

学习让一切更简单

Qorvo® 专版 (第 2 版)

GaN 技术

for
dummies[®]
A Wiley Brand



研究 GaN 的技术特性

了解 GaN 成功的秘诀

探索 GaN 的用途

提供方:

QORVO[®]
all around you

关于 Qorvo

Qorvo（纳斯达克代码：QRVO）长期坚持提供创新的射频 (RF) 解决方案以实现更加美好的互联世界。我们结合产品和领先的技术优势、以系统级专业知识和全球性的制造规模，快速解决客户最复杂的技术难题。Qorvo 服务于全球市场，包括先进的无线设备、有线和无线网络和防空雷达及通信系统。我们在这些高速发展和增长的领域持续保持着领先优势。我们还利用我们独特的竞争优势，以推进 5G 网络、云计算、物联网和其他新兴的应用市场以实现人物、地点和事物的全球互联。

访问 www.qorvo.com，了解 Qorvo 如何创造美好的互联世界。



GaN 技术

Qorvo[®] 专版 (第 2 版)

**作者：David Schnaufer、
Jeff Gengler、Richard Martin、
Fouad Boueri、Elias Reese、
Jose Jimenez、Richard Wilson、
Shawn Gibb 和 Michael Roberg**

for
dummies[®]
A Wiley Brand

GaN 技术 For Dummies[®], Qorvo 专版 (第 2 版)

出版商：

约翰·威利父子公司

111 River St.

Hoboken, NJ 07030-5774

www.wiley.com

新泽西州霍博肯市约翰·威利父子公司版权所有 © 2022

非经出版商事先书面准许，不得复制本出版物的任何部分，或将其保存于检索系统，或以电子、机械、影印、录制、扫描等形式或方式传输，但根据《1976 年美国版权法》第 107 条或 108 条规定获得准许的情况除外。需要向出版商申请批准的，应将申请发送至：Permissions Department, John Wiley & Sons, Inc., 地址：111 River Street, Hoboken, NJ 07030, 电话:(201) 748-6011, 传真:(201) 748-6008, 也可在线提交, 网址：<http://www.wiley.com/go/permissions>。

以下商标：威利 (Wiley)、For Dummies、Dummies Man 标识、The Dummies Way、Dummies.com、让一切变得更简单 (Making Everything Easier) 以及相关商业外观均为约翰·威利父子公司和 / 或其在美国和其他国家关联机构的商标或注册商标，未经书面准许，不得使用。所有其他商标分别归属于各自所有者。约翰·威利父子公司与书中提及的任何产品或销售商之间不存在任何关系。

责任限制 / 保证责任免责声明：尽管出版商及作者已尽最大努力编制本书，但对于本书内容的准确性或完整性不做任何声明或保证，并且特别声明免除一切保证责任，包括但不限于对适销性或特定用途的适合性的默示保证。销售代表、书面销售资料或促销声明不得为本书创建任何保证或延长保修。书中提及某个组织、网站或产品作为引证和 / 或潜在补充信息来源的，这种情况并不表明出版商和作者认可该组织、网站或产品所提供的信息或服务或建议。本书在销售时，即已理解出版商不提供任何专业服务。书中提出的建议和策略不一定适合您的情况。您应当在适当的时候咨询专家。此外，读者应当认识到，在作品成书与读者读到这段期间，书中出现的网站可能已经变更或不复存在。出版商或作者对任何利润损失或任何其他商业损害概不负责，包括但不限于特殊、伴随、后果性或其他损害。

ISBN 978-1-119-86230-7 (pbk); ISBN 978-1-119-86231-4 (ebk)

关于我们其他产品和服务的一般信息，或者如何为您的企业或组织定制 *Dummies*，请联系我们在美国的业务发展部，电话：877-409-4177，电子邮件：info@dummies.biz，网址：www.wiley.com/go/custompub。关于如何为产品或服务申请 *Dummies* 品牌许可，请联系：BrandedRights&Licenses@Wiley.com。

出版商鸣谢

为本书上市做出贡献的部分人员有：

项目编辑：Elizabeth Kuball

生产编辑：Tamilmani Varadharaj

购置编辑：Ashley Coffey

特别援助：Faithe Wempen、

编辑经理：Rev Mengle

Stephanie Orr、Mary Mullins、

业务开发代表：Molly Daugherty

Tim Hornback、Ted Jones、

Tuan Nguyen、Dean White、

Doug Bostrom

引言

氮化镓 (GaN) 晶体管于 20 世纪 90 年代亮相，目前广泛应用于商业和国防领域，但工程应用可能大相径庭。不相信？可以理解。但在您阅读本书之后，可能会成为忠实支持者。

GaN 的普及根植于其高电源和高电压功能。这些特性使其适用于许多应用，包括微波射频 (RF) 和功率开关应用。

GaN 独特的材料属性使其成为许多应用全新首选技术，如 5G 通信、汽车、照明、雷达和卫星应用。但 GaN 制造商和开发人员并不止步于此。他们继续通过技术革命来推进 GaN 的发展。这些创新将在未来继续开拓新的应用领域。

本书提供了牢固的 GaN 基础知识。它着眼于技术和 GaN 实现的驱动因素，以帮助您了解普及 GaN 的益处。它还调查了目前各行各业使用 GaN 的成熟和前沿应用。阅读本书之后，您将了解 GaN 如何在电子工程行业掀起一场革命，及其如何继续保持这一势头。

傻瓜式假设

之前提到，大多假设已不再关乎使用，尽管如此，我们仍然做出以下假设。我们主要假设您是技术或半导体行业的利益相关者，并且长期关注 GaN 等技术。您可能是工程师、设计架构师、技术员、技术主管、销售人员、技术学员或投资者。我们还假设您对半导体技术有一定的了解。因此，本书的主要受众为了解一定技术的读者，比如您。

果真如此的话，本书正适合您！如果都没猜中，您也要读下去。这本书很有用，读完后，您会对 GaN 技术有一个初步的了解！

书中符号

在书中，我们偶尔会使用一些符号，以引起读者注意一些重要信息。您不会看到典型的可爱笑脸符号或其他闪烁的表情符号，但您肯定会想停下来看看这些信息！这些符号如下：



记住

“记住”图标用于标记您想要记住的关键定义和要点。



技术内容

探索技术性很强的各方各面，可能会吸引您内心的极客。



提示

找出那些可以节省您时间的目标提示。

书本之外

尽管本书都是有用信息，但我们也只能在这 48 页中涵盖这些内容！如果您在读完本书后还想要了解更多信息，请访问：www.qorvo.com/gan 或 www.qorvo.com/design-hub，您可以在网站上获得更多有关 Qorvo GaN 技术及产品的信息。

您可能会问，Qorvo 是谁？Qorvo 是 GaN 工艺技术开发领域的领导者。其最新设备采用各种宽带、低噪声、高频和高功率解决方案支持诸如国防、商业和航空等市场领域。换句话说，Qorvo 可利用 GaN 技术制造各种性能优良的设备，所以这是我们非常感兴趣的课题。

- » 审视 GaN 技术的历史和未来
- » 识别当今主要的 GaN 应用和市场
- » 比较 GaN 与其他技术
- » 总结 GaN 的优势

第 1 章

开拓 GaN 技术市场

氮化镓 (GaN) 技术是一项相对较新的半导体技术，正在彻底改变当今世界。GaN 的优势源于其独特的材料属性：宽带隙、高击穿电压、高热导率、高电子迁移率和高饱和电子速度。

本章首先介绍关于 GaN 及其优势的一些基本事实，然后对使用 GaN 的行业和应用进行调查。

GaN：过去和现在

20 世纪 90 年代初，人们首次认识到 GaN 作为一种大功率和高频半导体晶体管材料的潜力，并开始不断探索。到 2000 年代中后期，GaN 就已经用于国防和航天领域的生产应用，以及固态照明发光二极管 (LED) 的商业应用。

自那时起，GaN 逐渐被射频 (RF) 电子领域接受，并广泛部署于 5G 等商业无线应用。GaN 材料的改进可实现高功率密度、高效率射频放大器，并推动了射频技术的应用。



技术内容

像砷化镓 (GaAs) 和磷化铟镓 (InGaP) 一样，GaN 是一种 III-V 直接带隙半导体技术。III-V 化合物半导体是一种含有元素周期表中 III 和 V 族元素的合金。(我们将在第 2 章详细地讨论这些内容。)

许多半导体市场分析师仍将 GaN 描述为一项相对较新的技术。然而，在短短的几年时间里，GaN 已经从小新秀一跃成为许多应用领域的领跑者。GaN 不仅取代了根深蒂固的现有硅技术，如横向扩散金属氧化物半导体 (LDMOS)，而且在与 GaAs 等其他技术组合使用时，还有助于提高整体系统性能。



记住

GaN 能够补充 GaAs 等现有技术的不足，从而有助于加快其在国防与商业应用领域的普及。GaN 还有助于提高系统性能，以满足下一代系统对更高功率、频率和效率的要求。因此，它开始成为带宽更宽、频率更高的全新射频应用的首选技术。

了解 GaN 的全球市场影响力

GaN 市场已经突破了 10 亿美元大关。GaN 能够满足极端温度、宽带宽、大功率、高电压和高输入功率等要求，这些独特的优势使其能够同时进入许多市场领域，如图 1-1 中所示。

主要市场为国防、航天、电信基础设施和卫星通信。但 GaN 还可用于许多其他应用。为了保持完整性，这里有一个更全面的列表，描述了图 1-1 所示每个高级市场的次级市场：

GaN RF

技术

GaN on SiC
GaN on Si
金刚石氮化镓
GaN on GaN

市场

国防和航天
无线基础设施
有线宽带
民用雷达
卫星通信
射频能量
测试与测量

图 1-1 : GaN 射频技术和市场。

» 国防和航天

- 电子战干扰发射器
- 国防通信, 包括战术无线电、卫星通信、数据链路
- 国防雷达, 包括空中、陆基和海军雷达
- 民用雷达, 包括航空交通管制和气象雷达
- 卫星通信, 包括国防和民用卫星通信

» 无线基础设施

- 宏 / 微基站, 包括远程无线电头端 (RRH) 和有源天线系统 (AAS)
- 小基站
- 无线回程

» 有线宽带

» 射频能量

- 医学
- 工业
- 科学
- 汽车

» 测试与测量

GaN 用于国防领域

GaN 在国防领域一直处于领先，并将继续保持领先地位。GaN 在提高军事系统性能方面发挥着关键作用，如有源电子扫描阵列 (AESA) 雷达和电子战 (EW) 系统，这两种系统都需要大功率、小巧外形和高效散热性能。在满足许多国防应用的高功率密度、高效率、宽带宽和长使用寿命需求方面，GaN 可提供有效的解决方案。

GaN 用于 5G 电信领域

通过实现大规模 MIMO 无线基站，5G 开创了多输入 / 多路输出 (MIMO) 技术的新时代。当您推出 5G 基础设施时，大规模 MIMO 系统可帮助无线网络运营商提高性能，最小化成本并提高容量。

随着向大规模 MIMO 过渡，业界开始从 LDMOS 功率放大器转向运行温度更低、外形更小巧、功率更大的 GaN 基解决方案。下面是与 LDMOS 相比，碳化硅 (SiC) 基 GaN 技术用于基站的一些关键优势：

- » **阵列更小**：因为与 LDMOS 相比，GaN on SiC 具有更高的功率输出和出色的散热性能，所以无线网络运营商可利用较小型阵列实现相同的输出功率。GaN on SiC 的阵列大小最多比 LDMOS 小 20%。
- » **可靠性**：即使在高温条件下，GaN 也能可靠运行。这对于 5G 基站来说至关重要，因为这些系统开始从无线发射塔下方的空调房间搬到塔顶。即使在恶劣的塔顶环境下，GaN on SiC 也具有较高的可靠性。
- » **散热性能更出色**：GaN on SiC 的热导率比 LDMOS 更高，所以可以更有效地散热，从而实现运行温度更低的系统。

- » **工作频率更高：**与 LDMOS 不同的是，GaN on SiC 可在 5G 使用的 6 GHz 以下和毫米波 (mmWave) 频率范围内工作，同时效率提高 10% 到 15%。
- » **重量更轻：**重量是基站应用的一个重要因素，也是更小巧外形之所以重要的关键原因。GaN 的效率更高，因而可使用尺寸更小的散热器，从而可缩减整个系统的尺寸和重量。对于在塔上安装 5G 的人员来说，这是非常重要，因为重量更轻意味着安装更简单。

要想充分发挥 5G 的多 Gbps 数据传输速度和超低延迟潜力，移动运营商必须提高系统性能。这意味着，它们需要对频谱采集、网络基础设施和传输技术进行大量投资。在 6 GHz 以下和毫米波频率范围内运行的大规模 MIMO 无线基站是其中一项最重要的 5G 传输技术。



技术内容

大规模 MIMO 基站使用许多天线传输和接收数据，而不是传统无线通信中通常使用的单天线。这些大规模 MIMO 系统支持空间复用，其中每个信道都向接收器传送独立信息。这可提高信号可靠性，并大幅提升吞吐量。

那么，5G 大规模 MIMO 基站系统需要什么样的射频前端 (RFFE) 组件呢？它们必须为具有高线性度、极高效率和低功耗的集成组件。GaN 满足这些要求。此外，在 RFFE 中使用 GaN 可减少大规模 MIMO 阵列所需有源元件的数量，以满足基站系统输出功率要求，如等效全向辐射功率 (EIRP)。



技术内容

EIRP 是在给定天线增益和射频子系统发射器功率的情况下，天线阵列所能辐射的最大功率。通过使用 GaN，系统设计人员可以轻松地实现每个塔的 5G 指定 EIRP 级别。此外，他们还可以使用更少、更小的天线来实现这一目标，从而以更低的资本支出更快速地进入市场。

比较 GaN 与其他技术

尽管 GaN 逐渐在越来越多的市场领域取代其他技术，但仍有一些现有技术直接与 GaN 竞争。最后，GaN 可为系统设计人员和设备工程师提供另一种技术选择，以打造一流产品，同时最小化系统与用户需求之间的权衡。

在任何射频系统中，最优技术都取决于设计人员所要实现的性能参数。在大多数应用中，技术选择取决于频率、功率水平、效率、尺寸和价格。可用的主要技术选项包括碳化硅 (SiC) 基 GaN、硅 (Si) 基 GaN、GaAs 和 LDMOS。表 1-1 比较了它们的特性及适用的射频应用。

表 1-1 GaN 技术与其主要竞争对手之比较

功能	GaN on SiC	GaN on Si	GaAs	LDMOS
RF 设备	TX PA、RX LNA、射频信号控制	TX PA、RX LNA、射频信号控制	TX PA、RX LNA、射频信号控制	TX PA
工作电压	高	高	低	高
功率密度	高	高	低	低
热阻	低	中	中	中
带宽	宽	宽	宽	窄

快速浏览此表，您就会明白为什么全球开始抛弃 LDMOS。GaN 可为进行系统开发的设计人员提供全面的竞争优势，满足其功率、宽带宽、高工作电压和高散热性能等要求。

因此，许多工程师都想知道 GaN 最终是否会取代 LDMOS 等技术。要回答这个问题，我们先来看看以下这些关键问题：

- » GaN 是否支持现有应用和新应用？
- » 它是否易于使用？是否提供即插即用的替换件？
- » 它是与当前技术一样可靠，还是比当前技术更加可靠？

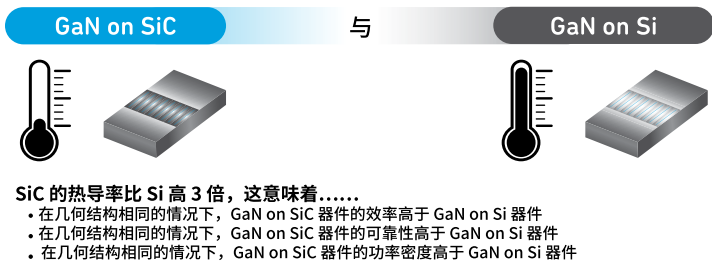
GaN 已经能够满足取代现有技术的所有先决条件，尤其是在 5G 等新应用领域。5G 领域的 GaN 已经支持更快的数据传输速度、更大的射频范围、更高的温度稳定性、较高输入功率水平稳定性、更小巧的尺寸以及更高效的功耗。



记住

如前所述，GaN 射频系统得益于其独特的材料属性：宽带隙、高电荷密度、高电子迁移率和高温耐受性。这些属性可转化为高功率附加效率 (PAE)、高功率输出、小巧外形、宽带宽和耐用性等射频优势。通过利用 GaN 的高 PAE 和高工作电压优点，系统能够以更低的工作电流和成本运行。此外，系统设计人员还可以减少系统设计所需的组件数量，从而节省设计时间，加快上市步伐。除了高热导率外，GaN 还因其低辐射灵敏度而知名。

从表 1-1 中我们可以猜测出，GaN 的制造工艺主要使用碳化硅或硅基板（分别为 GaN on SiC 和 GaN on Si）。每种基板都有其自己的优势。与碳化硅相比，硅基板的成本相对更低。然而，从许多方面来看，与 GaN on Si 相比，GaN on SiC 的可靠性和功率性能更高，因此更具优势，如图 1-2 中所示。这使得 GaN on SiC 成为 5G 电信、国防、航天等许多应用领域的最佳之选。



SiC 的相对介电常数比 Si 低 30%，这意味着……

- 在几何结构相同的情况下，GaN on SiC 器件的带宽大于 GaN on Si 器件

图 1-2 : GaN on SiC 和 GaN on Si 的优势比较。

图 1-2 突出显示了 GaN on SiC 和 GaN on Si 基板之间区别。此外，我们还发现人造金刚石是另一种替代基板材料。Si 基板的成本最低，但散热性能也最低，而金刚石基板的成本最高，但散热性能最高。然而，成本和散热性能之间的最佳平衡是 SiC 基板材料。因此，SiC 基板最常用于高功率、高效率的应用，尤其是国防和基础设施领域。

第 2 章

深入了解 GaN 技术

本章将深入探讨氮化镓 (GaN) 技术：其属性、优点、不同制造工艺以及最新进展。这种更深入的探讨有助于我们了解：为什么 GaN 能够在当今这个技术驱动的环境下发挥越来越重要的作用。

GaN：可靠的技术

GaN 是一项久经考验的化合物半导体技术。自 20 世纪 80 年代以来，化合物半导体一直都是高性能应用中的主导微波集成电路 (IC) 技术。这是因为与简单的硅基半导体器件相比，它们可实现卓越的速度和功率组合。

化合物半导体由元素周期表中的两个或两个以上不同元素族组成，而简单的半导体器件则由硅 (Si) 等单元素组成。如图 2-1 所示，GaN 是其中一种化合物半导体，它将元素周期表的第三列和第五列元素组合在一起，因此被称为 III-V 化合物半导体。

简单半导体

- 硅 (Si)
- 锗 (Ge)

《化合物半导体》

- III-IV
 - 氮化镓 (GaN)
 - 砷化镓 (GaAs)
 - 磷化铟 (InP)
- IV
 - 碳化硅 (SiC)
 - 硅锗 (SiGe)

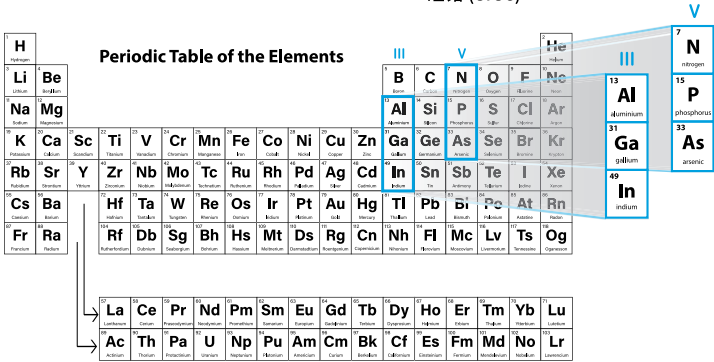


图 2-1：简单半导体与 III-V 化合物半导体

这些 III-V 半导体可用于各种应用。在过去的四十年，砷化镓 (GaAs) 应用最为广泛，全球运行着数十亿个 GaAs IC。与 GaAs 相比，GaN 可实现更出色的速度和功率处理组合。在晶体管速度给定的情况下，GaN 具有出色的功率性能，因此能够在频率范围广泛的数千个应用中取代其他技术。

GaN 单芯片微波集成电路 (MMIC) 和分立式晶体管于 2000 年代后期首次投入生产，主要针对最高功率水平的固态应用。在毫米波 (mmWave) 应用中，GaN 已在更高的功率水平方面取代了 GaAs，与竞争技术中 MMIC 提供的功率水平相比，GaN 可在 Ka 频段实现数十瓦的功率。在较低的频率下 (如 L 频段)，GaN 晶体管可实现超过 1,000 瓦的功率！

正如我们在第 1 章中提到的，GaN 可以使用多种基板材料，如硅、碳化硅（SiC）、GaN 和金刚石。GaN 可与高热导率基板（如 SiC）兼容，从而增强了其在高功率应用中的优越性。

GaN 固有的材料属性如何创造卓越的射频晶体管

从概念上讲，使用 GaN 构建的场效应晶体管（FET）与使用其他半导体材料（如 GaAs、磷化铟（InP）或 Si）构建的使用栅极触点或节点的晶体管类似。如果为 GaN 射频（RF）器件，其实现通常是耗尽型高电子迁移率晶体管（HEMT）。



技术内容

耗尽型 HEMT 对栅电极施加负偏压。这样就切断了漏极和源极之间的电流。当施加的栅电压为零时，耗尽型 FET 设计为处于开启状态；可通过将栅极拉大阈值电压以下将其关闭。

GaN 器件由纵向材料结构和横向结构组成，前者定义了许多固有属性，后者实现了与材料结构的接触并电荷流的控制（参见图 2-2）。与其他 FET 一样，横向结构包括源极、漏极和栅极触点。通常，附近还有其他结构提供磁场控制，如图 2-2 中所示的源场板。

静观其变

Qorvo 制作了一个非常实用的视频，解释如何正确地打开或关闭 GaN HEMT 晶体管。欲查看“如何偏置 GaN 晶体管：入门教程”，请访问：www.qorvo.com/design-hub/videos/how-to-bias-gan-transistors-an-introduction-tutorial。

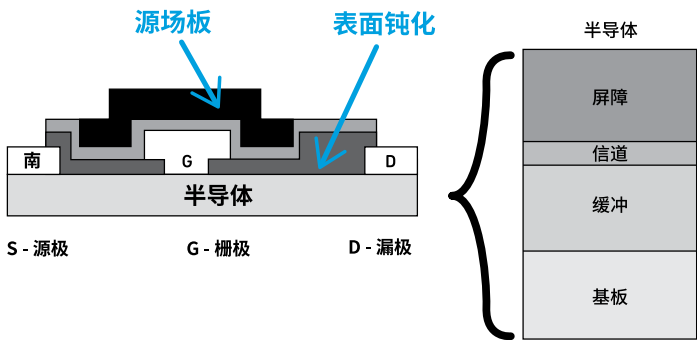


图 2-2：基本的 GaN FET 几何结构。

下面为图 2-2 所示内容：

- » **屏障**提供了两个关键功能：实现栅极和信道之间的隔离，以及支持电子流动的电荷容量。它通常由氮化镓铝 (AlGaN) 制成。
- » **信道**为纯 GaN。它可以为漏极触点和源极触点之间的电流提供传导路径。GaN 的高饱和速度和迁移率可实现器件漏极和源极之间的高速传输和电流电平。
- » **缓冲**用于限制信道内的电荷流，以避免泄漏到基板，并保证晶体管器件之间的隔离。
- » **基板**决定了器件的机械和散热性能。功耗较高的器件可受益于具有较高热导率的基板。SiC 基板材料使用便捷，可提供出色的散热性能，同时兼容 GaN 材料生长和 MMIC 制备。

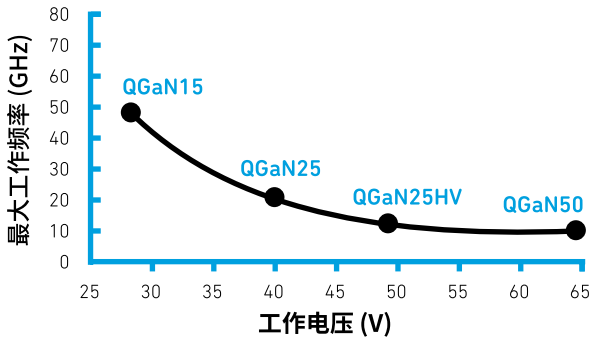
以下是横向结构的重要功能：

- » 器件的**栅极**控制从漏极到源极触点且流经器件的电流。栅极的长度决定了器件的速度和电子流经控制区域的时间。

» **源极和漏极触点**提供本征器件的低阻接入。栅极与这些触点之间的隔离不仅会产生不必要的寄生接入电阻，而且还会增加支持预期操作所需的击穿电压。

GaN 工艺选项解密

通过在晶体管速度、电流能力、击穿电压、效率和可靠性之间进行权衡，可针对目标应用对 FET 进行优化。为满足不同 GaN 应用的需求，制造商提供了频率和功率水平范围广泛的多种工艺技术。有了多个 GaN 工艺可供选择，电路设计人员可以将特定的 GaN 工艺技术与应用进行最优匹配，从而简化并加快设计。图 2-3 展示了 Qorvo 的系列 GaN 工艺技术，这些技术旨在适应多个市场领域的各种应用。



参数	QGaN15	QGaN25	QGaN25 HV	QGaN50
工作电压 (V_{dd})	最高 28V	最高 40V	最高 48V	最高 65V
功率输出	4W/mm	6W/mm	8W/mm	10W/mm
PAE	50%@35 GHz	60%@10 GHz	80%@3.5 GHz	78%@2.7 GHz
增益	9 dB@35 GHz	13 dB@10 GHz	21 dB@3.5 GHz	21 dB@2.7 GHz
目标应用频率范围	DC-60 GHz	DC-25 GHz	DC-12 GHz	DC-8 GHz

图 2-3 : AB 类性能的 Qorvo GaN 工艺技术选项。

例如，功率非常高的应用（如工作频率为 2 GHz 的 1 kW 晶体管）将受益于具有较高击穿电压的 GaN 工艺，因为它提高了工作电压和射频功率密度。工作电压的提高也会提高输出效率。这是提高接入电阻和降低晶体管速度之间的权衡。Qorov GaN50 工艺能够在 65 V 的电压条件下运行，同时也具有这些优势。

毫米波功率放大器 (PA) 应用（如工作频率为 30 GHz 的 20 W MMIC）要求使用能够在高频率条件下提供较高增益的高速器件。器件设计的权衡将有利于缩短栅极长度，最小化接入电阻，以及最大限度地提高电流容量。从而可以降低击穿电压和功率密度。Qorov GaN15 工艺能够在最高 28 V 的电压条件下运行，同时也具有这些优势。

在这两个示例中，GaN 器件提供了比其他技术更高的工作电压，从而展示了该技术固有的速度和电压优势。较高工作电压的优势不仅仅局限于 PA 电路，它还可以为整个系统带来好处。

例如：相位阵天线系统（GaN PA 的常见应用）可能需要数百或数千个单独的功率放大器。

这些天线阵列系统中的直流配电一直都是一大难题，因为电源会占据空间，增加重量，并引起直流电源损耗。但 GaN 具有较高的工作电压，可实现更低的直流电流和出色的尺寸、重量、功率和成本 (SWaP-C) 性能，以应对这些系统所面临的直流配电挑战。

GaN 器件的可靠性评估

在所有电子系统中，可靠性都极其重要，因此在选择半导体时，可靠性是一个关键考虑因素。GaN 的一个关键优势就是，与其他半导体相比，它可以在更高的电压和功率密度下运行。GaN 可以满足这些严苛要求，在高结

温条件下具有经过实践证明的可靠性，同时可在 200°C 温度条件下实现超过 10^7 (1000 万) 小时的平均无故障时间 (MTTF)，在 225°C 温度条件下实现超过 10^6 (100 万) 小时的平均无故障时间。GaN 具有更高的安全运行通道温度和更长的使用寿命，使系统设计人员能够推动其应用和产品的进步。

GaN 制造商采用不同的故障分析方法：一些依赖于热成像，而另一些则使用热成像、产品包装测试和建模的组合方法。但所有制造商和标准机构都同意：与其他技术相比，GaN 在高功率、高温应用方面更可靠。如图 2-4 中所示，GaN 的可靠性远远超过了基于 GaAs 的晶体管。

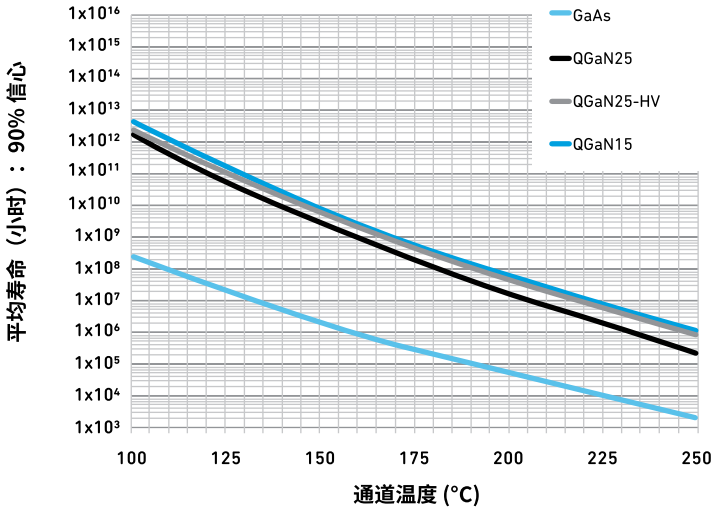
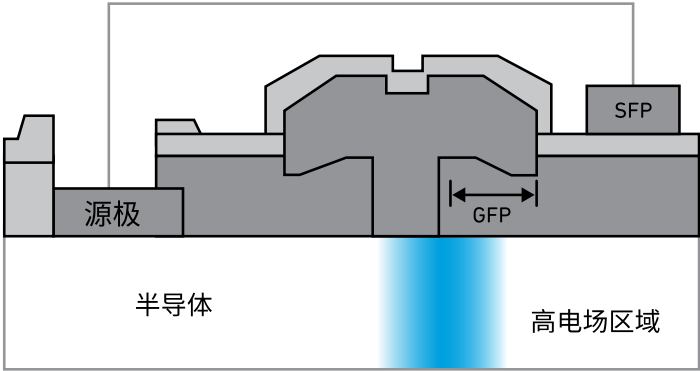


图 2-4：使用 Qorvo MTTF 曲线进行 GaN 与 GaAs 技术器件的可靠性比较示例

GaN 应用通常会使器件处于更高应力的工作条件下，如更高的电流密度、更高的环境温度和更高的电场。无论是器件设计还是器件使用的结果，这些问题都可能都是由压电效应、热失配或封装引起的。

GaN 器件还有一个需要注意的固有器件特性：由 GaN 固有的压电特性引起的应力。图 2-5 展示了 GaN FET 的峰值应力区域。然而，在 GaN 器件中，这种行为很好表征，也易于理解。因此，使用目前的 GaN 工艺技术，这不再是问题。



SFP - 源场板
GFP - 栅极场板

图 2-5：FET 的高电场区域。

如今，GaN 器件被用于可靠性要求最严苛且最具挑战性的各种应用，包括任务关键型系统和航空应用。GaN 的可靠性和稳定性超越了晶体管和 MMIC 工艺，经过优化可应对 GaN 应用范围不断扩大所面临的电气、散热和环境挑战。其环境稳定性可实现当今所有 GaN 工艺的裸片级高加速应力测试 (HAST) 兼容性。GaN 的封装和互连技术也在不断进步，以保持同步。

例如：当今的 Qorvo GaN 技术可用于大批量、制造成熟度 10 级 (MRL 10) 的成熟工艺。MRL 是美国国防部 (DOD) 制定的一种衡量标准，用于评估制造成熟度。MRL 10 是最高级别的制造成熟度，表明全速生产和精益生产实践已经就绪。



提示

GaN 技术不断进步，以支持更广泛的应用。这些进步包括在宽带频率范围中支持更高的工作频率和不断增加的功率水平。与大多数其他技术进步一样，小批量生产能力正在向大批量的成熟生产工艺转移。

GaN 的一个关键进步就是，通过缩短 GaN 栅极长度，可在极高频率（100 GHz 或更高）下运行。另一个进步就是输出功率水平：当工作电压提高时，GaN 可以在较低的频率下实现较高的功率密度。



技术内容

如今，GaN PA 设计通常遵循这样一个原则：1 GHz 频率下为数千瓦，10 GHz 频率下为数百瓦，100 GHz 频率下为数十瓦。在过去五年，这一粗略的品质因数翻了三倍，且仍在继续提高。

GaN 技术将继续发展，同时进一步扩大 GaN PA 频率范围，提高其功率水平。其他参数也正在探索之中，如增加高功率放大器 (HPA) 带宽和提高效率。GaN 器件性能的提高和电路设计技术的进步可实现这些领域的不断进步。

GaN 在过去 20 年中已经长足发展，如今正在进一步改进，实现更广泛部署。我们可以肯定的是，未来 GaN 技术将进一步改进，其应用范围也将更加广泛。

- » 将 GaN 集成到当今应用之中
- » 调查 GaN 技术包装和销售多种方式
- » 识别 GaN 建模的重要性和好处
- » 使用 Doherty 和数字预调失真增强 GaN PA 性能

第 3 章

使用 GaN 进行系统和器件设计

在 本章，我们将介绍设计氮化镓 (GaN) 功率放大器 (PA) 以及其他 GaN 应用的一些技术，并描述 GaN 在许多射频 (RF) 前端中的应用。我们还将探讨技术领导者如何在分立式、单芯片微波集成电路 (MMIC) 以及高度集成模块中使用 GaN 技术，以满足许多应用领域需求。我们还将说明 GaN 热建模在应用中的一些重要方面和优势。

使用 GaN 技术进行设计

过去，GaN PA 设计一直依靠大致的起点、丰富的经验和专业知识来完成。使用 S 参数和负载牵引数据可以提高设计的成功率。有了 GaN 分立式产品，使用精确的非线性模型也有助于更快地生成设计数据。对于分立式实现来说，建模有助于获得更精确的半导体行为数据，并获得针对特定应用的更好结果。

对于工程师来说，设计 GaN PA 的第一步就是获得半导体制造商的产品数据手册；第二部就是查看 S 参数。PA 设计工程师还可以利用测得的负载牵引数据确定最佳负载阻抗目标值，以便在指定频率下实现精确的功率和效率值。

有条件时，设计人员可使用负载牵引数据和仿真模型获得更好的结果。图 3-1 显示了如何针对 GaN PA 设计创建仿真模型。这些相同的模型用于生成 PA 参考设计。

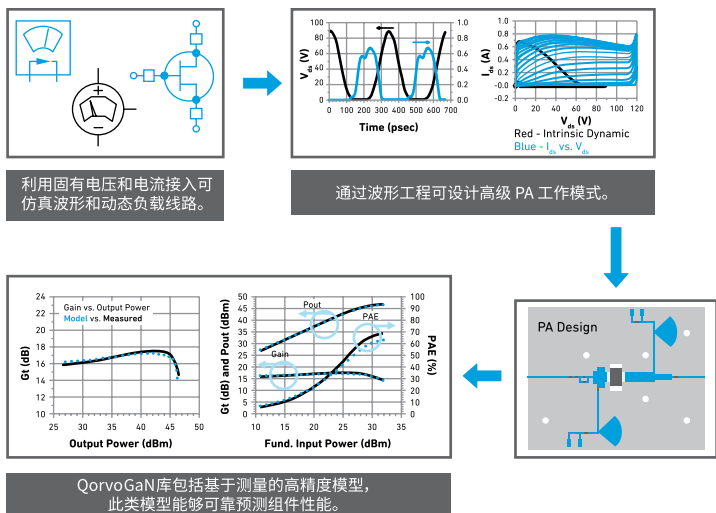


图 3-1：Qorvo/Modelithics 非线性仿真模型流程示例

这些分立式非线性 GaN 模型都具有可变偏置、温标、自热效应、固有电流 - 电压 (I-V) 感应和焊线设置等功能（若适用）。在最基本的层面上，非线性 GaN 晶体管模型必须捕获晶体管在不同工作电平下的电流 - 电压特性曲线 (I-V 曲线)。I-V 曲线决定了器件的基本功耗、效率和其他主要性能驱动因素。

一个模型预测 PA 晶体管非线性行为的能力主要基于几个方面：

- » 电压依赖性电流源 (I_{ds}) 的表示
- » 电压依赖性电容，主要是栅极 - 源极 (C_{gs})、漏极 - 源极 (C_{ds}) 和漏极 - 栅极 (C_{dg})
- » 电压依赖性二极管模型，与击穿电压的预测相关
- » 器件寄生电感、电容和电阻，代表器件的总体频率依赖性行为

作为一种相对较新的技术，与其他半导体相比，GaN 需要使用一些不同的建模和设计技术。GaN 具有更高的最大电流能力，可在更高的静态电压和更高的电压下运行，从而能够有效地扩展 I-V 曲线的边界值。

在任何情况下，都必须向工程师提供相关数据，以便于其优化设计，使其设计能够在目标应用电压、电流和负载条件下运行。这些数据可加快设计流程，帮助工程师在第一次就能够进行正确的布局，而不用担心是否需要昂贵的项目变更。

GaN 和射频前端

早期，GaN 被用作放大射频前端 (RFFE) 发射信号的 PA，主要裸片形式提供或用作法兰晶体管。但将 GaN 用于其他 RFFE 组件也会带来明显的好处。如今，GaN 还作为单独的分立元件或 MMIC 用于低噪声放大器 (LNA)、混频器和开关。本节将回顾 GaN 用于这些 RFFE 组件所带来的好处。

GaN PA

GaN 是实现大多数高功率应用所需功率水平和效率的首选。它可在非常小的外设中实现出色的耐久性和较高的饱和功率。此外，它还提供许多无线基站、商业和军事雷达应用等所需的高效率。

GaN 开关

GaN 开关适用于许多射频开关应用。它们具有高击穿电压、低导通电阻和低断开状态电容。这显著提高了其电源处理能力。

砷化镓 (GaAs) 场效应晶体管 (FET) 开关广泛应用于射频行业，通常用于功率水平为几瓦或更少的应用。GaN FET 可以使用相同的电路架构来处理更高的功率水平(几十瓦)。GaN 开关可实现较低的开关损耗、较高隔离度、较高线性度和出色的功率处理能力。随着对更高电流、电压能力、功率密度、温度、效率和频率范围系统的需求，硅基开关即将接近其极限。因此，在需要这些独特功能的应用中，GaN 开关开始取代硅开关。

GaN LNAs

GaN LNA 的功耗通常比 LNA 替代技术更低。选择将 GaN 用于 LNA 可降低噪声系数，并提高 LNA 所需的输入功率稳定性。

通常情况下，GaN 器件可耐受 2-4 瓦的输入功率水平。在许多应用中，高输入功率性能尤为重要。例如：在许多雷达应用中，在输入端增加一个限幅器或循环器可以降低高输入功率对接收器可能产生的影响。这确实有助于保护接收器，但会增加 LNA 处的噪声。这种限幅器或循环器方法也会降低接收器的灵敏度，从而对信号覆盖范围、吞吐量和性能产生不利影响。相比之下，GaN LNA 的极高输入功率性能意味着不需要使用限幅器或循环器，从而有助于提高接收器的整体性能。

GaN 混频器

基于 GaN 的混频器具有高线性度，且与基于 GaAs 的混频器相比，可以处理更多的输入功率。通常情况下，这些基于 GaN 的高端混频器用于国防、卫星通信和仪表应用。

GaN 的可用性为设计工程师在设计 RFEE 时提供了另一种可用技术。利用这项附加技术可带来更多机会。

GaN 系统可靠性评估

众所周知，GaN 比其他技术更可靠，主要归因于其独特性能，如可靠的高功率功能和散热稳定性。即便如此，对于设计人员来说，还必须围绕该技术创建一个功能强大的解决方案，以获得最佳系统可靠性。

与所有功率晶体管技术一样，谨慎的热设计是确保可靠运行的关键。支持高电压和高效率的关键在于将热量从器件中排出，从而将结温保持在可接受范围，以实现可靠运行。这可以通过精确的热测量和选择具有最佳热性能的基板材料来实现，该基板材料可以立即将设备的热量排到散热器上。



提示

铜块技术是散热器的替代散热解决方案。利用该方法，可在制造过程中将铜块嵌入到 PC 电路板 (PCB) 中，以实现从晶体管到安装了 PCB 的载体的高效热传递。与更昂贵的散热器或风扇相比，这种经济高效的方法可实现更好的热传递。

尽管铜块冷却方法可以实现实质性的器件问题改进，但对射频性能的影响比较小。此外，必须高度注意，以确保 PCB 表面保持平坦，并在铜块和器件封装的接地焊盘之间形成良好接触。

GaN 与 TWTA 之比较

GaN 工艺使用商用材料和可实现最佳可靠性、低成本和高性能的制造平台，如表 3-1 中所示。因此，与传统的行波管放大器 (TWTA) 技术相比，碳化硅 (SiC) 基 GaN 和硅 (Si) 基 GaN 可向工程师提供成本更低且具有竞争力的可靠解决方案。

表 3-1

GaN 与 TWTA 放大器之比较

	TWTA	GaN on SiC	GaN on Si
性能	高	高	中
尺寸	大尺寸	小尺寸	小尺寸
简单易用	低	高	高
可靠性	低	高	中

例如，实践证明，在要求使用千兆赫工作频率范围的商业和军事雷达应用中，GaN 是理想解决方案，特别是在发射阶段。它已经在许多应用中取代了 TWTA。如今，使用有源电子扫描阵列 (AESA) 和相控阵模块的军事雷达可受益于 GaN，特别是因为它们可以使用 MMIC 技术，从而简化和缩小设计。

匹配 GaN 散热性能与应用

提高功率意味着增加热管理挑战。高工作温度会导致器件性能下降，服务寿命缩短。因此，设计工程师会始终评估热因素的影响，以消除器件和系统层面的潜在问题。

许多需要在高温和极端环境下运行的应用都在考虑使用 GaN，因为它具有出色的散热性能。GaN 极高的运行通道温度 (225°C) 使系统设计人员可以不用从散热角度进行设计。例如，当使用横向扩散金属氧化物半导体 (LDMOS) 或 GaAs 实现时，一些需要液体冷却的应用可以在使用 GaN 时转而采用空气冷却。



提示

尽管 GaN 的散热性能优于许多半导体技术，但工程师仍必须充分了解散热设计和分析，以便构建稳定可靠的最终产品。在进入产品设计展示之前，完全了解 GaN 的散热性能至关重要。

估算 $T_{CH,MAX}$

GaN 等半导体的可靠性是通过估算器件的最高信道温 ($T_{CH,MAX}$)，进而估算器件的生命周期来确定的。这些数值是通过测量热阻、器件功耗和热传递，并据此建模来获取的。对于半导体器件，主要使用红外 (IR) 成像显微镜进行测量。这些红外范围有助于识别最终可能导致半导体上出现故障区域的设备热点。

因为与大多数半导体材料相比，GaN 技术可以在更高温度条件下运行，所以更准确地测量信道温度至关重要。因此，一些 GaN 设计人员和半导体制造商选择执行红外扫描之外的额外测量。

为什么？空间分辨率限制、反射面成像困难和芯片表面结构（如空气桥）限制了红外成像在测量 GaN 信道温度方面的准确度。此外，即使获得了准确的红外图像值，但最高信道温度实际上是器件栅极下方某个位置的值，如右图 3-2 所示。

为了获得更准确信道温度测量值，一种方法是使用热模型分析方法（也称为有限元分析 (FEA)）。使用三维模型或 FEA 结合显微拉曼热成像技术，并将这些结果与射频测试和红外成像进行比较，从而获得准确的热值。使用这种组合数据集，可以确定封装器件的 FEA 模型，从而提供准确的 $T_{CH,MAX}$ 。此外，如左图 3-2 所示，与红外图像光斑尺寸测量不同的是，微型拉曼光斑尺寸支持在栅极下的不同位置更精确地测量温度。这可实现更精确的峰值信道温度测量。

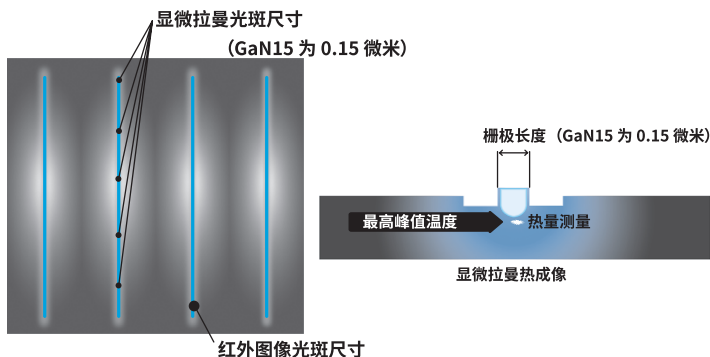


图 3-2：使用显微拉曼热成像技术测量 $T_{CH, MAX}$



技术内容

显微拉曼热成像技术是一种基于拉曼散射光谱的非侵入式光学技术，可实现亚微米空间内的温度测量，时间分辨率可达纳秒级别。它探测材料中由温度引起的、声子相对于基准声子频率的偏移（声子频率在环境温度下测定）。

为计算器件的预期使用寿命，确定器件的真正 $T_{CH, MAX}$ 是一个多步骤过程。首先，通过构建三维热模型或进行有限元分析（FEA），并与采用显微拉曼热成像等技术得到的实证测量结果进行比较，确定信道温度。然后通过射频测试和红外成像进行验证，并使用组合数据获取 GaN 信道温度和器件可靠性的准确测量值。



记住

FEA 是测量 GaN 的真正信道温度和器件可靠性的组合方法。这是一种三管齐下的方法，通过器件背面温度、裸片或产品贴装的测量值以及红外成像来创建 FEA 模型，从而准确估算 GaN 器件的使用寿命。

查看如何实现

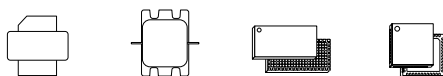
想要查看该方法的详细说明？请观看视频教程“了解 GaN 热分析”，网址：www.qorvo.com/design-hub/videos/understanding-gan-thermal-analysis。

连续波与脉冲工作

另一个需要考虑的重要设计和可靠性因素就是 GaN 器件在系统中的运行方式。器件是始终开启（连续波 [CW] 工作）还是通过脉冲开启和关闭（脉冲波工作）。每一种工作方法都会影响 $T_{CH, MAX}$ 值，这取决于具体的工作条件，并随着所选脉冲宽度和占空比的变化而变化。例如：在 CW 工作期间，系统达到热稳定状态运行后， $T_{CH, MAX}$ 达到最高点。

GaN 封装形式评估

GaN 可以采用裸片形式，也可以采用一些封装形式：预匹配晶体管、内部匹配场效应晶体管 (IMFET)、功率放大器模块 (PAM) 或 MMIC。每种形式都有其优点和利弊权衡，如图 3-3 中所示。每一种形式都可以为特定应用提供一流的热、尺寸和参数性能。



参数	未匹配或预匹配晶体管	IMFET	PAM	MMIC	FEM
多个增益级	否	否	是	是	是
输出功率	非常高	高	中	中	中
所需数量或外部组件	高	低	低	低	低
匹配	不匹配、预匹配、输入匹配至 50Ω	输入/输出匹配至 50Ω	输入/输出匹配至 50Ω	输入/输出匹配至 50Ω	输入/输出匹配至 50Ω
系统设计复杂性	高	中	低	低	低

图 3-3：GaN 形式类型比较

以下是如何使用这些 GaN 形式类型的快速说明：

- » **未匹配或预匹配晶体管**：这些器件适用于工程师需要设计灵活性的应用，例如：能够优化系统以满足特定频率范围或带宽要求。这些器件还允许工程师使用 Doherty PA 设计来创建解决方案，如 5G 远程无线电头端或高级阵列系统设计。

- » **IMFET**：这些是适用于大功率解决方案的分立式晶体管或电源棒。这些内部匹配的 GaN FET 常用于雷达和无线基础设施应用中。
- » **PAM**：PAM 旨在支持大功率应用，如商用 5G 多输入多输出 (MIMO) 和国防雷达。它们是内部匹配 50 欧姆输入和输出的两级或多级放大器。它们是专门为减小系统的尺寸、重量、功率和成本 (SWaP-C) 而设计的，同时可简化设计，并缩短上市时间。
- » **MMIC 和前端模块 (FEM)**：这些可以将多个功能集成到一个小型封装内的同一裸片上。MMIC 通常用于高频率操作应用，其中功率附加效率 (PAE) 和低射频损耗是重要的系统目标。FEM 为系统级封装 (SIP) 解决方案，有助于设计人员利用 GaN 的高功率密度、热导率和小尺寸。

探索 GaN 系统设计和实现

像 GaAs 这样的成熟技术可以支持大带宽和高频频段，但它们的功率密度比 GaN 低。因此，对于可接受每个元件更低的传输功率，且接收链噪声数字比较关键的应用，GaAs 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 仍是发射和接收组件的可行解决方案。

GaAs 栅极长度继续减少，有助于降低噪声系数，从而可以扩大射频范围，提高灵敏度。在所有其他因素保持不变的情况下，GaAs 上较短的栅极长度有助于提高性能，但这是以牺牲静电放电 (ESD) 灵敏度和输入电源生存性为代价的。然而，与 GaAs 相比，GaN on SiC 具有带宽宽、功率密度更高以及输入功率更高的优点，有助于提高生存性，降低噪声系数。此外，GaN 的高输入阻抗允许在系统上轻松实现射频匹配。

使用功率密度更高的 GaN 晶体管可简化设计，并减少系统中的匹配组件。这也意味着，与 GaAs 和 LDMOS 相比，使用的系统组件更少，从而可以降低射频链损耗。GaN 具有更高的发射功率和较低接收噪声系数，可以实现更长的射频范围和更高的信号分辨率。

在雷达应用中，这意味着系统可以看到更远处的较小目标，从而有更多的时间对目标的移动作出反应。传统雷达系统要求短脉冲宽度、窄瞬时带宽和较小的占空比。而如今，所有雷达频段都有一个驱动，可以将占空比增加三到五倍，达到 50% 或更高占空比，在某些情况下接近连续波操作。

雷达 AESA 系统可能会使用数百到数万个放大器。使用 GaN 可提高每个阵列元件的功率，从而扩大范围。或者，与 GaAs 和 LDMOS 等其他技术相比，每个元件可以使用更少的 GaN 器件来实现所需的输出功率，从而降低成本和复杂性。

GaN PA 在饱和状态下具有最高效率。对于线性度，则相反：当输出功率较低或为回退模式时，工作的线性度最高。在 5G 系统中，线性度是一个关键参数。所以，为使高功率 5G 高级天线系统 (AAS) 的线性度最大化，可使用一种称为数字预失真 (DPD) 技术 (见图 3-4)。

5G 基站的 PA 通常进行了效率优化，同时需要实现 50% 至 70% 的 PAE。然后可使用 DPD 来补偿线性度。由于信号输出功率和相关能耗较高，所以效率至关重要。附加好处在于，这些系统运行的温度更低，这一点很重要，因为它们安装在基站天线的顶部，而不是在结构底部的空调建筑内。

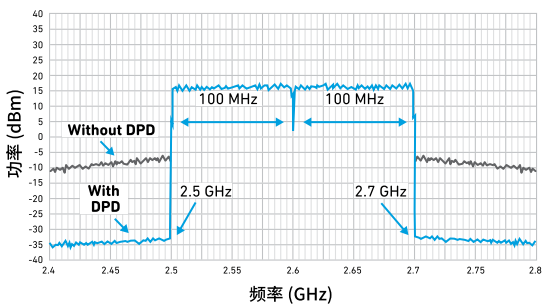
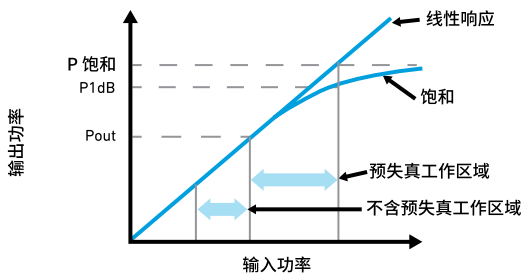


图 3-4 : DPD 和 Doherty PA 配置。



DPD 是一种利用数字信号处理技术消除失真的硬件和软件解决方案。它使设计者能够优化 PA 以降低功耗，同时最大限度地提高输出功率，实现高线性度。

了解 GaN Doherty PA 和数字预失真

通过利用一些创新型射频系统，如 5G 基站，我们可以提高 PA 输出水平、效率和线性度。为了一次性地有效地获得这三个参数，使用 DPD 是有益的。DPD 还可以最小化带外 PA 失真。

许多 GaN PA 使用 Doherty 配置来提高回退输出功率条件下的器件效率。通过使用 Doherty 配置，工程师可以最小化系统功耗，并获得 60% 或更高效率（在回退输出功率下），同时显著降低运行耗电量大的 PA 系统所需

的能量。使用 Doherty 时, DPD 至关重要。如图 3-4 中所示, 使用 DPD 和 Doherty 配置可实现更高效率和线性度。

高压 GaN 检查

对于有些应用来说, 获得最高输出功率至关重要。如前所述, PA 在接近饱和或峰值输出功率时效率最高。增加 GaN 晶体管的漏极电压可提高饱和条件下的功率输出。然而, 该技术可能适用于某些应用, 但并不适用于其他应用。

雷达就是高压 GaN 开拓新时代中的一个应用。雷达系统通常需要实现几百到千瓦的功率放大。它们通过组合多个固态功率晶体管或使用 TWTA 来实现千瓦级放大。

通过使用更高的工作电压, GaN 技术可以用比其他技术更少的晶体管来实现这些输出功率水平。例如, 在 65 V 工作电压下, GaN 可以在保持较低散热要求的情况下实现千瓦放大。此外, 与其他技术相比, 它外形更小巧, 并且可以使用更少的晶体管更可靠地实现敌我识别和距离测量的军事目标参数。

作为附加好处, 高电压 GaN 可降低设计复杂性, 因为它需要更少的晶体管来实现高功率水平。这些高电压、高功率晶体管的效率也很高, 在某些情况下可实现 70% 至 80% 的效率。

下面是高电压 GaN 的一些关键优势:

- » **高功率密度:** 它可减少晶体管数量, 以及整体组件大小和重量。
- » **更低功耗:** 它可以减少系统级电流损耗和对电源的需求。
- » **更简单的匹配能力:** 可在保持可用输出阻抗的同时, 提高输出功率。

如今，GaN 被设计为 28-32、48-50 或 65 V 漏极偏置（见图 2-2），但我们正在为新市场和现有市场探索更高的电压范围，以便在系统中实现进一步的性能提升。

- » 审视 GaN 的军事、航天和商业应用
- » 评估阵列元件数量和工艺技术之间的权衡
- » 展望 GaN 的未来应用

第 4 章

了解 GaN 如何改变市场

本

行业。

章将探讨如何将氮化镓 (GaN) 用于现有的和新的军事、航天和商业应用中。随着技术进步, GaN 越来越受工程师的青睐。在本章, 我们将深入了解 GaN 有望处于领先地位的一些新应用和

审视 GaN 在军事和航天领域的的应用

当今的许多航天和国防系统都需要高度可靠、坚固耐用的射频 (RF) 输出功率水平达到千瓦 (kW) 的组件。过去, 许多系统都依赖于真空管技术来产生 kW 级功率。但随着高功率半导体的发展, 一些应用的系统设计已经开始采用固态功率放大器 (SSPA)。SSPA 最初是以横向扩散金属氧化物半导体 (LDMOS) 或砷化镓 (GaAs) 为基础, 但现在这些系统开始使用 GaN, 这使它们更可靠、更坚固耐用, 并支持更宽的带宽。

军事卫星

当今的军事卫星软件定义无线电架构可实现持续的安全通信，达到战术领域的优势。除了提供控制和接口功能的地面网络之外，卫星通信网络还包括用户终端和卫星。从射频微波角度来看，卫星终端有几个组件可以实现连接。



记住

与过去相比，如今的卫星网络系统能够以更快的速度传输大量数据、视频和语音。它们可以在多个信道上快速安全地进行无线连接，并在复杂的通信环境和较宽的频谱范围内运行。由于 GaN 比其他半导体技术更可靠、功率更高且更坚固耐用，随着制造商开始从行波管放大器 (TWTA) 和 GaAs 技术转向 GaN 技术，GaN 在这些系统中发挥着越来越重要的作用。

几年来，军事和航空卫星网络市场发生了与之相关的巨变。随着功率密度的增加，GaN 使固态单芯片微波集成电路 (MMIC) 的组合达到了以前只有 TWTA 才能实现的功率水平。例如 Qorvo 的 Spatium，它采用已获专利的空间组合技术来提高射频功率、高效率 and 宽带工作频率。

Spatium 采用宽带对极鳍线天线向 / 从超大的同轴波导发射，分裂成多个微带电路。

这种 SSPA 解决方案也已经在商业和军事雷达、电子战 (EW)、卫星通信以及测试和测量市场领域占有一席之地。这一市场接受度归功于 SSPA 的优势，包括固态可靠性的提高、电压电源要求的降低、噪声系数的降低、能源成本的降低以及即时导通能力，所有这些都降低系统总拥有成本。

雷达

随着频谱获得越来越困难，处理军事通信中涉及的海量数据的挑战也在加剧。优化频谱使用需要采用更复杂的调制机制和有源电子扫描阵列 (AESA) 架构。为支持这些发展趋势，卫星网络中的射频前端 (RFFE) 将越来越多地利用 GaN 等高功率固态宽带技术。GaN 性能的持续提高有助于在 AESA 系统中提供高功率输出的解决方案。如今，这些 AESA 系统中使用的许多 PA 都采用高电压 GaN (参见第 2 和 3 章)。



记住

GaN 技术的主要优势可以归结为包括线性度、功率、效率、可靠性、尺寸和重量在内的几个属性。在 AESE 系统中，可靠性极其重要，GaN 能够在更高信道温度条件下可靠运行。

新型雷达系统还要求产品具有更高的功率附加效率 (PAE)、更低的信道温度和更低的噪声系数。GaN MMIC 的高 PAE 意味着，在特定输出功率下功耗更低，散热要求更低，运行成本更低。

此外，在雷达平台中使用高增益、高 PEA GaN MMIC 可缩减整个系统的尺寸和成本。这有助于满足新型 AESA 雷达系统更严格的尺寸、重量、功率和成本 (SWaP-C) 要求。在必须实现重量和尺寸最小化的航空航天系统中，满足 SWaP-C 要求极其重要。

电子战

EW 包括用于提供保护、支持和电子攻击的防御系统，如军用无线电、通信干扰器和无人机 (UAV) 系统，用于陆基、空中和海军平台。EW 市场持续增长，并见证了巨大的技术进步和电子元件集成。

EW 应用需要采用具有宽带功率和效率、小尺寸和最小重量的电子元件。这些系统还必须在较高工作温度条件下运行，具有较高可靠性，并且能够在极其恶劣的环境下工作。因此，像 GaN 和 GaAs 这样的技术被广泛使用，而且在 EW 领域，我们继续见证了基于管的系统向固态 GaN 和 GaAs 技术过渡的过程。

结合 GaN MMIC 技术和 GaN 封装的进步，进一步加速了解决方案的交付，这些解决方案可提高带宽，缩小外形尺寸，提高散热性能，并为 EW 应用提供低成本塑料封装。随着承包商寻求开发更小巧、更宽带宽、更高容量、更低成本和更强大的 EW 解决方案，GaN 成为新技术的首选。

调查 GaN 在商业应用中的用途

与许多半导体技术一样，GaN 首次应用于军事和航空航天应用领域。但从早期开始，许多商业市场就已经采用这项技术，尤其是 5G 基础设施市场领域。

5G 基础设施

5G 迅速采用 GaN 的原因主要有三个：满足增加功率输出、更高工作频率和更低功耗的需求。由于 PA 在 5G RFFE 中消耗的能量最多，系统设计人员将重点放在提高放大器效率上。幸运的是，效率是 GaN 的关键属性之一。



记住

PA 可最有效地接近饱和。系统设计人员采用 Doherty 和数字失真来实现 5G 系统的线性度（见图 3-4）。

GaN 可将许多基础设施应用的能效提升至新高度。GaN 可降低系统功耗，从而节省运营商成本，使系统更“环保”。这些优势使 GaN 成为 5G 的焦点，尤其是在毫米波 (mmWave) 固定无线接入 (FWA) 和使用大规模多路输入 / 多路输出 (MIMO) 天线阵列的 5G 基站中（见图 4-1）。大规模

MIMO 天线在相控阵自适应技术中采用了波束成型技术，在不加剧小区间协调的设计复杂性的情况下提高容量。通过使用大规模 MIMO，可以形成波束，确保几乎在任何时候，单个波束只会支持一位用户。这可为每位用户提供其自己的无干扰、高容量的基站连接。

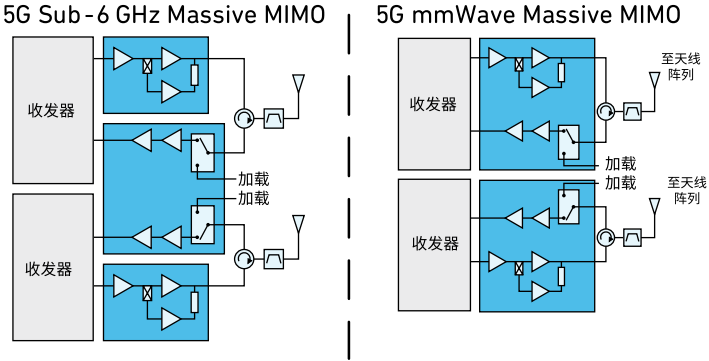


图 4-1：5G 大规模 MIMO 射频前端框图。

对于 FWA 来说，要达到其目标千兆速度，则必须实现非常高的输出功率。如图 4-2 中所示，高效 GaN Doherty PA 能够轻松满足 65 dBm 全向性辐射功率 (EIRP) 要求。

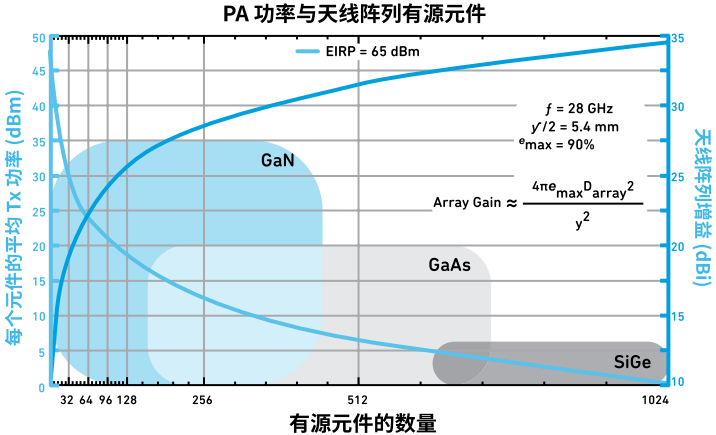


图 4-2：天线阵列元件数量和 RFFE 工艺技术之间的权衡。

GaN 具有较高的天线增益和较低的噪声系数，因为这些参数由波形成型增益确定。为了使用均匀矩形阵列实现 65 dBm EIRP，每个通道的 PA 功率输出将随着元件数量的增加而减少，如图 4-2 中所示。由于 GaN 每个信道的功率大于硅，所以使用 GaN 技术，天线阵列能够用更少的有源元件实现所需的功率输出。

有线宽带应用

多年来，GaN 在全球有线电视 (CATV) 技术进步中发挥了至关重要的作用。为支持对更高吞吐量的视频和宽带服务的需求，混合光纤同轴 (HFC) 网络运营商开始将光纤容量安装在其网络的更深层。HFC 可提供所需的功率放大，以缩短光纤到户 (FTTH) 节点和家庭或企业之间的距离。

选择 HFC 放大器时，线性度和效率是主要考虑因素，这就是为什么 GaN 是主要的技术选择。GaN 的高效性能可以实现更高的线性输出功率和较低的 DC 功耗。这样一来，有线电视设计人员就可以实现更宽的带宽和更高的数据速率，同时延长放大器之间的距离，并最大限度地提高可靠性。

商业卫星

GaN 和 GaAs 为实现各种各样的商用卫星通信应用提供支持，例如 5G 回程、超高清电视传输、移动卫星通信、飞机乘客互联网接入，以及单人可携带的（便携式）终端。

卫星通信设备在全球通信生态系统和全球民众日常生活中发挥着重要作用，如图 4-3 中所示。它支持电信、天气监测、航空通信、海事应用和导航等各种广泛应用，并且应用领域仍在不断扩展。

随着小型卫星、便携设备和移动卫星通信设备的日益普及，对更紧凑、更轻便、功耗更低组件的需求也更加强烈。此外，这些 RFFE 组件需要应对更高的带宽和数据吞吐量，以支持 5G、超高清电视和不间断安全通信等技术的进步。除此以外，还面临着降低开发成本、提高可靠性的压力。



图 4-3：卫星通信市场领域中的 GaN。

这些趋势就是制造商从基于管的系统向支持更高数据吞吐量和更小尺寸的固态设备（如 GaN）转变的原因所在。在商业卫星通信应用领域，GaN 具备显著的高功率放大优势。此外，GaN 支持卫星通信中使用的高频波段，如 X、Ku、K 和 Ka 波段。

正如军用和航空航天卫星应用开始放弃使用 TWTA 一样，商业卫星解决方案也正在经历同样的转变。这种转变是由 MMIC 或空间组合产品（如 Qorvo 的 Spatium）中使用的固态 GaN 驱动的，这些产品具有即时导通能力、所需的低电压轨、更低的噪声系数和更高的可靠性。

展望 GaN 的美好未来

GaN 才刚刚开始一段漫长而富有成效的旅程。尽管近年来已经取得了长足进步，但与硅或 GaAs 相比，GaN 仍是一项相对年轻的技术。随着 GaN 技术的不断发展，GaN 在新的和现有的应用领域中越来越受欢迎。

随着 GaN 广泛应用于各种射频应用领域，其市场增长将继续加速。军事雷达、电子战和无线通信应用的需求是其增长的主要推动因素。但由于 GaN 具有许多系统级优势，越来越多的现有应用和新应用开始使用 GaN。以下是其中一些应用：

数据中心

由于云计算的大规模发展，数据中心也在不断扩展。这些数据中心会消耗大量的能源，因此降低能耗是当务之急。通常在数据中心，干线电压是分

步骤进行转换的：首先，从 48 V 转换到 12 V，然后从 12 V 转换到低至 1 V。由于 GaN 具有较高的开关速度、小巧外形和高效率，数据中心设计人员可以使用 GaN DC 功率晶体管直接从 48 V 转换到 1 V。这种直接转换能力可节省能源，并减少复杂性。

汽车

电动汽车 (EV) 使用 GaN DC 功率晶体管的方式有许多。功率密度更高的电池、效率更高的电机和车载充电器的组合有助于减少车辆质量，从而实现更大的行驶里程。EV 系统开发人员开始用 GaN 取代硅晶体管，以满足更高效、更快速和更高功率系统的增长趋势。GaN 具有更快的开关速度和热管理性能，从而可为 EV 提供外形更小巧、成本更低、散热性能更出色的解决方案。

无线充电

无线充电开始扩展到智能手机应用领域之外，且即将在我们的家庭中普及。此外，无线充电也开始集成到汽车和医疗设备中。这些应用均使用 GaN 晶体管。

电源适配器

多年来，硅开关技术的改进实现了直流电源设计的许多进步。然而，硅即将达到其物理极限。因为 GaN DC 功率晶体管的启动速度比硅更快速，所以它们能够减少损耗，同时提高开关速度。因此，制造商们希望 GaN 能够帮助设计人员实现尺寸减小、效率提高和功率增加等改进。

医学

医疗设备制造商开始在 X 光机和磁共振成像 (MRI) 机中使用 GaN 技术。使用 GaN 不仅可以缩小尺寸，还具有其他优势。使用 GaN 的 MRI 机的分辨率可以提高 10 到 100 倍，使医疗专业人员能够以更低成本更早且更准确地发现癌症和其他疾病。

高能射频也开始出现在用于治疗恶性肿瘤的射频消融 (RFA) 设备中。在这种方法中,可在超声波、MRI 或 计算机断层扫描 (CT) 的引导下将 RFA 探针插入肿瘤中。利用高频电流,这种探针会产生极高的温度,从而杀死特定区域内的肿瘤细胞。死亡的细胞不会被移除,而是变成疤痕组织随着时间的推移而萎缩。

无线手持设备

GaN 在军用 EW 手持无线电中的应用已有许多年的历史。它可提供在恶劣的军事环境下所需的功率、高频、宽带宽和可靠性。随着 5G 和 mmWave 的出现,如今电信运营商需采用一种能在商用手持设备上实现一些相同功能的技术,包括高频段操作、大带宽和大数据容量。如今,我们可以使用 GaN 来满足这些组合需求。

科学应用

GaN 开始帮助推进用于研究、集成电路制造和其他前沿应用(如 5G 测试和测量)的技术。例如,它开始用于粒子加速器和化学气相沉积 (CVD) 系统之中。

CVD 是一项生产高质量固体薄膜和涂层的技术,与使用物理气相沉积技术的蒸发和溅射方法相比,它更具优势。用于合规前测试和故障排除的电磁兼容性 (EMC) 测试设备部署的 GaN 可提供高功率和宽带宽,以满足 5G 产品认证需求。

航空应用

在航空应用领域,GaN 的低功耗、小尺寸、高功率、高可靠性和耐辐射性都极其重要。与其他需采取特殊屏蔽措施的技术不同,GaN 对辐射的天然免疫力使其成为应对恶劣航空环境的最佳技术。

- » 总结了 GaN 技术及其优点的最重要事实
- » 了解 GaN 如何将军事和商业应用提升至新高度
- » 设想 GaN 的未来发展

第 5 章

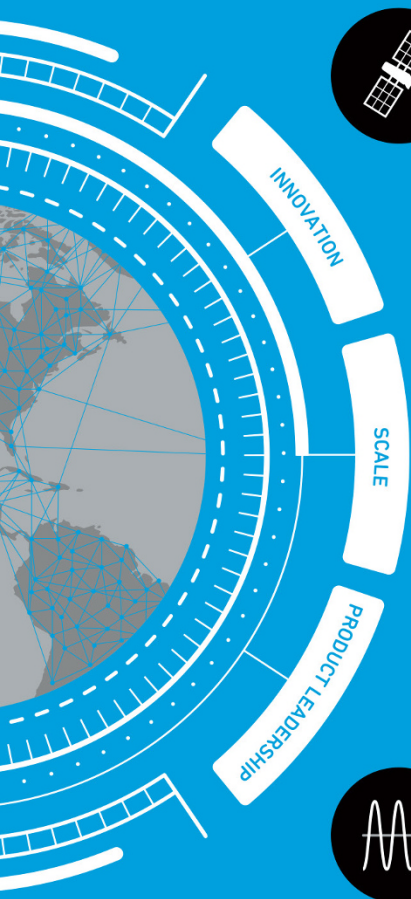
十大关键点

没时间？那就从这里开始吧！这个快速列表概述了这本书的要点。阅读本章节要点，如果有您感兴趣的内容，可在之前章节中查看完整的阐述说明。

- » **氮化镓 (GaN) 是一种高性能化合物半导体。** GaN 是一种 III-V 直接带隙化合物半导体，就像砷化镓 (GaAs) 一样。化合物半导体可在许多微波射频 (RF) 应用领域中提供速度和功率的出色组合解决方案。
- » **GaN 可为射频应用带来独特的优势。** GaN 独特的材料属性可为射频系统提供高功率附加效率 (PAE)、高功率输出、小巧外形、宽带宽、热优势和坚固耐用等优势。
- » **许多商业、国防和航空系统都使用 GaN。** GaN 独特的优势支持许多新的和现有的应用，包括雷达、卫星通信、商业无线网络和有线电视。
- » **GaN 对 5G 至关重要。** 为满足 5G 对数千兆网速和超低延迟性能的要求，设备制造商开始在大规模多路输入 / 多路输出 (MIMO) 系统中部署高功率 GaN。
- » **GaN 可用于整个射频前端。** GaN 最初用于制造功率放大器 (PA)，但现在用于低噪声放大器 (LNA)、高功率开关和混频器。

- » **多种 GaN 工艺和封装选项支持不同的应用。** GaN 半导体制造商已经开发了多种工艺和封装选项，使系统设计人员能够更轻松找到适合其特定应用的分立元件、单芯片微波集成电路 (MMIC) 或模块。
- » **GaN 极其可靠，即使在恶劣的环境下亦是如此。** GaN 在 200°C 温度条件下，平均无故障时间 (MTTF) 超过 1000 万小时；在 225°C 温度条件下，MTTF 超过 100 万小时，比其他半导体技术更加可靠。
- » **GaN 可用于大批量生产应用。** 美国国防部 (DOD) 将 GaN 归类为最高级别制造成熟度 (MRL) (即 MRL 10) 的工艺，这意味着全速生产和精益生产实践已经就绪。
- » **GaN 正在开拓新市场。** 由于其独特的性能，GaN 开始扩展到许多新的领域，包括汽车、医疗系统和先进的科学应用。
- » **GaN 技术将继续发展。** 未来 GaN 技术和封装方面的创新将支持更高的频率、更高的电压，甚至更宽的带宽，从而进一步推动 GaN 的普及。

Are You Working With The Leader In GaN?



Space qualified,
highest level of reliability



Demonstrated MTTF reliability with
200°C/1 million hours



Tens of millions
GaN products shipped to date



#1 GaN-on-SiC supplier
in defense since 1998



4 GaN process nodes at **MRL 10**
using USAF MRA tool



Broadest portfolio range
DC-60 GHz

Join us at [Qorvo.com/design-hub](https://www.qorvo.com/design-hub) to explore:
Blogs | Videos | e-Books | Design tools | Tech docs

© 10-2021 Qorvo US, Inc. | QORVO is registered trademark of Qorvo US, Inc.

www.qorvo.com/gan
info-gan@qorvo.com

QORVO

探索 GaN 技术

GaN 是一项适用于各种大功率、高电压和高频应用的技术。其技术特性使之非常适合许多国防、商业和航空应用。尽管相对较新，但 GaN 已经存在了数十年。它最初用于国防领域，但如今许多市场都有它的身影，包括新的 5G 蜂窝和航空卫星应用。

GaN 在我们身边的许多科技产品中已占有一席之地。它可立即量产，并可用于航空和军事领域。这就是商界迅速采用该技术的原因。如今，GaN 可帮助工程师实现下一代设计构想。

本书内容：

- 了解 GaN 的独特材料属性
- 了解 GaN 在重要雷达应用中的使用
- 了解 GaN 在商业、军事和航空领域的使用
- 了解适合您应用的 GaN 工艺技术
- 了解 GaN 在当今和未来市场的发展情况

QORVO
all around you

Go to **Dummies.com**[™]
for videos, step-by-step photos,
how-to articles, or to shop!

ISBN: 978-1-119-86230-7
Not For Resale

for
dummies[®]
A Wiley Brand



WILEY END USER LICENSE AGREEMENT

Go to www.wiley.com/go/eula to access Wiley's ebook EULA.