

测量低频噪声是否真的同时需要电流和电压低噪声放大器？

E4727B 先进低频噪声分析仪(A-LFNA)

低频噪声测量交钥匙解决方案

是德科技 E4727B (先进低频噪声分析仪 A-LFNA) 可以帮助您非常容易地进行半导体器件的低频噪声测量。E4727B 系统包含硬件部分和软件部分。使用者只需要输入测试条件即可进行低频噪声的测量，软件会自动判定硬件所需要的最佳设置。硬件部分里最重要和最关键的部分是 LNA (低噪声放大器)，一个非常低噪声和高增益表现的 LNA 是必须的。E4727B 里的 LNA 可以覆盖各种类型器件以及各种测试条件。一些商用的低频噪声测量系统同时集成了电压低噪声放大器 (Voltage-LNA) 和电流低噪声放大器 (Current-LNA) 来进行进行不同条件下低频噪声的测量。这篇应用指南是来解释为什么在 E4727B 里只需要有电压低噪声放大器 (Voltage-LNA) 就足够了。

电压低噪声放大器和电流低噪声放大器的比较

下面这张表格展示了电压 LNA 和电流 LNA 性能的比较结果。这两种 LNA 各有优缺点。因此要根据不同的目的去进行选择。

| | 电压低噪声放大器 | 电流低噪声放大器 |
|------|---|---------------------------|
| 本底噪声 | 😊 | 😞 |
| 带宽 | 😞 由输入寄生电容和电阻的衰减决定。 需要更短的电缆和/或更小的 RLOAD 电阻值。 | 😊 由定义 I-V 转换增益的反馈电阻决定。 |



指标

频率:

- 30 mHz – 100 MHz

LNA 本底噪声:

- -185 dBV²/Hz (最小值)

LNA 带宽:

- LNA1: 30 mHz – 1 MHz
- LNA2: 1 Hz – 1 MHz
- LNA3: 1 Hz – 100 MHz

LNA 电压增益:

- LNA1: 59 dB
- LNA2: 59 dB
- LNA3: 47 dB

LNA 转角频率:

- LNA1: 15 Hz
- LNA2: 100 Hz
- LNA3: 200 Hz

哪种低噪声放大器更好？

与电压 LNA 相比，电流 LNA 的缺点是它有非常差的本底噪声。但是电流 LNA 之所以用在一些商用的系统里的原因是，对于那些具有较小输出电阻的有源器件和较大值的电阻而言，它是一个好选择。这两种测量情况。具体的解释如下：

更加适合用在具有较小输出电阻的有源器件

有源器件(例如 FET, BJT 和 Diode)的输出电阻与偏置条件相关。图 1 显示的是 FET 的低频噪声测量电路以及等效输出电路。

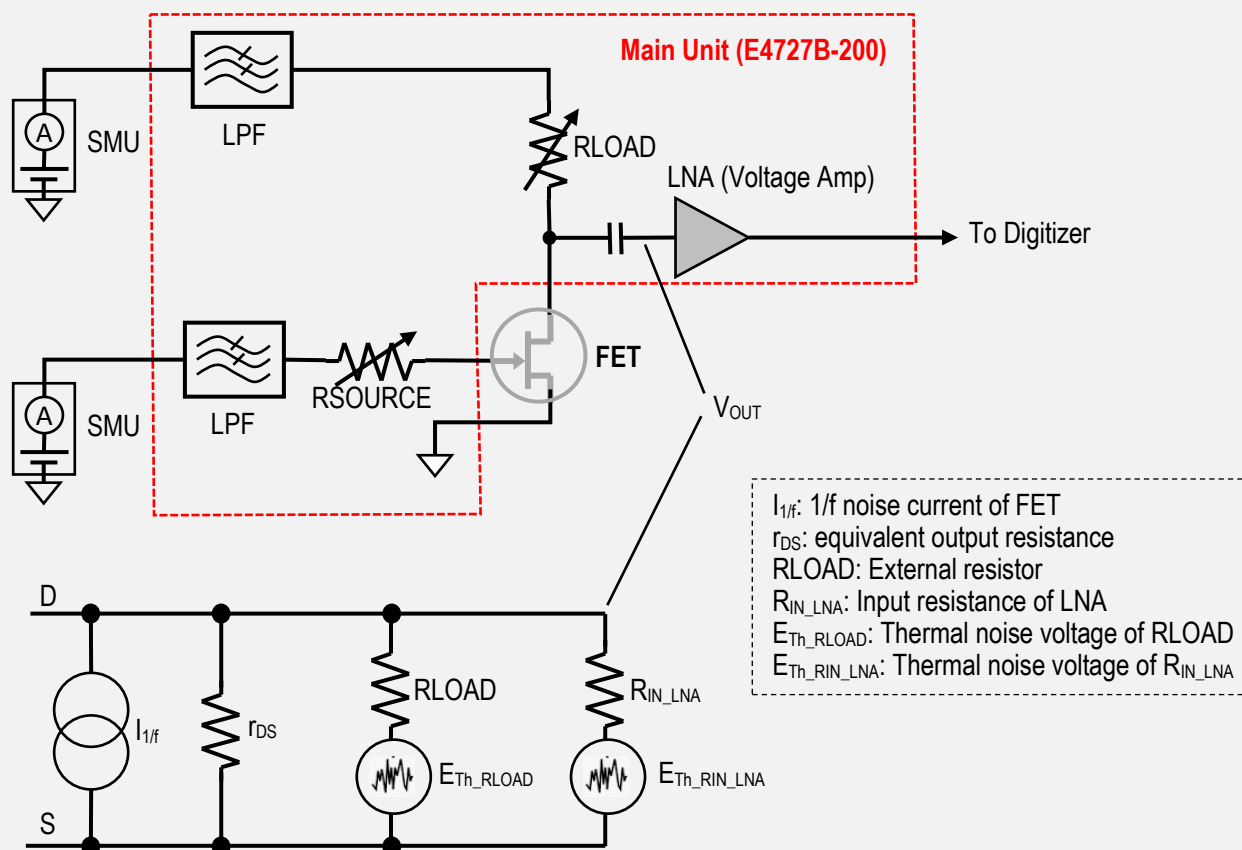


图1. FET的低频噪声测量电路以及等效输出电路

FET 的 $1/f$ 噪声电流($I_{1/f}$)通过下面的等式转换为输出电压(V_{OUT})。

$$V_{OUT} = I_{1/f} \times \frac{1}{\frac{1}{r_{DS}} + \frac{1}{R_{LOAD}} + \frac{1}{R_{IN_LNA}}}$$

外置电阻 RLOAD 的作用是电流到电压的转换器，借此放大 1/f 噪声电流($I_{1/f}$)。转换后的电压遵循基本的欧姆定律，它的值随着 RLOAD 的增加而增大。然而，在 FET 的线性工作区，等效的输出电阻(r_{DS})的值与 RLOAD($\sim k\Omega$)以及 R_{IN_LNA} ($\sim M\Omega$)相比会显得非常小。这也就意味着 V_{OUT} 会被较小的 r_{DS} 限制住，这也是电压 LNA 系统的局限性。因此，电流 LNA 更适合用在有源器件在输出电阻比较小的情况。

更适合用在大阻值的电阻

图 2 显示测量电阻低频噪声的等效电路，输出电压(V_{OUT})由下面的公式计算得到。电阻 1/f 噪声电压($E_{1/f}$)被 R_{DUT} 和 R_{LOAD}/R_{IN_LNA} 分压。

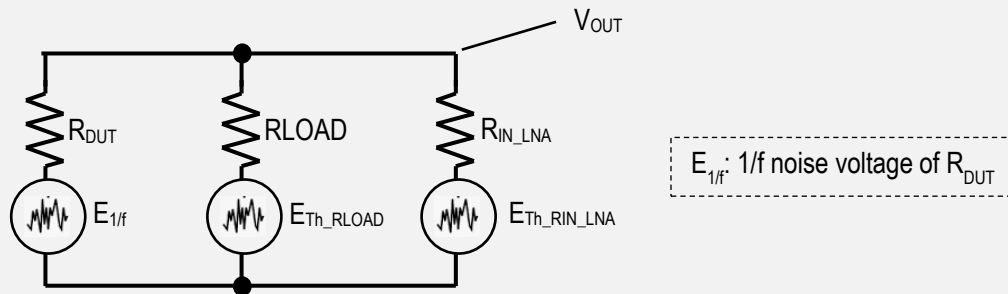


图 2. 电阻的低频噪声测量电路

$$V_{OUT} = E_{1/f} \times \frac{\frac{1}{\frac{1}{R_{LOAD}} + \frac{1}{R_{IN_LNA}}}}{R_{DUT} + \frac{1}{\frac{1}{R_{LOAD}} + \frac{1}{R_{IN_LNA}}}}$$

R_{IN_LNA} 的阻值非常大，所以上面这个等式可以简化为下面的式子。也就意味着如果要得到足够大的 V_{OUT} 就需要 R_{LOAD} 的阻值与 R_{DUT} 相比拟。同时，大的 R_{LOAD} 阻值需要 $E_{1/f}$ 不能被 E_{Th_RLOAD} 和 $E_{Th_RIN_LNA}$ 掩盖。因此，如果 R_{DUT} 阻值大于 $10 M\Omega$ ，那么 R_{LOAD} 的阻值就需要大约 $\sim 100 M\Omega$ 。这就造成了硬件设计上的难度，也就是为什么这种应用下会选用电流 LNA。

$$V_{OUT} \approx E_{1/f} \times \frac{R_{LOAD}}{R_{DUT} + R_{LOAD}}$$

但是为什么 E4727B 系统只配有电压 LNA 就可以做全部量测？

下面列表总结了电流 LNA 的一些应用场景

- FET 的线性工作区(也就是小等效输出电阻, r_{DS})
- 二极管的大电流区域 (也就是小等效电阻, r)
- 大阻值电阻 (也就是大 R)

E4727B 只配备了电压 LNA, 但是它可以覆盖任何器件和任何测量条件下的的低频噪声测量。原因是我们的系统对 LNA 电路以及整体系统都进行了优化设计。下面两个例子展示了实际的测量效果。

第一个例子是 FET 的线性工作区, 用来验证有源器件在小的输出等效电阻的情况。图 3 展示了在 $I_D=1 \mu A$ 到 $2 mA$ 且 $V_{DS}=0.01 V$ 下的 S_{id} 实测数据。在 $I_D=2 mA$ 下的输出等效电阻很小($\sim 4 \Omega$), 但是 E4727B 在所有的偏置条件下都能得到很合理的数据。右侧的图显示的是 S_{id}/I_D^2 和偏置的关系。这也验证了测量数据的合理性。



可测器件

E4727B A-LFNA 可用于 FET, BJT, 二极管, 电阻和电路的测量。所有器件均通过电压 LNA 进行测量, 该电压 LNA 是针对低频噪声测量而优化设计的。

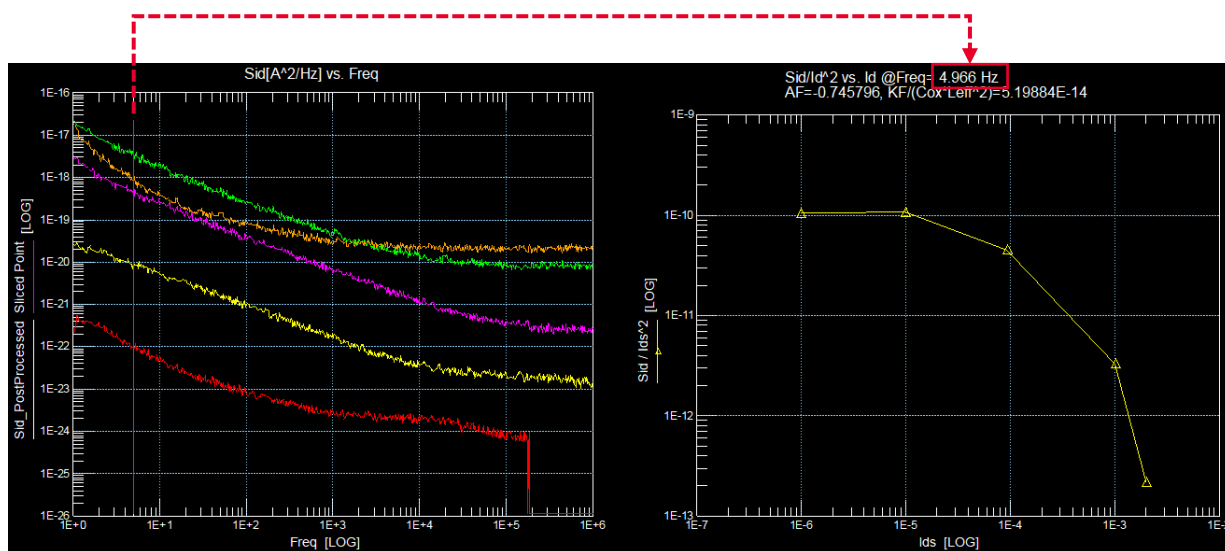


图 3. 实测 2N7002K FET 器件在 $V_{DS} = 0.01 V$ 时的漏极噪声电流密度 S_{id} (左图) 以及 5Hz 下归一化 S_{id} 的偏置相关性 (右图)

另一个例子验证了大阻值电阻的测量结果。图 4 显示的是阻值为 10Ω 到 $20 M\Omega$ 电阻量测的热噪声。Y 轴是噪声的电流功率谱密度(S_{ir}), 蓝色的虚线是热噪声的理论值($4kT/R$)。黑色虚线是 20Ω 热噪声以及它等效的 LNA 本地噪声 $-185 dBV^2/Hz$ 。这个数据说明 E4727B 可以测量 30Ω 到 $10 M\Omega$ 电阻的噪声。

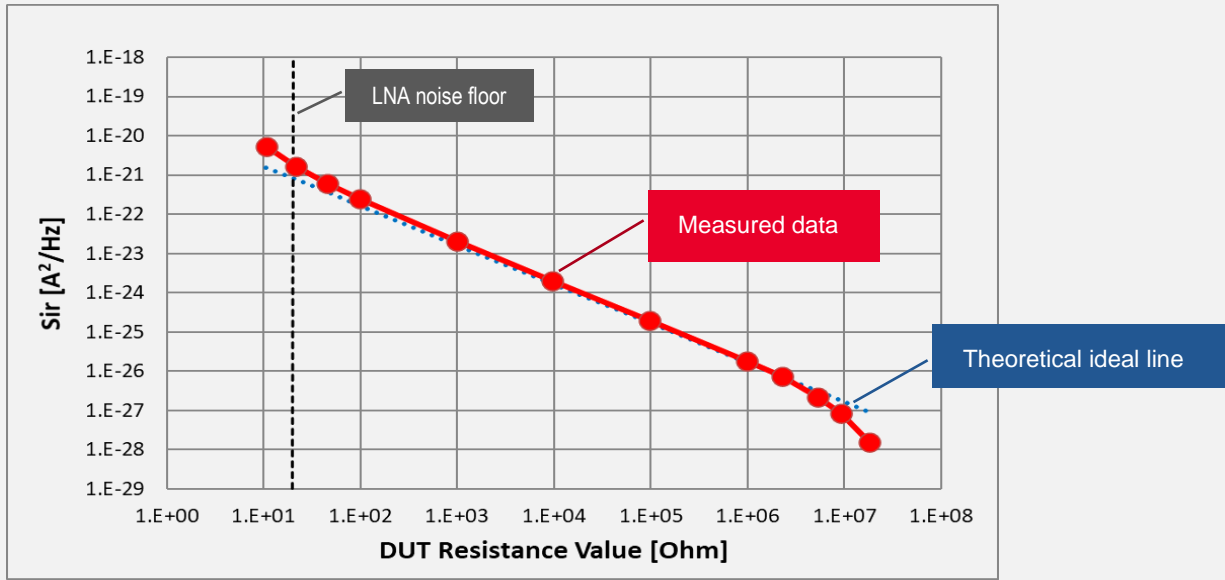


图4. 电阻热噪声的实测噪声电流密度 (S_{ir})

总结

有些商用系统同时使用了电流 LNA 和电压 LNA 来进行低频噪声的测量，但是这篇应用指南展示了只使用电压 LNA 也是可以进行各种器件所有偏置条件下的低频噪声测量。这需要对整个系统设计进行优化设计。是德科技具有这方面的能力，这也是市面上的唯一技术。E4727B 可以为所有器件所有测量条件下提供非常稳定并且精确的低频噪声测量结果。

Literature

E4727B/W7802B Advanced Low-Frequency Noise Analyzer/Measurement Bundle Software - Data Sheet, [3120-1435.EN](#)

Learn more at: www.keysight.com

For more information on Keysight Technologies' products, applications or services, please contact your local Keysight office. The complete list is available at: www.keysight.com/find/contactus

