

白皮书

Normally-off D-Mode 氮化镓晶体管的 根本优势

常闭耗尽型 (D-Mode) 与增强型 (E-Mode)
氮化镓晶体管本质优势对比之简短指南



氮化镓功率半导体器件毫无疑问是目前电力电子领域中非常火热的一个话题。当今占主导有两种晶体管类型：Normally-off D-mode和Normally-off E-mode 氮化镓晶体管。当人们面临选择时，有时会难以言明地倾向于使用增强型晶体管。而事实上，Normally-off D-mode在性能、可靠性、多样性、可制造性以及实际用途方面都是本质上更优越的平台。这之中的原因在于Normally-off D-mode能够充分利用氮化镓材料本身优势。

氮化镓中的大自然馈赠：二维电子气 (2DEG)

氮化镓晶体管的成功很大程度上归功于一个关键的自然现象：2DEG沟道。2DEG是在GaN和AlGaN薄层界面处自发形成极其快速的导电通道。其自发存在的电子浓度是半导体材料中可达到的最高之一。除此之外，它还可提供两倍于最先进的硅基或碳化硅晶体管的电子迁移率——高达 $2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。因此，二维电子气有着非常可观的低电阻—电容品质因数 (low resistance-versus-capacitance figure of merit) 及创纪录的高效率。

每一个氮化镓功率器件都源自耗尽型器件

图1展示了一个横向 (lateral) 氮化镓功率晶体管的原型结构——这几乎是当今市面上所有氮化镓器件的结构。AlGaN/GaN层通过沉积在被精心设计的缓冲层隔开的硅衬底上以实现高材料质量及阻断电压。沟道与漏极 (Drain) 及源极 (Source) 接触从而使电流通过。而调制电流的栅极 (Gate) 位于漏源之间并通过电介质层隔离来取得低漏电与高稳固性。场板 (Field-plate) 结构被设计用来取得最佳的电场散布及高可靠性。

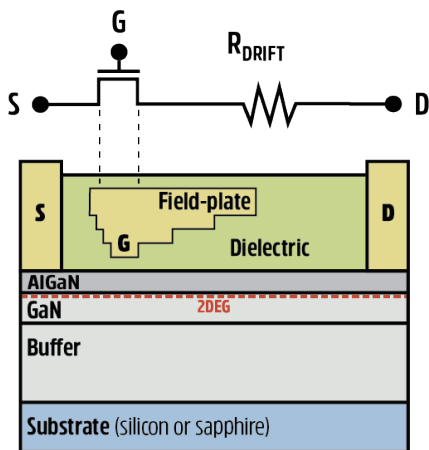


图1 氮化镓功率晶体管之完善体现—耗尽型 AlGaN/GaN高电子迁移率晶体管 (HEMT)

归功于材料本性，在AlGaN/GaN界面处会自发形成2DEG沟道，而无需外部施加栅极电压。意味着器件是常开型的，若想要耗尽沟道电子从而关闭它则需要给栅极加负偏压——这就是耗尽型器件。然而，电力电子系统往往需要常闭型器件来实现故障安全操作。那么这就有个问题：如何让横向的氮化镓高迁移率晶体管 (简称HEMT) 变成常闭型呢？这就引入了 Normally-off D-mode 及 Normally-off E-mode (p-GaN栅) 两个不同的技术路线。

在Normally-off D-mode技术中，氮化镓HEMT的结构不变从而保持它的高性能及可靠性。在自然状态下，2DEG沟道可不受束缚地最大化其无与伦比的高迁移率和电荷密度组合。

Transphorm的Normally-off D-mode解决方案是将氮化镓HEMT与低电压常关型硅基MOSFET结合来实现常闭型操作。该解决方案根据功率等级、拓扑结构及系统框架可提供2.5伏至4.0伏的正阈值电压。

相较之下，Normally-off E-mode增强型器件的方案选择控制HEMT内部的2DEG——但这样的设计会对2DEG优势有负面影响。

Normally-off E-mode增强型氮化镓器件限制了2DEG的天然优势

在工程师们将横向氮化镓HEMT的设计改动来实现常关型时不得不做出几个关键的妥协。首先，2DEG浓度必须要减少，这会导致相较于自然状态下更高的单位面积电阻 [图2] 及更低的品质因数(FOM)。其次，空穴掺杂的p-GaN层 [图3] 必须要添加到栅极金属下——这一层起到一个内置的负电池（大约有-3.2伏）的作用从而关断2DEG沟道并实现近1.6伏的较弱的正阈值电压。

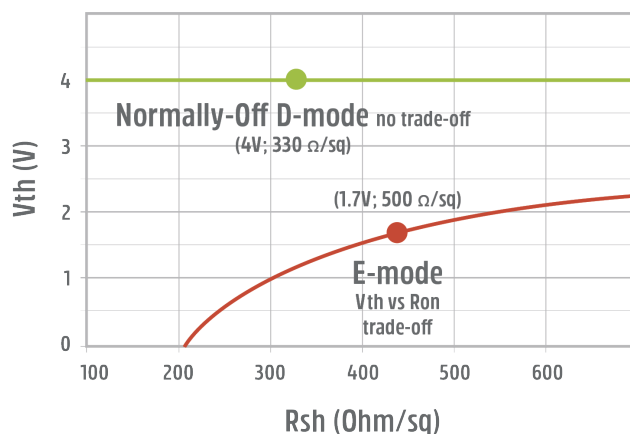


图2 较高的薄层电阻是由于为实现关断沟道而导致较低的沟道电子浓度

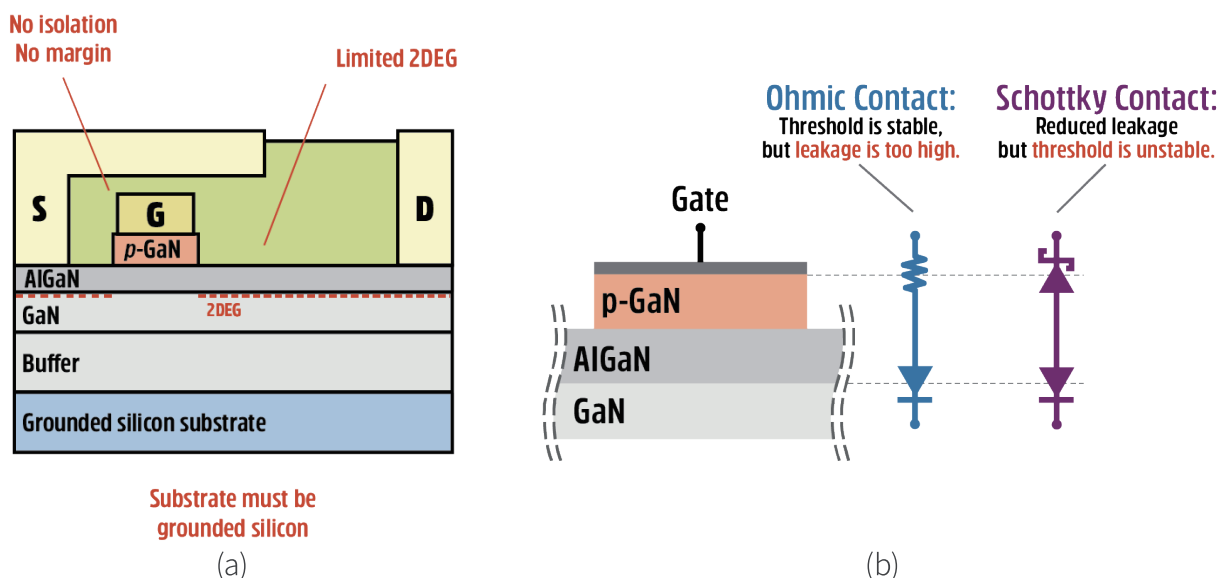


图3 (a) Normally-off E-mode (P-GaN 栅极) 结构, 无栅极隔离。(b) 示意图显示肖特基金属接触, 产生危险的背靠背二极管, 其间有浮动p-GaN层, 导致动态阈值电压Vth问题

在处理杂讯环境或高功率水平时，1.6V阈值电压可能是不够的，往往需要使用大约 -3V 的负电压栅极驱动，从而增加电路复杂性和额外的死区时间损耗。事实上，在 -3V 的栅极偏置下，从源极流向漏极的反向电流必须克服负栅极电压，这会导致额外的功率损耗。最近，负驱动对器件动态或开关电阻的负面影响已成为主要研究和关注的焦点¹。（这里的动态电阻是应用中的相关电阻，但是往往在Normally-off E-mode器件供应商的数据表中没有明确注明）

多米诺效应：Normally-off E-mode 缺乏栅极隔离、动态阈值问题、较低性能和脆弱性

上述 Normally-off E-mode方案是有代价的：失去栅极隔离等等。

用p-GaN 代替栅极电介质会导致栅极不再被隔离。这在正向偏压下会产生较高的栅极电流，从而严重限制了Normally-off E-mode器件的最大栅极电压额定值。为了减少较大栅极电流，可以采用另一种方法：栅极从欧姆金属接触改为肖特基势垒 [图 3b]。但是肖特基势垒又带来了另一个挑战，因为它现在阻碍了导通瞬态期间栅漏电容的放电。这个引起了“动态阈值电压”这一有害现象，从而导致了动态导通电阻的问题，如图4所示。若干个研究组都报告了这个问题^{2,3}。在 480V 电压下，Normally-off E-mode器件的动态导通电阻 $R_{DS(ON)}$ 增加了27%，而Normally-off D-mode器件仅增加了 5%，从而减少了导通损耗。图 4里的 Normally-off E-mode数据也得到了其他一些独立研究结果的支持⁴。

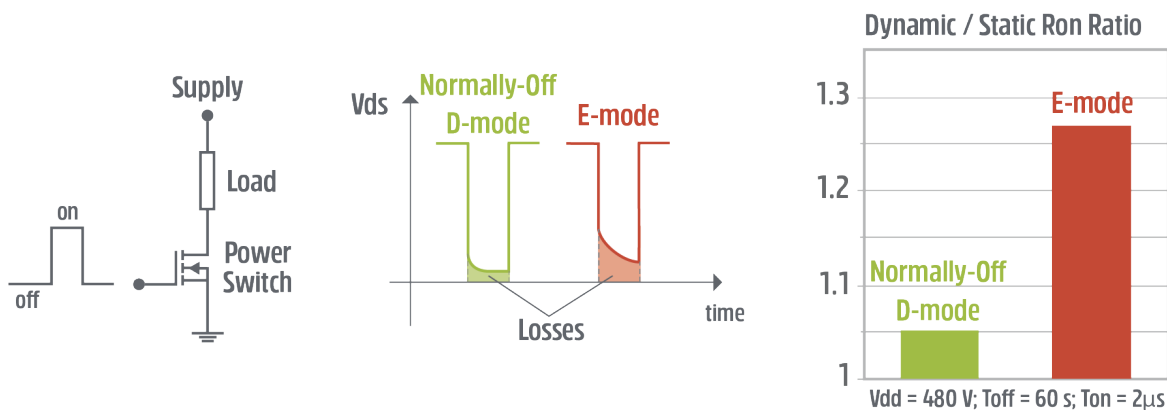


图4 具有肖特基势垒的Normally-off E-mode 器件难以对器件电容进行放电，从而导致动态阈值电压和导通电阻问题以及更高的损耗

由于电容放电困难，Normally-off E-mode 器件的阈值电压在开关过程中不稳定。与 Normally-off D-mode器件相比，这会导致更高的功率损耗。（这可能就是 Normally-off E-mode 制造商通常不报告动态 $R_{DS(on)}$ 的原因）。为了缓解这一问题，理论上可以对栅极进行过驱动，以降低器件栅极下方的导通电阻。

然而，这种潜在的解决方案要求必须把栅极电压控制在一个非常小的范围内，因为它不能超过较低的栅极最大额定值，以防止栅极损坏（最大只有+7 V），见图5。

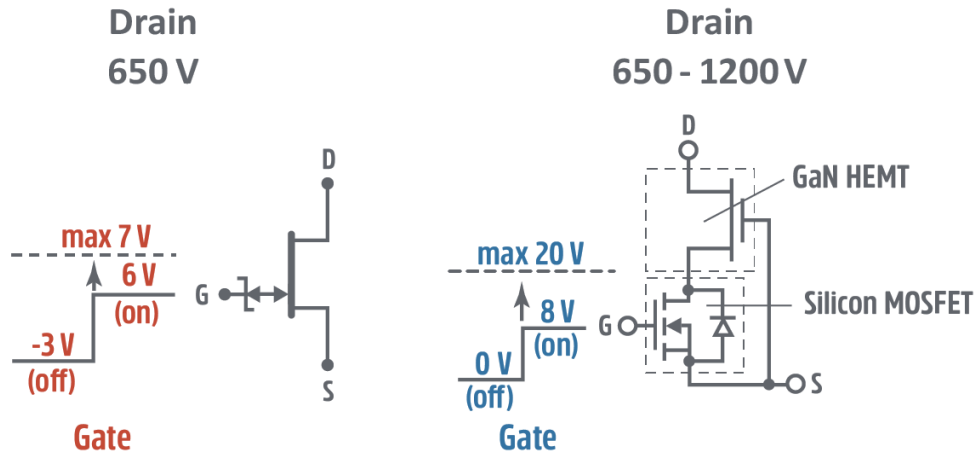


图5 Normally-off E-mode驱动器全面开启通道时只有 1 V 的余量，因此很容易导致损坏

2DEG 迁移率随温度升高而降低也会导致 p-GaN 栅极跨导下降 [图 6a]，从而导致转换速度更慢，并且与 Normally-off D-mode 相比，开关损耗也更多⁵，效率也更低。为解决这个问题，p-GaN 栅极方案需要更大的芯片，但是这会增加米勒电容，降低整体效率和造成更高成本。

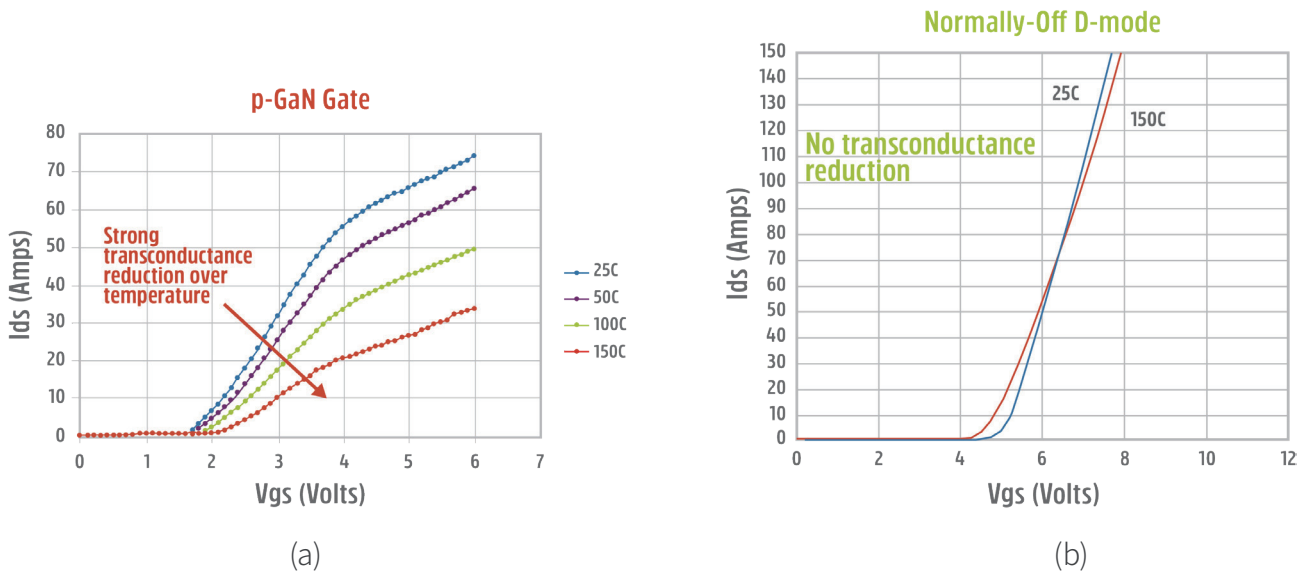


图6 (a) Normally-off p-GaN 栅极跨导随温度升高而下降，并降低栅极驱动能力; (b) Normally-off D GaN器件跨导不会随温度降低，因为硅栅极在高温下不受 GaN 迁移率下降的影响

另外，数据表也显示 Normally-off E-mode 的导通电阻有着比 Normally-off D-mode 器件更高的温度系数，从摄氏 25 度到 150 度增加高达 2.6 倍 [图 7]，这导致了随着温度升高快速增长的导通损耗。

Normally-off E-mode 器件由于缺陷注入到外延而引起的阈值电压漂移敏感性也限制了其性能。

Normally-off E-mode 的硅衬底必须连接到源极端子，以减轻由源极本身的电子注入引起的外延充电。这一设计将 Normally-off E-mode 的漏极电压最大额定值限制为 650 V。更高的电压需要

更厚的 GaN 外延来支持加在外延上的压降，但这个需要更复杂的生长技术和更高的成本，因此 Normally-off E-mode 器件在 1200 V 的竞争处于不利的局面。

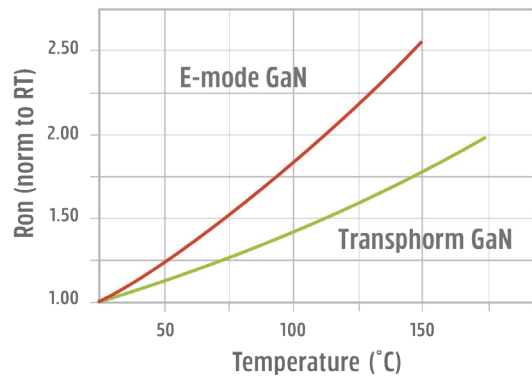


图7 Normally-off D GaN 的电阻温度系数优于 p-GaN 栅极 HEMT

Normally-off D-mode结构的理念：正确的方法适用于正确的目的

Transphorm以不同的方式处理氮化镓功率半导体。其技术平台将常开型的氮化镓 D-mode HEMT与高可靠、高性能的常闭型的低压硅MOSFET结合在一起。这确保了平台安全的常闭操作，同时保留了最高的氮化镓性能和最高的硅MOSFET栅极可靠性。

开发Normally-off D-mode结构氮化镓平台是经过深思熟虑的，原因有很多，最重要的原因是它与氮化镓的自然特性协同工作，并且与今天的硅技术向后兼容。它允许平台元素，特别是2DEG，发挥它们的最佳作用。因此，与其通过Normally-off E-Mode (p-氮化镓栅极) 限制氮化镓的优势，Normally-off D-mode结构实际上更加能充分利用氮化镓的潜力。因此，Normally-off D-mode代表了一个高性能、高稳定度的氮化镓器件技术平台，具有业界领先的可靠性和多样性。

发挥Normally-off D-Mode的自然优势

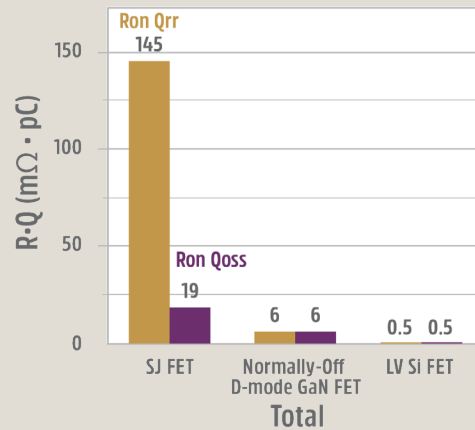
Normally-off D-Mode结构器件不会遇到Normally-off E-Mode器件所经历的前述挑战。例如，其解决方案不受动态阈值问题的影响，因为它驱动的是一个栅极隔离、低压的硅MOSFET。阈值电压由硅FET独立设定，与氮化镓HEMT无关。



误区一：

硅MOSFET会增加导通电阻和反向恢复电荷。

现实是：在氮化镓Normally-off D-Mode技术中，氮化镓芯片承受大部分的关断高压 (>90%)。硅MOSFET仅需承受几十伏的电压。单位面积的导通电阻随着额定电压按二次方下降，所以硅MOSFET实现了极低的导通电阻 ($R_{DS(on)}$)，不足总电阻的10%，并具有非常小的反向恢复电荷 (Q_{rr})。值得注意的是，这个 Q_{rr} 比高压超结硅MOSFET技术低一个数量级。以此为例，对于传统的600V硅超结功率器件，电阻电荷的乘积FOM ($R_{on} * Q_{rr}$) 为 $145 \text{ m}\Omega\text{-pC}$ 。对于650V的常闭耗尽型氮化镓，FOM降至 $6 \text{ m}\Omega\text{-pC}$ ，这标志着巨大的改进。而在 $6 \text{ m}\Omega\text{-pC}$ 中，低压硅MOSFET仅贡献 $0.5 \text{ m}\Omega\text{-pC}$ ，不到总数的10%，也不到600V硅功率器件的0.5% [图A]。误区破除。



图A：600V超结硅器件、650V 氮化镓Normally-off D-Mode器件和（与氮化镓HEMT配对的）低压硅FET的开关特性比较。低压硅FET对整体氮化镓Normally-off D-Mode电阻和电容的贡献很小。

常闭的D-Mode结构除了2DEG外，还会产生另一个自然的附加优势：SiN/Si界面。该界面自然地隔离了器件的栅极，提供了汽车级的最大栅极额定值 $\pm 20\text{V}$ ，具有卓越的可靠性和大驱动余量。阈值电压高达4V，且不会对2DEG有任何不利影响。硅低压MOSFET不需要负压关断或任何特殊的栅极驱动器。在所有开关条件下都稳定，不存在与动态阈值问题相关的隐形的功率损耗。

如图6b所示，Normally-off D-Mode结构氮化镓器件的跨导非常高，且不会随温度下降，因为它由硅MOSFET决定，并且独立于2DEG迁移率。

这些优势得到了实际应用数据的支持。当Transphorm的Normally-off D-Mode器件在商业电源适配器里取代Normally-off E-mode氮化镓时，实现了更高的效率和高达50%的机壳温度下降（尽管这里用的Normally-off D-Mode器件的数据表标称导通电阻要比E-mode高30%）[图8]。值得注意的是，即使芯片尺寸更小、数据表里电阻更高，Transphorm的Normally-off D-Mode氮化镓器件（商标为SuperGaN）在性能上也还是优于Normally-off E-mode器件。

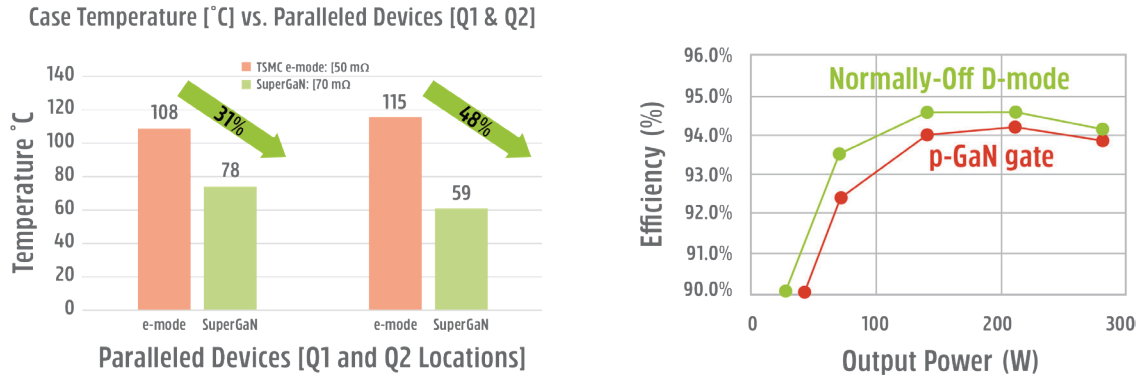


图8: Transphorm的Normally-off D-Mode氮化镓器件SuperGaN和P-GaN E-mode HEMT在280瓦雷蛇电源适配器上的性能差异。

GaN 的封装多样性等于客户应用的兼容性

D-Mode常闭平台非常适合各种标准封装，例如通孔、表面贴装和多芯片模块。这些封装本身具有高性能和高可靠性，增加了氮化镓平台本身的性能和可靠性。

借助于现代封装技术，Transphorm高功率Normally-off SuperGaN产品的寄生电感得以最小化。其采用了芯片堆叠技术和类似硅管的引线键合技术 [图 9]，无需引入额外的引线键合和额外的寄生电感。

Normally-off D-Mode产品也支持其他的封装方案，例如铜夹扣键合(Copper Clip)和开尔文源极(Kelvin source)等等。

Normally-off D-Mode结构还非常适合系统级封装集成，其中栅极驱动器和控制器与D-mode HEMT + 低压 Si FET（单片或混合）无缝集成，为满足不同终端需求增加了另一种选择。

一些额外优势

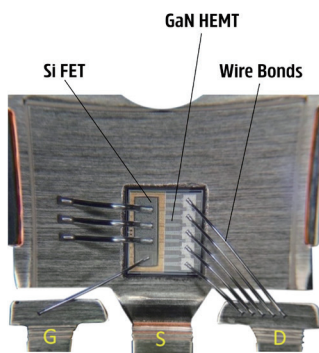


图9: SuperGaN FET 芯片堆叠封装 (TO-247)。也可以采用表贴封装，如PQFN、TOLL、TOLT 或模块

此外，D-mode结构里的GaN HEMT 不需要将源极连接到衬底。一个浮动或绝缘基板可实现更高的额定电压（例如：高达 1200 V^7 ）和双向开关器件⁸。而对于p-GaN 栅极的E-mode器件，如果想要开发双向开关器件，一个困难在于当两个端子的极性从接地电压到直流总线电压交替时，基板应该连接到哪个端子？对于p-GaN 栅极 HEMT 来说，这是一个没有明确答案的问题。



误区二：

Normally-off E-mode器件没有 Q_{rr} 。

现实是：在从反向导通切换到关断状态时，反向恢复电荷不仅考虑双极性输运里少数载流子复合，还包括空间电荷区域的形成，这实际上相当于输出电荷 (Q_{oss})。确实，氮化镓 HEMT 没有反向导通的双极性输运，但它们仍然具有在反向恢复期间需要充电的输出电容。简而言之， $Q_{rr} = Q_{oss}$ 。 Q_{rr} 并不为零。误区破除。

D-mode HEMT 还具有一些当今 E-mode HEMT 无法轻易获得的优势。

例如，随着 GaN 器件渗透到电机驱动市场，它将需要具备短路能力。D-mode 的绝缘栅电压处理可实现非常优雅的设计方法。事实证明，此类方法可将 Transphorm D-mode 器件的短路耐受时间 (SCWT) 增大到 5 微秒⁹，满足商用栅极驱动器的要求。值得注意的是，Transphorm 通过其专有的半导体工艺实现了 SCWT，无需添加额外的掩模或电流感应引脚，使得三引脚封装仍然适用。迄今为止，E-mode 器件似乎还没有为这种可能性做好充分准备，只有有限演示，有时甚至具有误导性。

¹J. Wei et al., "Dynamic Threshold Voltage in p-GaN Gate HEMT," 2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Shanghai, China, 2019, pp. 291-294, doi: 10.1109/ISPSD.2019.8757602.

²Ibid.

³A. Chini et al., "Gate-Bias Induced RON Instability in p-GaN Power HEMTs," in IEEE Electron Device Letters, vol. 44, no. 6, pp. 915-918, June 2023, doi: 10.1109/LED.2023.3265503.

⁴Zhong et al., "IG- and VGS-Dependent Dynamic RON Characterization of Commercial High-Voltage p-GaN Gate Power HEMTs" Digital Object Identifier 10.1109/TIE.2021.3104592.

⁵S. I. H. Sabzevari, S. Abdi and R. Ghazi, "Assessment of the Switching Characteristics of a commercial e-mode Power GaN Device Using a Dual Pulse Test Set-up,"

2021 IEEE 15th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Florence, Italy, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPE-POWERENG50821.2021.9501072.

⁶Recommended External Circuitry for Transphorm GaN FETs (Application Note No. 0009). Retrieved from Transphorm Inc. website: <https://www.transphormusa.com/en/document/recommended-external-circuitry-transphorm-gan-fets/>

⁷G. Gupta et al., "1200V GaN Switches on Sapphire Substrate," 2022 IEEE 34th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Vancouver, BC, Canada, 2022, pp. 349-352, doi: 10.1109/ISPSD49238.2022.9813640.

⁸J. Huber and J. W. Kolar, "Monolithic Bidirectional Power Transistors," in IEEE Power Electronics Magazine, vol. 10, no. 1, pp. 28-38, March 2023, doi: 10.1109/MPLE.2023.3234747.

⁹D. Bisi et al., "Short-Circuit Capability with GaN HEMTs : Invited," 2022 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Dallas, TX, USA, 2022, pp. 1-7, doi: 10.1109/IRPS48227.2022.9764492.



误区三：

D-Mode GaN会振荡。

事实：D-Mode GaN具有很大的增益。增益本身是有益的，可以实现非常快速的开关。但需要正确利用它才能实现所需的性能，同时防止出现不良影响，例如振荡。为了防止振荡并充分利用任何快速开关半导体器件，电路工程师应遵循一组标准设计原则，例如：最小化栅极和电源环路电感、选择正确的栅极电阻和栅极铁氧体磁珠，在需要的地方采用 RC 缓冲器（主要是在直流链路上，尽可能靠近设备的漏极端子）。所有这些设计原则都很容易实施，并在应用笔记 AN0009⁶ 中进行了总结，如果实施得当，它们不会降低 GaN HEMT 的性能。相反，它们会增强其性能，同时抑制振荡和电磁干扰 (EMI)。参见波形图 B。误区破除。

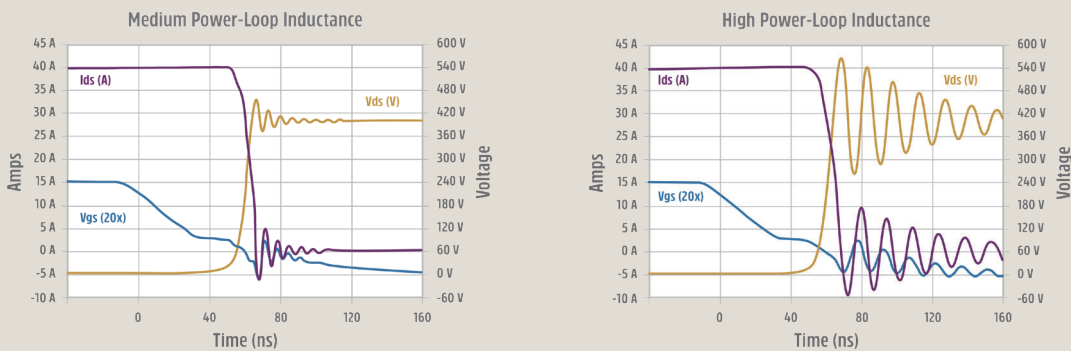


图 B：GaN 共源共栅器件具有高增益。良好的电路设计和优化的电源环路电感有助于抑制振荡并实现快速开关和高性能

结论

结合上述优势，Transphorm Normally-off D-Mode氮化镓技术平台（SuperGaN）产生了一系列器件，优化并且放大了 GaN 作为半导体材料的固有优势，为下一代电力电子产品提供真正革命性的功率转换解决方案。



关于Transphorm

Transphorm (传方半导体) 是氮化镓革命的全球领导者, 致力于设计、制造和销售用于高压电源转换应用的高性能、高可靠性氮化镓半导体功率器件, 产品覆盖全功率范围 (45W至10+kW)。Transphorm拥有庞大的氮化镓功率半导体领域的知识产权组合, 持有或取得授权的专利超过1,000项, 其高压氮化镓半导体器件在业界率先取得JEDEC和AEC-Q101认证。得益于垂直整合的业务模式, Transphorm能够在产品和技术开发的每一个阶段进行创新: HEMT设计、外延片材料生产、晶圆制造工艺、以及功率管的生产和应用支持。Transphorm的创新助力电力电子应用突破硅器件的局限性, 其氮化镓解决方案效率超过99%, 将功率密度提高50%以上, 而系统成本降低20%。Transphorm的总部位于加州戈利塔, 并在戈利塔和日本会津设有制造工厂。

联系方式

75 Castilian Drive
Goleta, CA 93117
United States

电话 : +1-805-456-1300
官网 : www.transphormusa.com



transphorm

www.transphormusa.com