

# GaN-on-Si 如何帮助提高功率转换和电源管理的效率

## Introducing Infineon's CoolGaN™

### 摘要

本文介绍了硅基氮化镓(GaN-on-Si)在功率设计应用中的优点，并讨论了硅(Si)、碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)技术之间的主要差异，以及英飞凌的 CoolGaN™ HEMTS 的特点和优势。

作者：Andrea Bricconi，英飞凌科技股份有限公司 GaN 汽车业务发展主管

## 目录

1 简介	3
2 HEMT、GaN 和 GaN-on-Si	4
3 通过 GaN-on-Si 实现高效率	6
4 CoolGaN™ 的优势	8
5 系统级解决方案	10
6 可靠的电源	11
7 总结	12

## 1 简介

效率是所有行业的强大推动力，因为效率低下常常会导致不必要的高成本。在电子产品中，效率也会导致对整体性能的限制，或者如果不遵守这些限制，则会缩短产品寿命。影响所有商业和工业的同样市场力量推动了对更高效率的功率转换的追求。而同样地，需要提高效率才能实现更高的功率密度。这不仅可以实现更小、更轻、更可靠的产品，还有助于消除性能方面的限制，提高数据中心等关键基础设施以及电动汽车等新兴应用的电力水平。

此外，随着连接设备的数量与日俱增，更高效的功率转换可以在一定程度上降低为数十亿台设备供电的总体财务成本。而由于涉及的数量庞大，因此提高整体效率也变得同样重要，因为这能降低为现代社会供电的环境成本。

根据能量守恒定律，能量既不会凭空产生也不会凭空消失，它只会改变状态。在电子学中，我们通常把这种状态的变化称为损耗，特别是当结果状态是热量时。这种损耗在功率转换中是普遍存在的，而热量是半导体器件面临的一个特殊难点。从电子设备中去除多余热量的成本可能让人无法承受，而且对环境有害。

这推动了对更高效的半导体器件的研究和开发，以提高功率转换效率、改善功率密度并降低电源管理的整体财务和环境影响。

传统的功率半导体以硅基片为基础。然而，虽然硅是一种优秀的通用半导体，但在涉及高电压时，它却存在很大的限制。为此，半导体行业一直在努力克服这些限制，并在很大程度上取得了相对成功。但是，随着对更多电力需求的居高不下，整个行业正在从硅转向具有更适合功率特性的半导体材料。这些材料被归类为宽带隙，这是指它们在结晶层面上与硅等材料存在物理差异。这些差异转化为几个重要的特性，其中之一是它们能够在更高的开关频率下工作，同时将损耗保持在非常低的可管理水平。

## 2 HEMT、GaN 和 GaN-on-Si

晶体管是电子工业的基本构建模块。而由于半导体基片形成了构成晶体管的平台，因此它们的特性决定了晶体管的工作方式。在大多数应用中，晶体管发挥着电压控制开关的作用，这意味着流经晶体管的电流与为应用供电的电流相同。应用的功率要求越高，晶体管的效率也就必须随之提高，或者在某些情况下，晶体管的物理尺寸也就必须变得越大。

目前用于制造功率半导体的宽带隙材料包括碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)。然而，SiC 晶圆和 GaN on Si 晶圆的供应链仍在发展之中，还没有规模庞大的硅晶圆基础设施和供应链那么成熟。

为了克服这一障碍以获得更高的效率，该行业已经在开发新基片方面付出了巨大努力，同时持续地充分利用硅所带来的规模经济效益。当然，这种方法也面临着挑战，但成功的意愿是一致的，这有助于启动宽带隙晶体管的功率转换市场。正如传统的硅工艺发展一样，这创造了一个再投资的良性循环，并已经显示出显著的成功迹象。

半导体材料的基本性能取决于其载流子（通常称为电子）的迁移率（尽管在讨论载流子时，它们的对应物空穴也被称为载流子）。具有高电子迁移率的材料可提供更大的载流能力，这从电力电子方面来看显然是一个重要优势。

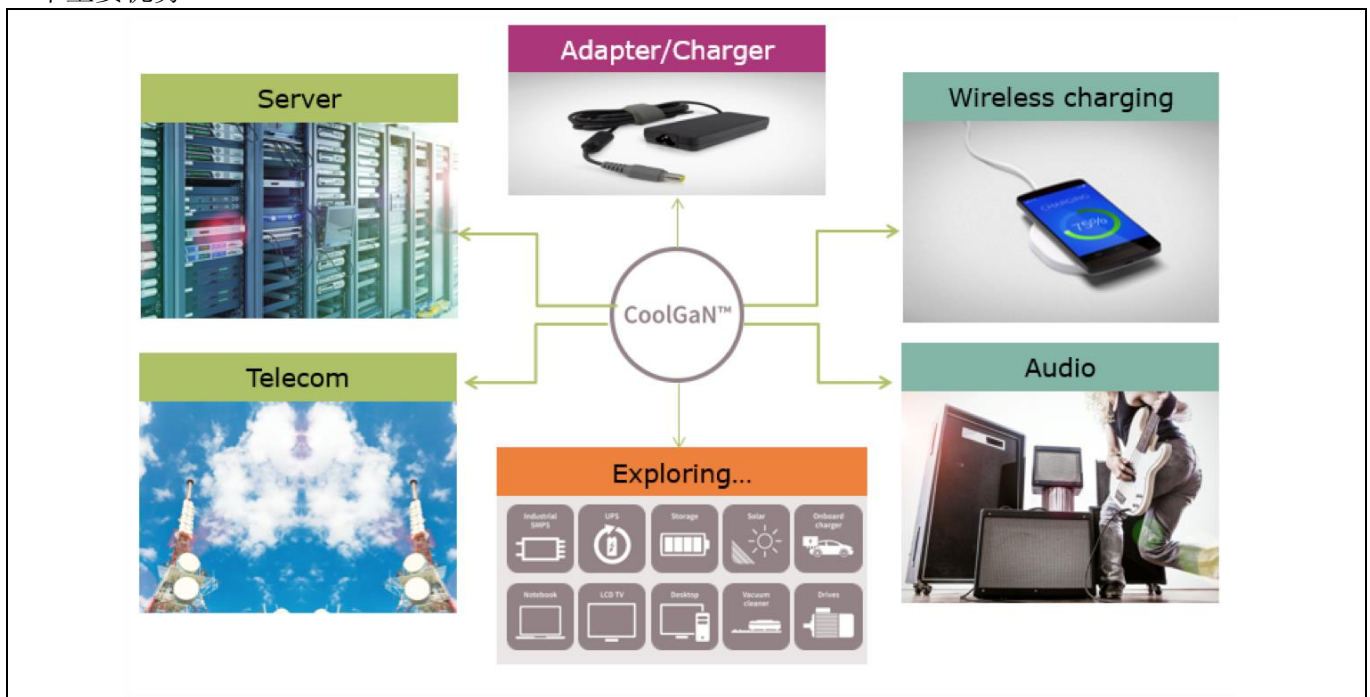


Figure 1 CoolGaN™ HEMT 功率晶体管的应用

高电子迁移率晶体管（通常简称为 HEMT）是由两个结构不同的基片结合在一起形成，产生所谓的异质结晶体管。这基本上意味着两个基片的带隙不同，但正是这种差异促进了更高的电子迁移率。英飞凌已经成功开发出硅基氮化镓工艺(GaN-on-Si)，该工艺目前正用于制造其 CoolGaN™系列 HEMT 器件。

### 3 通过 GaN-on-Si 实现高效率

除了思考我们为什么需要更高的功率转换效率之外，还需要考虑 GaN-on-Si 功率晶体管是如何能够比传统的硅功率晶体管实现更高的效率。

部分原因在于转换器的拓扑结构以及对底层技术的需求。现今的电源制造商所青睐的拓扑结构之所以得以发展，主要是因为它们非常适合 CoolMOS™ 功率晶体管的功能。该技术多年来一直是电源设计的基础。但现在 GaN 消除了 CoolMOS™ 的一个关键限制——体二极管的性能。具有零反向恢复电荷的 GaN 使其能够用于以前没有考虑过的电源拓扑中——例如全桥图腾柱 PFC 拓扑。正是这种新启用的拓扑与新的 GaN 技术的结合，共同实现了新的电源性能水平。

由于下文中详述的特性，导致 MOSFET 的特性限制了纯硅功率晶体管在高电压转换中的性能。英飞凌开发的技术消除了其中很多特性，这意味着晶体管可以在更高的频率下运作而不会影响效率，使效率保持在最高值。

将硅基片键合到 GaN 结构的过渡层是实现功率转换中的重大飞跃的关键技术之一。当中所涉及的知识产权已获得许多专利保护，但重要的是过渡层是制造 HEMT 器件的基本要素。

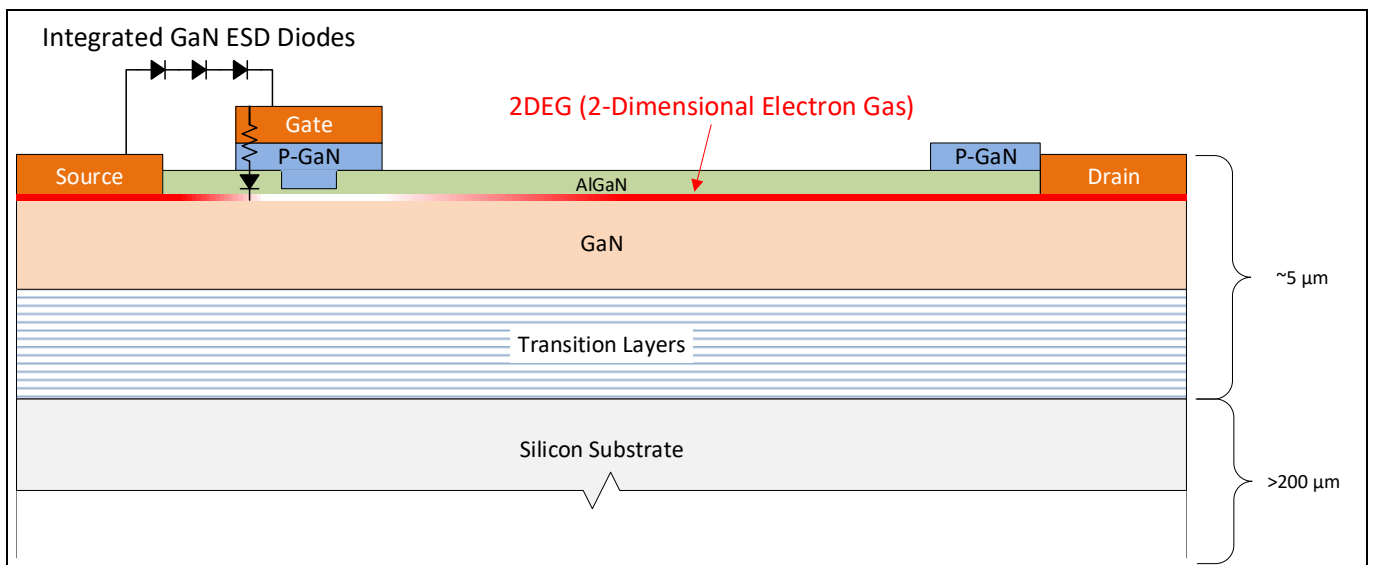


Figure 2 CoolGaN™ GaN-on-Si HEMT 的图，显示了过渡层

过渡层外延生长在硅基片上，使 GaN HEMT 结构构建在这些层的顶部，形成一个平面晶体管，电荷载流子由此横向移动穿过器件。这与典型的硅晶体管形成了鲜明的对比，因为在硅晶体管中，载流子主要垂直移动。

和大多数晶体管一样，HEMT 有三个端子，在 FET 和 HEMT 的情况下，这三个端子分别是漏极、源极和栅极。顾名思义，栅极控制器件，可以将其视为电压控制开关。晶体管的设计是“常开”或“常关”，栅极则控制了其状态，目的是在器件开启和传导时，在通道中尽可能地降低电阻。英飞凌的 CoolGaN™ 是常关型晶体管，现在被认为是电子行业必备的晶体管。

漏极和源极端子之间的电阻， $R_{DS(on)}$ ，是选择功率晶体管时的关键参数之一，而“开关”可以对栅极电压的极性（即打开或关闭）做出的反应速度也是关键参数之一。使用 GaN-on-Si 创造 HEMT 功率器件在品质因数(FOM)方面具有显著的优势。但是，要充分利用这些优势，必须将功率晶体管与最佳栅极驱动器相匹配。英飞凌科技采取的方法是开发出一套完整的技术，这些技术结合在一起，共同为应用提供合适的解决方案。在高功率转换和开关中，该解决方案是 CoolGaN™系列，包括 600 V、400 V、200 V 和 100 V 器件（200 V 和 100 V 仍在开发中），由新型 GaN EiceDRIVER™系列栅极驱动器提供支持。

## 4 CoolGaN™ 的优势

HEMT 虽然表面上类似于其他类型的 FET，但它有一个显著的有利特性，即在源极和漏极之间没有本征体二极管。这可以说是 GaN 晶体管最重要的一个特性，即反向恢复性能。没有体二极管就消除了它的影响，而在其他类型的晶体管中这是一个限制因素。与反向恢复电荷相关的峰值电流在硅功率晶体管中可能非常大，以至于它们不能用于具有重复反向恢复特性的转换拓扑中，包括半桥拓扑。然而，GaN-on-Si HEMT 不会出现这种情况。

由于 CoolGaN™ 晶体管没有少数载流子，也没有体二极管，因此不具备反向恢复特性，这使得它们非常适合半桥拓扑结构，并且还可以支持开发全新的功率转换拓扑结构，无需对控制技术进行重大（和昂贵）调整，这些拓扑结构以前是无法实现的。

由于电阻本质上是一个限制因素，因此具有低开态电阻， $R_{DS(on)}$ ，的晶体管非常重要。这个数值可以理解传导损耗，对于许多晶体管来说，传导损耗与温度有关。CoolGaN™ 晶体管中的  $R_{DS(on)}$  的温度系数显著低于硅晶体管，小于 2.0 而不是 2.4。这种差异意味着 CoolGaN™ 晶体管的传导损耗对于高温下的硅晶体管更有利。

线性度是考虑功率晶体管在开关状态转换过程中工作特性的另一个重要因素。超结硅功率晶体管的输出电容非常的非线性；器件两端的电压 ( $V_{DS}$ ) 在开始时缓慢增加，然后急剧增加，最后需要额外的时间来实现  $V_{BUS}$ （在大多数使用 600 V 晶体管的 HV 应用中通常是 400 V）。CoolGaN™ 晶体管具有线性特性，输出电荷约为硅晶体管的十分之一。较小的线性输出电荷意味着开关转换是线性的，比硅晶体管快了近十倍。减少的输出电荷也会使储存在输出电荷  $E_{OSS}$  中的能量减少 25%。

在高频操作中，高于 200-250 kHz 时，开关速度是确定能量传递如何发生的关键。CoolGaN™ 的超高速开关速度可实现非常短的死区时间。传统的硅晶体管需要考虑到更高的  $I_{RMS}$ ，这势必会增加损耗。这意味着 CoolGaN™ 即使在高开关频率下也能提供高效率。

此外，由于无源元件的尺寸随开关频率而变化，因此，采用可以在高频率下保证高效率的晶体管将有助于减小功率变换器的尺寸和重量。



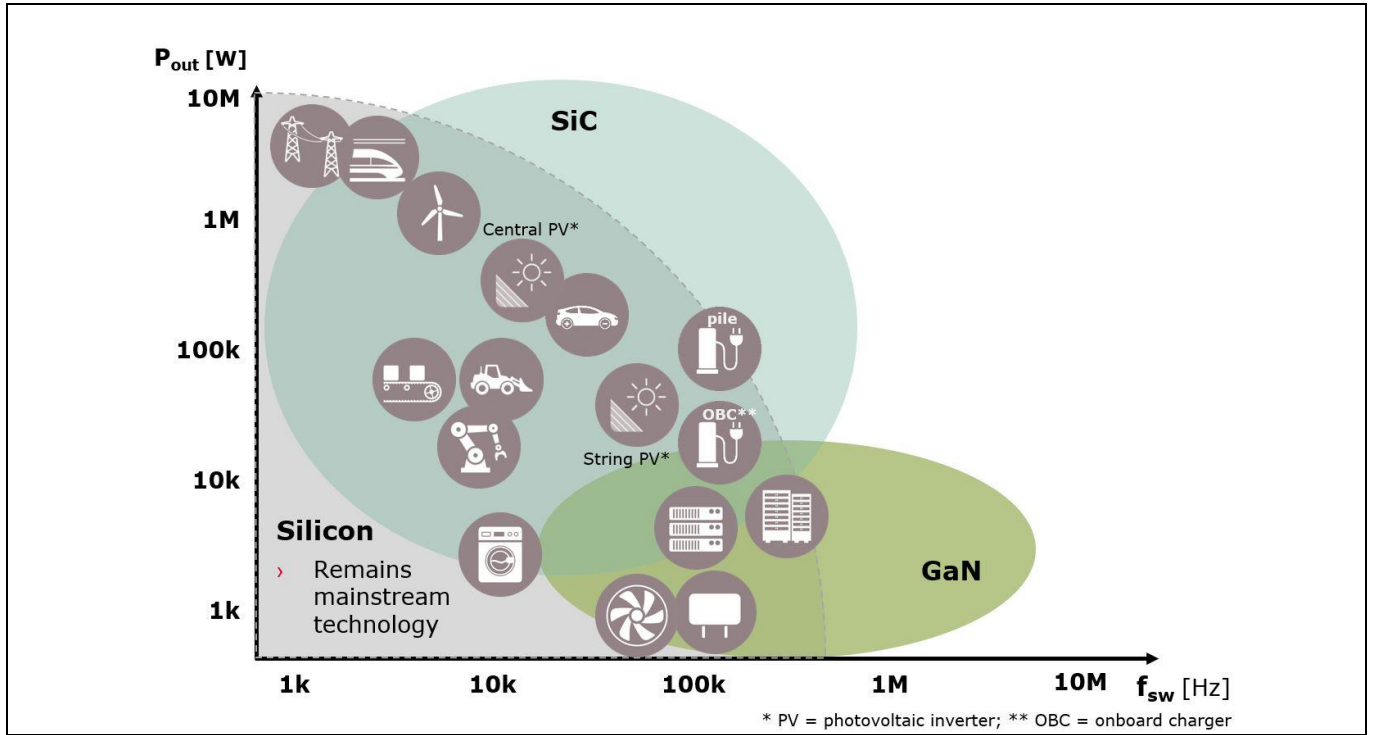


Figure 3 在特定的应用中，与传统的硅或碳化硅相比，GaN 在更高的开关频率下可以提供更高的效率

## 5 系统级解决方案

英飞凌正在积极开发硅和碳化硅 MOSFET 器件以及 GaN-on-Si。因此，它完全了解每种技术适合的应用领域，以及如何从该技术中获得最佳效果。

CoolGaN™系列产品的目标应用需要增强型（常关）HEMT 器件，这在典型的电源转换应用中具有更大的优势，因为它们的运行需要的功率更少。CoolGaN™ HEMT 器件的大部分操作优势来自于它们在超高频率下的开关能力，但这是一个可能受封装引线寄生电阻影响的特性。出于这个原因，CoolGaN™器件采用 SMD（表面贴装器件）技术进行封装，而不是通孔封装。

与英飞凌的所有功率晶体管一样，CoolGaN™系列也得到了其栅极驱动器的支持，其中包括 GaN EiceDRIVER™系列。它们提供输入和输出通道之间的隔离，具有快速切换和精确定时功能。使用 GaN EiceDRIVER™作为 CoolGaN™功率晶体管的栅极驱动器将通过 GaN-on-Si 技术实现增益和降低损耗，从而实现更高的整体效率和更高的功率密度。

## 6 可靠的电源

提供可靠的电源是任何应用的基础，而这始于使用基于成熟可靠技术的可靠组件。

这一理念一直是英飞凌开发 CoolGaN™ 的核心：认证计划基于特定的应用概况、质量要求概况以及在开发阶段进行的广泛可靠性调查，以及对所有故障和退化机制的良好理解和建模。

CoolGaN™ 600 V 器件系列产品已通过认证，预计寿命超过 15 年，故障率低于 1FIT。自从批量生产以来，英飞凌已经出货了 100,000 多个 CoolGaN™ 600 V 70 mΩ 器件，在现场或客户认证测试期间均没有报告任何故障。

欲知英飞凌 CoolGaN™ 开关和专用 GaN EiceDRIVER™ 产品组合的信息，请访问 [www.infineon.com/gan](http://www.infineon.com/gan) 和 [www.infineon.com/gan-eicedriver](http://www.infineon.com/gan-eicedriver)。

## 7 总结

在以电子技术为支撑的每一个垂直行业中，都需要更高效的电源转换，包括 AC-DC、DC-AC 和 DC-DC。这包括用于电信和服务器的 SMPS，以及移动和无线充电器和电源。

在所有这些应用中，首要需求是更高的效率和更高的功率密度。虽然硅 MOSFET 仍然在功率转换中发挥作用，随着时间的推移肯定会不断改进，但随着英飞凌成为市场领导者，宽带隙器件具有在高压和低压应用中实现真实增益所需的 FOM。对于介于 100V 和 600V 之间的范围，英飞凌认为一般的 GaN-on-Si 及其特殊的 [CoolGaN™](#) 系列产品能够引领行业，提供一个完全合格且可靠的解决方案，该解决方案得到强大、可靠的配套产品组合的支持。这包括 [CoolMOS™](#) 和 [OptiMOS™](#) 功率晶体管以及 [EiceDRIVER™](#) 系列栅极驱动器。

发布方：  
英飞凌科技股份有限公司  
85579 Neuburg, Germany

© 2018 Infineon Technologies AG。  
保留所有权利。

**请注意！**

本文档仅用于提供信息之目的，在任何情况下，不得将本文中提供的任何信息视为针对特定目的提供功能、条件和/或产品质量以及适用性的担保、保证或表述。有关产品的技术规格，请您参阅我们提供的相关产品数据表。客户及其技术部门需针对特定应用评估产品的适用性。

我们始终保留随时对文档和/或给出信息进行修改的权利。

**其他信息**

若需获得有关技术、产品、产品应用、交付条款与条件和/或价格的更多信息，请联系距离您最近的英飞凌办事处 ([www.infineon.com](http://www.infineon.com))。

**警告**

由于技术要求，产品可能包含有害物质。若需了解相关物质的类型，请联系距离您最近的英飞凌办事处。

除非另由英飞凌授权代表经书面形式明确批准，否则不得将产品用于任何可能造成人身危险的应用，包括但不限于医疗、核能、军事和生命攸关的应用，或者其他因产品失效或使用而造成个人伤害情况的应用。