



技术概述

# 用于双脉冲测试的定制 GaN 解决方案

使用 PD1500A 动态功率器件分析仪进行 GaN 功率器件表征



使用是德科技定制的专有 GaN 测试板，  
对 GaN 功率半导体器件实施可靠且可重复的表征。

HEMT、共源共栅、GIT 和垂直 GaN 技术

功率环路电感低于 5 nH

根据您的特定 GaN 测试需求量身定制



## 简介

为了满足宽带隙 (WBG) 动态测试和表征需求，是德科技于 2019 年推出了 PD1500A 动态功率器件分析仪和双脉冲测试仪 (DPT)。在此之前，市面上的动态功率器件测试系统大多是针对速度较慢的硅 (Si) 功率 FET 开发的，主要采用电阻开关技术。但是在表征开关速度和边缘速率更快的 WBG 器件时，这些系统就渐渐无法满足需求，为此功率半导体制造商和功率器件设计人员不得不开发定制的表征解决方案。

由于影响动态参数结果的因素有很多（例如电感开关、功率环路寄生效应、栅极驱动电路设计等），因此功率器件制造商和消费者在对这些 WBG 器件进行测试时，很难对得到的测试结果进行对比。



图 1. PD1500A 动态功率器件分析仪和双脉冲测试仪。

PD1500A 的主要目标是为 WBG 器件提供可重复且可靠的表征结果。无论是从个人到个人还是系统到系统，它都可以实现对不同功率器件的一致比较，让您能够确定最适合自身设计的功率器件。是德科技在 2019 年推出的 PD1500A 最初主要侧重于 Si FET、IGBT 和 SiC FET。其模块化的体系结构最大限度地减少了对定制测试解决方案的需求。自 PD1500A 问世以来，它已证明可为这些功率半导体提供可重复且可靠的测试结果。

# GaN FET 测试挑战

由于 GaN FET 的开关速度和边缘速率是 SiC 的 10 倍，因此在设计能够提供可重复且可靠的表征结果的 DPT 系统时会遇到额外的挑战。

- **各种各样的器件设计与外形**——目前，业界仍在不断开发各种拓扑和方法，以求最大限度地发挥 GaN 功率器件的优势。因此，器件的标准化程度较低，需要更多的定制设计。图 2 显示了截至本文发布时所开发的主要 GaN 器件类型。

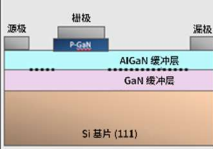
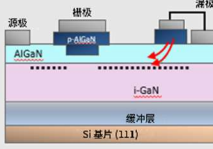
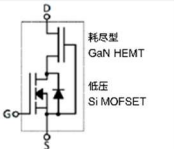
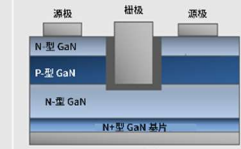
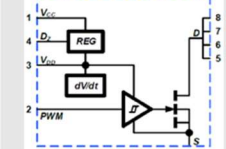
	HEMT (高电子迁移率晶体管)	GIT (栅极注入晶体管)	共源共栅 GaN	垂直 GaN	GaN 功率 IC
优点	• 开关速度超快	• 开关速度超快 • 电流崩塌较少	• SiO <sub>2</sub> 栅极很稳定 • Vgs 摆动更高	• 垂直结构支持更高电压和更大电流	• 容易在实际电路中使用
缺点	• Vth 较低 • 不够耐用 • 电流崩塌	• 由于其特别的结构和独立的栅极驱动器，很难使用	• 比 HEMT 或 GIT 慢得多 • 容易出现振荡	• 非常难以制造(目前在市面上买不到。) • 比 HEMT 或 GIT 慢	• 不容易制造
典型技术指标	• Vds 最大值: 650 V 或 100 V, 200 V • Vgs 驱动器: 0 V 至 6 V • ID 最大值: 3 A 至 80 A	• Vds 最大值: 600 V • Vgs 驱动器: 固定 (-5 V 至 5 V) • ID 最大值: 10 A 至 30 A	• Vds 最大值: 650 V • Vgs 驱动器: 0 V 至 10 V-12 V • ID 最大值: 10 A 至 40 A	• Vds 最大值: 1.2 kV 或更高 • Vgs 驱动器: 0 V 至 10 V? • ID 最大值: 20 A 至 400 A?	• Vds 最大值: 650 V • 驱动电压: 6 V • ID 最大值: 24 A
结构					
Typ. package	SMD	SMD	TO-220, SMD	SMD	SMD

图 2. 主要 GaN 器件类型。

- **稳定的 DPT 操作**——最大限度降低功率环路和栅极环路电感对于减少 GaN 开关波形中的高频能量更为关键。能量太高会很容易产生过大振铃，导致高压振荡，从而往往会毁坏器件或损坏测试系统(图 3)。

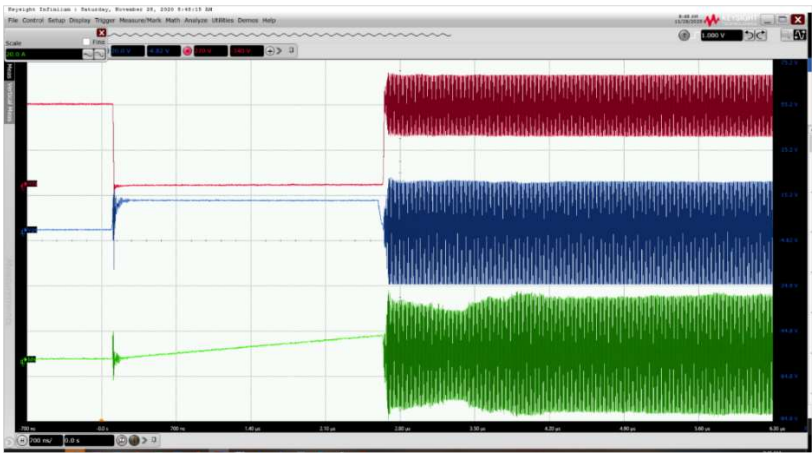


图 3. 关断时的器件振荡。

- **大带宽、低寄生电流测量**——由于在开关波形中含有 GaN 的高频能量，因此您必须能够测量更高频率和更小的寄生电流。
- **动态  $R_{ds(on)}$ /电流坍塌**——与 Si 和 SiC 功率器件不同，GaN FET 由于在晶体/电介质膜内或电介质与半导体层之间的界面中存在电荷陷阱现象，所以拥有动态  $R_{ds(on)}$  特征。
- **被测器件连接至系统**——GaN FET 到测试系统的连接也需要最大限度降低寄生效应。从避免寄生效应的角度来讲，焊接器件是一个理想方案，但当测试多个器件时，该方法难以实施并且非常耗时。

## 最大限度降低夹具寄生效应

正如之前所述，PD1500A 因其具有模块化体系结构及独立的被测器件电路板、栅极驱动器电路板、直流支撑电容器和自动负载电感器，所以无需定制即可为 Si、IGBT 和 SiC 提供可配置的解决方案。不过，该设计在夹具中存在太多寄生效应，因此无法有效测试 GaN 器件。一个最重要的要求是，尽量降低功率环路、栅极环路以及直流支撑环路电感，以实现可重复且可靠的测量（参见图 4，节选自 2020 年 4 月《Bodo's 功率系统®》，第 36-39 页“克服表征高速功率半导体器件的挑战”，[www.bodospower.com](http://www.bodospower.com)）。

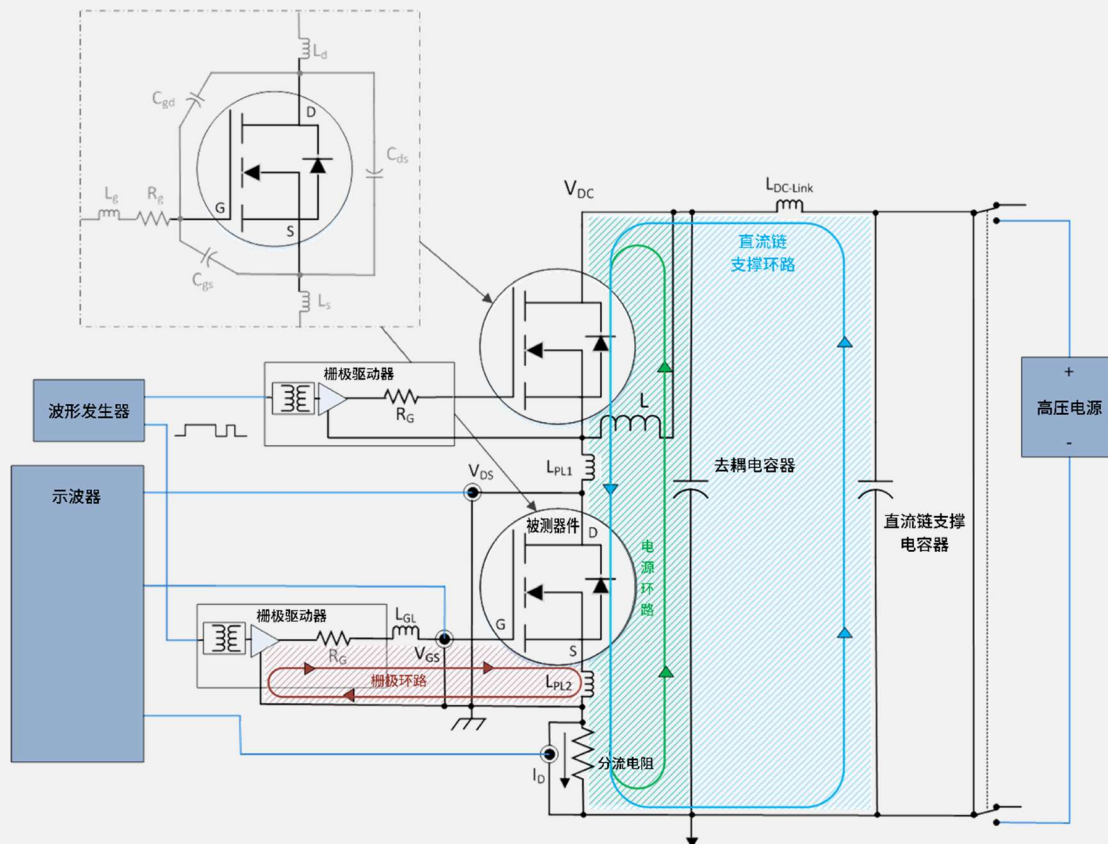


图 4. 双脉冲测试电路，包括夹具和器件寄生效应。



为了使用 PD1500A 进行 GaN 测试，是德科技充分利用了 PD1500A 系统体系结构（包括仪器、探头、安全系统、自动控制软件、自动校准例程和现有夹具），并与针对不同 GaN 器件配置定制的测试电路板结合使用。定制的 GaN 测试板包括直流支撑电容器和去耦电容器、定制栅极驱动器、钳位电路 ( $R_{ds(on)}$ )、探头连接和自动校准常数。将所有这些 DTP 元器件放到一块电路板上，可以实现更小的环路面积（即电感），满足 GaN 器件测试的要求。在移除标准 PD1500A 栅极驱动器电路板和被测器件电路板之后，定制的 GaN 测试板可以使用与 PD1500A 标准被测器件电路板相同的连接直接连接到夹具（图 5）。

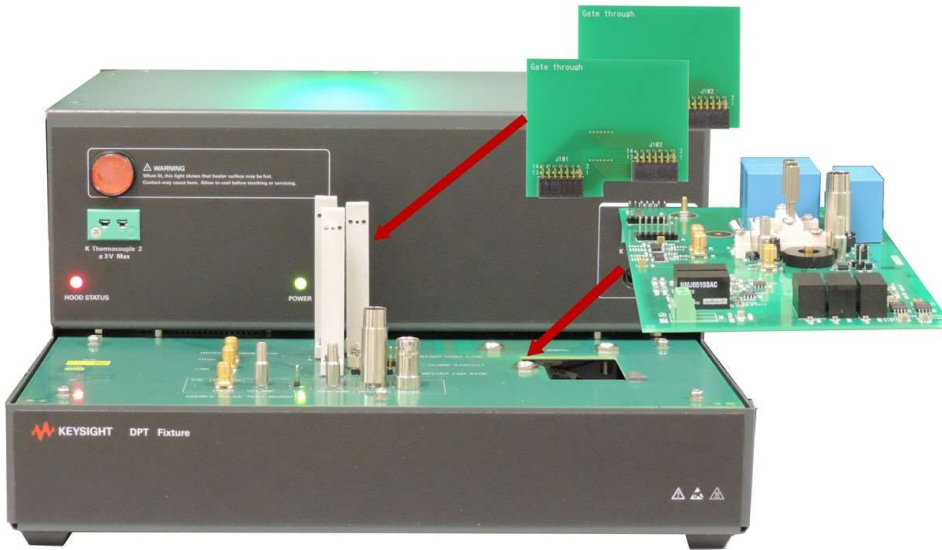


图 5. 定制的 GaN 测试板与 PD1500A DPT 夹具。

定制的 GaN 测试板不包括负载电感器。PD1500A 系统已经过更新，允许使用客户提供的外部负载电感器，在确定初始脉冲宽度和电流斜坡速度方面提供更大的灵活性。外部负载电感器通常与定制的 GaN 测试板结合使用。如欲详细了解如何选择或制作您自己的负载电感器，请参考《PD1500A 外部电感器指南》，编号：PD1500-90006。

在单板上开发 DPT 电路，由于可以将元器件放置得非常靠近，因此可以减少源极、栅极和直流支撑回路的寄生效应。但是，要实现可重复且可靠的 GaN FET 测量，还需要克服其他挑战。当在测试板上布置 DPT 电路时，必须考虑测量探头、被测器件连接器和其他复杂的测量要素。

多年以来，是德科技一直引领测量技术创新，为我们的 DPT 参考设计开发“可重复且可靠的 GaN 表征” ( $R^2GC$ ) 技术。这些  $R^2GC$  技术使我们能够提供先进的商用功率环路电感 ( $< 5 \text{ nH}$ )。请注意，GaN 测试板的设计是定制的，结果会因每块测试板的具体要求和设计而不同。图 6 显示了来自定制 eHEMT GaN 测试板的“开启”波形，以提取近似的功率环路电感。

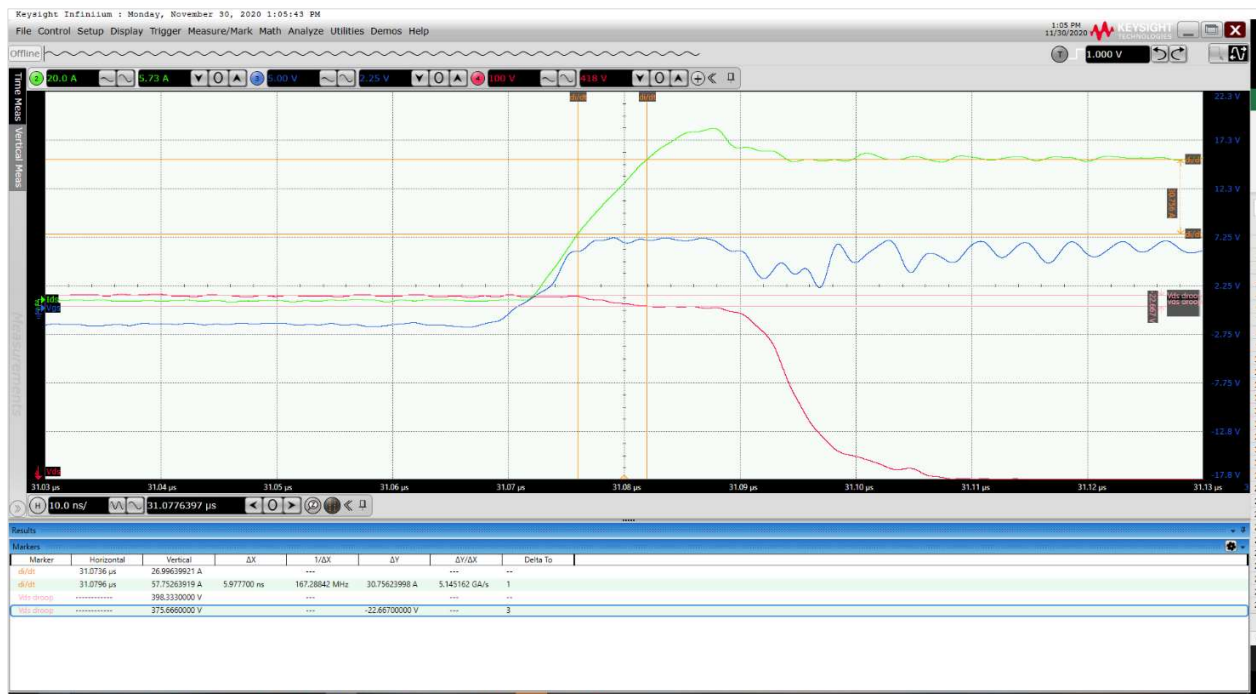


图 6. 功率环路电感分析 (eHEMT – 400V, 60A: 功率环路电感 =  $V_{\text{droop}}/di/dt = 22.667\text{A}/5.145\text{ GA/s} = 4.41\text{ nH}$ )。

## 可重复且可靠的 GaN 表征 (R<sup>2</sup>GC) 技术

是德科技的 R<sup>2</sup>GC 创新是什么？

- **电流传感器**——是德科技正在申请这项技术的专利，它能够实现超低插入损耗 ( $S_{21}$ ) 和大带宽。图 7 显示了是德科技的 R<sup>2</sup>GC 电流传感器技术与行业标准 Pearson 探头功能的比较。R<sup>2</sup>GC 电流传感器的频率分量明显更高 (大带宽)，从而可以表征出器件的真实特征。

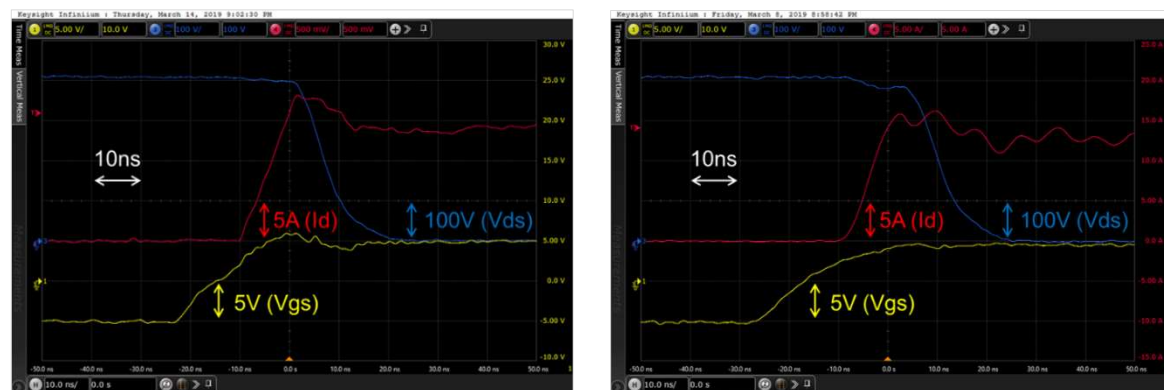


图 7. 是德科技的 R<sup>2</sup>GC 电流传感器 (左)、Pearson 探头宽带电流显示器 (右)。

- **功率器件连接**——为了进一步降低寄生回路的电感，我们开发出了无焊接功率器件连接技术，该技术无需焊接即可灵活更换功率器件 (DUT)，其寄生性能与焊接效果相当。此外，是德科技的 R<sup>2</sup>GC 无焊接连接技术还支持对 GaN 器件执行从室温到 150 °C 的温度测试。



- **栅极电阻器 ( $R_g$ )**——当为标准 DPT 测试、栅极电荷 ( $Q_g$ ) 测量以及动态  $R_{ds(on)}$  测量确定合适的阻尼量时，更换栅极电阻是常见的做法。不过， $R_g$  位于栅极环路 (图 4) 内，任何寄生效应都会影响 GaN FET 开关的控制。与被测器件连接方法相似，是德科技开发了一种 R<sup>2</sup>GC 可更换  $R_g$  技术，该技术无需通过拆焊和焊接改变栅极电阻器，便能提供与焊接  $R_g$  等效的性能 (图 8)。

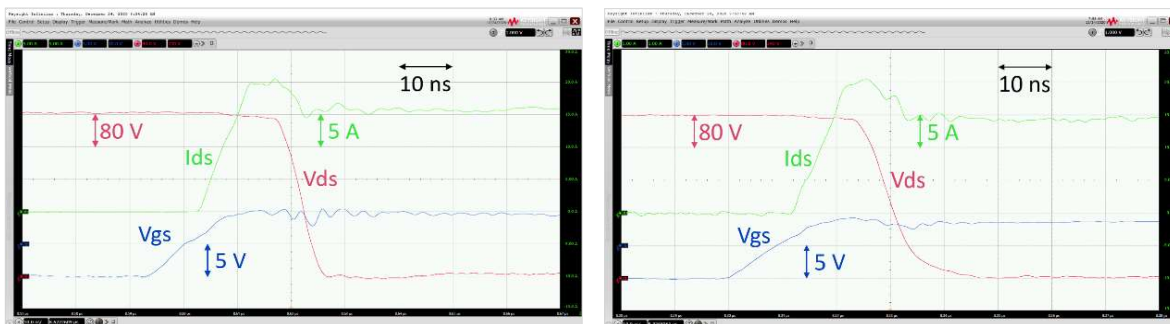


图 8. 是德科技 R<sup>2</sup>GC 可更换  $R_g = 1\Omega$  (左)，焊接  $R_g = 1\Omega$  (右)。

动态  $R_{ds(on)}$ ——电流坍塌现象是 GaN 器件制造商和用户最关心的问题之一。JEDEC JC-70.1 委员会针对 GaN eHEMT 器件发布的第一个测试方法标准 (JEP173, 2019 年 1 月; <https://www.jedec.org/standards-documents/docs/jep173>)。按照该标准中的建议，是德科技设计了一个快速 R<sup>2</sup>GC 钳位电路，能够支持高分辨率 10:1 探头测量  $V_{ds(on)}$  (参见图 9)。钳位  $V_{ds(on)}$  信号可以在 50 至 200 ns 之间稳定下来。GaN 测试板设计是特别定制的，取决于每块测试板的具体要求和设计，得到的结果也会不同。

## JC-70 宽带隙电力电子转换半导体

JEDEC 标准委员会认识到需要为功率半导体行业制定 WBG 标准。

2017 年 9 月，JC-70 宽带隙电力电子转换半导体委员会成立，并下设 GaN JC-70.1 和 SiC JC-70.2 两个小组委员会。

每个小组委员会再下设三个任务组，分别负责开发可靠性与认证流程，制作元件和参数技术资料，以及研究测试与表征方法。是德科技积极参与这些标准的开发工作。

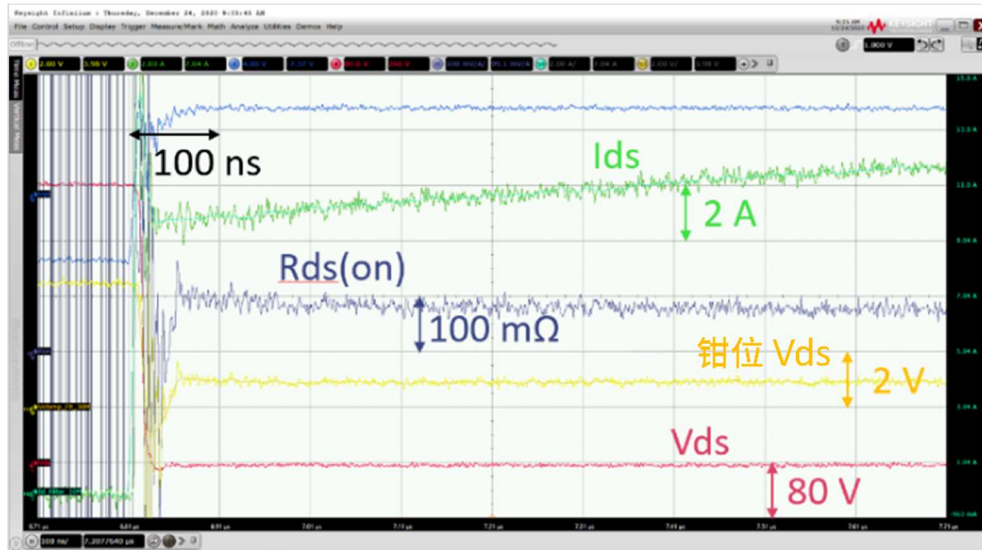


图 9. 使用 R<sup>2</sup>GC 技术进行  $R_{ds(on)}$  (钳位  $V_{ds}$ ) 测量。

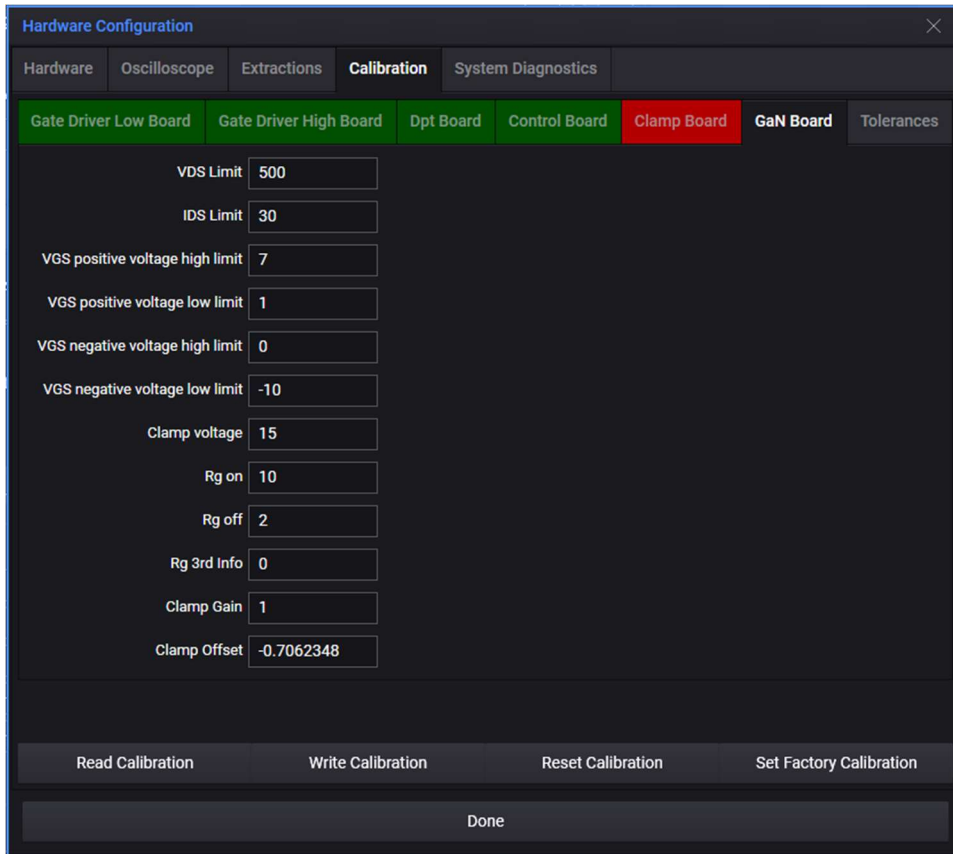
通过使用标准 PD1500A 动态功率器件分析仪/双脉冲测试仪和定制的 GaN 测试板，是德科技的 R<sup>2</sup>GC 技术能够实现可重复且可靠的 GaN FET 表征。



## PD1500A 软件

使用 PD1500A 软件测试定制的 GaN 测试板很容易。只需简单几步，便能设置好定制 GaN 测试板。

- 在硬件配置菜单中设置 GaN 测试板的初始参数



The screenshot shows the 'Hardware Configuration' window with the 'Calibration' tab selected. The 'GaN Board' is highlighted in the top navigation bar. The following parameters are visible:

Parameter	Value
VDS Limit	500
IDS Limit	30
VGS positive voltage high limit	7
VGS positive voltage low limit	1
VGS negative voltage high limit	0
VGS negative voltage low limit	-10
Clamp voltage	15
Rg on	10
Rg off	2
Rg 3rd Info	0
Clamp Gain	1
Clamp Offset	-0.7062348

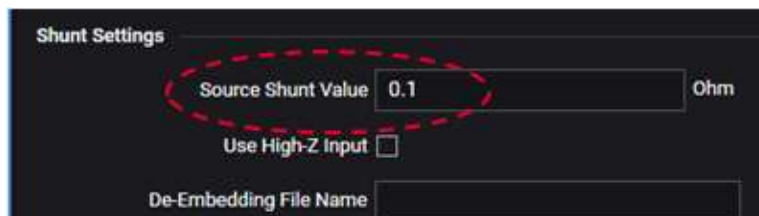
At the bottom, there are buttons for 'Read Calibration', 'Write Calibration', 'Reset Calibration', and 'Set Factory Calibration', followed by a 'Done' button.

- 设置所需的外部电感器，指定电感器值。



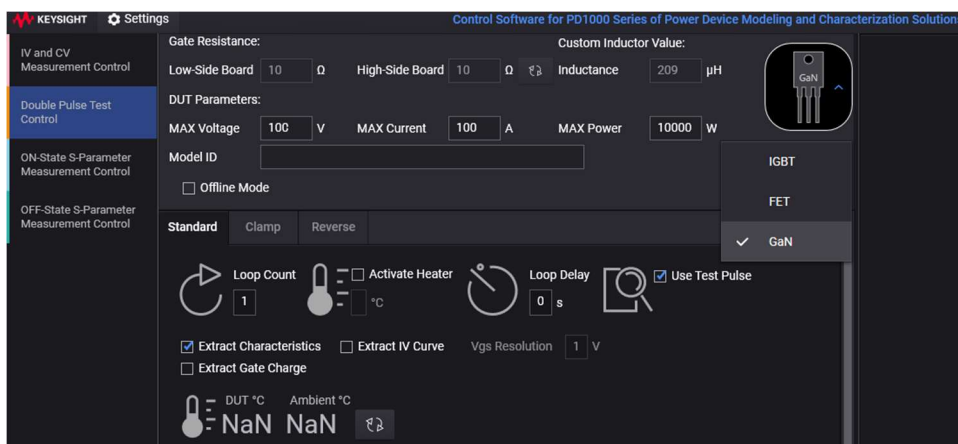
The screenshot shows the 'Inductor Settings' window. The 'Use Custom Inductor' checkbox is checked. The 'Custom Inductor Value' is set to 200 uH.

- 设置 R<sup>2</sup>GC 电流传感器



The screenshot shows the 'Shunt Settings' window. The 'Source Shunt Value' is set to 0.1 Ohm. The 'Use High-Z Input' checkbox is unchecked. There is also a field for 'De-Embedding File Name'.

- 然后只需要在菜单中选择 GaN 器件，您便可以配置测试了！



## 测试参数

请参阅《PD1500A 系列——动态功率器件分析仪/双脉冲测试仪》技术资料 (P/N 5992-3942CHCN), 查看测试参数的完整列表。由于每个 GaN 测试板均是定制的，因此要测试的具体参数可能不同。不过，通常定制的 GaN 测试板能够测试列出的所有参数。在此过程中，需要注意以下几点。

- 可对 GaN 器件执行反向恢复测试，但并非始终都能执行。某些 GaN 器件没有体二极管（例如 eHEMT）。定制的 GaN 测试板能够测试反向恢复参数。
- 与 Si 和 SiC 器件不同，GaN 器件的  $R_{ds(on)}$  是一个动态参数。对于 Si 和 SiC 器件，通常使用 B1505/6A 功率器件分析仪来测量  $R_{ds(on)}$ ，以获得准确的静态测量结果。不过，要想测量 GaN 器件的动态  $R_{ds(on)}$ ，最好使用包含是德科技 R2GC 钳位电路的定制测试板。

## 定制 GaN 测试板的测量功能

每个 GaN 测试板都是定制的，因此具体的系统和测量功能会有所不同。此外，与用于测试 Si 和 SiC 的标准 PD1500A 相比，定制的 GaN 测试板有一些系统限制。请参阅《PD1500A 系列——动态功率器件分析仪/双脉冲测试仪》技术资料 (P/N 5992-3942CHCN)，查看完整的技术指标列表。定制 GaN 测试板的系统限制和测量功能与标准 PD1500A 的不同之处在下面列出：

- **漏极通道 – DC – 源极 – 最大电流** = 80A，用于电流设计。  
(要提供更大电流，需规划额外的设计/测试)
- **漏极通道 – DC – 源极 – 最小电流** = 1A
- **栅极 – DC – 源极**项目均根据测试板设计而定制
- **栅极 – AC – 源极**项目均根据测试板设计而定制
- **电气 – 模块化元器件**项目均根据测试板设计而定制
- **被测器件 – 分立器件**项目包括 GaN eHEMT、GaN GIT、GaN Cascode 和垂直 GaN
- **被测器件 – 分立器件**封装均根据测试板设计而定制
- **系统 – 安全罩 – 系统中的最大能量**根据直流直撑电容器的设计而定制

## 详细了解 PD1500A 动态功率器件分析仪解决方案

请访问 [www.keysight.com/find/PD1500A](http://www.keysight.com/find/PD1500A)

《PD1500A 系列动态功率器件分析仪/双脉冲测试仪》技术资料

对宽带隙半导体器件实现可重复的可靠表征。(5992-3942CHCN)

《PD1500A 动态功率器件分析仪/双脉冲测试仪——控制软件指南》

本指南针对 PD1500A 动态功率器件分析仪/双脉冲测试仪（或 DPT 系统）控制软件，提供了完整的软件安装、配置和操作信息。(PD1500-90001)。

如欲了解更多信息，请访问：[www.keysight.com](http://www.keysight.com)

如需了解关于是德科技产品、应用和服务的更多信息，请与是德科技联系。

如需完整的联系方式，请访问：[www.keysight.com/find/contactus](http://www.keysight.com/find/contactus)

