下一代功率器件：SiC 和 GaN 谁将笑傲江湖?

宽禁带电子器件取代硅基电子器件已经成为一种潮流，在电源、风力发电机、太阳能系统、混合动力电动汽车、电车、火车和工业机械等方面，宽禁带电子器件都展现出了良好的器件性能及应用前景。IMS Research(现已被 IHS 并购) 公司的 Richard Eden 对于宽禁带电子器件在各行业领域的应用前景及发展瓶颈进行了深入的研究，给出了详尽的描述。

硅基器件未来对于功率器件市场的掌控力将会面临的越来越大的压力。这一压力来自于两种宽禁带器件，一种是 SiC 材料，其在功率器件中的应用已超过 30 年。另一种是 GaN 材料，这一材料近来一直受投资机构的热捧，基于这种材料的蓝光及白光 LED 在高端消费领域已经获得广泛应用。首只 SiC 功率器件是诞生于 2001 年的 SiC 肖特基二极管。当时 SiC 材料被寄予厚望，人们希望它能够迅速成为制造高效率的功率器件的半导体材料。然而受 SiC 基衬底制备的高难度所限，SiC 材料体系没能够迅速成长起来。作为其竞争对手的 GaN 材料，则由于其具有极高的性价比，已经毫无争议的成为目前表现最优异的半导体材料。由于其在电压和温度性能方面相对 GaAs 具有压倒性的优势，其已经被用来制作射频功率放大器。由于 GaN 材料体系具有诸如能够在标准硅基板上生长外延层和制备低损耗的器件等明显优势和特点，其器件成本将会远远低于 SiC 材料体系。

IMS Research 是一家总部设在英国从事市场调研的公司，一直以来我们都在关注 SiC 和 GaN 功率器件的各种应用，并试图去评估其未来十年的发展趋势。本文将介绍这两种宽禁带材料在各个领域的广泛应用，包括电源系统中的功率因素校正器 (PFC)、不间断电源 (UPS)、混合动力和电动汽车、工业级电机驱动器、PV 逆变器、风力发电机和机车牵引器，等等。

对于 SiC 和 GaN 器件来说，它们的大规模应用具有相同的阻碍。要想取得较大的发展，它们的价格就必须降低到与硅基超级结场效应管 (MOSFET) 和硅基高压绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 接近的价格水平。人们寄希望于通过在大尺寸衬底上生长及提升材料质量等手段来实现这一可预期的目标。

其他对于 SiC 和 GaN 器件快速发展具有决定性作用的因素还包括：验证 SiC 和 GaN 晶体管和功率模块的长期使用可靠性所需要花费的时间，尤其是在需要长寿命材料的工业领域以及关乎健康和安全的应用领域；高质量的 SiC 材料和硅基 GaN 外延材料随着时间变化竞争力增加的情况；政府机构是否会在功率器件的节能效率方面立法或制定相关政策。供应 SiC 和 GaN 器件产品的功率半导体制造商数量的增加，所带来市场竞争力的提升同样也会驱动宽禁带器件不断拓宽市场应用领域，尤其是在高端应用领域更为明显。SiC 器件产品可以进军需要高工作电压 (1700V、2.5kV、3.3kV、4.5kV 及更高) 的高端应用领域，而 GaN 二极管和晶体管等产品可以做到工作电压 1200V 及以上的应用领域。

电源

电源系统中的功率因素校正器 (PFC) 是首先可以应用这两种宽禁带材料功率器件的产品。这项应用的长期赢家可能会是 GaN 材料。这一器件的典型工作电压是 600V 和 650V，而这已不再是消费品及办公设备上电源系统的主流工作电压。我们预计 GaN 二极管和晶体管等产品在这一工作条件下的成本低于 SiC 基的相同产品，甚至于最

终他们的价格会与硅基器件相当。工业级的三相电源用量要比 PFC 电源少，但他们要求 1200V 的额定电压，这一点 SiC 基器件很容易实现。

对于 PFC 电源当中的硬开关的电源供电系统 (PSU) 来说，SiC 和 GaN 开关体现出了实质性的优势，而对于软开关电路则不明显。他们对于功率转换效率的提升非常有限，大概只有 0.1%-1% 的水平。引入宽禁带电子器件的好处是可以大幅削减 PSU 的尺寸，使得功率密度的提升得以实现，这是由于在缓冲电路中可以使用数量更少、体积更小的次级组件。这些次级组件是因为采用了 SiC 和 GaN 器件，所以才能够具有更快的开关频率。

一些其他大型的电源，如不间断电源等，也在寻求构建 SiC 和 GaN 功率器件的产品体系。然而，在 UPS 当中应用的只是相对较小的 SiC 肖特基管，并不能反映宽禁带半导体的整体水平的提升。在我们看来，SiC 和 GaN 肖特基管在 UPS 上的应用潜力的确比较有限。我们预测，分立的 SiC 和 GaN 功率器件仅会在 5.1kVA 以下的单相 UPS 上应用，而 SiC 电源模块则可以应用到 5.1kVA 到 250kVA 的 UPS 系统当中。

高性能汽车当中的高性能电子器件

对于宽禁带功率器件来说，一个令人振奋的消息来源于混合动力和电动汽车市场。采用上述宽禁带功率器件可以增加逆变器的效率，增长车辆充电后的使用时间。

在混合动力及电动汽车应用上宽禁带器件有三个具有潜力的研究方向：仅在插电式混合动力汽车和电动汽车电池上使用的电源充电器；直流转直流电压转换系统；动力传动系统。在这些电子系统中使用宽禁带半导体材料可以提高功率密度，减小尺寸及重量。这一点是非常值得可取的，因为电动汽车空间紧凑，节省电子系统的空间就会给设计师们更多的自由空间。此外，减少车身重量可以增加车辆的加速性能及行驶范围。

在混合动力汽车 (HEV) 当中，如今的主流是硅功率器件并具有两个独立的冷却系统。这是因为安装在内燃机附近的逆变器需要维持比发动机更低的温度。如果用 SiC 器件取代硅基绝缘栅双极晶体管 (IGBT)，由于其具有更低的热容，同样可以使用相同的逆变器作为发动机外壳，并使用相同的冷却系统。

然而到目前为止，由于没有足够成熟的 SiC 开关技术能够与硅基器件甚至 SiC 肖特基二极管的可靠性相匹配。这将会延迟 SiC 器件在混合动力汽车当中的应用。由于具备相同的材料基础和基本结构，SiC 结型场效应管 (JFET) 可以作为匹配可靠性的优先选择。但是这些晶体管并不能主导市场，因为另一种 SiC 双极结型晶体管 (BJT) 同样具有市场竞争力，在寿命测试中具有良好的可靠性，更耐高温的温度循环系统，以及能够更耐振动和冲击。

从长远来看，GaN 二极管和晶体管在混合动力汽车当中的应用前景更被看好。这是由于其与相同性能的 SiC 器件相比更有价格上的优势。未来 GaN 分立器件可能不仅会在电池充电器上被应用，在动力传动系统的功率模块上也会被用到。同 SiC 器件一样，GaN 器件只有在达到汽车行业电子产品使用规范之后才会被广泛使用。

工业级电机驱动器

SiC 功率器件尤其是功率模块，最有可能应用到的是在工业级电机驱动器市场。在这一应用领域，SiC 功率器件可以用在工程自动化系统中驱动和控制工业电机的设备上。这种设备可以是单相或者三相；可以驱动直流，交流或者伺服电机；可以在变速及变频下运行。这种采用 SiC 功率器件的设备最大的好处是提升发动机驱动中的控制能力及效率。

采用 SiC 功率器件来取代硅工艺器件使得功率密度增加，这使得逆变器的尺寸重量和制冷系统都得以大大削减。然而这个市场是对于成本的敏感性很强，市场前景受价格与性能和尺寸联动的影响。为赢得市场，SiC 器件的价格必须降低到和硅基器件相当的水平。

附图说明：逆变器是用于将太阳能电池片输出的直流电转换为可以连上供电网络的交流电的形式。用SiC器件取代硅器件可以提升转换效率，带来更高的回报。

功率转换效率将会变得极其重要。作为与能源相关产品生态设计发展方向的需要，欧盟对于电动机最低效率制定了相关的法律，低压直流和交流驱动产品将会从中受益。从 2015 年开始，根据这一发展方向所制定的相关法律授权将会采用 IE3 节能标准发动机(超高效率)或者 IE2 节能标准发动机(高效率)以及相关的驱动器。现如今的大多数发动机符合 IE2 节能标准，我们相信大多数消费者会倾向于选择一种较便宜的方式，在现有的 IE2 标准的发动机当中增加一个驱动器，而不愿意买新的 IE3 节能发动机来替代现有的发动机。这会使得驱动器市场销量的迅速上升。

对于工业级电机驱动器的设计者们来说，长期工作状态下的稳定性是很重要的，这就要求其各部件具有优异的可靠性。对于 SiC 器件的可靠性来说还有很多悬而未决的问题。其必须在完成一系列特定的载荷循环，温度循环，寿命测试数据合格的情况下才能进行评估和导入量产。然而根据我们的预测，这一苛刻的审查将会顺利通过，并不存在较大的缺陷和纰漏。不久的将来，SiC 和 GaN 分立功率器件会被应用到单相驱动器上，而 SiC 功率模块会被应用在三相上。

SiC 和 GaN 器件在工业级电机驱动器上的应用还有两项重要的但并不明显的优点：一是开关频率的提升会降低发动机的噪声；二是可以为逆变器电路拓展到合并变压器创造条件，沿着这一技术路线，我们可以产生正弦波电压和电流输出，这可以大大减少射频电磁兼容性噪声。

增加光伏效率

各种光伏系统的制造商们挖空心思绞尽脑汁，唯一的目的就是希望能够不断增加光输出。采用 SiC 和 GaN 功率器件来取代硅基器件可以提升逆变器的转换效率，这或许能够对光伏效率的提升贡献一点微薄之力。即使仅能提高 0.5 个百分点也被认为是值得的，因为这意味着终端用户可以将更多的电卖给电力公司获取更大的经济收益。

因此，光伏逆变器成为第二大的 SiC 肖特基二极管需求市场，而光伏行业即将成为首个大规模采用的 SiC 晶体管的应用领域就不足为奇了。SiC 器件制作的逆变器的开关频率达到硅基逆变器的两到三倍，而尺寸仅为其一半大小。

尽管目前 600V 的 SiC 肖特基二极管的价格相对偏高，但它在微逆变器和串式逆变器方面将获得更大的市场份额。然而，在我们看来，这些器件最终会被更具有价格优势的 GaN 肖特基二极管所取代，一旦其可靠性被验证通过，将会很快进军微逆变器和串式逆变器并占领市场。

附图说明：工业级电机驱动器，如在大型木工机械当中，为SiC功率器件的应用提供了很好的机会。

对于晶体管，我们认为在 5kW 以下的微逆变器和串式逆变器应用当中，GaN 晶体管产品最终会取代 600V 高压场效应管 (MOSFET)。SiC 晶体管也同样会在某些市场领域取得进展，在 5kW 以上的单相串式逆变器应用中，SiC 晶体管会取代 900V 以及 1200V 的硅基绝缘栅双极晶体管 (IGBT)。我们也期待 SiC 功率模块能应用到 1200V 三相中央逆变器当中。

提升风能利用率

风力发电机是另一种能够从宽禁带功率器件当中获益的可再生能源。实验结果显示采用 SiC 功率器件取代硅基 IGBT 作为功率模块可以提升系统整体效率约为 1%。这种效率提升如果转化为成本收益，对于风电厂商来说，售价在 $1.5/MW-h 的电力能源可以节省 $1.5/MW-h。采用 SiC 功率器件还可以提升功率密度，使得电力转换系统设计更加小型化。

当然 SiC 功率模块的应用也存在几个重要的阻碍：高成本，可靠性问题，高额定电流产品缺乏可行性认证。现阶段的 SiC 功率模块的应用仅限于 30A 的最大额定电流，和在风力发电机目前使用的硅基 IGBT 具备 100-150A 的额定电流相比还相去甚远。

值得注意的是，分立的 SiC 功率器件不太可能会被应用到风力发电机上，这是由于功率切换就需要几十个这样的分立器件。可行的方案是整合六个或更多 SiC 功率器件到散热盒中做成功率

模块，并加入保护和控制电路等。

在绝大多数情况下，风力发电机需要 1700V 的功率模块，并工作在 690V 的三相电源电压下。这些发电机的叶片在不断被加长，以产生更多的电力。这就使得功率模块的制造商们也需要不断增加产品的工作电流，降低产品价格。我们认为这一趋势会阻碍 SiC 功率模块的引入，抑制其往这一领域的渗透发展。

对于风力发电机来说，同一些其他领域的应用相同，器件的可靠性也是至关重要的。单个模块的失效会引起整个风力发电机的功率转换器停止工作。而其导致的后果还与风力发电机所处位置有关。如果是在陆地上，电工可以在 24 小时内进行必要的修复。

但是如果是在海上，专业工程师需要利用服务船，在天气状况良好的情况下去进行维修。在冬天则无法去修复。海上的风力发电机往往规模更大，平均每年导致电力收入损失的故障数大约要比陆上风力电机高数千倍。

促进运输行业发展

在运输行业当中，三相 690V 电源是标配，因此大部分功率模块的额定电压都是 1700V。有一些甚至会更高，高达 6.5kV。通常电力牵引车辆上有两种逆变器，一种推进发动机驱动器的主逆变器和一种供电池充电用的辅助逆变器。两到三辆有轨电车大概会需要一个包含六个功率模块的逆变器，而内燃机车上则需要 60 个这样的功率模块。目前发动机推进器上的功率模块额定电流在 1200-1400A。目前市面上的 SiC 功率模块远没有达到这一性能指标。

电池系统遍布在整个火车上，功率控制系统、刹车、照明、供暖、通风和车厢内的所有电源插座。由于电池充电器上的额定电流及功率都比较低，其上所用的功率模块数量比推进器系统上的也要少。基于这一点，电池充电器上的逆变器将会是 SiC 功率模块的主要应用方面。

SiC 器件取代硅基器件会使得功率转换效率提升 1%。这会减少能量的消耗，提升转换速度。由于 SiC 器件具有更大的工作温度范围，制冷系统也会大大减小。除此之外，SiC 器件还可以提高开关频率，使得感应组件可以做的更小。所有这些提到的优势的最终结果是使得火车的重量大大减轻，驱动性能更强，尤其是起步加速阶段效

下转第34页

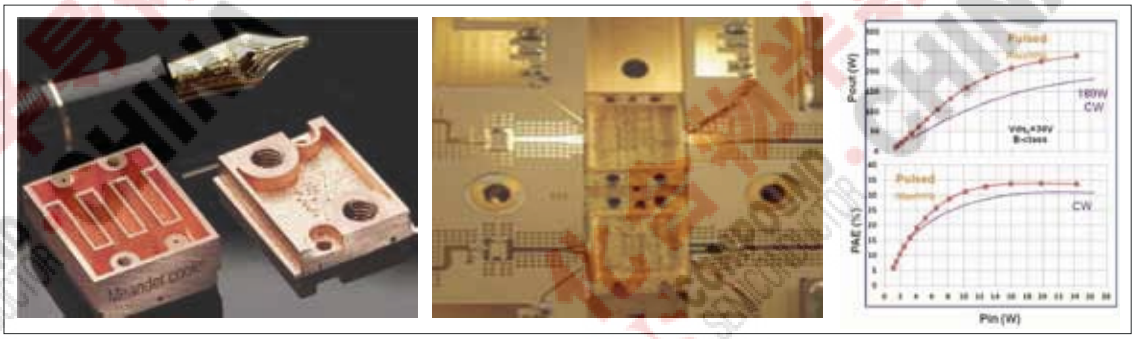

图10: (a)由三维加工制作的铜热交换器, (b)工作在200W L波段的InAlN/GaN HEMT器件的局部照片, (c)包含两个边长为36mm器件的放大器在2GHz下的输出功率和PAE，采用的是10μs脉冲和CW工作模式进行负荷周期的检测。上曲线: 输出功率; 下曲线: PAE。

件级别时 PAE 为 55%。这些令人吃惊的成果还只是 MORGaN 项目众多研究的亮点之一，但已经使 HEMT 器件在材料、传感器，微波器件和封装上得到了很大的改进。

本文只涉及了 MORGaN 项目中的几个具有重大突破意义的研究成果，更多详情请登陆 MORGaN 公共网站 http://www.morganproject.eu。CSC

扩展阅读

Europe turns to AlInN to push the limits of transistor and sensor performance, Compound Semiconductor Nov&Dec 2009, p.27

上接第28页

果会更为显著。这所带来的好处要远远大过降低逆变器尺寸或者体积，因为牵引机车对于空间的要求没有那么苛刻。相对而言，可以说发动机的噪声更加令人担忧，增加开关频率则可以很好的降噪。

SiC 器件要想能够有所作为，必须要做到，降低价格，消除可靠性方面的担忧，提高功率模块的额定电流，尤其是纯 SiC 器件的功率模块。过高的价格是最大的阻碍，并且价格要降低到到能够大规模应用将会是一个长期的过程，需要数年的时间。

其他应用领域

宽禁带器件还有一些其他的应用领域。高压 SiC 器件可以用在军事及航天工业，钻探和开采，医疗设备以及其他一些工业领域。与此同时，低压的 GaN 器件应用领域包括：电信和数据通信网络和服务器上的高端二次侧开关模式的电源，包括载荷端子的直流转换直流，以太网的电力供应以及其他诸如无线充电等未来具有增长潜质的新兴技术领域。

我们的观点是 SiC 功率器件最大的应用潜力是在军事以及航天工业上。在航空工业中，SiC 功率器件可以被用于航空器内的电力分配；低压端是 MOSFET，1200V 的硅 CMOSFET 可以被用来替换高压端的接触器。SiC 功率器件最大的好处是增加了功率密度，这会使得开关频率增加 5-10 倍，这样大小和重量都可以减少，器件也可以在更高温度下工作，冷却 / 散热器也相应减小，重量减轻。

GaN 器件也将会在一些应用领域大放异彩，这些领域主要是替代低压硅基 MOSFET 以及一些需要提升功率转换效率的领域。预期在大范围的直流 - 直流电源市场 GaN 器件很有市场：例如网络电源、载荷端子转换器、48V 电信电源装置、12V 或 48V 服务器电源、医疗设备和包括基于 LED 之类的各种形式的照明设备。

GaN 器件在一些其他领域也同样有市场前景。一旦宽禁带的低压 GaN 器件能够匹配硅基 MOSFET，那么它将在一些高端二次侧开关模式电源，如家用 / 商用电脑、笔记本和平板电脑等领域被广泛采用。此外，600V GaN 器件还可以应用在诸如电动自行车、主流驱动器和逆变器等方面。更重要的是，研究人员正在研究将 GaN 器件应用于太空及军事领域，这是因为 GaN 材料的固有辐射特性要优于硅。GaN 功率器件之所以备受瞩目，是大家期望她能够形成颠覆性的技术突破，在商业化上打败传统的硅工艺器件。这样的应用领域包括了无线充电、数字功率转换器和射频追踪装置等。

抢占市场份额

由于 SiC 和 GaN 功率器件在一系列领域的巨大潜力，这类器件的销售额增长速度已经超过了功率器件市场整体增长速度。尽管从去年来看宽禁带材料的销售额还不到整个功率半导体销售收入的 1%，但是我们可以预期，只要这类材料的成本控制持续下去，并且器件的长期可靠性得到验证，到 2021 年，这一市场的销售额将达到 30 亿美元——接近整个功率半导体市场份额的 9%。换句话说，未来十年这些器件在功率器件市场将会有数十倍的规模增长。CSC