欧洲正致力将氮化物 HEMT 器件提高到一个新的水平

首个在自支撑金刚石衬底上生长的 GaN 的 HEMT 器件、采用不同设计的 GaN 压力传感器、高性能的化学传感器，以及可以提供几百瓦功率的放大器，是欧洲在 MORGaN 项目诸多研究成果中的部分代表。来自 III-V 实验室的该项目负责人 Sylvain Delage 在此详细披露该项目的许多进展情况。

为了提升 HEMT 器件性能而进行的尝试和试验需要引入新型的、性能优越的材料组合，以提升氮化物器件的电学性能，先前传统采用的是 GaN 和 AlGaN 材料的配对组合。新引入的 InAlN 材料将会取代先前使用的 AlGaN 材料以减小应力、来提高器件的输出功率和其在高温下的工作性能。而且，由于 InAlN 材料具有更强的自发极化性，InAlN/GaN 异质结能产生两倍于其同类 $Al_{0.25}Ga_{0.75}N$/GaN 异质结的电荷密度，这将使得该器件具有更好的高频工作性能。此外，加上在改用金刚石衬底后还可以提升器件的热管理能力，将可进一步提升器件的工作性能。

诸如此类的研究进展已经在为期 3 年的、称之为“高性能 GaN 材料的研发（MORGaN）”的项目中得到了实现。该研究项目于 2008 年 11 月开始启动，由欧洲委员会拨款 9,200,000 欧元（约为 13, 000,000 美元）来对该项目进行资助，项目的参与者来自于欧洲 11 个国家的 23 家企业和研究机构（详见图 1）。

在对 GaN/InAlN 异质结抱有很大期望的 MORGaN 项目计划实施之前，一个称为 UltraGaN 的项目在 2005 年就已经展开。幸运的是这两个项目均取得了成功，使得 InAlN/GaN 异质结目前正在成为世界各大主要研究实验室所重点关注的对象，这是因为 InAlN/GaN 异质结在光电子和微电子应用中有着它特殊的优势。

MORGaN 项目的另一目标是研究和开发金刚石衬底的优异热性能及其理化性能。先前的目标涉及到开发新型的硅 / 多晶金刚石复合材料衬底，以及在晶圆上沉积纳米晶体金刚石来提升其散热能力。金刚石薄膜镀层还能起到对 GaN 膜层的保护作用，当采用金刚石这种宽禁带材料来制作可在腐蚀性很强的电化学溶液中使用的传感器时，金刚石的这种保护性能成为了它所拥有的最为主要功能和作用。

MORGaN 项目的特点之一是它对材料研发的关注，占全部一半以上的研究资源都被投入到衬底的开发、应变的管理、异质半导体的生长、难熔金属的研究、三维金属加工以及陶瓷封装等各种材料领域的问题。项目已经取得了很多成果：其中包括有欧洲首块 2 英寸的硅 / 多晶金刚石复合衬底；世界上首个生长在单晶金刚石上并能在微波波段下工作的 GaN 基 HEMT 器件；以及能在 3.5GHz 频率连续波下工作的、具有 6.6W/mm 输出功率和 70% 电源效率的 InAlN/GaN 基 HEMT 器件（详见“MORGaN”项目大事记方框栏）。

MORGaN 项目所取得的成功推动了许多方面的应用，例如：基于 InAlN HEMT 器件的大功率高效率放大器有望能减少消费类应用中移动通信基站和多种形式电力电子系统所产生的碳足迹。此外，已试制成功的压力传感器可以在高达 700℃ 温度下来测量几十 bar 的压力，这不仅有助于进行石油的勘探和太空的探索，而且还能对汽车和喷气式发动机的检测提供很大的帮助。最后，但同样也是重要的一点就是 MORGaN 项目开发出了令人难以置信的、具有高度稳定性的化学传感器，它可以在一个较大的 PH 动态范围内进行 PH 值的测量。

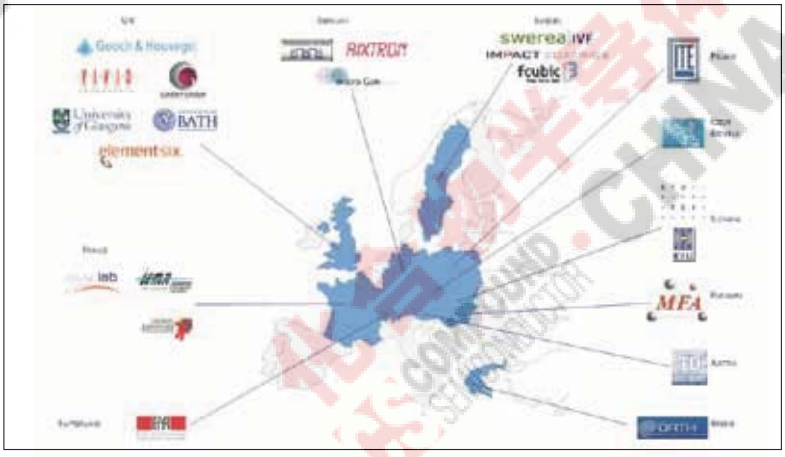


图1：欧洲委员会资助的MORGaN项目有来自欧洲11个国家的23个企业和研究机构参与合作。

MORGaN 项目大事记

- 欧洲首块2英寸硅/多晶金刚石复合衬底诞生。
- 首个能工作在微波波段的 HEMT 器件诞生，它的制作是采用了在单晶金刚石衬底上通过直接生长 GaN 异质结的方法。
- 自支撑外延蔓延生长 GaN 梁和悬臂。
- 首个涂覆纳米单晶金刚石层的 InAlN/GaN HEMT 器件诞生，其电流增益的截止频率为 20GHz。
- 具有 500 $Wm^{-1}K^{-1}$ 热导率的纳米单晶金刚石材料的顶部散热层诞生，表明在降低器件热阻时可以不影响其电性能。
- 首个能工作在 3.5GHz 频率的连续波下的 InAlN/GaN HEMT 器件诞生，它在 3.5GHz 频率下具有 6.6W/mm 输出功率和 70% 的电源效率。
- 能符合非线性电路的设计要求、且能提供 320W 输出功率的中等规模放大器的诞生。
- 新型高温 (800℃) 扩散阻挡层和金属化技术的开发。
- 能用于恶劣环境中使用的鼓膜制作技术，以及封装中悬臂梁传感器的嵌入技术。

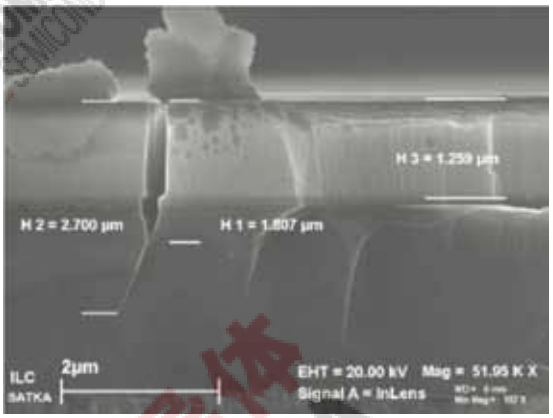


图2: 由拉伸应变所导致的、并终止于硅(111)层内部的裂纹(SEM照片)。

金刚石衬底

对具有超高热传导性能衬底材料进行研发的工艺平台中，其引领者是 Element Six 公司，该公司已经成功优化了在单晶金刚石衬底上直接生长 GaN 的工艺。尽管该衬底尺寸目前还相对较小，只有 4mm × 4mm 的大小，但其电学性能十分优秀。较大尺寸的衬底很可能会通过在硅上进行金刚石薄层沉积来制作，Element Six 公司采用这种方法已经能生产 2 英寸的自支撑晶圆，其结构特征是在 70µm 厚的多晶金刚石层上沉积 2µm 厚的硅 (111 晶向) 表面层。要进一步放大衬底的尺寸 (如 100mm) 将需要进行很多额外的工作。这种 2 英寸的多晶金刚石复合衬底所具有的一项重要特性就是其热导率可高达 1000 $Wm^{-1}K^{-1}$。

英国 Bath 大学的研究人员已经能在上述这种复杂的硅 (111)/ 多晶金刚石复合衬底上进行氮化物层的沉积，其技术亮点包括有可形成高质量、无裂纹的 AlN 和 GaN 层，其中 GaN 层的厚度为 350nm(图 2)。

EPEL、CH 和 FORTH 的工程师们采用了氨或 RF 源的 MBE 生长技术在单晶金刚石衬底上直接生长氮化物外延结构。该工艺是首先沉积一个 AlN 低温缓冲层，在沉积 800nm 厚的 GaN 层之前，还要预先沉积一个进行应变处理的中间层，它能使随后沉积的 GaN 层处于压应变条件下。最后，在上述沉积结构的上方加工形成 HEMT 结构，该结构由 24nm 厚的 $Al_{0.28}Ga_{0.72}N$ 层以及其上的 2nm 厚的 GaN 覆盖帽层构成 (图 3)。

对该器件进行霍尔效应测量的结果显示，在室温下它的电子迁移率为 731$cm^2V^1s^{-1}$，载流子面密度为 1.3x$10^{13}cm^{-2}$。在冷却到 770K 时，该结构的电子迁移率和载流子面密度将分别增加至 1740

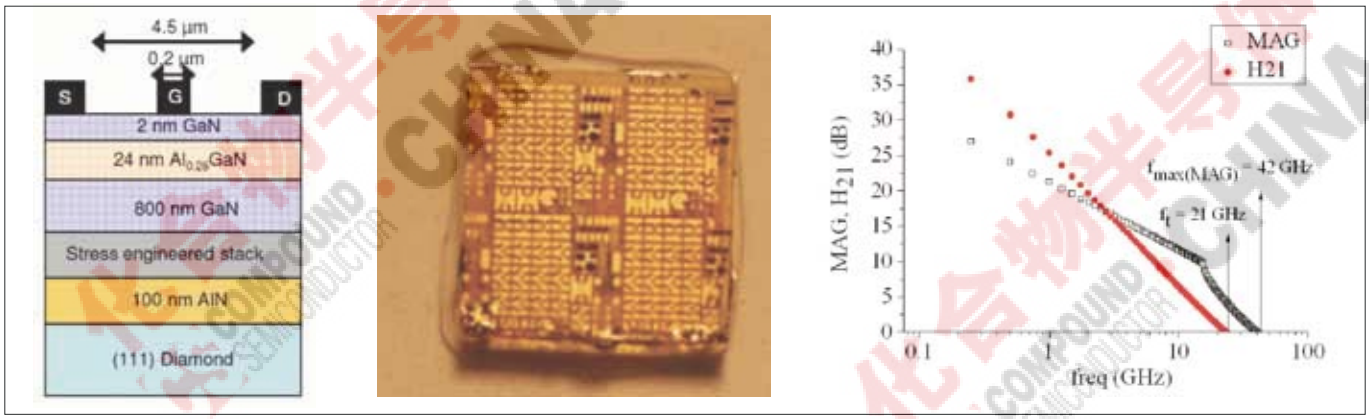


图3: (a) (左图)在金刚石单晶衬底上生长HEMT结构的设计, (b) (中图)在金刚石单晶衬底上加工的HEMT器件的光学显微照片, (c) (右图)对带有1 µ m厚纳米晶体金刚石散热器、尺寸为2x0.2x75 µ m^3 的HEMT器件进行测量，得到其电流增益(h_{21})和功率增益(MSG/MAG)与频率间的函数关系，偏置条件设定为V_{ds}=10V 和V_{gs}=-2.5 V。

$cm^2V^{-1}s^{-1}$ 和 $1.4x10^{13}cm^{-2}$。热性能分析显示该器件的热阻 R_{th} 为 3.5K mm W^{-1}，是在常规 4H SiC 衬底上生长 HEMT 器件热阻的 2 倍。

来自 Ulm 理工大学的工程师们已经用上述晶圆制作了栅长为 0.2 μm 的晶体管 (图 3b)。对其进行了小信号测量，结果显示其电流增益的截止频率 f_t 值为 21GHz，功率增益的截止频率 f_{max} 值为 42GHz(图 3c)。尽管这些数据还略低于在 SiC 衬底上制作 AlGaN/GaN 器件的测量值，但是首次试验就能取得如此结果未尝不让人感到满意。下一步的工作将是对该异质结构和器件工艺进行优化。然而，一旦这种可行性的研究结束，正如项目所规划的那样，由于受到单晶金刚石衬底目前在尺寸上的限制，MORGaN 项目联盟将不会再在这个方向上进行继续的努力。

压力传感

基于 ELOG 的悬臂梁器件是由 Bath 大学制作完成的，它能产生几个微米的挠曲量：5 μm 宽、500 μm 长的悬臂梁可产生 6 μm 的挠曲量，另外一种双夹持式的 15 μm 长的悬臂梁变体结构则能产生 9 μm 的挠曲量 (这些悬臂梁由一个压电控制的纳米定位器进行弯曲，其挠曲量可通过光干涉条纹的偏移来进行测定)。

这些结构的制作工艺包括有横向的蔓延生长，它是以光刻工艺为基础。在蔓延生长后进行氧化层的缓冲腐蚀去除之前，先预先形成一层薄的 SiN 牺牲层以实现悬臂梁的释放。该光刻工艺可以采用“double dogleg”生长工艺窗口来使得 ELOG 能沿着其最优化的互结晶方向进行生长。

为了优化鼓膜传感器的设计而需要进行数值模拟，这项工作已经由 Bath 大学和 Joseph Fourier 大学共同展开。这两所大学已经开发了针对该种传感器的机械力学模型，该模型拥有六个传感单元 (图 4)。这种传感器模型能对处于特殊压力范围内的蓝宝石衬底厚度进行精确的微调。

这项努力的另一个贡献者是 IEE 的 Slovak 科学院，该机构已经开发出了与该传感器制造工艺相兼容的高温加工技术。通过对蒸发沉积形成的镍－铱界面薄层进行热氧化和图形化，在栅界面上形成导电金属氧化物。这种新颖的栅金属工艺使其电导性能得到提升，器件经过 800℃的退火工艺后，其良好的传输特性并没有退化。

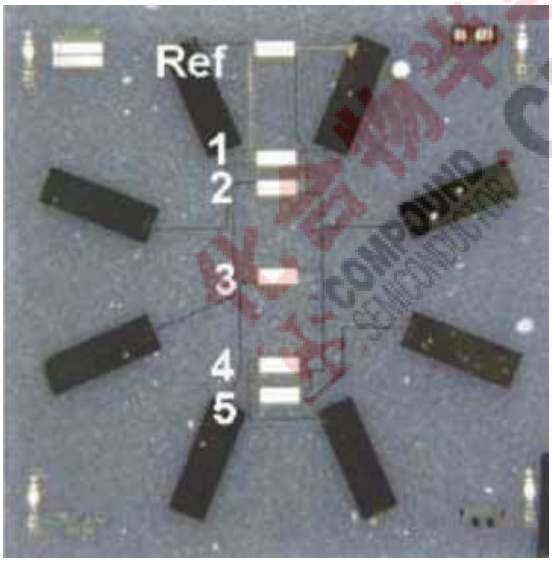


图4：鼓膜压力传感器采用了几个HEMT器件作为传感单元。该传感器能测量80 bar以上的压力。

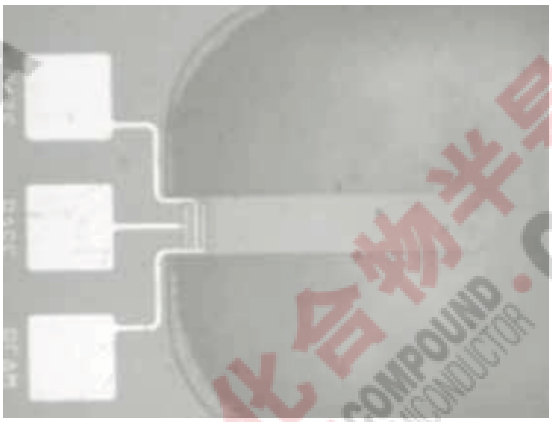
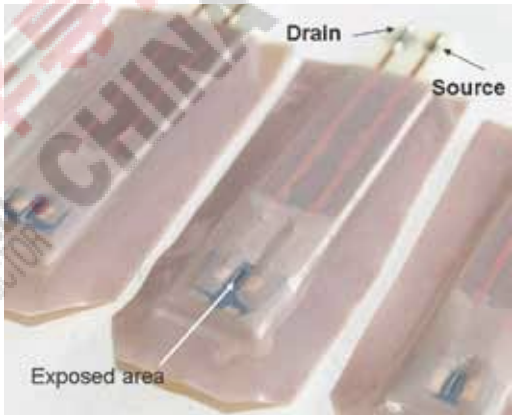


图5：用GaN制作悬臂梁结构的光学显微照片。

在高达 60bar 的压力环境下对这些传感器进行测试，表明其漏源电压会随着压力的上升而以 0.02%/bar 的比率线性地下降。这一结果与 MORGaN 项目开发的有限元模型相符合，揭示了任何因压电弛豫和不完美的夹持都会导致上述的线性关系出现偏差。当这种传感器被包封在一个特制的封装体中时，它能在 400℃温度、高达 80bar 的压力环境下正常地工作。

MicroGaN 项目所进行的工作已经能在硅衬底上来制作 AlGaN/GaN 悬臂梁。在该工艺中，在从悬臂梁下方进行选择性干法刻蚀去除硅衬底之前，悬臂梁结构就已经被确定。芯片设计包括有一个温度传感器和在一个 Wheatstone 桥中的两个悬臂梁结构。传感器可以测量其中一个悬臂梁的挠曲量，而另一个悬臂梁则是作为参照以补偿它们的温度效应 (参见图 5)。对该传感器的测量是在 300℃温度下和一组挠曲量范围中进行。



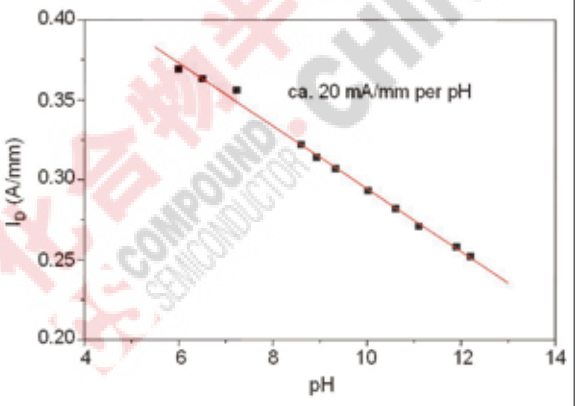


图6: (a)封装好的InAlN/金刚石离子敏场效应晶体管, (b)InAlN/纳米晶体金刚石电化学传感器的漏极电流稳态值与pH值的函数关系。

酸碱 pH 灵敏

MORGaN 项目的另一项工作就是由 Ulm 理工大学研发的离子敏场效应晶体管 (FET)，它的结构特征是在 AlInN/GaN HEMT 器件上采用了金刚石电极。这些化学传感器既可以制作成一个单芯片的集成电路，也可以制作成一个混合方式的集成电路。在这两种设计中，都将纳米晶体金刚石电极暴露在电解质中，并且在采用混合集成电路设计方式时，该电极时也同时也与外部的 AlInN/GaN HEMT 相连接。这种异质结构必须具有可承受进行纳米晶体金刚石的热沉积工艺的热预算，也就是说，它们要能在 800℃高温下具有几个小时的承受能力。

要构建这些化学传感器，还需要将 FET 芯片贴装在具有 Cu/Au 导电通路 PCB 板的中心部位。Gwent Electronic Materials 公司为此项任务提供了支持。采用超声楔焊技术来将这些晶体管焊接在 PCB 板上的 48 个焊盘上，这是一种能将纳米晶体金刚石电极与具有不同几何形状的晶体管进行快速互连的键合工艺技术。它们还采用了合成玻璃层对这种传感器进行覆盖，使得其在使用过程中 (图 6a) 也能对器件进行光学显微镜的观察。

测量结果表明该传感器具有可重复的 55mV/pH 的 PH 灵敏度，对应于每个单位 pH 值具有 20 mA/mm 的灵敏度 (图 6b)，该传感器还具 0.05pH 的高分辨率。该传感器的优点之一就是其快速的响应能力，这种响应需要有几秒钟的时间，才能完成电解质的完全混合过程。

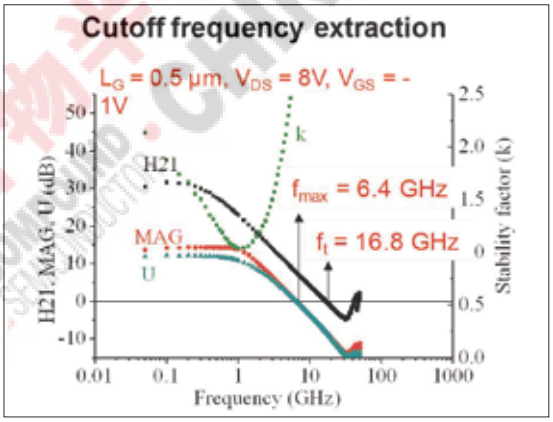


图7: 带有1 µm厚的纳米晶体金刚石散热层、尺寸为2x0.5x75 µ m^3的HEMT器件，它的电流增益(h_{21})和功率增益(MSG/MAG)与频率间的函数关系，其偏置条件设定为 V_{ds}=8V 和 V_{gs}=-1V。

热量耗散

对 GaN 基 HEMT 器件涂覆金刚石层所具有的潜在性优势的认可已经有好多年了，这种涂覆可以形成一个对恶劣环境的抗腐蚀保护层，还能产生一个理想的散热效应来对器件进行强制性冷却。要将这种潜在性能优势转化为现实，就需要在温度超过 700℃的富氢自由基环境条件下进行纳米单晶或多晶金刚石薄膜的沉积，这就要求这种 HEMT 器件要具有极其稳定的半导体异质结构、器件的接触和钝化性能，因为它们有可能会起到成核层的作用。

Ulm 理工大学应用偏置增强成核技术首次成功地制作了具有 1 µ m 厚度的蔓延生长纳米金刚石散热层的亚微米 HEMT 器件。该器件有着十分理想的小信号工作特性，其电流增益的截止频率 f_t 为 16.8GHz，功率增益的截止频率 f_{max} 为 6.4GHz(图 7)，这一器件的性能成果为 MORGaN 项目贡献了一个世界纪录。

超大功率 HEMT

功率为 1kW 的晶体管工艺开发是 MORGaN 项目的另一个研究成果。为了尝试达到这一输出功率的目标，来自 III-V 实验室的研究者们在半绝缘的 SiC 衬底上制作了边长为 36mm、栅长为 0.7 µ m 的 HEMT 器件 (图 8)。这些晶体管有着以下结构特征：在 SiC 衬底上生长 2 µ m 厚的 GaN 层以及 10 µ m 厚的 InAlN 层。通过优化

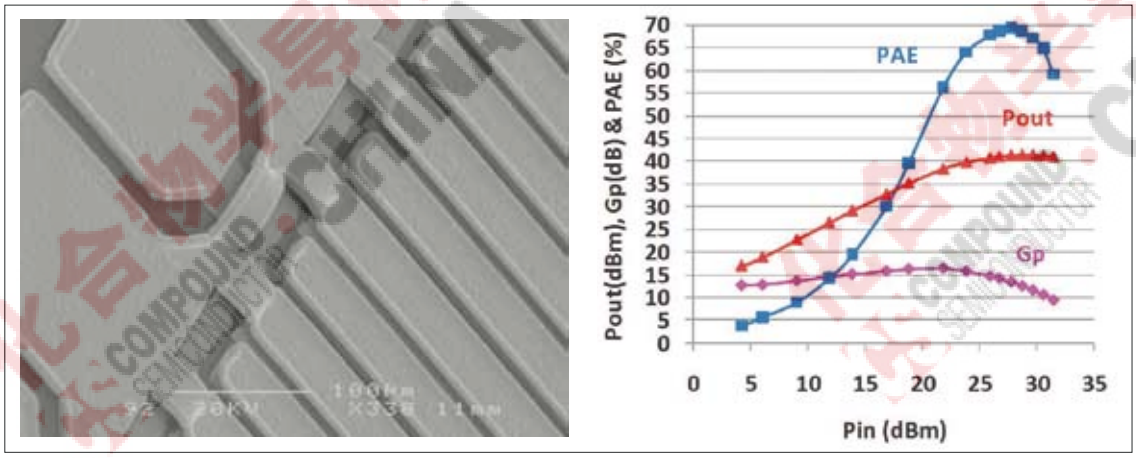


图8: (a)可工作在L到S波段、具有边长为36mm、栅长为0.7μm的HEMT功率条器件(SEM照片)。(b) Pout = 41.2dBm (13.2W – 6.6 W/mm)时，PAE值为70%，在3.5GHz、V_{ds}=35V条件下在晶圆上的Gp测量值为13.4dB (边长为2mm的器件以及采用窄脉冲驱动设置)。

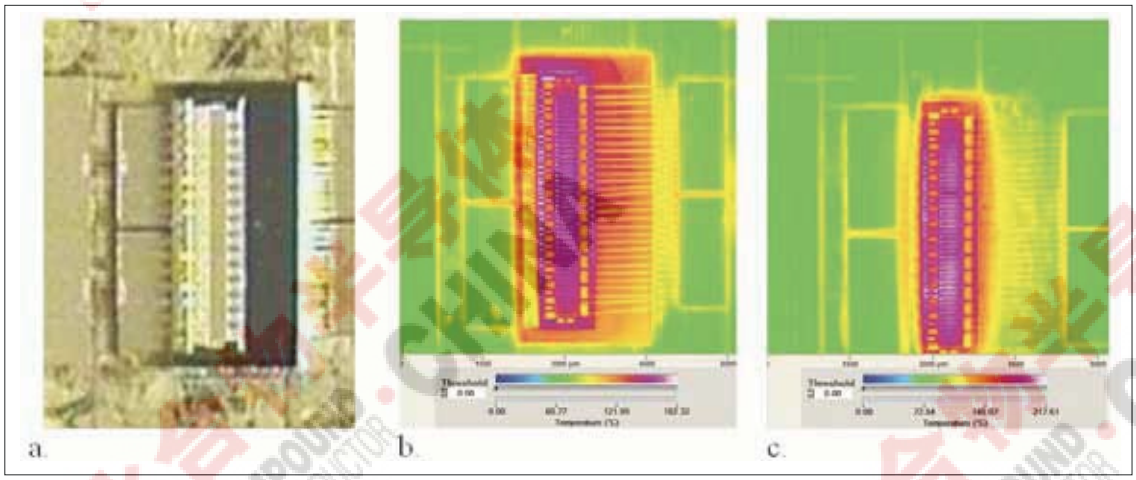


图9: (a)采用厚度减薄至100μm的SiC衬底、贴装在TM180金刚石薄片(图中黑色部位)上的边长为36mm InAlN/GaN HEMT器件的光学显微照片。该功率条在CW条件下能以3.5 W mm^{-1}这一设定值进行热功率耗散，整个组装件是贴装在一个温度保持为62℃的一个夹具上。(b) (a)图中功率条的显微红外热成像照片。(c)其SiC衬底厚度为400μm但没有散热器的一个类似功率条的显微红外热成像照片。

器件的形貌拓扑结构来保持器件的微波功率增益以及来应对器件的过热问题。由于工作频率的影响，相对于其本身所释放的热量来说，这些器件趋于能耗散更多的热量。当器件由10μs的脉冲驱动时，边长为2mm的基本器件单元就能输出13.2Wmm^{-1}的功率，其功率效率值(PAE)为70%。当切换到连续波驱动模式时，由于存在着自加热效应，使得功率效率值(PAE)降到了55%左右。为了改善这些功率条的热环境，它们是贴装在由Element Six提供的多晶金刚石贴条带上。(具体实例参见图9)

在进行贴装之前，SiC衬底需要减薄到100μm以改善其热管理性能：因为SiC的热导率为450W$m^{-1}K^{-1}$，要比高质量多晶金刚石的热导率小四倍。

热红外成像分析显现了高热导工艺平台的优势。将一个边长为36mm的功率条贴装在一个金刚石散热器上，它在一个温度维在62℃的夹具上的热耗散能力为3.5 Wmm^{-1}，此时其导电沟道的温度最大值为173℃(图9b)。对于一个相类似的400μm厚衬底的功率条，如不将其贴装在金刚石散热器上，那么其导电沟道的温度最大值将会增至214℃。

采用动态热交换器有可能来进一步改善器件的热管理能力，其工作原理是通过将水注入一个具有很大表面积的空洞中来增加热量的交换。III-V实验室和Swerea IVF公司已经设计出了这种热交换器系统，并由FCubic公司运用他们的三维加工能力已成功地制造出了该种热交换器系统(图10)。上述公司对MORGaN项目的最新贡献是开发了一种新的工艺，即采用薄层加工方式来制作高精度的铜部件。这样就能制造出热阻实验值为0.16℃W^{-1}的热交换器，这是一个令人不可思议的低热阻数值，它可以帮助HEMT器件来散发高达几百瓦的热能量。

利用这种热交换器，研究者们已经制造出了2GHz的放大器，它包括有36mm边长的两个功率条，能提供200W的输出。当切换到脉冲运行模式时，该器件可以提供250W的输出功率，这已是目前InAlN/GaN异质结器件所能达到的最高功率输出记录。320W是器件工作的功率极限，此时PAE为35%，根据逆向分析，这相当于在器

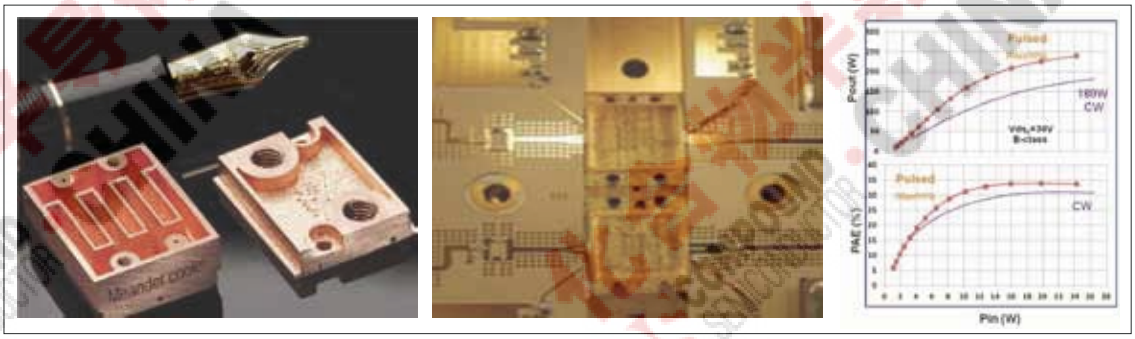


图10: (a)由三维加工制作的铜热交换器, (b)工作在200W L波段的InAlN/GaN HEMT器件的局部照片, (c)包含两个边长为36mm器件的放大器在2GHz下的输出功率和PAE，采用的是10μs脉冲和CW工作模式进行负荷周期的检测。上曲线: 输出功率; 下曲线: PAE。

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