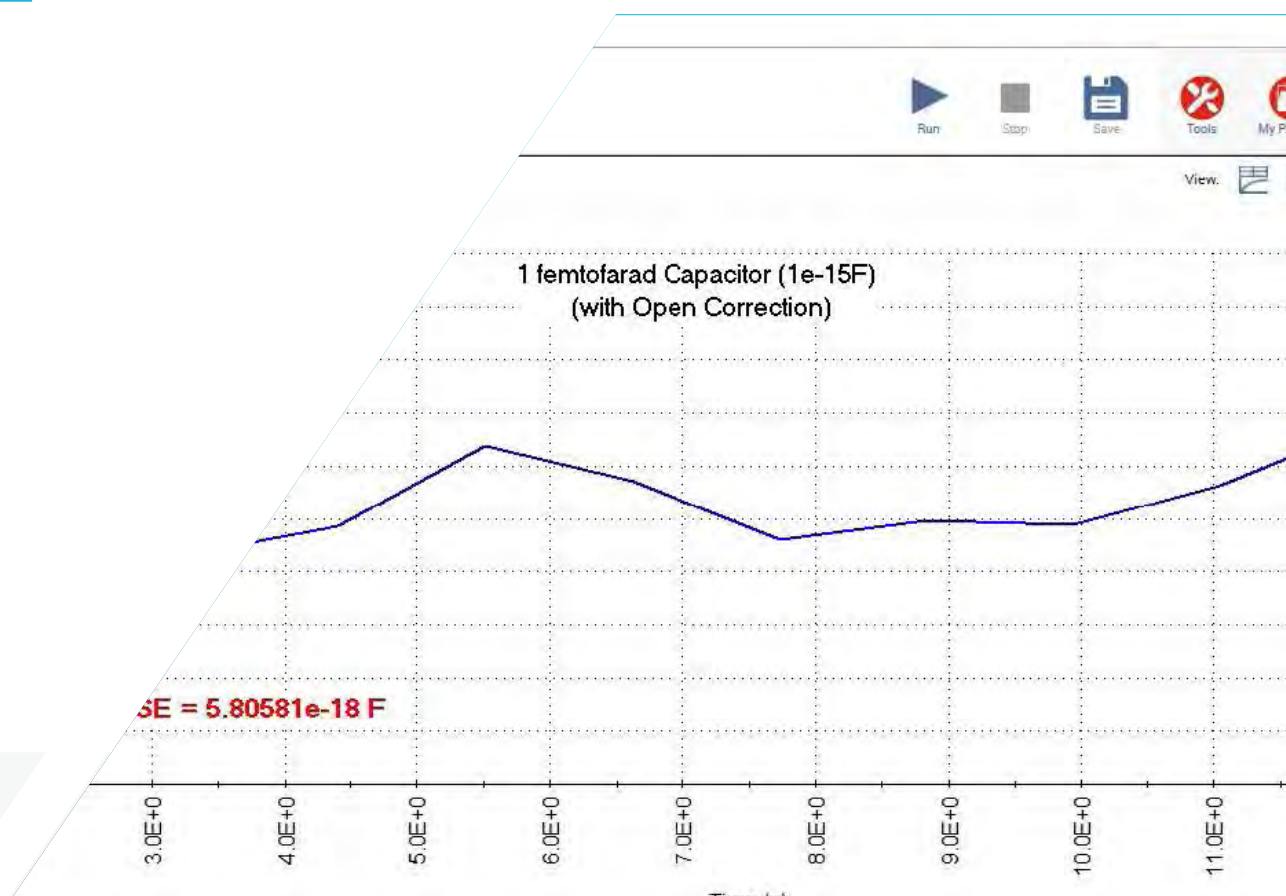


使用4215-CVU测量 fF (1e-15F) 电容

应用指南



引言

典型的半导体电容在 pF 或 nF 范围内。许多商业上可用的 LCR 表或电容计补偿后可以使用适当的测量技术来测量这些值，然而，一些应用需要在飞秒法 (fF) 或 1e-15 范围内进行非常灵敏的电容测量。这些应用包括测量金属到金属的电容，晶片上的互连电容，MEMS 器件，如：开关，纳米器件端子之间的电容。如果没有使用适当的仪器和测量技术，这些非常小的电容很难进行测量。

使用 4200A-SCS 参数分析仪配备的 4215-CVU (CVU)，用户能够测量大范围的电容，<1 pF 非常低的电容值也能测到。CVU 采用独特的电路设计，并由 Clarius+ 软件控制，支持校准和诊断工具，以确保最准确的结果。使用这种 CVU 和适当的测量技术可以使用户实现多个噪声水平的非常低的电容 (1e-18f) 测量。

本应用说明了如何使用 4215-CVU 电容电压单元进行 fF 电容测量。这包括建立适当的连接和使用 Clarius 软件中适当的测试设置，以获得最好的结果。关于进行电容测量的进一步信息，包括电缆和连接、定时设置、保护和补偿，可以在 Keithley 应用说明中找到，*使用 4200A-SCS 参数分析仪进行最佳电阻和交流阻抗测量*。

连接被测器件

与被测设备 (DUT) 进行适当的连接对测量灵敏的低电容至关重要。

为了获得最佳效果，使用标配的红色 SMA 电缆从 CVU 连接到 DUT。红色 SMA 电缆的特征阻抗为 100 Ω 。两根 100 Ω 并联电缆具有 50 Ω 的特性阻抗，这是高频源测量应用的标准。所提供的附件允许通过 BNC 或 SMA、连接件连接到测试夹具或探针上。使用提供的扭矩扳手，拧紧 SMA 电缆连接，以确保良好的接触。

双线感知和测量的 CVU 配置如图 1 所示。HCUR 和 HPOT 端子连接到 BNC 三通，形成 CVH (HI)，LCUR 和 LPOT 端子连接到形成 CVL (LO)。

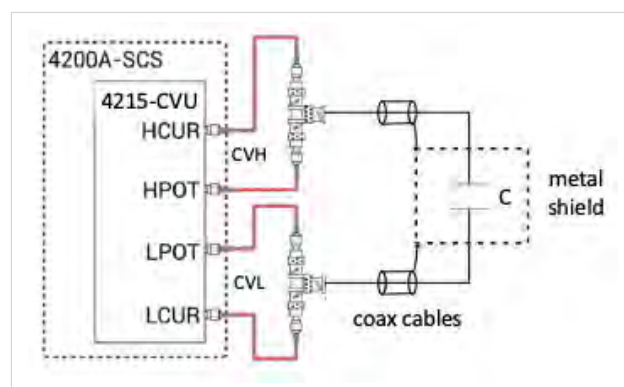


图 1. 双线测量的 CVU 连接

图 2 是 DUT 四线测量的示例。在这种情况下，HCUR 和 HPOT 端连接到设备的一端，LPOT 和 LCUR 端连接到设备的另一端。将四线连接到设备上，通过测量尽可能接近设备的电压来进行敏感的测量。

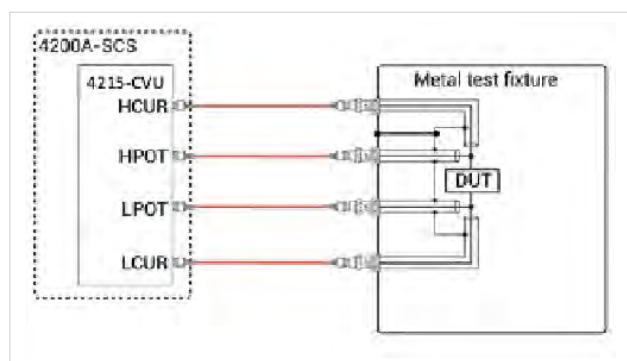


图 2. 四线测量的 CVU 连接

对于双线或四线测量，同轴电缆的外部屏蔽必须尽可能接近设备，以尽量减少屏蔽的环路面积。这降低了电感，并有助于避免共振效应，尤其在大于 1 MHz 的频率下影响更大。

保持所有电缆安装牢固，以避免任何移动。在执行偏置测量和实际 DUT 测量之间时发生的任何运动都可能轻微改变回路电感并影响补偿数据。

当测量非常小的电容时，屏蔽 DUT 对于减少由于干扰而造成的测量不确定性变得很重要。干扰源可以是交流信号，甚至是物理运动。金属屏蔽应包围 DUT，并连接到同轴电缆的外壳上。

对于低电容测量，最好使用四线测量，但是，如果电缆较短且使用补偿，则可以实现双线传感的最佳测量。

测量 fF 电容的 Clarius+ 软件配置

在 Clarius 软件中设置测量包括在库中选择 fF 项目、配置测试设置和执行测量。

选择库的电容项目

在 Clarius 软件的项目库中包含了一个用来进行非常小的电容测量的项目。从选择视图中，在搜索栏中输入“femtofarad”。fF 电容项目将出现在窗口中，如图 3 所示。选择“创建”，以在项目树中打开项目。



图 3. 库中 fF 电容测量项目

配置测试设置

一旦项目被创建，飞法电容项目将出现在项目树中，如图 4 所示。

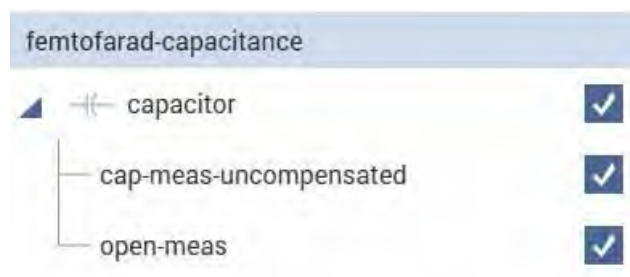


图 4. 飞法电容项目树

本项目有两个测试：1) *cap-measure-uncompensated* 测试项，用于测量 DUT 的电容。2) *open-meas* 测试，用来获取电缆和连接件的电容，由于这些电容测量的灵敏度，开路测量用来保证 DUT 测量的精确度，开路测量数据从 DUT 的电容测量值中减去。该方法能对极低电容的良好的测量结果。

对于成功的低电容测量，在配置窗口中适当地调整测量和定时设置是很重要的。以下是一些关于做出最佳调整的建议：

测量设置：用户可以控制的一些设置：电流测量范围、交流驱动电压和测试频率。这些对测量很重要，因为它们涉及到确定器件电容的方程式。CVU 根据 I_{ac} 、 V_{ac} 和测试频率计算设备电容：

$$C = \frac{I_{ac}}{2\pi f V_{ac}}$$

其中，

C = 器件电容 (F)

I_{ac} = CVU 测量的交流电流

f = 测试频率

V_{ac} = 交流驱动电压

通过观察这些方程中的关系，可以推导出电流测量范围、交流驱动电压和测试频率的最佳设置。

CVU 有三个电流测量范围：1 μ A、30 μ A 和 1 mA。对于噪声最小的最低电容测量，使用最低电流范围，1 μ A 范围。

交流驱动电压的水平会影响测量的信噪比。当交流噪声水平保持相对恒定时，使用更高的交流驱动电压产生更大的交流电流，从而提高信噪比。所以，最好使用尽可能高的交流驱动电压。本项目采用了 1V 交流驱动电压。

对于非常低的电容测量，使用大约 1 MHz 的测试频率是理想的。由于测试频率远高于 1 MHz，传输线效应增加了成功测量的难度。在较低的测试频率下，由于测试频率和电流成比例，测量值的分辨率会降低，因此，会产生更大的噪声。

定时设置：定时设置可以在“测试设置”窗口中进行调整。速度模式设置使用户能够调整测量窗口。对于非常低的电容测量，请使用自定义速度模式来设置测量时间，以达到所需的精度和噪声水平。基本上，测量时间或窗口时间越长，测量的噪声就越小。噪声与测量时间的平方根成反比，如下式所示：

$$Noise = \frac{1}{\sqrt{MeasTime}}$$

该噪声可以通过计算电容测量值的标准偏差来获得。这个计算可以使用 Clarius 软件中的公式编辑器自动完成。cap-meas-uncompensated 测试自动计算噪声并将值返回到表。

可以使用图 5 中所示的测试设置窗口中的自定义速度模式来调整测量窗口。

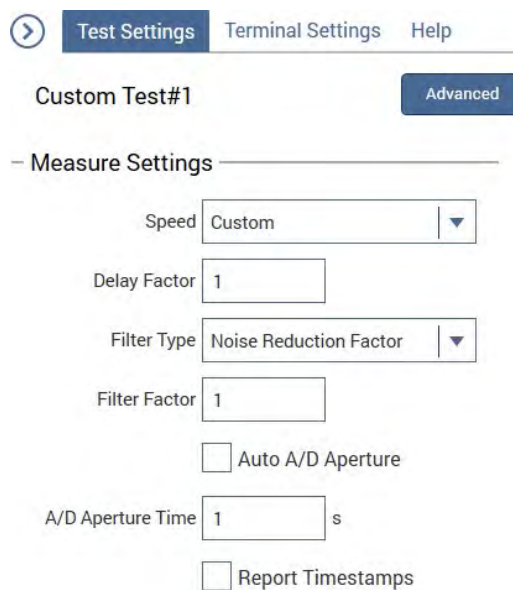


图 5. “测试设置”窗口中的自定义速度模式测量

窗口的时间，计算方法如下：

$$Measurement\ Window = (A/D\ Aperture\ Time) * (FilterFactor2\ or\ Filter\ Count)$$

表 1 列出了 CVU 噪声作为测量窗口的函数，用两线法将电容连接到 CVU 端子。噪声的计算方法是取 15 个读数的标准偏差，以及设置为 0V 直流、1 MHz 和 1V 交流驱动电压的测量值。该数据验证了随着测量时间的增加，噪声会减小。注意，以上噪声是在 $\geq 1s$ 的测量时间内 fF 或 1E-18F 范围内的噪声。可能需要在每个测试环境中进行实验，以确定一个测试的最佳测量时间。

测量时间 (s)	噪声 (rms)
0.001	1.18E-16
0.002	9.90E-17
0.005	9.17E-17
0.01	7.43E-17
0.02	6.84E-17
0.05	2.98E-17
0.1	2.24E-17
0.2	1.49E-17
0.5	1.15E-17
1	6.13E-18
2	5.00E-18
5	3.99E-18
10	2.77E-18

表 1. 1fF 电容的测量时间与噪声的关系

执行测量

一旦配置了硬件和软件，就可以执行测量。理想情况下，4200A-SCS 应该在测量前至少预热一个小时。

按照这四个步骤进行补偿测量并重复结果。

1. **测量器件的电容。**在项目树中选择 cap-meas-uncompensated 测试。在“配置”视图中，根据设备和应用程序调整测试设置。运行该测试。
2. **测量开路情况。**在项目树中选择 open-meas
3. **测试。**调整测试设置，使其与 cap-meas-uncompensated 测试中的测试设置完全相同，包括数据点数和电压步数。仅断开 CVH（HCUR 和 HPOT）电缆。确保未端接的电缆已进行封盖。运行开路测试。
4. **分析结果。**在项目树中选择 femtofarad-capacitance 项目，然后选择分析视图。图 6 显示了显示补偿的 1 fF 测量值的屏幕截图。



图 6. 1fF 电容测量的分析图表和图形截图

注意，最近的电容和开路测量在表中噪声测量计算的后面。项目树中所有的测试数据将显示在屏幕的右侧。如如图 7 所示，选择了 *capmeas-uncompensated* 和 *open-meas* 测试的数据。这意味着每次执行测试时，都将在工作表中填充最新的数据。

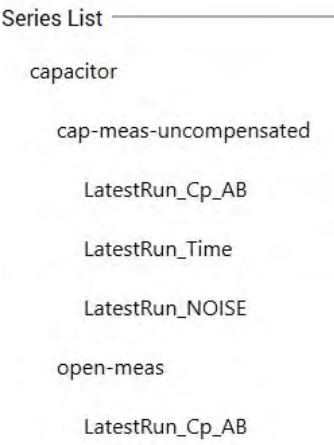


图 7. 从测试中得出的数据

在公式器中建立了一个公式，通过从项目级分析图表中的 *capmeas-uncompensated* 测试数据减去 *open-meas* 测试数据，自动计算补偿电容测量值。该图显示了补偿的电容作为时间的函数。表中的电容列列出了补偿的测量值以及所有读数的平均电容。图 8 显示了电容测量数据 (Cp-AB)、时间、噪声、AB 测量数据、补偿测量数据 (电容) 和平均电容 (AVG_CAP)。

	capacitor			Formulas		
	cap-meas-uncompensated			open-meas		
	LatestRun			LatestRun		
	Cp_AB	Time	NOISE	Cp_AB	CAPACITANCE	AVG_CAP
1	6.0100E-15	2.1942E+0	5.8058E-18	5.0669E-15	943.0739E-18	952.4282E-18
2	6.0182E-15	3.3013E+0		5.0749E-15	943.2922E-18	
3	6.0166E-15	4.4083E+0		5.0681E-15	948.4917E-18	
4	6.0242E-15	5.5154E+0		5.0604E-15	963.7814E-18	
5	6.0107E-15	6.6224E+0		5.0535E-15	957.1653E-18	
6	6.0132E-15	7.7295E+0		5.0672E-15	946.0129E-18	
7	6.0093E-15	8.8365E+0		5.0598E-15	949.5303E-18	
8	6.0095E-15	9.9435E+0		5.0607E-15	948.8479E-18	
9	6.0077E-15	11.0506E+0		5.0514E-15	956.2955E-18	
10	6.0222E-15	12.1576E+0		5.0544E-15	967.7908E-18	

图 8. 分析界面中显示的测试数据

5. 重复测量。可以运行在项目重复某个测量。补偿读数将自动计算。但是，*open-meas* 测试不需要选择，如图 9 所示。如果数据出现意外移动，应定期重复获取的开路数据。这可能因为了温度的变化或电缆的运动。

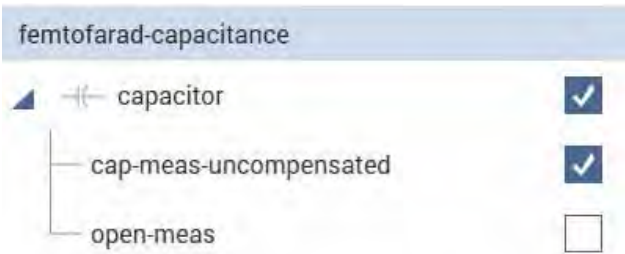


图 9. 在项目树中不选择 open-meas 测试

结论

4215-CVU 利用库项目、适当的连接、适当的测量技术和设置，可以测量 fF 水平电容。使用适当测量窗口的 4215-CVU 可以使几十个 aF 范围及以下的噪声水平。



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：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。

040220 SBG 1KC-61666-0

