏极。

如果想实现更高的带宽，可以使用两条 PMU 通道测量 1/f 漏极电流噪声，如图 13 中的实例所示。PMU CH1 对栅极应用电压偏置，PMU CH2 应用漏极电压，测量漏极电流和时间。源极和衬底偏置电位端子连接到 GNDU 或两个强制 0 V 的 SMU 上。在本例中，我们使用前面介绍的 pmu-isd 测试。

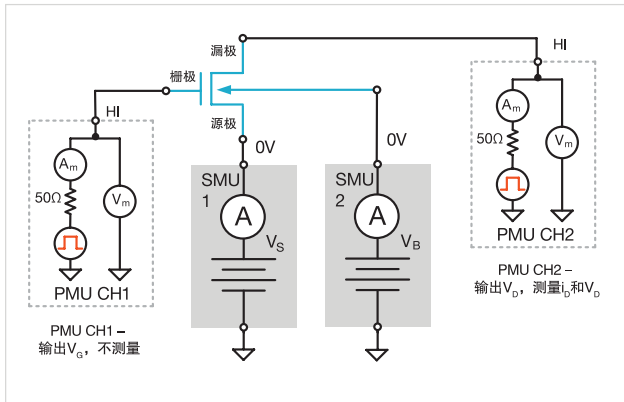


图 13. 使用两条 PMU 通道提供栅极电压，测量漏极电流和时间。

在 2 端子器件上配置 1/f 噪声测量

我们也可以推导出 2 端子器件上的 1/f 噪声。下面阐述了怎样在二极管上配置这些测量。

测量 2 端子器件只需要一个 SMU，如图 14 所示。在本例中，SMU 连接到二极管的阳极，接地单元 (GNDU) 连接到阴极。SMU 偏置二极管，测量得到的电流和时间。如果想推导出 ISD，可以使用库中的 smu-isd 测试。

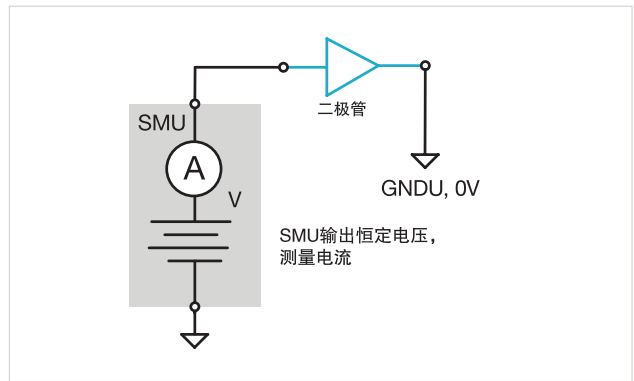


图 14. 使用一个 SMU 提供恒定电压，测量 DC 电流和时间。

另一种方法是使用 SMU 输出电压，使用 PMU 测量电流。在这种情况下，SMU 的电压源的噪声要低于 PMU，但 PMU 测量电源的速度快于 SMU，因此可以获得更高的频率。

在图 15 的实例中，SMU 连接到二极管的阳极，提供电压。PMU CH1 连接到阴极，测量得到的电流和时间。为使用这一配置，我们要创建一个新的 Custom Test (UTM)。在 Configure 视图中，在 PMU_freq_time_ulib 用户库中选择 PMU_SMU_sampleRate 用户模块。

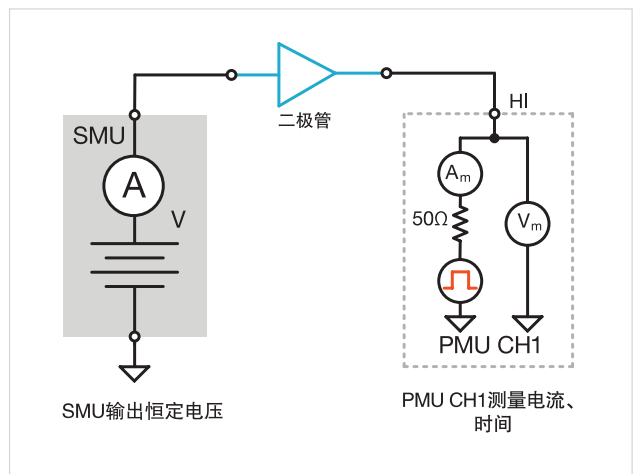
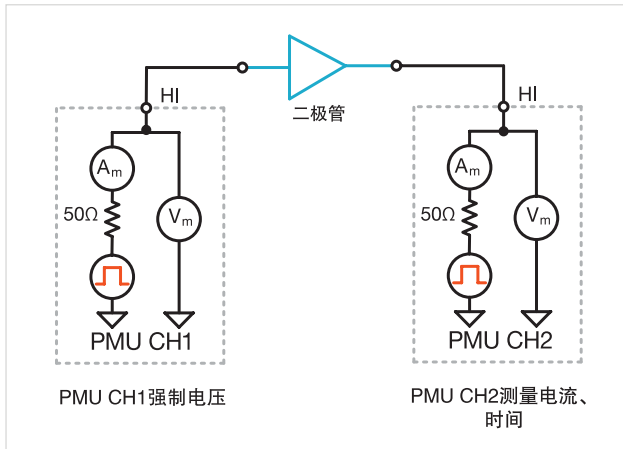


图 15. 使用 SMU 和 PMU 偏置和测量二极管电流。

最后，第三种方法使用两条 PMU 通道提供电压，测量电流。这种方法的带宽最高，但噪声也最大。

图 16 显示两条 PMU 通道连接到二极管的任意一侧。PMU CH1 强制恒定电压，PMU CH2 测量得到的电流和时间。可以使用程序库中的 pmu-isd 测试，实现这一配置。



总结

PMU 和 SMU 都可以用来在器件上进行 1/f 噪声测量，具体视要求的噪声水平和频率而定。用户可以使用开路及自带的程序库测试，检验某个测试配置的噪声水平。内置测试和 FFT 功能用来把时域测量转换到频域中，用户获得重要测试结果的速度会快得多，因为他们不用再使用其他的工具分析数据。

附录 A

Clarius Formulater 中的 FFT 相关功能

Clarius 软件拥有内置 Formulater，用户可以在测试数据及其他 Formulater 计算结果上进行计算。Formulater 提供了各种计算功能、常用数学运算及常用常数。从 Clarius V1.9 版开始，Formulater 中增加了 FFT 公式。图 17 显示了 Formulater 及 FFT 功能的截屏。

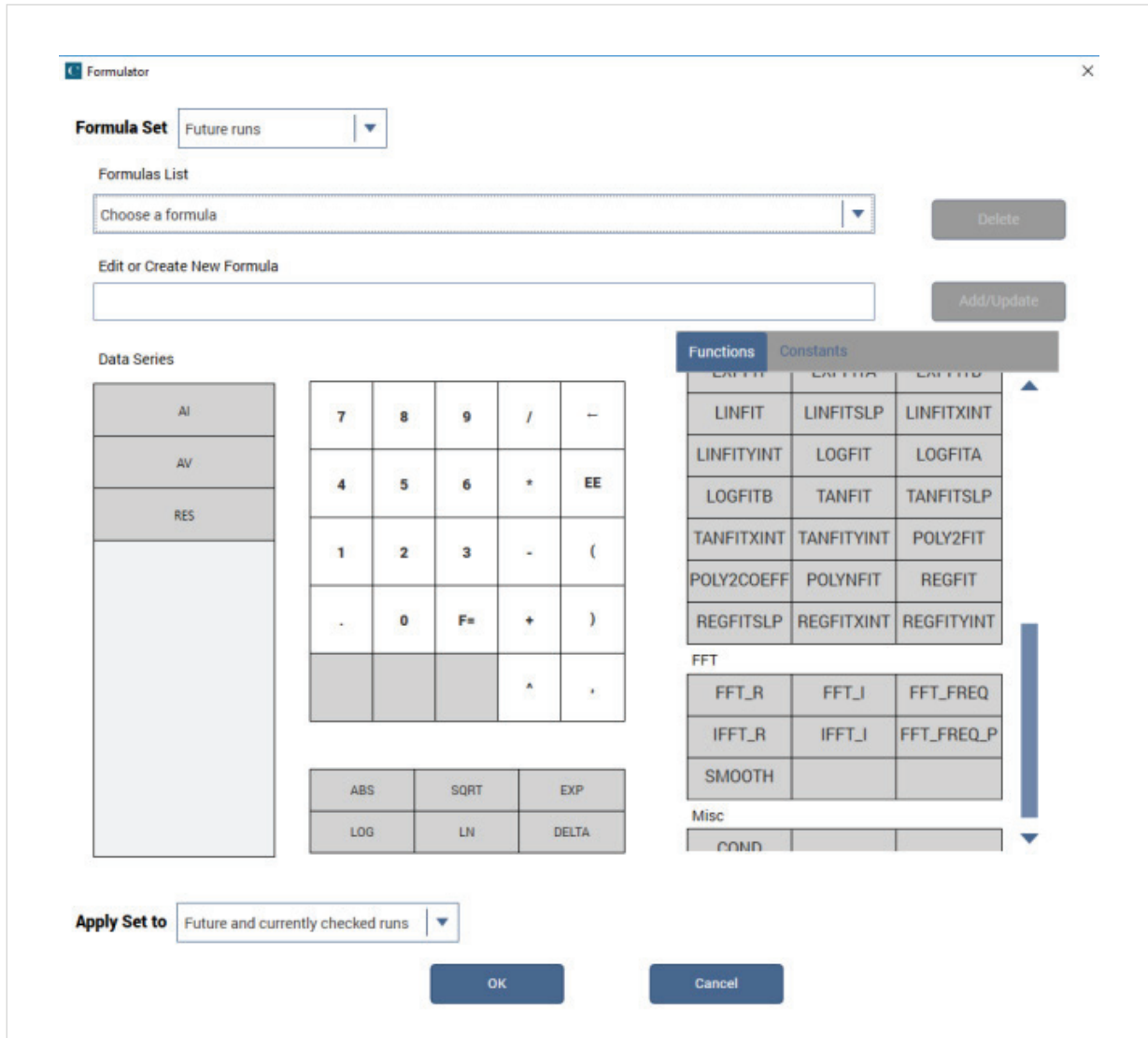


图 17. Clarius 软件中 Formulater 的 FFT 功能。

表 4 列出了内置 FFT 功能及其说明。这些公式可以在实数和虚数输入阵列上执行 FFT 或逆 FFT，然后输出实数或虚数部分。其中两个公式从一个输入时间阵列中返回一个频率阵列。平滑功能在输入阵列上使用数字滤波，清零高频成分。

表 4. FFT 公式及说明。

公式	说明
FFT_R(Real, Imag)	在提供的实数和虚数输入阵列上执行 FFT，然后输出计算的 FFT 的实数部分。
FFT_I(Real, Imag)	在提供的实数和虚数输入阵列上执行 FFT，然后输出计算的 FFT 的虚数部分。
IFFT_R(Real, Imag)	在提供的输入阵列上执行逆 FFT，然后返回 1/N 定标的实数部分，其中 N 是样点数。
IFFT_I(Real, Imag)	在提供的输入阵列上执行逆 FFT，然后返回 1/N 定标的虚数部分，其中 N 是样点数。
FFT_FREQ(Time, Tolerance)	从输入时间阵列中，返回一个频率阵列，对应 FFT 输出的频率。
FFT_FREQ_P(Time, Tolerance)	从输入时间阵列中，返回一个纯正频率阵列，对应 FFT 输出的频率。
Smooth(X, Percent)	在输入阵列上执行数字滤波，清零高频成分。

在使用 FFT 公式时，最好以均匀隔开的时间间隔获取数据。在把时间阵列转换成频率阵列时，FFT_FREQ 功能允许用户输入一个大概的参数，确定连续隔开的时间数据是否均匀间隔开。如果输入中两点之间的增量（用百分比表示）大于大概的值，那么将把 #REF 返回 Sheet。

计算得出的实数和虚数数据阵列的输出长度将是 2 的幂。因此，理想的采集的数据点数应是 2 的幂，比如 64、128、256、512、1024 等等。如果数据点数不是 2 的幂，那么返回的点数将降到 2 的第二低的幂。



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。

090221 SBG 55C-73837-0

