挑战产业现状

Challenging the Status Quo

可配置的CMOS射频前端

Duncan Pilgrim，Peregrine 半导体公司

GaN商业化

Doug Carlson，MACOM 公司

编者按：目前行业发展正处在激动人心的时刻，多年来在市场上表现良好且曾带来重大变革的技术都在逐渐更新换代，开始被一些新技术慢慢取代。这些新技术不但性能与现有技术不相伯仲，同时还可极大地降低成本，更小的封装尺寸。

以往的 CMOS 功率放大器的性能还无法与 GaAs 功率放大器相媲美，但现在的 CMOS 已经以手持前端 PA 模块的形式实现了这一性能，即便是在 4G/LTE 应用中也是如此。相较 GaAs，CMOS 具有低成本、高集成度的优势，目前主要定位在市场规模巨大的手机前端市场。

一直以来，GaN 的效能都要优于 GaAs 功率放大器且足以挑战 LDMOS 功率放大器的地位，但较高的价格限制了其在一些高性能市场上的发展。而目前这一情形正在发生变化，行业内正致力于在 8 英寸硅基片上培育硅基氮化镓（GaN-on-Si）技术，并使用低成本塑料封装工艺来大幅降低技术成本，将其打造成为射频行业的主流解决方案。本刊选用了两家已准备好使用 CMOS 及 GaN 技术挑战行业现状的公司的文章来进行说明。

可配置的COMS射频前端

作者：Duncan Pilgrim Peregrine 半导体公司

CMOS 技术快速抢占了其可满足所需性能的所有市场。原因很明显——对 CMOS 技术的大力投资帮助扩大了其生产规模，促使工艺技术不断得以改善。当 CMOS 的性能与现有技术持平时，就成为了从现有技术向 CMOS 技术快速过渡的转折点。这一原理在射频行业来看其实很好理解，因为 CMOS 的不断发展总会对市场产生极大影响。

改变RFFE现状

2004 年，Peregrine 半导体公司推出其首个基于 CMOS 的手机天线开关。该产品以其高集成度和更小的封装尺寸的优势成功赢得了以尺寸为选择标准的产品市场份额。但遗憾的是，该款产品未能满足所有射频性能标准，尤其是现有 GaAs 开关的插入损耗问题。但

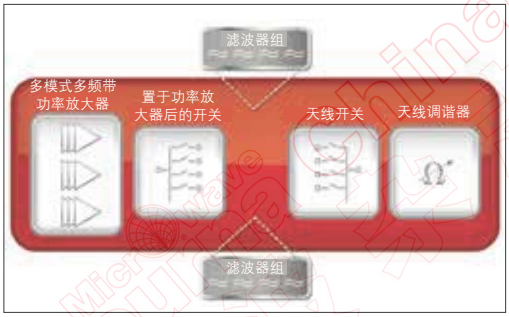

图 1. Peregrine 公司推出的 UltraCMOS Global 1 为首个可配置的 RFFE 系统。

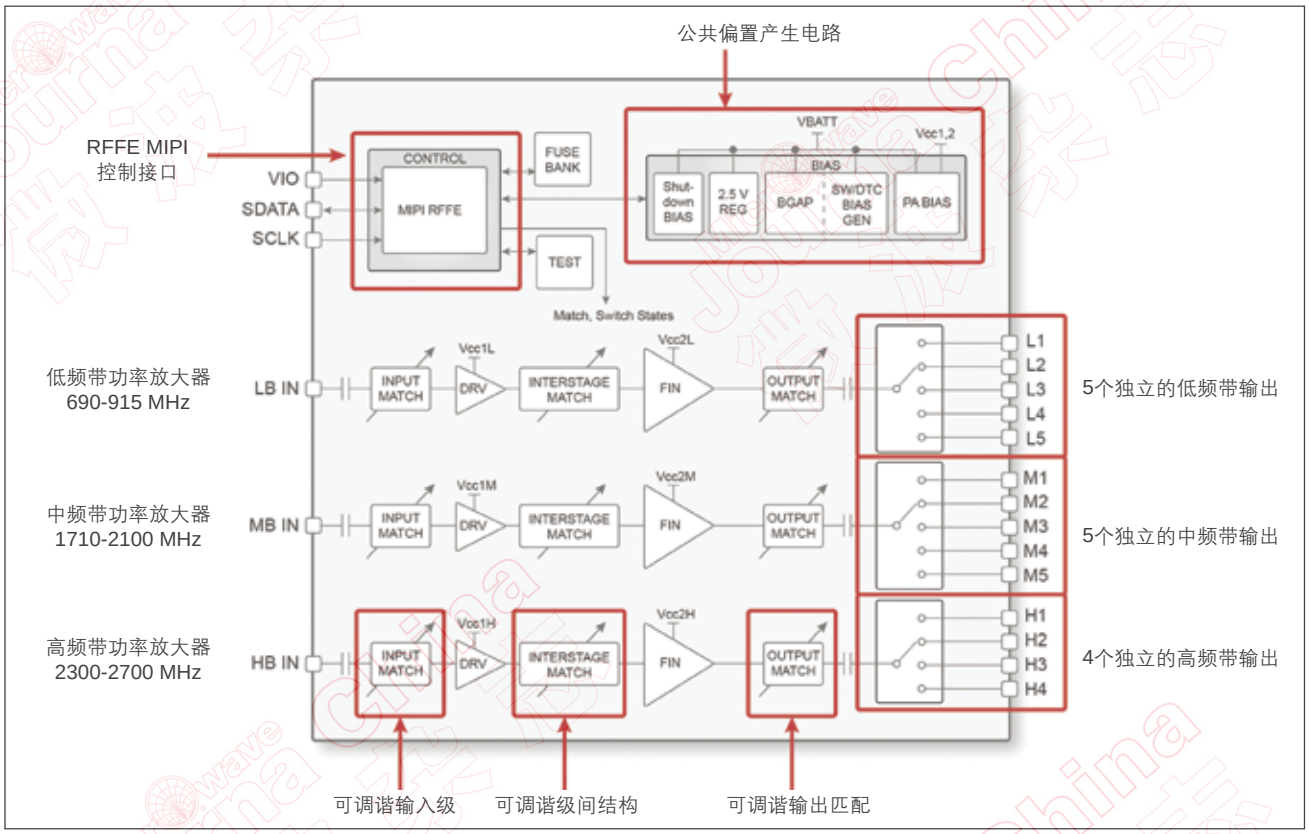

图 2. Peregrine 公司的 UltraCMOS Global 1 功率放大器性能可超越基于 GaAs 的 LTE 功率放大器，并可提供更多集成优势。

UltraCMOS 5 技术的面世为 GaAs 开关注入了新鲜动力，提供了包括集成度、尺寸、品质以及优质性能等诸多益处。$R_{ON}C_{OFF}$ 是比较开关装置性能的一个关键指标。理想状况下，若想实现 0 插入损耗，则开关的 R_{ON} 值应为 0；而若想实现无限带宽，则开关的 C_{OFF} 值也应为 0。应用 UltraCMOS 5 技术后，$R_{ON}C_{OFF}$ 可达到 253 fs，首次低于 GaAs 技术。此外，CMOS 技术具有很高的集成度和可媲美 GaAs 的性能，这样的组合所产生的优势从出货产品的数量就可以看出。第一批 10 亿个芯片上市花费了 10 年的时间，而随着 UltraCOMS 5 技术的问世，第二批 10 亿个芯片进入市场的时间还不到两年。现今，GaAs 天线开关供应商已转而选择使用 CMOS 技术，以保持其市场竞争力。随着 UltraCMOS 10 技术及 UltraCMOS Global 1 射频前端（RFFE）技术陆续于 2013 年和 2014 年推向市场，CMOS 性能实现了另一里程碑式飞跃，促使 CMOS 功率放大器的发展势头反超了 GaAs 功率放大器，即使在高端 LTE 智能手机市场亦是如此。

下一个转折点

UltraCMOS Global 1 是行业中第一个可配置 RFFE 系统，可满足 40 个以上 LTE 频段的需求，助力原始设备制造商（OEM）开发出适合全球所有移动设备市场的单一 SKU 产品，并为工程师们提供了可调谐特性，用来简化可能出现的 RFFE 状态数目增加 5000 倍以上的设计与测试复杂度。可配置 RFFE 基于射频绝缘硅（SOI）CMOS 技术，该项技术以 170 多个已申请及待申请的专利为基础，并具备卓越的生产制造能力，目前出货产品已有 20 多亿件。

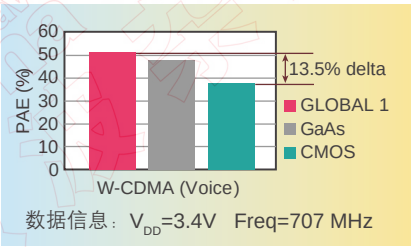

图 3. Global 1 功率放大器性能优于 GaAs，同时比现有 CMOS 功率放大器的性能要高 13.5%。

架构概述

这一集成式 RFFE 解决方案以 UltraCMOS 10 技术平台为基础，提供 100% CMOS 架构，可集成所有组件，包括（参见图 1）：

- 三路、多模式、多频带功率放大器
- 置于功率放大器后的开关
- 天线开关
- 天线调谐器
- 通用 RFFE MIPI 接口

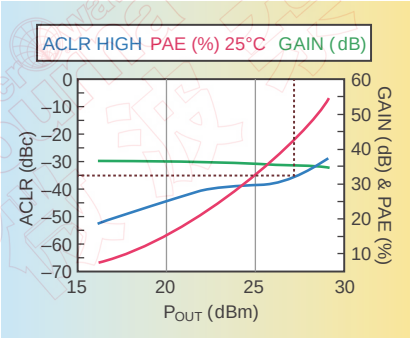

图 4. 这一实时性能测试显示出抬升曲线，其中红线表示 PAE，蓝线表示 ACLR。

Global 1 设计方案的一个主要因素就是 UltraCMOS 10 技术平台，这是与 GLOBAL FOUNDRIES 合作开发的 130nm 射频 SOI 技术。从 $R_{ON}C_{OFF}$ 参数来看，相比同类的射频 SOI 解决方案，该方案在性能方面提高了 50%。

各组件均支持 LTE 设备的高线性度、高隔离度及低损耗要求，并在系统中实现了紧密集成。优异性能与高集成度的完美结合极大地简化了设计过程，减少了高达 50% 的总 RFFE 应用尺寸。所有功能均通过通用 MIPI RFFE 1.0 接口来控制，很容易即可实现与平台销售商参考设计方案的集成。

支持技术

RFFE 能够达到并（在某些频带中）甚至超越基于 SOI、CMOS 及 GaAs 技术的现有相关产品的原始功率附加效率（PAE）。添加了包络跟踪及数字预失真（DPD）等支持技术后，可进一步提升该技术的性能优势。Global 1 旨在与所有参考设计平台实现完美集成，并可使用任何第三方滤波器及包络跟踪调制器，可根据参考设计的独特标准自由选择那些能够优化性能和 / 或降低成本的组件。

功率放大器

过去，GaAs 是唯一能够为 LTE 设备提供所需高性能的功率放大器。而经过 8 年不懈的研发努力，该技术成为可达到 GaAs 产品性能的首个 CMOS SOI 功率放大器之一。UltraCMOS Global 1 PA（参见图 2）是一个多模式、多频带功率放大器，可通过 MIPI 接口实现 3 个放大器路径（偏置生成与控制）的一体式集成。

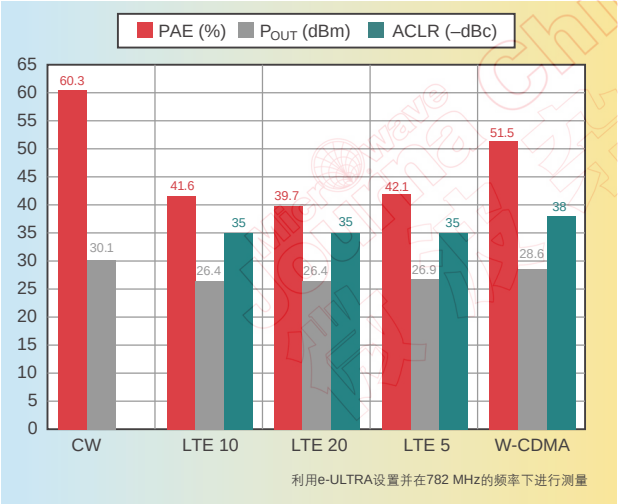

图 5. 在低频带，UltraCMOS Global 1 功率放大器在 W-CDMA、LTE5、LTE10 及 LTE20 波形下基本未出现性能下降。

在功率放大器所在的芯片上还集成了置于功率放大器后的开关，使功率放大器得以支持 5 个独特的低频带、5 个独特的中频带以及 4 个独特的高频带。功率放大器可支持的频率范围为 690~915 MHz（低频带），1710~2100 MHz（中频带）以及 2300~2700 MHz（高频带）。近年来，单一、高频带路径一直都是唯一的要求，且通过使用卫星功率放大器可非常经济有效地满足这一需求。而现在的设备必须能够支持多达四种不同的高频频带，因此，为支持在中国推出 TD-LTE 网络制式（频带 38、40）、在欧洲和中国香港推出 B7、在美国推出 B41 以及在其他地区推出其他频带，实现高频带集成会起到至关重要的作用。

功率放大器性能

功率放大器性能的标准行业指标为在相邻信道泄漏比（ACLR）为 -38 dBc 时使用 W-CDMA（语音）波形的 PAE。在这些情况下，低频带、多模式、单频带（MMSB）功率放大器的 PAE 性能超过了 50%（参见图 3），已经优于领先的 GaAs 功率放大器，高出其他 CMOS 功率放大器性能 13.5%。2 月发布的最初 Global 1 数据显示，Global 1 功率放大器的性能与 GaAs 功率放大器的性能在同一水平，超过其他 CMOS 功率放大器至少 10%。凭借不懈的产品开发努力，Peregrine 公司也在不断提高其产品性能，在某些频带中其产品性能已经超越了 GaAs 功率放大器。

该功率放大器并不仅限于 W-CDMA 网络。在 e-UTRA 测试条件下，图 4 显示了 782 MHz 情况下 25 资源块（RB）QPSK 信号的典型 LTE 抬升曲线。ACLR1 运行良好，该功率放大器旨在满足整个输入功率范围的要求。在 -35 dB ACLR 情况下，通过使用 782 MHz 下 25 资源块（RB）QPSK 信号，MMSB 功率放大器的 PAE 性能几乎可达 43%。这些曲线显示的性能结果与领先的 GaAs 功率放大器几可媲美。

图 5 数据显示，对于 LTE 波形，在资源块分配量高达 100 时，Global 1 功率放大器的 PAE 性能与当前的高端 GaAs 功率放大器相当。在中频带及高频带运行时也得到了同样的比较结果。CW 测试可展示当功率放大器

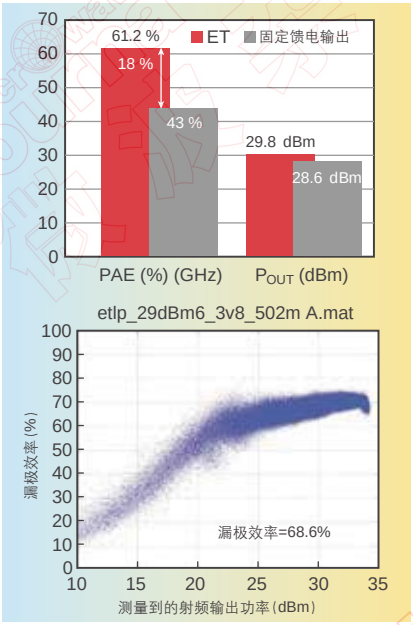

图 6. 当增加了 Nurija 公司的包络跟踪时，Global 1 功率放大器的 PAE 性能提升了 18%；输出功率增加了 4% 以上；漏极效率超过 68%。

达到饱和时的性能，同时能够看出当增加包络跟踪功能时功率放大器可能达到的性能水平。

增加包络跟踪技术

在满足线性度及噪音要求的同时实现包络跟踪的效能优势是一件已知极具挑战性的难题。但现在已涌现出许多能够满足所有需求的包络跟踪调制器。大部分调制器都拥有独特的架构，其对功率放大器的要求也都略有不同，但这些要求也存在一定的共同点，包括尽可能减少 AM-AM/AM-PM 的失真特性以及对较低漏极电压保持一致的增益响应。为了满足这些要求，需要对偏置结构及功率放大器架构进行精心设计。将偏置电路与功率放大器架构进行整合可加强对工艺、电压及温度（PVT）的控制，并减少这些因素的变化幅度。

正如基于 GaAs 的传统功率放大器那样，得益于包络跟踪技术的应用，UltraCMOS Global 1 功率放大器的性能得以改善。Peregrine 公司生产的功率放大器具有可配置性，从而可在所选包络跟踪解决方案的基础上对匹配度和偏置进行优化。同样地，该设计方案可支持多种包络跟踪调制器，使工程师在优化其参考设计方案时有了充分的选择空间。

例如，Peregrine 公司使用 Nurjira 推出的 NCT-L1300 包络跟踪器以及 UltraCMOS MMSB 功率放大器完成了测试。这一组合使 PAE 性能提高了 18% 以上（参见图 6），并使系统效率提高了超过 50%。这些测试结果是在使用 25 RB QPSK LTE 信号、频率为 780 MHz、峰均功率比达到 7.3dB、功率绝对值为 29.8dBm 以及 ACLR 为 -38dBc 的情况下获得的。此外，在测试时还采用了线性输出匹配，而且仅对最终馈电阶段进行调制。如果也对驱动器的馈电进行调制，并对这一匹配进行优化使之能够在饱和状态下运行，则有可能进一步提升性能。

功率放大器可配置性

借助可调谐式匹配以及广泛的偏置控制，可基于运行模式、功率及频率等对设备进行配置。由于设备需要支持的频带及运行模式的数量不断增加，RFFE 必须具备可配置性。例如，中国移动正在开发可支持十个频带及五种运行模式的手机，而据预计这一趋势将会继续发展。在所有这些运行模式、频带组合、功率级及其他因素的影响下，可能出现的状态也会越来越多。Peregrine 公司预测，RFFE 可能出现的状态将增长 5000 多倍。考虑到 Global 1 晶粒集成了 150 种不同的开关元件，而所有这些元件必须被控制并设定好线路。这一级别的控制和可配置性只能通过 CMOS 精密工艺才能够经济有效地实施。

支持多种频带

Global 1 基于 CMOS 的工艺不仅实现了低损耗开关、数字可调谐电容器、高 Q 值片上无源器件及控制电路的单片集成，而且还包括可优化负载线的可调谐匹配网络。这不仅使 RFFE 能灵活运用于各种频率，还能对运行的频带进行调谐和优化。

功率放大器各路径覆盖广泛的频率范围，并且在这一范围内，有多种 3GPP 频带，其中仅低频带的数量就有 11 个。目前，工程师可以通过两种方式在单个设备上支持多种频带。其中一种方式是在每个支持频带上设置一个功率放大器及一个双工器，这种方式可实现最佳性能，但由于需要占用较多空间，成本较高且具有局限性。第二种方式是使用多模式、多频带（MMMB）功率放大器，这种方式支持宽频运行；在低频带，支持的运行频率为 699MHz~915 MHz。但在使用 MMMB 功率放大器的情况下，工程师必须接受系统在整个频带范围运行时性能降低这一事实。GaAs 功率放大器可以在整个频带范围内尽量减少输出功率的降幅，但 PAE 曲线显示出显著下降。例如，PAE 在 900 MHz 频率下变得非常高，但在 700 MHz 频率下则会降低 10%~12%。有了 Peregrine 公司的完全可调谐功率放大器，工程师可优化所需运行频带的 ACLR、输出功率以及 PAE。

与双工器互连

传统的 MMMB 功率放大器的输出匹配（Z_O）是固定的，因此其不可能与所有类型的双工器完美匹配（如图 7 所示）。可以通过会影响所有其他线路性能的一条路径对该匹配进行优化，否则该匹配会降低系统在所有频带下运行时的性能。

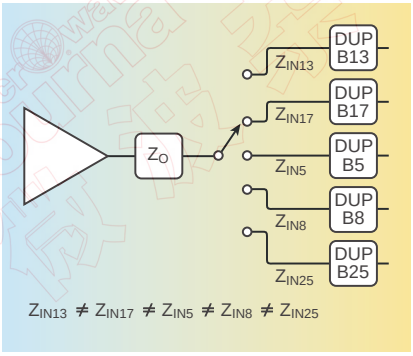

图 7. 在这一传统的 MMMB 功率放大器及双工器框图中，无法在功率放大器与所有双工器之间实现的最佳匹配。

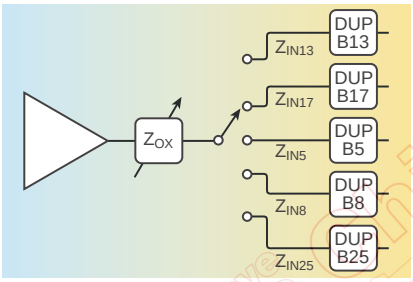

图 8. Global 1 集成了可调谐的输出匹配，可优化所有路径的性能。

功率放大器及双工器之间的错配可能导致产生几十分之几 dB 的插入损耗，相当于 PAE 减少几个百分点。这是单频带功率放大器集成双工器（PAiD）模块取得成功的主要因素，被代工工厂广泛使用，以取得最佳性能。

可选择的替代方案为包括可调谐输出匹配（参见图 8）MMMB 功率放大器，可根据运行的频带进行调谐。这一功率放大器可基于具体频带优化 PAiD 模块通常可能出现的界面阻抗。

在阻抗调谐作用下，ZOX 可有效进行再调谐，因此 MMMB 功率放大器输出可与在各频带下双工器的输入阻抗匹配。

$Z_{013}=Z_{IN13}$；$Z_{017}=Z_{IN17}$；$Z_{05}=Z_{IN5}$；$Z_{08}=Z_{IN8}$ & $Z_{025}=Z_{IN25}$

这一可调谐性可使设备轻松地与市场上所有的滤波器产品共用，但会将降低解决方案其余部分与滤波器元件共同封装的优势。此外，Global 1 支持外部滤波器，并可轻松配置，以支持不同频带及组合。

可配置性

可调谐功率放大器可帮助工程师在尽可能防止性能下降的情况下实现多频带运行，并可带来诸多好处，包括：

- 去除生产公差
- 温度补偿，减少温度变化幅度
- 优化不同模式及功率级
- 针对包络追踪或平均功率追踪的再调谐进行匹配
- 补偿功率放大器及双工器、天线或甚至 PCB 布局变化之间的错配

RF 设计工程师将从 UltraCMOS Global 1 系统中获得最大受益，因为该系统可大幅减少所需的工程和验证时间。平台提供商可开发单一参考平台，减少参考设计开发成本及验证时间。可对运行频率进行电子调谐的能力意味着，一直以来通过手动调谐才能实现的“最佳”性能目前在一夜之间通过运行优化程序就可以实现。根据产品的功能设置以及形状因素，代工工厂可快速优化参考设计。这可减少研发成本，加快上市时间，简化供应链以及改善库存管理。消费者可享受更长的电池续航时间、更好的接收情况、更快的数据速率以及更广的漫游范围。

总结

这样的新技术为什么会在当前出现呢？只要看看 ABI 发表的研发报告《连接未来世界：2014 年及 2015 年预测》，就可以对 LTE 市场情况窥见一斑。该报告称，2014 年 LTE 用户数量达到 3.752 亿，且这一数字在 2015 年将增长 60% 以上，达到 5.889 亿。此外，2014 年 4G 移动网络数据吞吐量将翻番，达到 12.4 艾字节。这些需求对 RFFE 性能的要求是前所未有的，因此需要市场发生真正的转变。

历史证明，真正的创新和发展是挑战常规模式的结果。为迎接这一挑战，Peregrine 公司已借助其先进的 CMOS 平台以及 25 年 RF 专业技术开发出完全可配置的 RFFE。2014 年 2 月，该公司推出了组成该完整系统的最后一个元件（LTE 级别的 CMOS 功率放大器），其性能超越了 GaAs 功率放大器，并具备可重新配置的特性，使单个全局性 SKU 就可以支持 40 多个 LTE 频带及 5000 多种 RF 状态。这类系统具有更大的灵活性，并可帮助 RF 工程师满足下一波全球移动设备创新要求。

GaN商业化

作者：Doug Carlson MACOM 公司

GaN 技术的性能优势已经被当今的射频微波业界熟知。GaN 的功率密度是 GaAs 和 LDMOS 技术的 8 倍之多，还可用于更高频率的器件。GaN 技术在获得宽带宽的同时保持高效率。它还在功率开关和 LNA 应用中显示出良好的性能。

GaN 技术的发展主要由政府基金和研发机构支持。碳化硅（SiC）基片的 GaN 已经被成功应用于军事领域如宽带电子战干扰机和雷达系统，而硅（Si）基片的 GaN 则被用于军事通信。这些应用为 GaN 进入包括 CATV，移动基站和其它应用在内的商业市场打开了大门，而且我们看到 GaN 现在已经初步渗入到这些市场了。

为了应对这些的商业应用各不相同的性价比要求，GaN 仍将被分为两种不同类型：SiC 基 GaN 用于专门的高性能应用，而 Si 基 GaN 用于成本敏感的大批量应用。MACOM 公司对

这两种 GaN 进行了评估，因为它们占了基于 SiC 和 Si 基片的脉冲和连续波产品的大部分市场。在器件级来看，GaN/Si 和 GaN/SiC 的性能本质上完全一样（见表 1）。

GaN 技术正在开发它的潜力——它被主流应用所选择的关键是解决技术和成本两个挑战。技术层面上，MACOM 最近验证了用于重要商业应用的器件性能（例如见图 9），证明了 Si 基 GaN 是取代当前 Si 基解决方案的下一代 RF 功率技术的首选。与硅基生产技术和相应成本结构相比，Si 基 SiC 已经具有很好的输出功率、效率、增益、带宽和工作电压性能，证明其在 RF 工业中的革命性意义。

除了提供引人注目的性能外，Si 基 GaN 还具有器件可靠性。在三温度加速寿命测试中，MACOM 公司的 Si 基 GaN HEMT 工艺在 28V 和 48V 偏置时都显示了的良好的可靠性。以 IDSS 改变 20% 作为故障标准，寿命测试得到的结果是，在 200℃ 结温度和激活能量 2.2eV 的条件下平均无故障工作时间为 1×10^6 小时（见图 10）。

有待深入

今天，我们仅仅处在 GaN 市场渗透和选择的最开端。根据 ABI 研究报告（氮化镓射频功率器件（MD-GAN-106），2013 年 9 月 24 日），GaN 在 2013 年的市场营收为 1.886 亿美元，表明 GaN 技术至今仅渗透了不到 2% 的大约 95 亿美元的整个模拟半导体市场。考虑到 GaN 的大力推广，尤其是 GaN 对射频微波市场的潜在影响，如此小的市场渗透也许有点让人意外。有这样一种说法，没有一种 GaN 的模拟部件会表现出较差的性能。如果 GaN 生产成本与当前主流技术相当，它将对模拟领域产生剧烈的影响。

为了推动 GaN 被主流市场所认可，会涉及一系列的关键需求点，很大一部分要从成本方面去驱动，另一部分则是关于供应商如何让客户即系统设计师接触这一新兴技术。在实际考量中，有一项值得留意的是任何新技术都必须解决一个当前技术无法解决的技术问题。从这方面看，GaN 之类的新技术没有取代旧技术，而只是为下一代创新增加能力，提高性能。系统工程师和 GaN 供应商等需要明白 GaN 在其中所处的地位。

另一需要重点考量的方面是应用支持。一般来说，系统工程师毕竟不是半导体技术和功能的专家。这意味着供应商不仅需要列出产品参数，而且需要提供合适的系统和应用层信息，以帮助设计者开发出能具有 GaN 全部优点的更好产品。

这些挑战能被设计者和供应商智慧联合起来迅速地克服。如今 GaN 主流选择和商业化最大的阻碍其实是供应链。

整个供应链的效率

GaN 的供应链可分为基于 SiC 衬底和 Si 衬底的两种，它们的区别在于对不同的目标应用所对应的不同价格和性能参数。这并不奇怪，他们的供应链也看上去大不一样。在射频微波领域，作为唯一能同时提供基于 SiC 衬底的和基于 Si 衬底的 GaN 产品的公司，MACOM 在两者上都有很好规划。

基于 SiC 衬底的 GaN 会比基于 Si 衬底的提供更优秀的热性能，所以是高功率密度应用的理想选择。基于 SiC 衬底 GaN 器件的供应商在他们早期的努力中已经获得可观的成功——特别是电子战领域——而且基于 SiC 衬底的 GaN 仍将作为看重功率密度的应用不二选择。但是生产 SiC 所伴随的高成本使得这个市场仅能由少数高混合、低批量的晶圆厂来提供服务。

通过对比，目前 Si 工业的生产规模巨大，产量是 SiC 的 2000 倍。因为 Si 的生长速度是 SiC 的 200 倍（或更高），生产所需能源小得多，且资金设备利用率高得多。这从根本上得到了比基于 SiC 衬底的 GaN 更低的成本结构。而碳是工业大规模应用历史短的相对较新的材料，Si 得益于超过 60 年的工业化和发展，大概是地球上最为技术工程化的材料。因此基于 SiC 衬底的 GaN 供应链具有极大的成本优势。

至于 GaN 外延技术的成本则直接与外延层在基片上的厚度相关。对 Si 衬底和 SiC 衬底的两种器件，外延

表 1.
GaN/Si 和 GaN/SiC 性能对比

2GHz时栅长0.5 um	Si基 GaN	SiC基 GaN
功率密度(W/mm)	7	7
增益(dB)	17.5	15
效率(%)	> 70	> 65

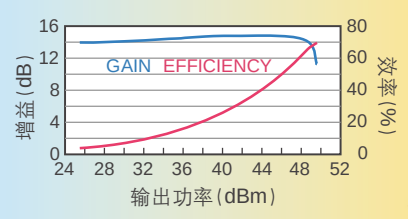

图 9. Si 基 GaN 性能示例，器件在 2.7GHz 时功率达 100W，漏源电压 48V。

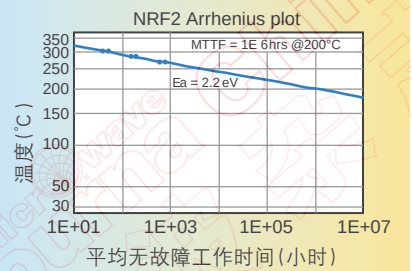

图 10. 硅基 GaN 的三温度工作寿命测试结果。

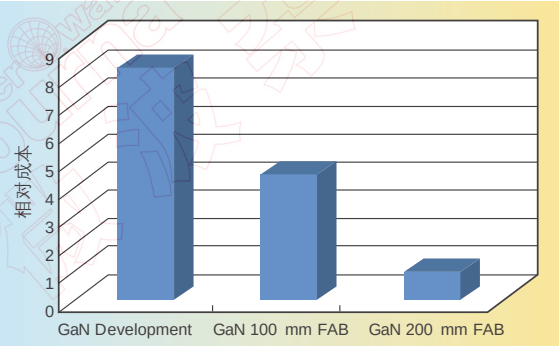

图 11. 生产 GaN 器件的成本对比。

层厚度本质上一样，因此相关的外延成本也大约相等。

工艺规则

SiC 基 GaN 主要以相对低批量的 3 英寸和 100mm 复合半导体晶圆厂生产。至今复合半导体主要的大批量应用一直是移动手持设备，由于前面讨论的成本效率，如今已受到来自 CMOS 得挑战。SiC 基 GaN 还没有可行的方案用于大直径、大批量生产设备，不能将成本控制在消费品市场可接受的范围。

另一方面，Si 可以允许供应商采用更大直径的晶圆，其典型每周产量大于 5000 个 8 英寸的晶圆。这种 CMOS 工艺控制的典型生产线良品率高于 98%。由于 CMOS 所处终端市场极高的产量，平衡产量和成本变化非常关键，这种操作标准在 III-V 族工业则不可行。

市场完全成熟后，Si 基 GaN 在主流硅晶圆工厂的成本可从目前 SiC 基成本大幅降低。如图 11 所示，GaN 用小直径晶圆厂生产改用到 200mm 硅晶圆厂可以减小几乎 10 倍的成本。此成本优势可以通过超高产量的 CMOS 设备被进一步扩大，未来能减小 100 倍的总成本。

为实现 8 英寸的产量，RF 应用中基于 Si 基 GaN 需求会被 DC 功率市场所驱动而会大大增加，这个市场可以是 10 倍于 RF 微波市场，超过 95% 的 GaN 芯片产量就会导向至 Si 基的 GaN，DC 功率和 RF 领域就可能可以由相同的 8 英寸硅晶圆工厂提供。

为了完全实现 GaN 的商业化，还必须在整个供应链中选择有保障的供应商，他们应该具有稳定性和抗压性——以及更不用说的经济效率。双资源支持是大批量、风险规避的关键要求。

先进封装

GaN 供应链优化会被工艺效率和客户需求同时促进，它们的结合会使所有相关者从根本上获得巨大的成本缩减。生产效率的提升推动着降低生产制造和产品中的成本，从而推动着大批量要求。但微波射频领域的系统设计者已经看到以前的技术部署的进步，当然不会对这些动态陌生。

大量的用于终端应用的封装选择是另一个产品或解决方案被考虑的关键点和重要因素。技术发展已经使有机塑料封装成为射频、微波和毫米波应用的选择，拓展了塑料封装的功能和频率性能。近期，MACOM 已经专注在高功率应用中引入表贴塑料封装技术。塑料封装的高功率 GaN 使设计者可以使用传统的表贴装配方式，从而可以减小系统尺寸和重量。这样，选择塑料封装的 GaN 不仅有利于系统生产成本减小，同时有利于与大批量塑料封装相关的测试效率。塑料 GaN 器件的到来给予系统设计师新的设计灵活度，与传统封装器件相比塑封器件能达到 90W 的功率而且降低尺寸和重量（见图 12）。

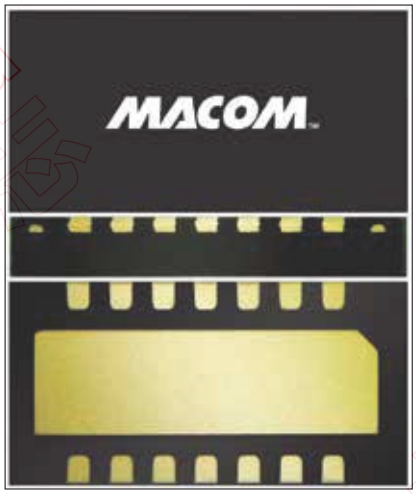

图 12. 用于 GaN 器件的典型塑料 DFN 封装（3×6mm）。

在严酷的工作环境条件下，陶瓷的气密封装的仍然重要的选项。陶瓷封装 GaN 器件还能比目前的塑封器件拥有更大的的输出功率能力。

当考量陶瓷和塑料封装 GaN 功率器件的性价比和适用性时，产品寿命目标是一个重要的决定性因素。军用雷达系统设计师比多数消费产品设计师对环境可靠性有更高的期望。如果系统需要极高可靠性而在很长时期内无需保养，且通常对成本的压力比商用系统小，那么陶瓷 GaN 器件是一个理想的选择。

总结

SiC 基 GaN 非常适合高性能射频应用，而 Si 基 GaN 更适合大部分商业应用和一些成本敏感的军事应用，只要它能满足性能要求。当 Si 基 GaN 规模逐渐扩大而使用更大直径的 Si 晶圆时，它的成本结构将足够低乃至可以大范围取代很多用于各种应用中的当前技术。就像可以通过提高 Si 晶圆的批量来获得复合半导体的低成本结构一样，也可以通过提高封装和生产效率——也是由于硅的使用——来获得 GaN 技术的主流商业化。■