

使用P2102A探头和Bode 100 VNA进行2端口阻抗测量

By Benjamin Dannan and Steven Sandler, Picotest.com

高速印刷电路板（PCB）设计需要精心设计的供电网络（PDN），以支持当今的FPGA和定制混合信号ASIC。PDN包含重要的阻抗信息，可以告诉设计人员系统如何对动态电流做出反应以及PCB布局的影响。如果我们将PDN视为稳压器模块（VRM）和负载（ASIC）之间的传输线，那么良好的PDN设计的起点就是VRM。

如今，VRM需要给使用多口千兆以太网，PCIe和DDR存储器接口的多个VDD内核供电，以支持FPGA和/或定制ASIC。话虽这么说，但有关VRM输出阻抗的信息一般是不会提供的，而且提供时也不一定准确。此外，对于任何设计工程师而言，在多个VRM或多拓扑DC-DC稳压器上测量超低阻抗都是一项挑战。

2端口并联-直通阻抗测量是在微欧和毫欧范围内测量VRM输出阻抗的黄金标准[1]。但是，并非总是可以通过同轴连接器连接PCB或被测器件（DUT）进行这些测量。因此，当设计人员使用矢量网络分析仪（VNA）进行这些类型的测量时，连接DUT的方法需要注意细节，以确保电感和各种误差最小化，从而可以进行精确的测量。为了充分利用您的VNA，您需要使用正确的探头和附件以确保您的特定测量的准确。使用P2102A这样的可调型探头，您可以快速表征多个VRM，以确保稳定性，甚至可以在初始PDN设计期间检查模型是否准确。

Picotest P2102A 2端口PDN传输线探头是一种可调型探针，其尖端的电感非常低，可降低在密集PCB上的空间限制导致的测试难度，同时无需焊接同轴器件，添加其他同轴连接器或其他必要的测试点用于阻抗测量。当要评估的传输线路数量很多且耗时，或者PCB迭代可用于为每个测试点进行测试时，此功能特别有用。重复测量得以简化，因为连接只需将尖端与现有的输出电容器焊盘接触即可。该可调型探头带有4个探针尖，可以在PCB上的各种SMD封装（例如1206、0805、0603或0402）上进行测量。P2102A探针尖具有1X，2X，5X和10X衰减。这使用户可以灵活地在宽范围的电压范围内进行测量。例如，2X探头可以测量6Vrms，而无需DC隔离器。这样是衰减阻抗底噪增加的幅度。简而言之，这2端口P2102A探头最适合于VRM，电源平面和去耦测量。另一个好处是，您可以在评估PDN的同时使用非侵入式稳定性测量（NISM）来评估电源的稳定性[2]

Application Note

2-Port Impedance Measurement

本文档的目的是向设计和测试工程师展示如何设置Bode 100 VNA并将其与Picotest P2102A探头一起使用的过程，以高效，快速地准确测量任何VRM或电源路径的阻抗。这还将向您展示如何使用此探头作为快速的GO / NO-GO测试仪。在本应用笔记中，将按照图1所示的过程对两个DUT进行测量。

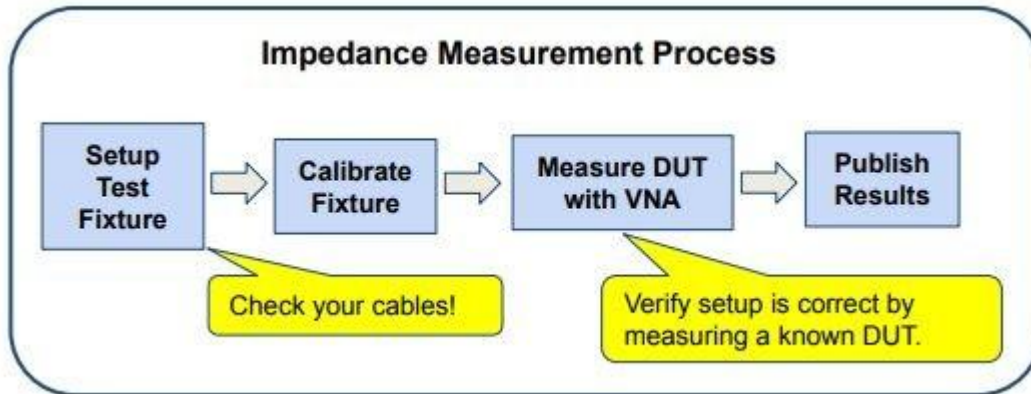


Fig. 1 - Impedance Measurement Process.

Application Note

2-Port Impedance Measurement

1.0 Test Equipment List

Description	Model	QTY
Vector Network Analyzer	OMICRON Lab Bode 100 [3]	1
2-port PDN Transmission Line Probe Kit	Picotest P2102A-2X [4]	1
Common Mode Transformer	Picotest J2102B-N [5]	1
Picotest PDN Cable®, BNC-BNC, 0.25 meter	BNCJ/BNCJ-250 [6]	1
SMA Female to N Male Adapter	Pasternack PE9081 [7]	1
SMA Female to BNC Male Adapter	Pasternack PE9073 [8]	1
BNC Female to N Male Adapter	Pasternack PE9002 [9]	1
3D Probe Positioner	Keysight N2787A [10]	1
VRM Demo Boards (Flat and Varying Impedance)	LM20143B [11]	1
VRM - Infineon PS5401 Eval (DUT)	EVAL_PS5401-INT [12]	1
Calibration Board/Substrate	Included in Picotest P2102A kit	1

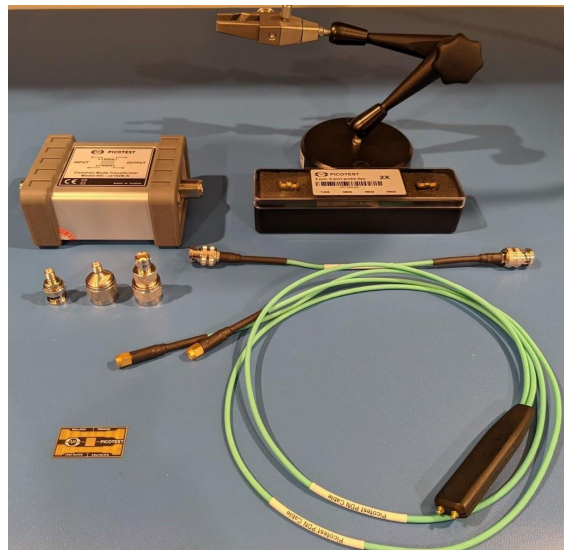


Fig. 2 - Picotest PDN cables, J2102B ground isolator, calibration substrate, P2102A probe, P2102A probe tips, and probe holder for measurement.

Application Note

2-Port Impedance Measurement

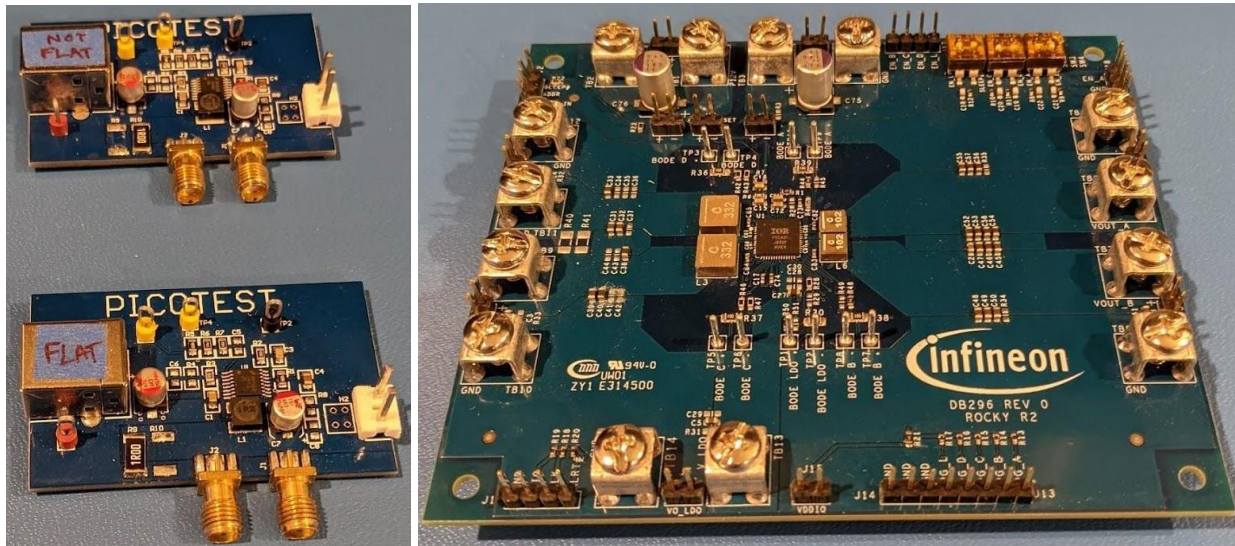


Fig. 3 - Picotest LM20143 DUTs (left) and Infineon PS5401 Eval DUT (right).

Note: 在本文档中，Picotest LM20143测试板可能被称为平面DUT和非平面（NF）DUT。

2.0 测量设置

P2102A-2X探头的尖端包括50Ω串联电阻（ R_s ），可以在Bode Analyzer Suite软件中进行设置/说明。图4和5提供了如何用Bode 100将DUT连接到2端口P2102A探头的图示。

对于其他P2102A-#X探针型号，请按照下面Bode Analyzer套件中的定义设置 R_s ：

P2102A-1X - $R_s = 0\Omega$

P2102A-5X - $R_s = 200\Omega$

P2102A-10X - $R_s = 450\Omega$

注意：对于P2102A-1X探头尖端，在Bode Analyzer套件中，由于 $R_s = 0\Omega$ ，因此也可以使用分路直通法代替带串联电阻的分路直通法。

Application Note

2-Port Impedance Measurement

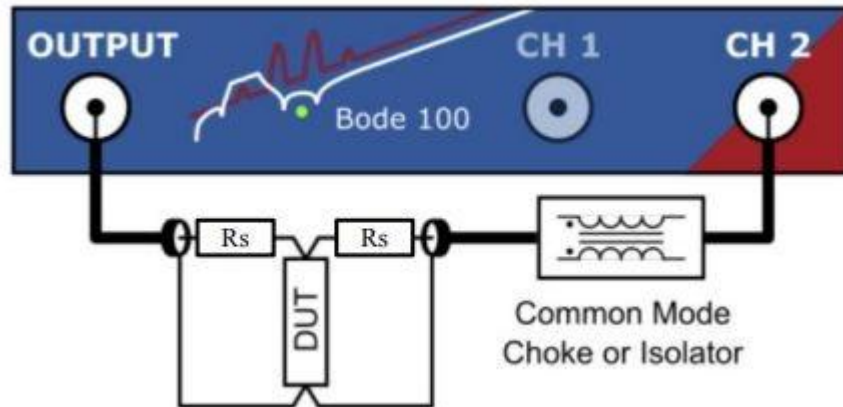


Fig. 4 - 2-port Shunt-Thru with series resistance impedance measurement setup using Bode 100 and Picotest ground isolator J2102B.

许多2端口探头用户已经拥有一个微探针台，但是，设置摄像机，显微镜，校准等的重要性有时比简单的VRM阻抗甚至稳定性测量所需的要大得多。这就是P2102A探头在测试中更加适合的地方，如图5所示。

Application Note

2-Port Impedance Measurement

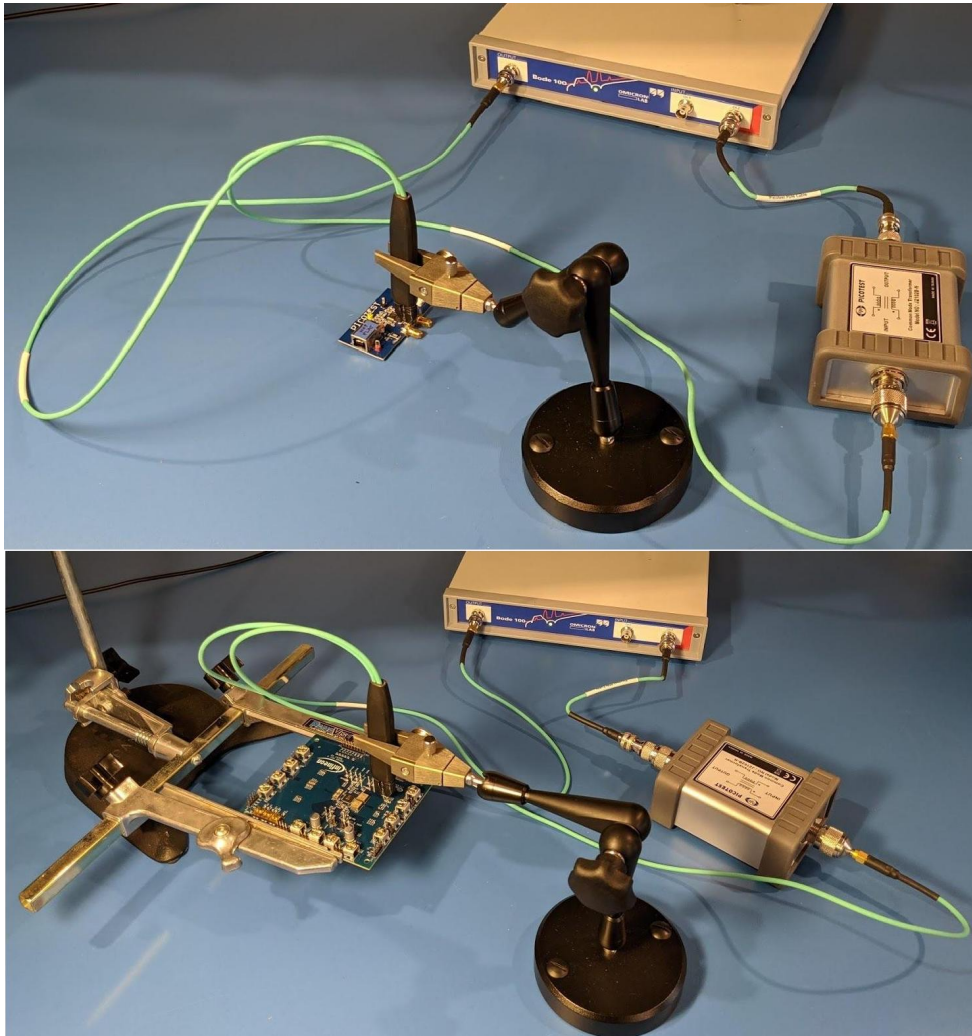


Fig. 5 - Measurement Setup after Calibration with DUTs.

并联-直通直通法通过固有地，会在低频时遭受接地环路误差。通过流经连接到通道2接地的电缆屏蔽层的电流会引入测量误差，当测量非常低的阻抗值时，该误差在低于几MHz的频率下会变得很明显。为了减少低频时的接地环路误差，请使用接地隔离器或共模变压器（例如J2102B）或有源隔离设备（例如J2113A [13]）。

在进行任何测量之前，您应确保使用直通校准或短开负载（SOL）校准方法对设置进行校准。正确的校准至关重要，因为它可以校正接触电阻，尖端电感，耦合和热电偶效应。Picotest的建议是在Bode 100上使用SOL校准方法。为何如此重要的示例在本文档的后面显示。此外，为了确保一致的接触电阻，最佳精度和可重复性，可以在校准和测量过程中使用探头支架。

Application Note

2-Port Impedance Measurement

图6和7提供了每个DUT上探针尖端位置的图示。对于图6，在测量之前先取下0603电容器（C42），然后如图所示使用0603探针头。但是，无需移除电容器即可进行此测量。为了识别起见，探头的外壳在顶端在信号侧有一个凹口，而平整光滑的一面是“接地”侧，以免造成混淆。

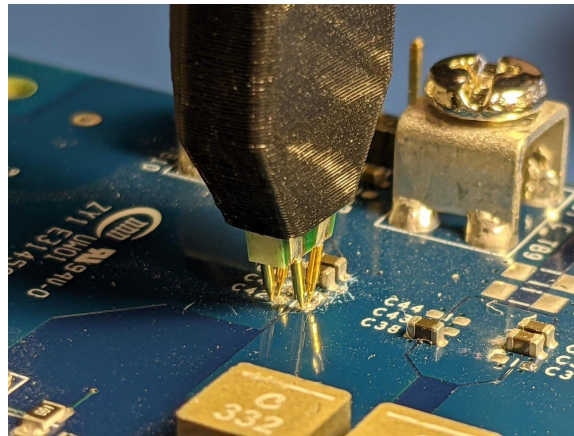


Fig. 6 - Probe location on DUT - Infineon PS5401 Eval at C42.

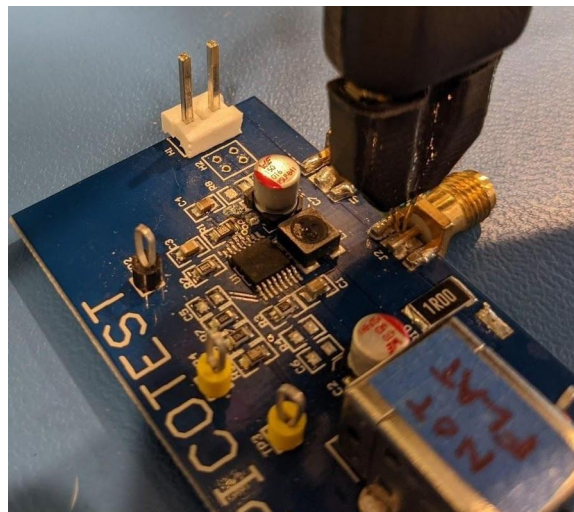


Fig. 7 - Probe location on DUT - LM20143 at J2.

Application Note

2-Port Impedance Measurement

3.0 测量结果

图8所示的结果描述了使用P2102A可调型探头在打开和关闭LM20143 DUT的情况。表1总结了三个光标位置处的阻抗。

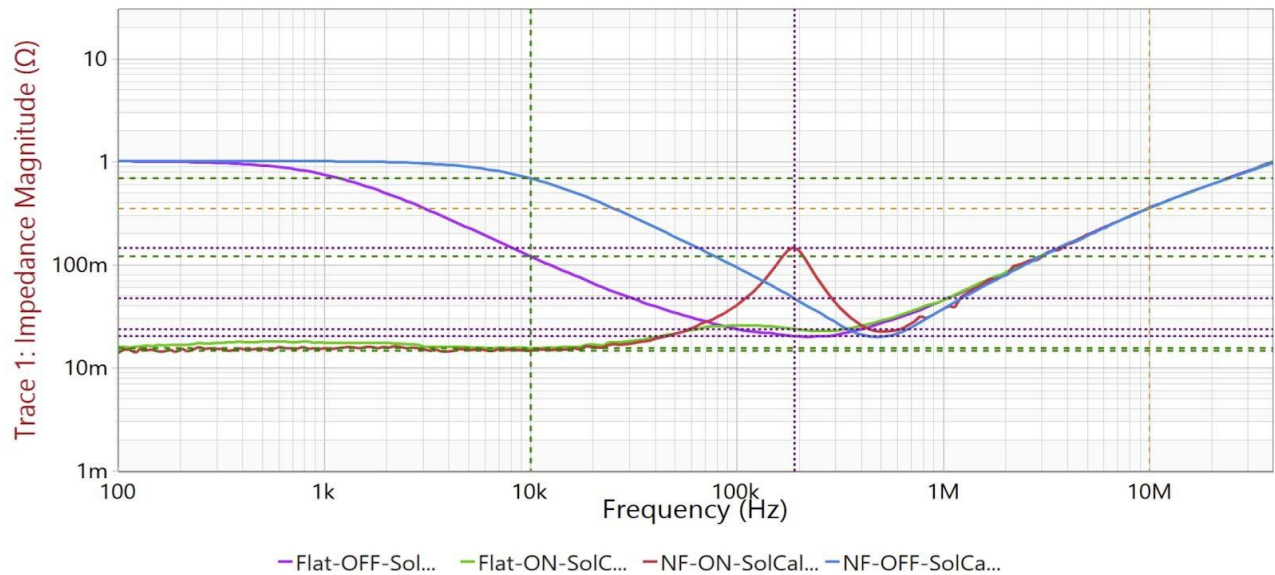


Fig. 8 - LM20143 VRM Output Impedance results OFF and ON (SOL calibration method).

Table 1 - Results of the LM20143 Flat vs. Not Flat DUT boards at J2.

	Cursor 1	Cursor 2	Cursor 3
Frequency	10 kHz	190.708 kHz	10 MHz
Trace 1	Magnitude	Magnitude	Magnitude
Flat-OFF-SolC...	120.101 mΩ	20.188 mΩ	352.353 mΩ
Flat-ON-SolC...	15.444 mΩ	23.607 mΩ	350.559 mΩ
NF-ON-SolCal...	14.569 mΩ	144.882 mΩ	353.724 mΩ
NF-OFF-SolCa...	686.32 mΩ	46.963 mΩ	352.433 mΩ

Application Note

2-Port Impedance Measurement

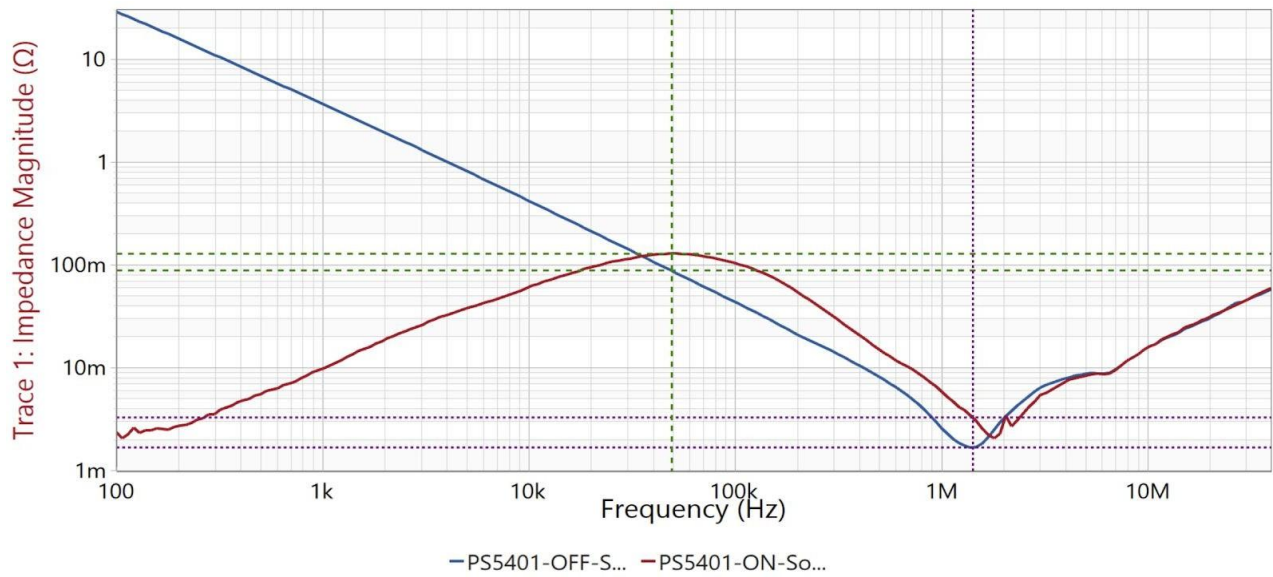


Fig. 9 - Infineon PS5401 Eval - VRM Output Impedance Results OFF and ON at C42 (SOL calibration method).

Table 2 - Results of Infineon PS5401 Eval DUT OFF and ON at C42.

	Cursor 1	Cursor 2
Frequency	49.119 kHz	1.426 MHz
Trace 1	Magnitude	Magnitude
PS5401-OFF-S...	87.704 mΩ	1.669 mΩ
PS5401-ON-So...	127.674 mΩ	3.272 mΩ

如图9和表2中的结果所示，使用P2102A可调型探头可以精确地测量10mΩ以下。

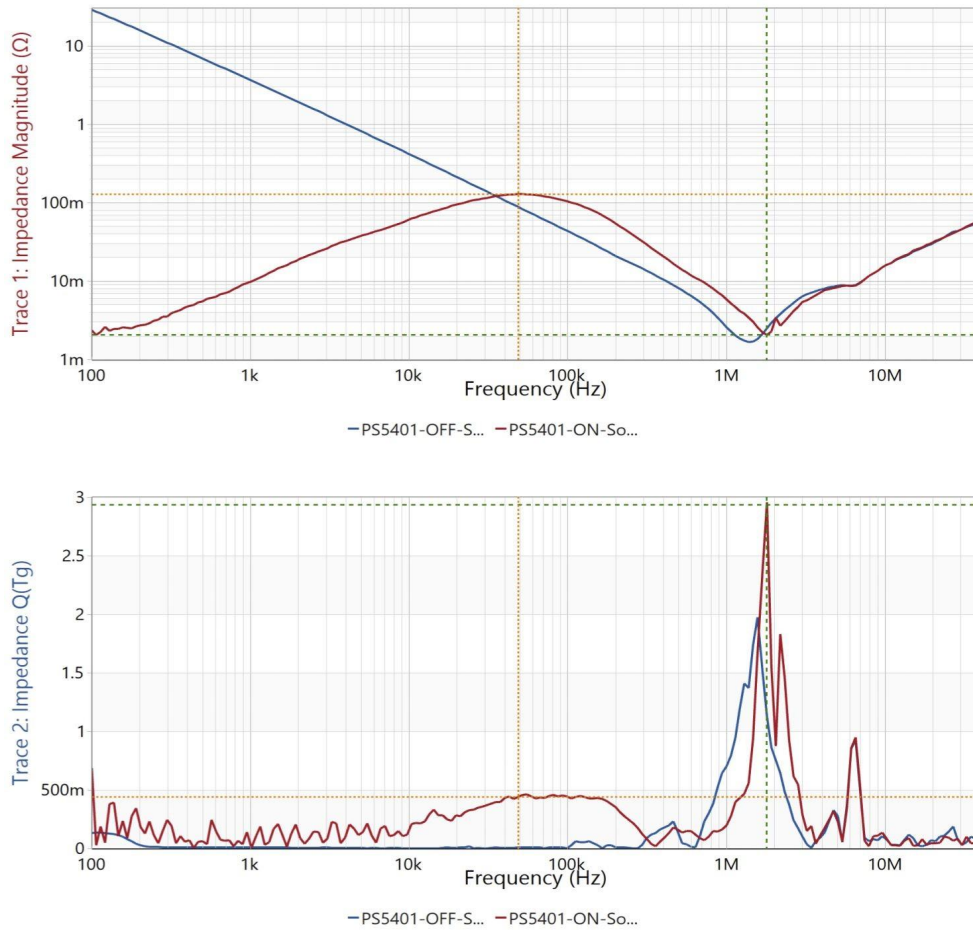


Fig. 10 - NISM Method of Infineon PS5401 at C42 (SOL calibration method).

Table 3 - NISM Method Results of Infineon PS5401 Eval DUT ON at C42.

	Cursor 1	Cursor 2	
Frequency	1.805 MHz	48.874 kHz	
Trace 1	Magnitude	Magnitude	
PS5401-ON-So...	2.058 mΩ	127.677 mΩ	
Trace 2	Q(Tg)	Q(Tg)	
PS5401-ON-So...	2.935	438.715 m	

英飞凌PS5401 DUT 的 NISM 测量结果:

Phase margin Cursor 1-Cursor 2: >71° of PS5401-ON-So...

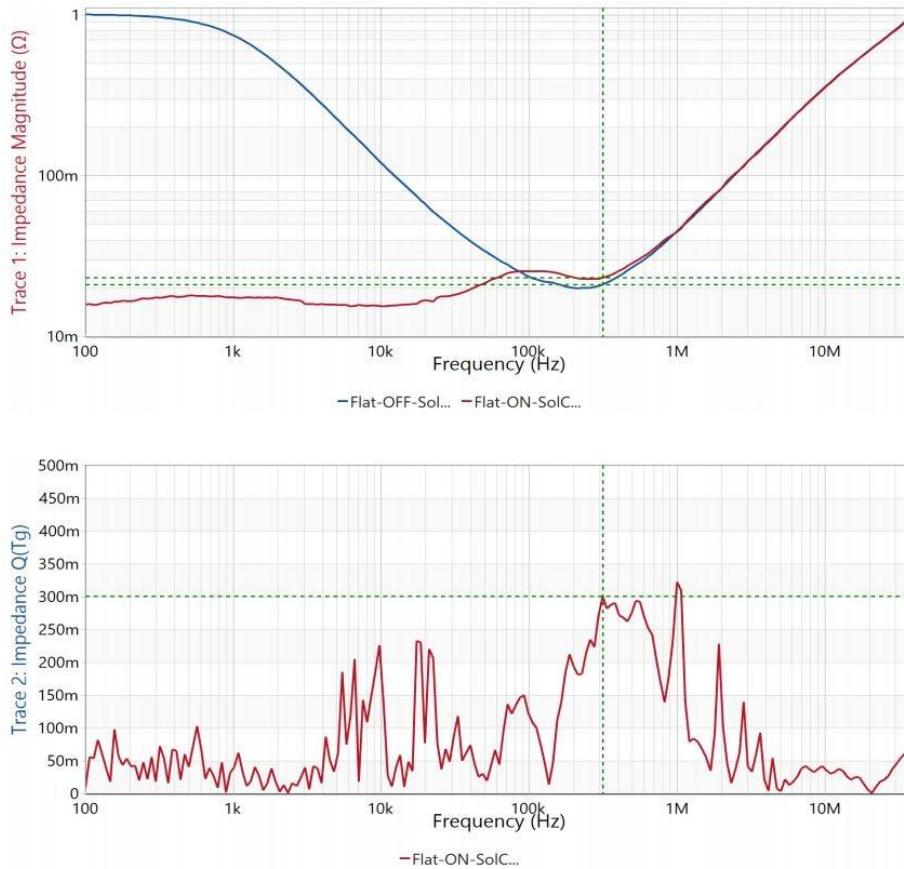


Fig. 11 - NISM Method of LM20143 Flat at J2 (SOL calibration method).

Table 4 - NISM Method Results of LM20142 Flat DUT ON at J2.

		Cursor 1
Frequency		317.167 kHz
Trace 1		Magnitude
Flat-OFF-Sol...		20.976 mΩ
Flat-ON-SolC...		23.159 mΩ
Trace 2		Q(Tg)
Flat-ON-SolC...		300.47 m

***LM20143 Flat DUT* 的 NISM 测量结果:**

Phase margin of Cursor 1: >71° of Flat-ON-SolC...

通过使用NISM，我们可以确定VRM的稳定性。如图10和11所示，通过分析显示大于71°的相位裕量（PM），Bode Analyzer Suite的计算结果可以快速确定这两个VRM具有稳定的控制环路。

4.0 P2102A --使用 Bode 100进行校准

通过串联电阻测量对并联-直通阻抗的测试装置进行校准

接通Bode 100的电源后，如图5所示，连接好用于校准的电缆。在DUT上进行测量之前，请按照以下步骤校准测量设置。

4.1 直通校准- Bode 100

Step 1: (In Bode Analyzer Suite) Select **File > New Measurement**

Step 2: Select “Impedance Analysis” tab

Step 3: Select **Shunt-Thru with Series Resistance** drop down > select **Start measurement**

Step 4: On menu ribbon > select  drop-down > select ► **Perform new calibration**

Step 5: Set Serial resistor $R_s = 50 \Omega$

Step 6: Ensure cables and probe are connected as shown in Figures 5 and 12 for **Thru calibration**

Step 7: Under Thru calibration > select **Start**

Step 8: Ensure the arrow points to the left, **Thru calibration** is applied

Thru calibration Open/Short/Load calibration

Step 9: Select **Close**

开始对DUT进行测试.....

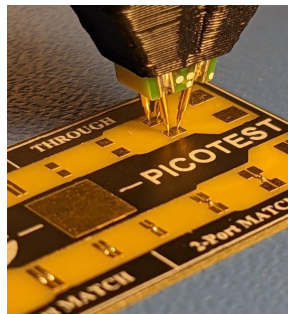



Fig. 12 - P2102A 2-port Thru-Calibration with Bode 100.

4.2 执行Short-Open-Load (SOL) 校准 Bode 100

Step 1: (In Bode Analyzer Suite) Select **File > New Measurement**

Step 2: Select “Impedance Analysis” tab

Step 3: Select **Shunt-Thru with Series Resistance** drop down > select **Start measurement**

Step 4: On menu ribbon > select  drop-down > select ► **Perform new calibration**

Step 5: Set Serial resistor $R_s = 50 \Omega$

Note: 对于1X, 5X或10X探针, 需要相应地设置 R_s .

Step 6: 确保电缆和探头的连接如图5和13所示, 进行开路校准

Step 7: Under **Open** calibration > select **Start**

Step 8: 确保如图5和13所示连接电缆和探头以进行短路校准

Step 9: Under **Short** calibration > select **Start**

Step 10: 确保如图5和13所示连接电缆和探头以进行负载校准

Step 11: Under **Load** calibration > select **Start**

Step 12: 确保箭头都指向右侧, **Open/Short/Load calibration** is applied

Thru calibration Open/Short/Load calibration

Step 12: Select **Close**

开始对DUT进行测量

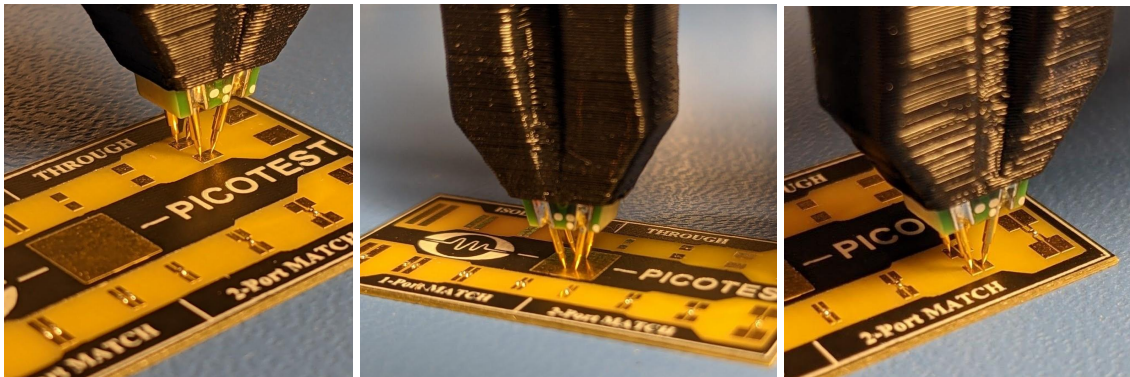


Fig. 13 - P2102A 2-port Calibration Open (left), Short (center), and Load (right) with Bode 100.

通过使用SOL校准方法而不是Thru校准方法，可以进一步提高测量精度。直通校准方法不考虑感应耦合误差。图14和15提供了两个示例，比较了使用Thru校准方法与SOL校准方法时归因于电感耦合的测量误差。

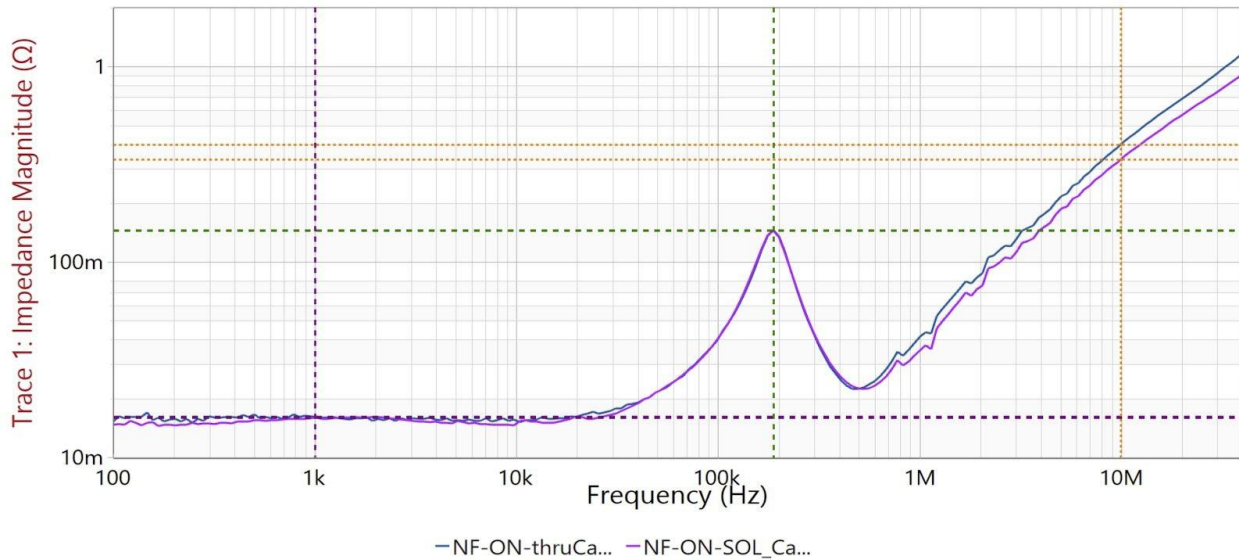


Fig. 14 - LM20143 Not Flat- Measurement Results using Thru-cal method (blue) vs. SOL method (violet) with Bode 100 and P2102A.

Table 5 - Thru-Cal Method vs. SOL Method Results for the LM20143 Not Flat DUT at J2.

	Cursor 1	Cursor 2	Cursor 3
Frequency	188.808 kHz	10 MHz	1 kHz
Trace 1	Magnitude	Magnitude	Magnitude
NF-ON-thruCa...	145.238 mΩ	398.314 mΩ	16.129 mΩ
NF-ON-SOL_Ca...	144.409 mΩ	334.099 mΩ	15.898 mΩ

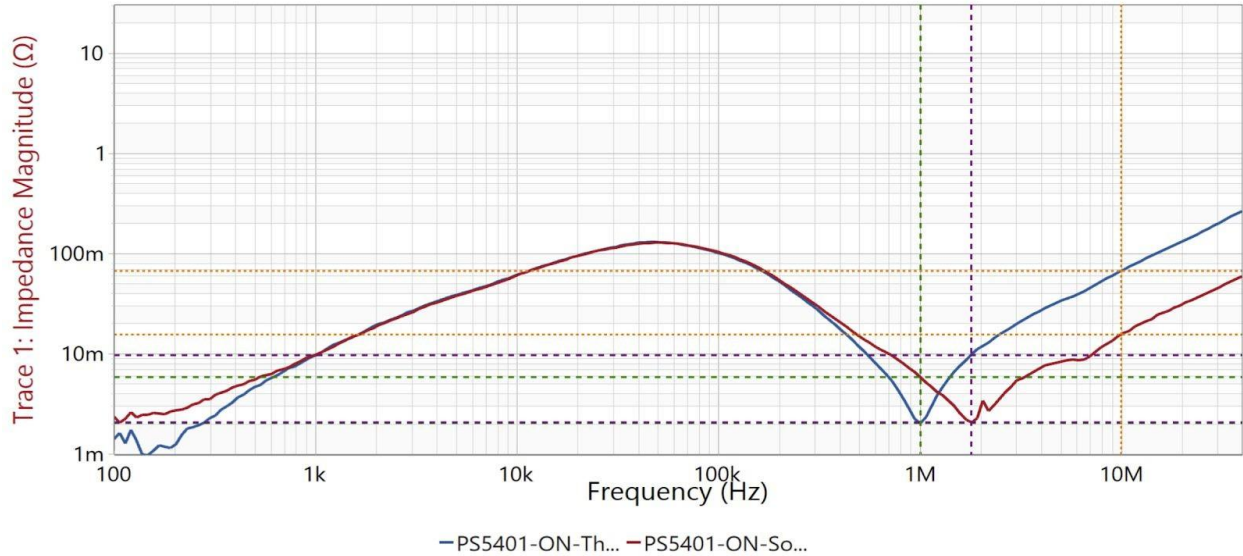


Fig. 15 - Infineon PS5401 ON - Measurement Results using Thru-cal method (blue) vs. SOL method (red) with Bode 100 and P2102A.

Table 6 - Thru-cal Method vs. SOL Method Results on Infineon PS5401 DUT at C42.

	Cursor 1	Cursor 2	Cursor 3
Frequency	1 MHz	1.8 MHz	10 MHz
Trace 1	Magnitude	Magnitude	Magnitude
PS5401-ON-Th...	2.068 mΩ	9.667 mΩ	66.742 mΩ
PS5401-ON-So...	5.927 mΩ	2.063 mΩ	15.501 mΩ

如图14和表5所示，在LM20143非平坦DUT上，使用SOL校准的测量值和通过直通校准的测量值，在10 MHz（光标2）观察到小64mΩ。从图15和表6中也可以看到类似的结果，与之相比，使用SOL校准方法在10 MHz处（光标3）观察到小了40mΩ。

直通校准方法。最后，如前所述，英飞凌PS5401 DUT的阻抗存在谐振。重要的是要注意的是，在测量过程中，如果在校准过程中未考虑电感耦合，则该谐振点会漂移（由于电感）。具体而言，Thru-cal直通校准方法的谐振点出现在1MHz，而在使用SOL校准方法进行校准期间考虑了电感耦合时，谐振点发生在1.8 MHz，频率变化了800 kHz。通过测量短路，可以在校准后看到Thru-cal直通校准产生的额外残留电感。

5.0 Conclusion

此处显示的2端口并联-直通阻抗测试方法是测量VRM的输出阻抗和控制环路增益（相位）稳定性能的黄金标准。

P2102A可调探针使您能够非常简单，快速和准确地进行2端口阻抗测量，从而有助于更好地设计PDN并提供快速的GO / NO-GO测试。测量阻抗时，我们不仅可以确定VRM的稳定性，还可以确定电源传输网络的组成。我们甚至可以根据包括时域，频域乃至EMI相关数据在内的阻抗测量结果来创建VRM的高精度模型。我们可以分辨出阻抗的哪些部分基于控制环路性能，哪些部分基于印刷电路板和/或去耦性能。

如果要测量平面或高频阻抗，则P2104A 1端口探头[14]可能是更好的选择。

如本文档所示，要使用带有P2102A可调型探头的Bode 100 VNA进行低阻抗测量，请执行以下操作：

- 必须使用正确的（低电感）探针，高质量的电缆和共模变压器（J2102B）。
- 您必须正确校准设置，因为这对于实现高保真度测量和消除测试设置错误的来源至关重要。
- 必须施加一致的可重复接触电阻，以施加一致的尖端压力。可以使用如图所示的N2787A，ClampMan [15]等探头支架或PacketMicro的探头支架之一来完成此操作。

6.0 References

1. Ultra-low Impedance (20 micro ohm) Measurement using 2-Port Shunt-Through - <https://www.picotest.com/images/download/Ultra-low.pdf>
2. NISM - <https://www.picotest.com/measurements/NISM.html>
3. Omicron Bode 100 - https://www.picotest.com/products_BODE100.html
4. Picotest P2102A - 2 Port PDN Transmission Line Probe - https://www.picotest.com/products_PDN_Probe.html
5. Picotest J2102B-N - Common Mode Transformer - https://www.picotest.com/products_J2102B.html
6. Picotest PDN Cable® - <https://www.picotest.com/pdn-cable.html>
7. Pasternack PE9081 - SMA Female to N Male Adapter - <https://www.pasternack.com/sma-female-n-male-straight-adapter-pe9081-P.aspx>
8. Pasternack PE9073 - SMA Female to BNC Male Adapter - <https://www.pasternack.com/sma-female-bnc-male-straight-adapter-pe9073-p.aspx>
9. Pasternack PE9002 - N Male to BNC Female Adapter - <https://www.pasternack.com/n-male-bnc-female-straight-adapter-pe9002-p.aspx>
10. Keysight 3D Probe Positioner - N2787A - <https://www.keysight.com/en/pd-1643963-pn-N2787A/3d-probe-positioner?cc=US&lc=en>
11. DUT - Picotest LM20143B VRM Demo Boards (Flat and Varying Impedance) - https://www.picotest.com/products_LM20143.html
12. DUT - Infineon PS5401 Eval - https://www.infineon.com/cms/en/product/evaluation-boards/eval_ps5401-int/
13. J2113A Semi-Floating Differential Amplifier - https://www.picotest.com/products_J2113A.html
14. Picotest P2104A 1-Port Probe - coming 2021 to https://www.picotest.com/products_PDN_Probe.html
15. ClampMan PCB Holder and Clamping Solution - https://www.picotest.com/products_clampman.html