

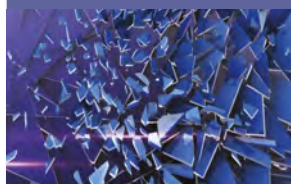
化合物半导体



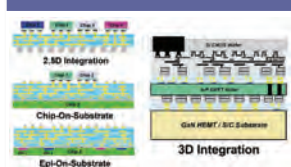
• CHINA

季刊 2018年 第2期

GaN 跻身主流市场



3D 集成



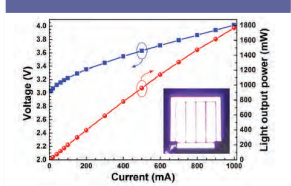
改善UVC LED 热管理



垂直 GaN 功率器件



UV LED 输出超过1W



GaAs 为 5G 手机 提供关键组件



your

EPITAXIAL GROWTH

partner



Enabling advanced technologies



- World leading technology
- Complete materials range
- MOCVD, MBE, CVD
- Advanced semiconductor wafer products
- Advanced R&D capabilities
- Multiple, manufacturing sites (Europe, Asia, USA)



www.iqep.com

快速.
靈活.
專業.

一間植入
體鑄造廠
可滿足您的
所有
需求。

INNOVION

鑄造廠離子注入

www.innovioncorp.com
sales@innovioncorp.com
+1 [408] 501-9100

封面故事 Cover Story

- 08 GaAs为5G手机提供关键组件
GaAs provides the key ingredient for 5G phones
- Ben Thomas, QORVO

业界动态 Industry

- 03 5G与汽车科技带动SiC与GaN的发展
5G and automotive technologies drive the development of SiC and GaN
- 04 终极磁传感器即将问世?
The ultimate magnetic sensor?
- 06 小巧高效的GaN器件即将跻身主流市场
GaN: small, efficient and market-ready

技术Technology

- 12 3D集成: 整合InP, GaN和硅CMOS
3D integration unites InP, GaN and silicon CMOS
- Andrew Carter, Miguel Urteaga, TELEDYNE SCIENTIFIC AND IMAGING
- 16 改善UVC LED的热管理
Improving the thermal management of UVC LEDs
- John Cafferkey, CAMBRIDGE NANOTHERM
- 20 优化GaN HEMT生产
Refining production of the GaN HEMT
- Richard Stevenson
- 24 GaN功率器件: 完善垂直架构
GaN power devices: Perfecting the vertical architecture
- Yuhao Zhang, Min Sun, Tomás Palacios, 麻省理工学院

科技前沿 Research Review

- 29 加快 GaN 的生长速度
Accelerating GaN growth
- 30 UV LED 的输出功率超过 1 W
UV LEDs exceed 1W output
- 31 了解 microLED 的不足
Understanding microLED deficiencies

- 02 编者话Editorial
- 32 广告索引Advertisement Index

关于《化合物半导体》

《化合物半导体》中国版(CSC)是全球最重要和最权威的杂志Compound Semiconductor的“姐妹”杂志,亦是中國唯一專注於化合物半導體產業的權威雜誌,重點介紹國外先進技術和產業化經驗,促進國內產業發展,為國內讀者提供化合物半導體行業的專業知識。內容涵蓋晶體的特性研究,器件結構的設計,生產中用到的材料、設備、軟件、測量、工廠設施,以及有關市場分析和動態。

About Compound Semiconductor China

Compound Semiconductor China (CSC) is the 'sister' title to Compound Semiconductor - the world's most respected and authoritative publication. It is also the unique and authoritative publication dedicated to the Compound Semiconductor industry in China, introduce advanced global technology information and manufacturing experience, support the growth of the industry in the China market. Our content covers the technology development of crystal characteristic, design of IC structure, and materials, equipment, software, metrology, facilities for manufacturing, as well as market analysis & trends.

关于雅时国际商讯 (ACT International)

雅时国际商讯 (ACT International) 成立于1998年, 为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品一包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动一为跨国公司及中国企业架起了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站, 以及各种技术会议, 服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约十多万专业读者。ACT亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT总部在香港, 在北京、上海、深圳和武汉设有联络处。www.actintl.com.hk

About ACT International Media Group

ACT International, established 1998, serves a wide range of high technology sectors in the high-growth China market. Through its range of products -- including magazines and online publishing, training, conferences and events -- ACT delivers proven access to the China market for international marketing companies and local enterprises. ACT's portfolio includes multiple technical magazine titles and related websites plus a range of conferences serving more than 100,000 professional readers in fields of electronic manufacturing, vision system design, laser/phonics, RF/microwave, cleanroom and contamination control, compound semiconductor, and Electromagnetic Compatibility. ACT International is also the sales representative for a number of world leading technical publishers and event organizers. ACT is headquartered in Hong Kong and operates liaison offices in Beijing, Shanghai, Shenzhen and Wuhan. www.actintl.com.hk



扫一扫
免费下载电子书

5G 推动射频氮化镓市场

在过去两三年里，RF GaN（射频氮化镓）市场快速发展，已经重塑了整个射频功率产业。Yole Développement 研究报告（2018-2023 射频氮化镓市场：应用、厂商、技术和基板）显示：截止 2017 年末，RF GaN 整体市场规模已经接近 3.8 亿美元。RF GaN 在各个市场的渗透率实现了突破，尤其是电信和国防应用市场，在这两个应用领域的复合年增长率超过了 20%。随着 5G 网络应用的到来，预计 RF GaN 市场在 2019-2022 年将获得新一轮爆发增长。RF GaN 整体市场规模到 2023 年预计将增长至目前的 3.4 倍，2017-2023 年复合年增长率可达 22.9%。

Yole 报告分析了不同的技术发展趋势及其对整个 RF GaN 市场及相关厂商的潜在影响，并提供了 RF GaN 在各个新的应用领域的市场规模预测。

Yole 预计电信和国防应用将成为 RF GaN 产业的重要支柱。就电信市场而言，得益于 5G 网络应用的日益临近，将从 2018 年开始为 GaN 器件带来巨大的市场机遇。相比现有的硅 LDMOS（横向双扩散金属氧化物半导体技术）和 GaAs 解决方案，GaN 器件能够提供下一代高频电信网络所需要的功率和效能。而且，GaN 的宽带性能也是实现多频带载波聚合等重要新技术的关键因素之一。GaN HEMT 已经成为未来宏基站功率放大器的候选技术。由于 LDMOS 无法再支持更高的频率，GaAs 也不再是高功率应用的最优方案，Yole 预计未来大部分 6GHz 以下宏网络单元应用都将采用 GaN 器件。

目前，RF GaN 技术正在发展成为 RF 主流，主要的 IDM 公司有 Sumitomo, Qorvo 和 Cree 等。未来代工厂可能会有更多的发展。相比传统硅工艺，GaN 技术的外延工艺要重要得多，会影响其作用区域的品质，对器件的可靠性产生巨大影响。这也是为什么目前市场领先的厂商都具备很强的外延工艺能力，并且为了维护技术秘密，都倾向于将这些工艺放在自己内部生产。尽管如此，Fabless 设计厂商通过和代工合作伙伴的合作，发展速度也很快。凭借与代工厂紧密的合作关系以及销售渠道，NXP 和 Ampleon 等领先厂商或将改变市场竞争格局。当然，GaN 晶体管的价格现在依然比较高，Yole 认为，未来随着越来越多的厂商参与，会使产量增加，价格下降。

GaN 的封装也非常重要，封装方面的努力也能将价格降低到更有吸引力的水平。很多厂商现在选择塑料封装，业界已经出现了一些新型封装材料和新的管芯连接方法。比如，MACOM 和 Sumitomo 已经开始采用银烧结作为管芯连接材料，这有助于热控制，并能提高器件质量。而且已经确认下一步将会使用纯铜作为封装的法兰材料。

目前市场上存在两种技术的竞争：GaN-on-SiC（碳化硅上氮化镓）和 GaN-on-Silicon（硅上氮化镓）。它们采用了不同材料的衬底，但是具有相似的特性。理论上，GaN-on-SiC 具有更好的性能，而且目前大多数厂商都采用了该技术方案。不过，MACOM 等厂商则在极力推动 GaN-on-Silicon 技术的广泛应用。未来谁将主导还言之过早，目前来看，GaN-on-Silicon 仍是 GaN-on-SiC 解决方案的有力挑战者。

赵雪芹

社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak
adonism@actintl.com.hk

主编 Editor in Chief

赵雪芹 Sunnie Zhao
sunniez@actintl.com.hk

出版社 Publishing House

雅时国际商讯 ACT International
香港九龙 B,13/F, Por Yen Bldg,
长沙湾青山道478号 478 Castle Peak Road,
百欣大厦 Cheung Sha Wan,
13楼B室 Kowloon, Hong Kong
Tel: (852) 2838 6298
Fax: (852) 2838 2766

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 25988571
Fax: 86 755 25988567

武汉 Wuhan

Tel: 86 27 59233884

UK Office

Angel Business
Communications Ltd.
6 Bow Court,
Fletchworth Gate,
Burnsall Road, Coventry,
CV56SP, UK
Tel: +44 (0)1923 690200
Chief Operating Officer
Stephen Whitehurst
stephen.whitehurst@angelbc.com
Tel: +44 (0)2476 718970



5G 与汽车科技带动 SiC 与 GaN 的发展

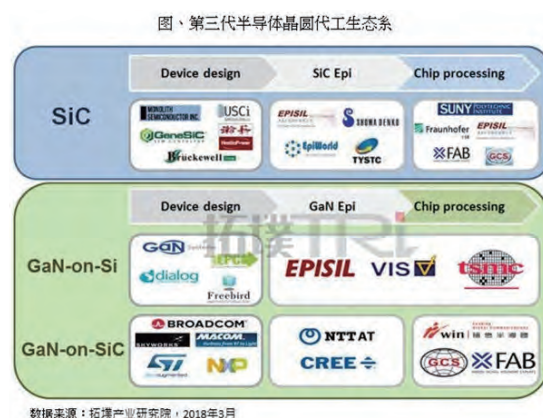
5G 预计将于 2020 年迈入商用，加上汽车走向智慧化、联网化与电动化的趋势，将带动第三代半导体材料碳化硅 (SiC) 与氮化镓 (GaN) 的发展。根据拓璞产业研究院估计，2018 年全球 SiC 基板产值将达 1.8 亿美元，而 GaN 基板产值仅约 3 百万美元。

拓璞产业研究院指出，相较目前主流的硅晶圆 (Si)，第三代半导体材料 SiC 及 GaN 除了耐高电压的特色外，也分别具备耐高温与适合在高频下操作的优势，不仅可使芯片面积大幅减少，并能简化周边电路的设计，达到减少模组、系统周边的零组件及冷却系统的体积。除了轻量化设计之外，因第三代半导体的低导通电阻及低切换损失的特性，也能大幅降低车辆运转时的能源转换损失，两者对于电动车续航力的提升有相当的帮助。因此，SiC 及 GaN 功率组件的技术与市场发展，与电动车的发展密不可分。

然而，SiC 材料仍在验证与导入阶段，在现阶段车用领域仅应用于赛车上，因此，全球现阶段的车用功率组件，采用 SiC 的解决方案的面积不到千分之一。另一方面，目前市场上的 GaN 功率组件则以 GaN-on-SiC 及 GaN-on-Si 两种晶圆进行制造，其中 GaN-on-SiC 在散热性能上最具优势，相当适合应用在高温、高频的操作环境，因此以 5G 基站的应用能见度最高，预期 SiC 基板未来五年在通过车厂验证与 2020 年 5G 商用的带动下，将进入高速成长期。

尽管 GaN 基板在面积大型化的过程中，成本居高不下，造成 GaN 基板的产值目前仍小于 SiC 基板。但 GaN 能在高频操作的优势，仍是各大科技厂瞩目的焦点。除了高规格产品使用 GaN-on-SiC 的技术外，GaN-on-Si 透过其成本优势，成为目前 GaN 功率组件的市场主流，在车用、智能手机所需的电源管理芯片及充电系统的应用最具成长性。

拓璞产业研究院指出，观察供应链的



展，由于 5G 及汽车科技正处于产业成长趋势的重心，供应链已发展出晶圆代工模式，提供客户 SiC 及 GaN 的代工业务服务，改变过去仅由 Cree、Infineon、Qorvo 等整合组件大厂供应的状况。GaN 的部分，有台积电及世界先进提供 GaN-on-Si 的代工业务，稳懋则专攻 GaN-on-SiC 领域瞄准 5G 基站的商机。另外，X-Fab、汉磊及环宇也提供 SiC 及 GaN 的代工业务。随着代工业务的带动，第三代半导体材料的市场规模也将进一步扩大。

另外，市调机构 Yole Développement(Yole) 在其研究报告中指出，截至 2017 年，射频氮化镓市场规模已近 3.8 亿美元。展望未来，电信和国防将成为该产业的应用主流，由于 5G 网络的迅速崛起，自 2018 年起，电信市场将为氮化镓组件带来巨大的发展契机。

Yole 认为，5G 网络将推动氮化镓组件市场的发展。到 2023 年，射频氮化镓的市场规模将大幅扩张 3.4 倍达 13 亿美元，2017-2023 的年复合平均成长率 CAGR 为 22.9%。Yole 技术与市场分析师 Zhen Zong 直言，氮化镓射频技术获得业界认可，已成为主流；市场领先者的相关营收正在迅速提升，而且这一趋势在未来数年中将持续；目前氮化镓组件的价格依然较高，近年会有越来越多公司加入这个市场，提升供货数量，并促成价格下降。

终极磁传感器即将问世？

英国的一个新的研究项目 CS-MAGIC (Compound Semiconductor MAGnetic Integrated Circuits, 化合物半导体磁集成电路) 很有可能会使宽带隙磁场传感器成为商业瞩目的焦点。——Rebecca Pool 报道

2017 年底, 英国硅晶圆企业 IQE 与卡迪夫大学的合资公司 Compound Semiconductor Centre (CSC, 化合物半导体中心) 获得了略多于 35 万英镑的英国政府资金, 用以开发具有基于 GaAs 和 GaN 材料的集成化电子器件的超灵敏磁传感器。

新的 CS-MAGIC 项目获得 InnovateUK (创新英国) 经费奖励的时点正值业界分析人士预计磁场传感器领域即将迎来惊人成长之际。据市场研究咨询公司 Markets and Markets 预测, 到 2023 年, 磁场传感器的全球市场规模将从目前的 30 亿美元快速增长至 50 亿美元, 复合年增长率 (CAGR) 达 8.8%。与此相似, 市场研究公司 Technavio 预测的 CAGR (从现在到 2020 年) 为 10%。

现今, 磁传感器的需求在很大程度上来自于汽车行业, 该行业需要高度灵敏、坚固的霍尔效应传感器, 以在引擎控制管理、防抱死制动系统等汽车单元中较宽的温度范围内映射越来越小的磁场。不过, 航空航天和工业领域日益需要使用传感器来测量旋转、速度和线性位置。

正如英国曼彻斯特大学半导体器件和材料专业教授、InnovateUK 奖励经费获得者之一 Mohamed Missous 所说: “如今, 我们正在开发的传感器所面对的工作环境比以往任何时候都更加严苛。”

他补充道: “目前市场有售的硅霍尔效应集成电路, 当温度达到 150℃ 时, 它们就停止工作, 因此采用 III-V 族半导体材料制成的器件引起了人们的极大兴趣和关注。”

而且, 基于硅的传统器件还会饱受磁场灵敏

度低、工作频率和温度范围有限, 以及功耗高等不利因素之苦。因此, 从他的角度考虑, Missous 一直在开发基于 GaAs-InGaAs-AlGaAs 系统的量子阱霍尔集成电路, 而且还创立了位于英国的 Advanced Hall Sensors (AHS) 公司, 旨在将其 2DEG 霍尔传感器推向市场。

器件制造采用的是分子束外延 (MBE) 技术, 以把薄膜沉积在 GaAs 晶圆片上, 接着通过后续的光刻、蚀刻、退火和金属蒸镀步骤, 以及最后的晶圆切片和封装工序加工成霍尔传感器。

至关重要的是, 量子阱是通过在两个较厚的 AlGaAs 层之间插入一层 InGaAs 薄膜生成的。形式为二维气体 (即 2DEG) 的电子被限制在这个较薄的层之内, 而不是像在传统霍尔效应传感器中那样被置于“自由漫游”的状态, 从而增强了电子特性。

的确, 基于硅的线性霍尔集成电路能够在 10 Hz 带宽中检测低至 600 毫微特斯拉 (nT) 的磁场。但是, AHS 已经生产了基于 GaAs 的量子阱霍尔 2DEG 器件, 该器件能在 10 Hz 带宽中检测低至 177 nT 的磁场。而且, 先前的器件具有 10 kHz 的最大截止频率, 而宽带隙器件版本则把该数字延伸至 200 kHz。

迄今, AHS 已经出货超过 1500 万颗分立传感器, 不过, 由于获得了英国政府的最新资助, Missous 和他的公司现在打算实现单芯片传感器的商品化, 这种传感器具有较宽的动态范围, 可在更加严酷的环境中工作。

这位研究者介绍说: “我们的全集成化芯片将是单芯片, 其内置了量子阱霍尔效应传感器和

所有的驱动电子器件。这将是全新的芯片；单芯片 GaAs 霍尔效应传感器现在根本就不存在。”

驱动电子器件也将基于 GaAs，这意味着整个芯片将具有更强的抗辐射性能，而且工作温度范围将比现有器件的更宽。其实，在温度范围方面，Missous 的目标是用单颗芯片覆盖 -200℃ 至 200℃，而如今的硅器件所覆盖的温度范围则仅为 -50℃ 至 150℃。

现在，AHS 正与业界伙伴 TWI 和 Renishaw 公司配合工作，以开发一种基于 GaAs-InGaAs-AlGaAs 层的通用结构。这一点应该会在明年 4 月得到确认，而到了之后的 11 月，封装器件的抽样检验工作应在进行之中。

Missous 说：“我们希望生产可在较高温度范围内工作的通用 IC，而一旦我们实现了这一目标，TWI 和 Renishaw 将测试器件并就其性能提供反馈意见。我们依靠这些合作公司来做这件事，这样我们就能根据他们的任何需要定制芯片。”

他补充说：“我们不希望制作非常复杂的电路，但是我们必需确保所有的电子器件与传感器保持同步。该电路将在非常宽广的温度范围内工作，并不会因此损失任何灵敏度或功能性。”

更上一层楼

与此同时，在 CS-MAGIC 项目的第二个组成部分中，来自斯旺西大学电子系统设计中心的 Petar Igic 正在从事的开发工作可被描述为基于 GaN 的下一波磁传感技术。

Igic 已经制作出了面向电源应用的 GaN HEMT，不过现在借助 InnovateUK 的最新资金投

入，他准备开发基于其磁 HEMT 概念的分立传感器。

他说：“我们的目标一直是开发一种可与现有 HEMT 技术完全兼容的传感器。我们无需不同的原料配制或额外的工艺步骤，但是器件布局不同于 HEMT，因而使器件对于磁场具有很好的灵敏度。”

极为重要的是，基于 GaAs 的传感器能在最高 220℃ 的温度条件下运行，而基于 GaN HEMT 的传感器则可在高达 400℃ 左右的温度环境中保持自身的性能，正如 Igic 指出的那样，后者的制约因素是“合适封装和焊接工艺的开发进展情况”。

眼下，Igic 正致力于论证上述概念和优化器件布局，他希望这些工作可在未来的 12 个月内顺利完成。在此之后，他将着眼于针对具体应用定制器件，而且还将与封装公司进行合作。

显然，CS-MAGIC 研发项目基于 GaAs 的霍尔传感器比第二种基于 GaN 的器件更接近于商品化。但是，GaN 在严酷环境中的潜在性能提升是无可争辩的。

据 Igic 称，初步研究结果显示：基于 GaN 的传感器能够检测低至 100 nT 的磁场。更重要的是，器件灵敏度将不会随着磁场和高温而发生改变。

Igic 强调指出：“我们无法在价格上胜过硅材料，但是 GaN 器件将进入航空航天和汽车应用领域，因为它可在非常高的温度条件下工作，并且较少受到辐射的影响。我们将必须采用标准制造工艺来生产此类器件，但是其独特的卖点是：当 GaAs 器件停止工作时，GaN 器件仍在继续运行。”

小巧高效的 GaN 器件即将跻身主流市场

在经过试验、测试和大量的讨论之后，GaN 将跻身主流市场。

——Rebecca Pool 报道

从业内分析人士到诺贝尔物理学奖得主，许多化合物半导体业者断然指出 GaN 是目前需要给予关注的材料。

去年底，Yole Développement 公司的 Ana Villamor 着重阐述了数据中心现今如何以一种“现象级的惊人速度”接纳 GaN 产品，包括具有负载点电源的 DC/DC 转换器。

与此同时，当今年 1 月在印度海得拉巴大学发表讲话时，Hiroshi Amano 断言 GaN 材料不久即将在物联网 (IoT) 和 5G 通信领域中发挥巨大作用。

对于英国的 Dialog Semiconductor 公司来说，最新的一系列声明证实了公司总裁在最近几个月中所强调的观点：主流市场接受 GaN 可谓近在咫尺。

2016 年底，当该公司在快速充电电源适配器中进行 GaN 电源 IC 的抽样检验时，其负责开发和战略的高级副总裁 Mark Tyndall 对《Compound Semiconductor》杂志说：“当 TSMC 开始把 GaN 作为 6 英寸晶圆上的一种标准工艺提供时，我们视之为一个信号，表明进入市场的时机到了。”

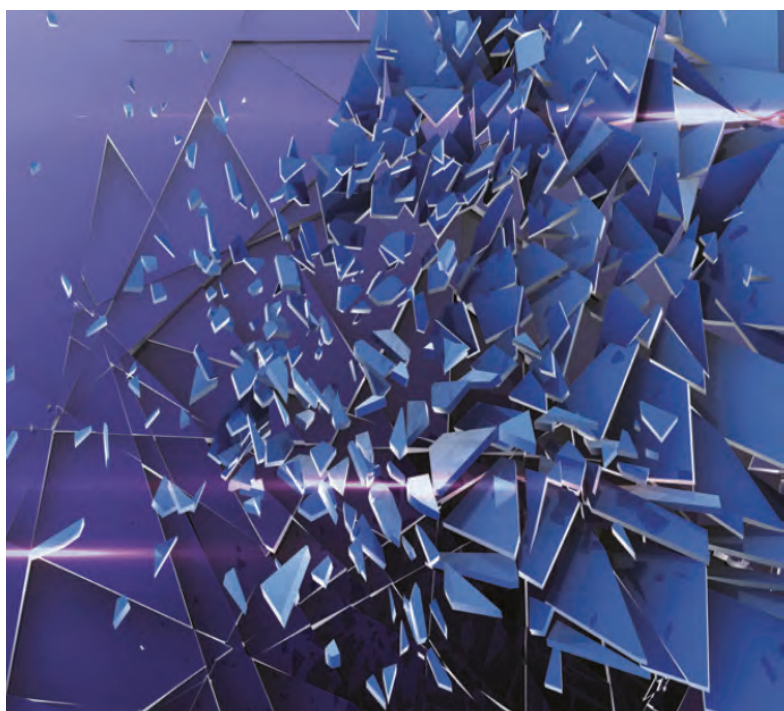
自那时起，该公司一直与 TSMC 进行合作，旨在将其高电压 GaN 电源 IC 和控制器投放市场。电源管理 IC 和 Dialog 公司的“快速充电”电源转换控制器专为提供与现有硅 FET 相比效率更佳、尺寸更小和功率密度更高的电源而设计。

实际上，该公司声称其最新产品几乎使电源的功率损失和尺寸锐减 50%，对于移动通信行业为其智能手机、笔记本电脑等产品所渴望的消费型适配器而言，这些因素是非常重要的。目前，Dialog 公司 GaN 器件的预生产已在进行之中，产品发布很快就会到来。

Dialog Semiconductor 的公司发展总监 Tomas Moreno 说：“我们预期于本季度推出首款 GaN 电源 IC，随后在今年年中推出我们的第二款用于消费型电源适配器的电源 IC。”

至关重要的是，Moreno 估计：对于 GaN 来说今年将是转折点，而消费型适配器区段是该公司的首个目标市场。

他说：“GaN 可满足规模超过 50 亿美元市场的需要，涵盖面包括 PC、TV、游戏、数据中心、汽车、清洁能源、工业和其他细分市场。我们首先专注于消费领域，这是因为它的市场容量大而且设计周期非常短，所以我们能够快速形成规模，并通过我们的生产线提供众多的晶圆。”



他补充说：“这的确将压低成本……而成本的降低反过来又将推进技术的成熟，市场因此将继续接纳 GaN。我们的目标是将消费型电源适配器市场用作其他应用的一个「启动平台」。”

观察到征兆

Moreno 认为整体市场的全面接纳已开始萌动，并且注意到在数据中心、工业、甚至汽车应用中出现了许多基于 GaN 器件的导入设计。他说：“所有这些发展势头我们均已尽收眼底。”

而且，他认为市场发展趋势（包括转向 USB Type C 连接和 USB 供电以及对快充电池的依赖程度日益增加）必定将开启 GaN 器件大举进入消费型电源适配器市场的进程。

他强调指出：“我们拥有这个机会窗口，即：智能手机和 PC 所使用的适配器将会是同一个。而借助 GaN 器件，我们可以把这种通用型适配器做得非常之小。”

另外，虽然诸如均来自美国的 Navitas Semiconductor 和 Inngie 等业界厂商已经发表了基于 GaN 器件的 65 W 适配器，但是 Moreno 认

为 Dialog 能够提供一种材料用量较少的系统。

他说：“有些公司已经 [发表了] 此项技术，但是采用的拓扑需依靠昂贵的组件。我们正在设计的芯片将帮助用户降低物料成本，并能以更快的速度实现。”

但是，有关客户对于可靠性的关注，情况怎么样呢？Moreno 认为这些问题正在得到解决，并着重阐释了由 Dialog 和竞争对手提供的器件是怎样通过严格的可靠性测试要求的。此外，他还认定供应链瓶颈（即：围绕外延层沉积和器件封装）即将被攻克。

Dialog 的制造合作伙伴预计将拥有必要的 MOCVD 反应器，而且如他补充所述：“消费类应用往往功率较低，且采用 QFN 封装；对于此类封装而言没有供应链瓶颈。”

他说：“Dialog 是消费应用领域中的一家实力强大的主导厂商，而且我们非常熟悉这个市场。我们能够以更好的性能和具竞争力的物料成本把此项技术带到这里。”

他又补充道：“人们很快就可以手持小巧玲珑的电源，尽享方便自由的移动生活乐趣。”

3D辨识和手势识别 最佳镀膜方案

www.evatecnet.com/products/clusterline-platforms/clusterline-rad



瑞士EVATEC精密溅射镀膜设备CLUSTERLINE RAD® 生产符合成本效益的干涉滤光片，用于3D和手势识别传感器

- 全自动化上下片系统-支援8英寸的玻璃片并包括自动双面镀膜的翻转系统
- 业界最好的均匀性和最低微粒-使用最新的旋转靶技术并且不需修正档片
- 最佳光学薄膜叠层精度和可重复性的原位光学监测

要了解更多信息请联系我们的总部info@evatecnet.com或联系你的区域销售和服务办公室Evatec China Ltd., Tel: +86 21 8019 7660, 邮箱: infochina@evatecnet.com

ADVANCED PACKAGING • SEMICONDUCTOR • OPTOELECTRONICS • PHOTONICS • THE THIN FILM POWERHOUSE
www.evatecnet.com

GaAs 为 5G 手机提供关键组件

GaAs 可满足 5G 前端模块所用功率放大器的所有要求。

Ben Thomas, QORVO

5G 的推出时间将从何时开始？直到最近，所有人都还是在猜测。但是，现在时间节点已经变得越来越清晰，可能最早在 2019 年就开始。

加速推动部署这种通信技术的是全球宽带标准的最新进展：非独立无线电（non-standalone radio）。它使运营商能够通过对现有 4G 基础设施的增强而不是替代方案来提供 5G 数据，从而速度更快且更经济。然而，这隐含着一些内容，包括移动射频前端的复杂的新挑战。它们将需要支持 4G 和 5G 波形，前所未有的带宽和新的频频段。

这些努力将是值得的，因为当 5G 网络建设形成时，它将产生重大影响。5G 网络将带来：增强智能手机和其他移动设备的移动宽带，使运营商能够提供更高的峰值数据速率并扩大网络容量，从而支持更高密度的更多用户；针对需要非常低延迟的关键应用（如自动驾驶汽车和工业控制系统）的超可靠、低延迟通信；以及大量需要低功耗、相对低带宽通信的物联网设备的大规模机器类型通信。

为了实现这一切，5G 网络将使用比当今 4G



网络更宽的频率范围（包括毫米波频率）。为了支持不同应用的不同要求，它们将采用一种称为网络分片的技术，根据各自的特定需求为每个设备分配不同程度的延迟、数据速率和安全级别。

当谈到增强的移动宽带时，5G 将补充 4G，而不是取代它。运营商已经利用 LTE Advanced 和 LTE Advanced Pro 功能增强了其现有的 4G 网络。这应该通过载波聚合（carrier aggregation, CA）实现高达约 1Gbit/s 的峰值数据速率，这种技术结合了多个数据载波并带来更大的带宽。但是，为了满足移动宽带的预期增长，网络需要将相比 LTE 可以提供的更大容量与更高速度相结合。

Cisco 可视网络索引提供的预测给出了这些容量和速度增长程度的指标。根据这个来源，到 2021 年，普通智能手机用户的数据消费预计将翻两番，达到每月近 7GB。其中大部分增长将是通过视频流量以及增强现实和虚拟现实等新兴应用的推动。为了支持这些能力，5G 增强型移动宽带正计划提供高达 10Gbit/s 的峰值网络数据速率。

加速由这些先进能力推动的 5G 标准化过程的压力使得在 2017 年 3 月取得了非独立无线电的定义。移动标准组织 3GPP 同意将 5G 新无线电规范的发展划分为两个阶段。主要为移动宽带设计的非独立规范正在作为 3GPP 版本 15 的一部分而进行快速跟进；而 5G 独立的新无线电规范将在版本 16 中予以发布。

对于非独立无线电，4G LTE 频段为载波控制和信令信息提供“锚点”，而 5G 频段则充当数据管道。相比之下，采用 5G 独立无线电，新的 5G 网络架构同时用于承载数据的控制平面和用户平面。

由于非独立无线电的发展，5G 增强型移动宽带的及早交付对于网络运营商来说更经济实惠。这是因为这些运营商可以利用设备和基础设施中现有的 4G LTE 调制解调器和收发器以及现有的演进分组核心。或者换句话说，运营商可以通过增强现有 4G LTE 基础设施来提供非独立无线电，而不是完全构建下一代核心的独立无线电 5G 网络。正是这种方法使得能够在 2019 年推出

大规模的 5G 增强型移动宽带试验和部署，而不是之前提出的 2020 年时间表。

最初，增强型移动宽带的部署预计将集中在 6GHz 以下的频率。这是因为这个频段支持更广泛的覆盖范围，并且它比毫米波频率更适合支持移动设备中的网络连接。由于 3.3GHz 和 5GHz 已经分配或正在考虑分配之中，新频段接近全球性的可用可以帮助过渡到分配新的全球频段。这些努力将导致重新分配 TDD-LTE 频段，如 42 和 43 频段，这些频段也将用作不同地区的 4G 主频段；并引入新的频段 n77，n78 和 n79。后三者将是第一批仅用于 5G 数据传输的 5G 频段。

RF 前端挑战

为手机配备 5G 非独立无线电和复杂的 4G LTE 先进的 CA 功能，对设备和芯片组制造商来说都是一项挑战。他们将努力致力于单模组来产生支持 4G 和 5G 需求的非独立 RF 前端，并支持全球覆盖，因为这最大限度地减少了对手机本地化的需求。这些要求将为 RF 前端带来前所未有的技术挑战，特别是在发送端。挑战将包括为 4G 和 5G 波形提供高功率效率和线性度，同时



支持非常宽的带宽并提供高输出功率，包括新的 Power Class 2 标准。最近采用的 Power Class 2 或 HPUE 是作为改善手机覆盖范围的方法，但相对于传统的 Power Class 3 移动设备标准将功率提高了 3dB。

这些不同的标准目前正在进行中，两个 5G 上行波形正在朝着 3GPP 内的正式批准方向发展：循环前缀正交频分复用（CP-OFDM）和离散傅立

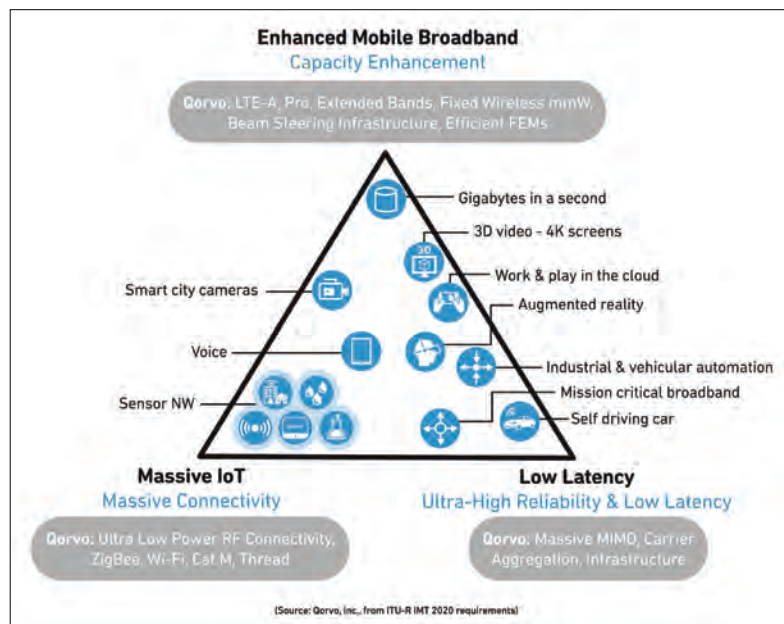


图1. 5G应用分类。

叶变换扩展 OFDM(DFT-s-OFDM)。5G 的前端(包括非独立无线电)将必须支持这两种波形。

在这两者中, CP-OFDM 有着最大的挑战,但也是最有前途的,略为网络运营商提供几个关键的优势。其属性包括提供资源块的最高效频谱封装(高达 98%),并提供空间多路复用的优势,从而可支持多输入多输出(MIMO)技术。由于这些优点,CP-OFDM 是在优先考虑最大限度地提高网络容量时(例如在城市和建筑物内)的最主要候选。挑战在于 CP-OFDM 产生比 4G LTE 更高的峰均功率比。其影响是功率放大器需要更大的功率回馈,并且需要在很宽功率水平上实现高的线性度。

另一种选择是 DFT-s-OFDM,它可以提供效率较低的频谱封装—最高可达 90%,而且对于 MIMO 来说效率也较低。但是,这种形式的 5G 上行链路,与目前使用的 LTE 上行链路具有相同的波形,由于峰均功率比较低,所以可以提供更大的工作范围。由于这些特点,当优先考虑最大化覆盖范围时,例如在人口较少的地区,人们会希望使用 DFT-s-OFDM。

大带宽

4G LTE 和 5G 之间最大的区别之一是信号的带宽:通常为每载波 100MHz,而采用 LTE 的每载波最多为 20MHz(尽管使用 CA 支持高达 60MHz)。较宽的带宽和新的 5G 波形的组合推动峰值平均功率比远高于任何先前的蜂窝通信标准。

所以,RF 前端需要在高频段内非常宽的信道上保持足够的增益和高线性度。

同时存在与宽带宽信号有关的功率效率挑战。为了最大限度地提高 4G LTE 的效率,常用的方法是引入包络跟踪和数字预失真。如果采用包络跟踪,通过不断调整功率放大器的电源电压来优化效率,从而跟踪 RF 包络。

不幸的是,今天的包络跟踪器只能支持高达 40MHz 的带宽。由于这种局限性,包络跟踪不适用于 100MHz 的 5G 信号。相反,功率放大器必须在固定电压的平均功率跟踪模式下运行,同时在整个频率范围内提供高频率线性操作。对于传输链来说,结果就是实质性的效率下降,同时还有对于功率放大器设计的高度线性要求。

对于 LTE,5G 需要具有相对较快增益建立时间的多增益态 PA。如果采用最复杂的下行链路调制方案 256QAM,那么在低噪声放大器中也需要高线性度。关键优值是优异的误差矢量幅度,以及需要当今 64QAM LTE 信号上的改进二阶截点。

更高的输出功率

为了最大限度地提高手机的工作范围,人们正在努力提高射频输出功率,因为这可以弥补高频时的更大传播损耗。这需要支持 3GPP 功率等级 2 标准,该标准使天线处的手机输出功率翻倍,即从之前标准的 23dB 增加到 26dB。通过转向功率等级 2,运营商能够使用高频频段来实现可与低频段所提供运营范围相媲美的运营范围,而无需构建广泛的新的无线基础设施。

然而,这不是唯一的好处。功率等级 2 还改善了内建的接收。与 4G LTE 相反,其中 3GPP 功率等级 2 标准仅用于有限的 TDD-LTE 频带集合,而对于 5G 等级,功率等级 2 则是所有新业务频段的基准要求。因此,所有 5G RF 前端都必须支持这种高输出功率,同时管理相关的热挑战,包括散热。

除了这些热挑战之外,向 5G 非独立无线电的转变将给设备制造商带来棘手的任务,即将更加复杂的 RF 内容,塞进分配给 RF 前端的已经很拥挤的空间中。与其中 MIMO 是可选的 4G LTE 不同,5G 实现预期在标准的下行链路中使用 4×4 MIMO;而一些设备也可以为上行链路使用 2×2 MIMO,从而为极高的数据速率提供前所未有的 200MHz 上行链路带宽。在手机内容纳额外

的射频链路需要高度集成的模块。在某些情况下，可能需要在某些手机中引入额外的天线来支持高频段，从而导致进一步的尺寸和 RF 隔离难题。

射频前端设计

工程师在设计射频前端时必须非常小心，以便它们能够满足 5G 非独立无线电所要求的非凡效率、带宽、线性度和输出功率要求。满足整体要求取决于射频前端关键组件的性能优化，如功率放大器、低噪声放大器和滤波器。

成功的关键是结合使用不同工艺技术制造的级别领先组件。采用先进封装技术，这些组件可以整合到集成模块中，从而节省空间、提高功效并改善散热性能。

在 Qorvo，我们设计了一个满足 5G 非独立无线电全球要求的 RF 前端（见图 2）。这个前端就是我们在 2017 年世界移动大会上推出的 QM19000，具有带宽非常宽的滤波器来支持分配的 4G 和 5G 频段，它支持跨越 3.3GHz 至 4.2GHz 的 900MHz 范围。

该滤波器不必具备的一个特性是“陡峭的裙边”，这是其他设计中需要用来避免更加拥挤的频谱较低频率区域的干扰。由于这一点，暂时没有必要使用体声波滤波器技术，尽管这可以用于未来需求的发展。

对于低噪声放大器，有多种技术可用，包括绝缘体上硅，但 GaAs pHEMT 一直是理想的选择，因为它提供了满足严格线性要求方面的优势。

为了满足 5G 非独立无线电要求，功率放大器至关重要。它必须同时处理 4G 和 5G 传输。在第一种实施方式中，包络跟踪将用于 4G LTE，以最大化整体系统效率。然而，由于通常为 100MHz 的更大带宽，这项技术不适用于 5G。因此，功率放大器必须支持多种功率管理方案：4G 的包络跟踪和 5G 的平均功率跟踪。由于它必须满足两种模式下的性能要求，因此需要将包络跟踪模式下的低饱和效率与平均功率跟踪模式下的线性效率结合起来。当同时支持 4G 和 5G 传输时，该放大器还必须满足线性和增益要求。这包括由于峰值与平均功率比高，其使用于功率回退，而这是 CP-OFDM 的必要条件。

为了满足 4G 和 5G 的所有要求，包括饱和和线性效率，有必要使用由化合物半导体技术制造的功率放大器，例如我们的 HBT5 GaAs 工艺。

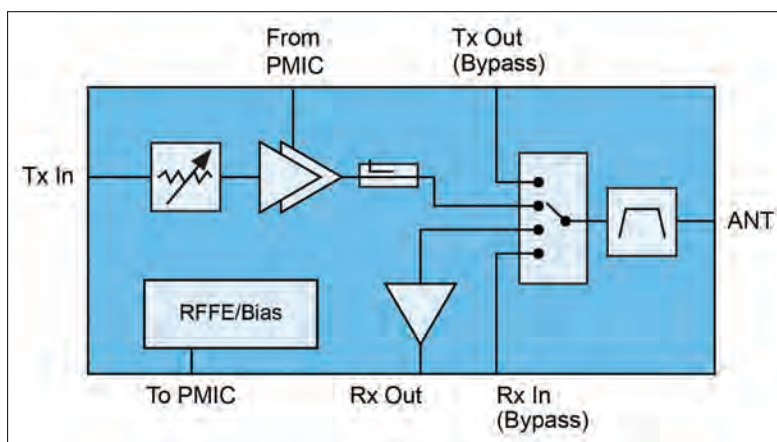


图2. Qorvo QM19000, 一款5G非独立无线电移动射频前端。

连续几代的该工艺都提高了增益和功率输出，从而可以满足新的要求，例如功率等级 2，同时还可以提高效率。采用我们的 HBT5 工艺生产的功率放大器具有很高的热性能，具有出色的散热特性，这要归功于我们的铜凸点封装技术。

即使采用我们的 HBT5 工艺制造的两级功率放大器，也可能需要额外的放大以满足更高输出功率的要求，例如在支持功率等级 2 时，以及在使用 CP-OFDM 波形时（其中收发器驱动电平预计会降低高达 3dB）。为了满足这些需求，我们的 QM19000 包含一个额外的可变增益放大器。该产品还具有复杂的功率管理功能，可用于在包络跟踪模式和平均功率跟踪模式之间切换。

QM19000 的其他优点包括高饱和功率附加效率，同时还在很宽范围正向电源电压下保持良好的线性效率。使用 GaAs 而不是 SiGe 时，该模块可在整个 3.3-4.2GHz 频率范围内保持高效率，SiGe 可在这些高频率下提供比其他技术更高的增益。发送 100MHz CP-OFDM 信号时，在支持的频率范围内提供一致的增益，同时保持了高线性度。

很明显，为移动宽带建立非独立无线电标准已经使运营商能够加速 5G 的计划。与此同时，它创造了具有挑战性的新的移动射频前端需求，包括需要同时支持 5G 和 4G 波形以及大带宽，同时在很宽条件范围内提供高增益、高效率 and 线性度。集成 RF 前端，包括基于化合物半导体技术的高性能 PA，是解决这些难题的关键。随着其他 5G 应用领域向着部署方向发展，它们将面临其他 RF 挑战，需要针对设备和无线基础设施的创新型高性能解决方案。这些解决方案可能会利用化合物半导体的独特性能特点。☑

3D 集成

整合 InP, GaN 和硅 CMOS

多材料堆叠器件实现了无与伦比的性能，这归功于有源衬底、晶圆键合和散热通孔。

Andrew Carter, Miguel Urteaga, TELEDYNE SCIENTIFIC AND IMAGING 公司

与硅基技术相比，采用 III-V 族材料制造的器件具有卓越的高频性能和更好的功率处理特性。然而，这并不是说硅不能发挥作用。由 III-V 族材料制成的电子器件平台缺乏集成的低功耗数字逻辑电路，所以当它们用于制造复杂的基于 III-V 族材料混合信号系统时，它们必须在某种程度上与硅 CMOS 相连接。

如果通过紧密异构集成将这两个材料系统结合在一起，这可以为新型微系统打开大门，将 III-V 族晶体管的性能与 CMOS 的巨大 IP 和制造资源相结合。其中一个关键挑战是确保异构集成工艺不会损害 III-V 族器件的本征性能。

有许多不同的方法可以实现化合物半导体和硅的异构集成（参见图 1 的概述）。一种选择是简单地将由不同材料制成的器件平铺到中介层上。通过这种被称为 2.5D 集成的方案，所有材料必须

形成合适的机械和电气接口。一般来说，这不是太棘手，这要归功于诸如凸点键合和热压键合等技术。但是，如果布线密度太高，则底部中介层可能过于昂贵。

可以解决这个缺点的变化是使用中介层，这也是常用的有源器件衬底，例如硅 CMOS。采用这种方法，一些中介层的成本可能会降低，因为它预先填充了技术。另一个优点是密集的布线环境。然而，这些优点可能会由于芯片内寄生损耗所掩盖，这会阻止系统达到每项技术的内在性能。

通过在共同衬底上进行所有技术的外延生长可以避免这种缺陷。这种方法的另一个优点是器件可以共享同一个布线环境。然而，主衬底很昂贵；并且由于厚的外延缓冲层，可能会导致器件热管理不好。

在 Teledyne Scientific and Imaging，我们最近展示出后一个问题并非不可逾越。使用混合融合晶圆键合进行电气互连，我们形成集成了硅 CMOS 与 InP 和 GaN 技术的叠层。这些叠层具有高导热性的 SiC 衬底，从而可以改善热管理。

我们的三种技术叠层将硅 CMOS 与 InP BiFET（同一衬底上的 HBT 和 HEMT）和 GaN HEMT 结合在一起。我们技术的优点包括最小的不同技术间电学寄生效应和适用于所有类型器件的充分散热。

我们的三种技术叠层顶部为硅 CMOS。这是由较低功率的器件组成，因此需要最少的散热。其下是 InP 器件技术，其中 InP 衬底减薄至

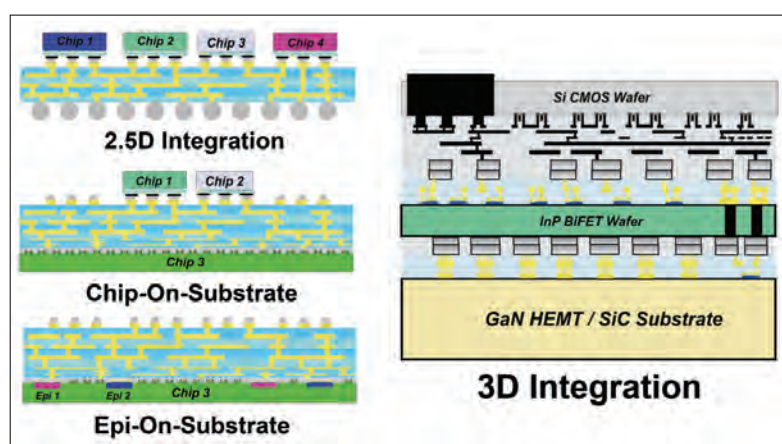


图1. 有多种选项可用于实现化合物半导体的异构集成。

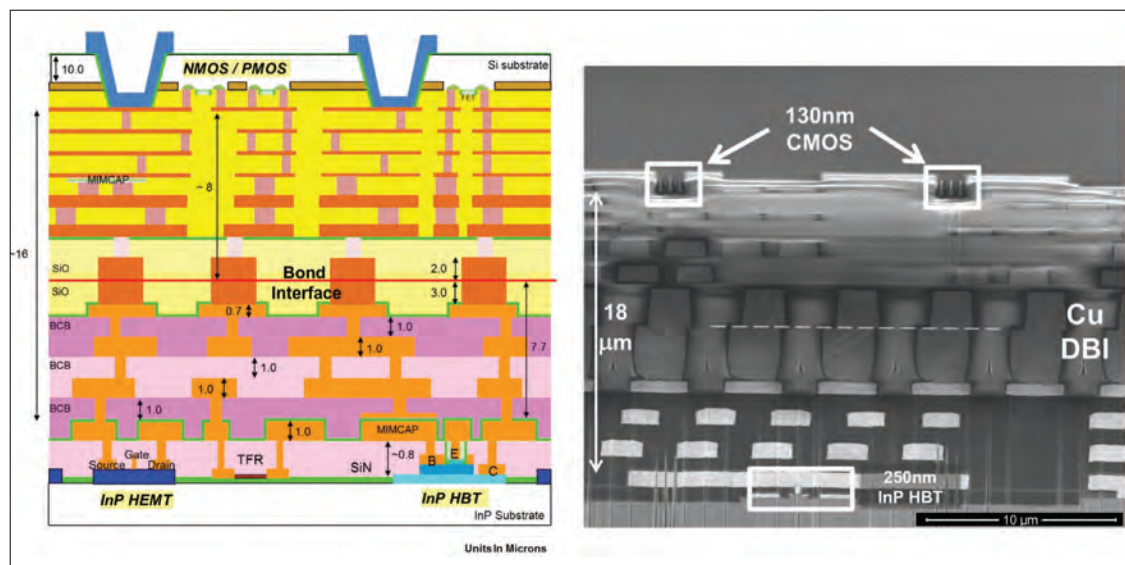


图2. 硅/InP晶圆堆叠：该技术的横截面示意图，以及完整工艺的FIB/SEM横截面。

10μm，并正面键合到位于叠层底部的 SiC 上 GaN 衬底，以确保最佳散热。

我们使用 Tessera 直接键合互连 (DBI) 技术将一种材料系统粘合到另一种材料系统上。这种方法采用嵌入介质中（在这种情况下为二氧化硅）的铜通孔以及每个衬底之间的电接触，这些衬底以面对面或背对面的方向与另一衬底对齐。异构互连通孔的间距仅为 5μm，所以对于芯片尺寸 1cm²，有可能具有多达 400 万互连。为了将 InP 连接至 GaN，在 InP 中形成钨贯穿衬底通孔，并且在薄化的 InP 的背面和 SiC 上 GaN 衬底上形成直接键合互连。

我们在开发三叠层技术方面所做的努力已经分为两个独立但互补的方向：硅 /InP 面对面键合和 InP/GaN 背对面键合。

InP 和硅 CMOS

硅和 InP 的面对面连接可实现 3D 异构集成，为空间受限的微系统带来显著优势。例如，考虑目前用于雷达和高数据速率通信系统的射频波束形成器 IC，它们由一系列增益和相位控制的接收机和发射机通道组成。通过控制每个通道的增益和相位，有可能引导波束形成器的辐射方向图的主瓣的电子束。为了产生最大的扫描角度，所有发射器 / 接收器的天线放置在网格上并且间隔开等于波束形成器中心频率的自由空间波长的一半距离。有了这些射频系统，趋势就是转向更高的频率，所以天线必须放在一起。其中一个后果就是系统封装约束发挥作用。然而，这不是我们技术的主要问题，因为我们的 3D 集成形式将硅控

制逻辑与 InP 紧密接近，并且可以在毫米波频率下实现理想的栅格间距。

我们毫米波频率工作的波束形成器的关键构件是我们的 250nm InP HBT 技术。这些具有 250nm 发射极宽度的器件结合了 f_t 和 f_{max} 最大值分别为 360GHz 和 700GHz，具有共发射极击穿电压为 4.5V。

我们还开发了 InP BiFET 工艺，InP/InGaAs HBT 和 InGaAs HEMT 在同一 InP 衬底上共面。HEMT 为开关式发射 / 接收通道提供低噪声放大器 and 射频开关。

我们的标准 InP HBT 布线环境采用：苯并环丁烯绝缘体，其介电常数为 2.7；三层电镀金布线；以及薄膜电阻器和金属 - 绝缘体 - 金属电容器无源元件。InP 器件通过硅制做的器件来补偿，后者采用格罗方德的 130nm 硅 CMOS 工艺。这种 CMOS 技术提供六层铜金属布线和无源电路元件。

为了设计 InP 和 CMOS 器件布局并模拟所得

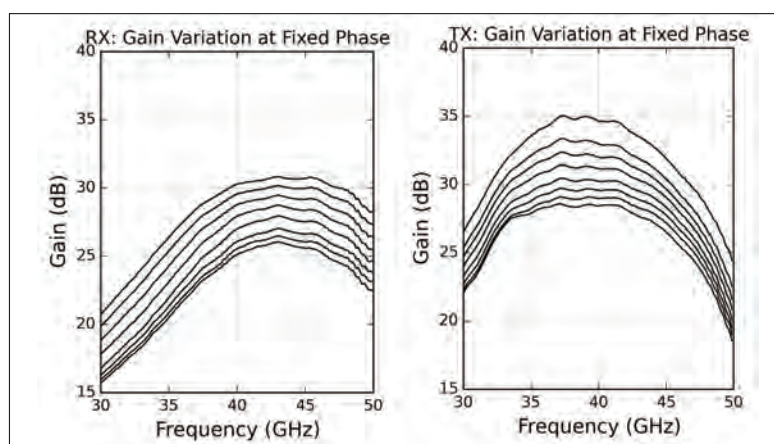


图3. 固定相位状态下对于所有状态的InP/硅Q波段接收器和收发器通道RF增益。

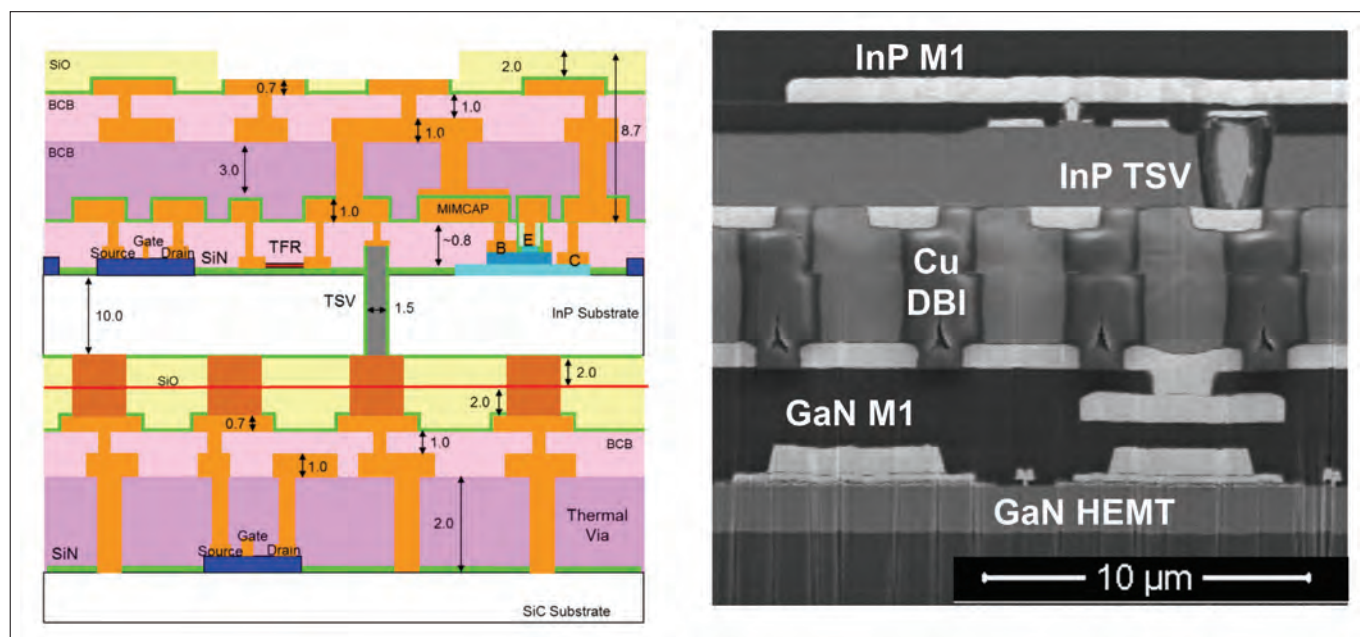


图4. InP/GaN晶圆堆叠：技术的横截面示意图，以及完整工艺的FIB/SEM横截面。

到的电路，我们使用了集成的 Cadence 工艺设计套件。它可以同时应用于这两种技术，其优点包括设计规则检查以及布局和原理图检查。

为了将直接键合互连技术应用于 InP，我们修改了标准的后端线路布线环境。调整包括提高对基板和金线的介电粘附性，并为 100 毫米 InP 衬底开发化学机械抛光工艺。我们发现，应用连续几次的等离子体增强 CVD 二氧化硅，然后进行化学机械抛光，有助于去除加工晶圆顶部的非平面。在此之后，我们对抛光后的二氧化硅进行图案化和刻蚀，并用电镀铜填充以形成互连。

针对硅 CMOS 晶圆，我们使用类似的工艺。在这种情况下，一旦晶圆键合，硅晶圆就研磨并抛光直到它仅有 10μm 厚，然后在晶圆的背面形成接合焊盘，连接到 CMOS M1。

我们用扫描电子显微镜仔细研究了所得到的结构（见图 2）。横截面图像显示出 InP HBT 和 CMOS FET，并显示这两种技术之间的 M1 到 M1 的垂直距离约为 18μm。这足够短到用来确保金属化层之间的低寄生互连。

我们的结构已经用于使接收器和发射器波束

形成器信道工作在 40GHz 的 Q 波段下。接收器信道包括一个 InP HBT 低噪声放大器，一个 InP HBT/ 硅 CMOS 3 位可变增益放大器，以及一个 InP HBT/ 硅 CMOS 4 位移相器。在发射器信道内，有一个 InP HBT/ 硅 CMOS 4 位移相器，一个 InP HBT/ 硅 CMOS 3 位可变增益放大器和一个 InP HBT 功率放大器。

直流和射频性能的表征表明，接收器功耗为 240mW，而发射器的功耗为 1W。对于接收器，40GHz 时的可变增益控制是 25.1dB 到 30.3dB，而发射器则是 28.4dB 到 34.6dB（见图 3）。在此配置中，40GHz 附近的最高增益状态的 1dB 带宽为接收器 10GHz，而发射器为 8GHz。接收器和发射器在 40GHz 时的均方根相位误差分别为 4.6 和 4.8 度。对于收发器信道，40GHz 时的饱和射频输出功率为 20.3dBm（107mW）。根据配备有工厂安装噪声系数硬件（阻抗调谐器和低噪声接收器前端）的是德科技 PNA-X 的测量结果，40GHz 时的信道噪声系数约为 4.2dB。这与单独的低噪声电路模拟非常吻合，包括键合垫损耗，它显示出 4.0dB 的噪声系数。

结合 GaN 和 InP

由于其 3.4eV 高能隙，GaN HEMT 结合了出色的高频性能和高击穿电压。但是，这些放大器在毫米波频率下可能具有低至中等的增益，因此需要高功率输入信号才能驱动其进入压缩。

一种可能的解决方案是在 GaN 级之前插入高

我们的射频波束成形器研发工作使用了各种异构集成策略，我们的工作已证明：3D堆叠可为射频和混合信号毫米波应用提供紧凑型电路设计。

效 InP 驱动放大器。InP HBT 技术提供的大带宽允许在毫米波频率下实现高功率附加效率设计。

为确保两种器件的最佳散热性能，InP 和 GaN 技术必须采用背对前端晶圆键合进行堆叠。另一个先决条件是使用贯通衬底通孔来电互连衬底。

我们通过用 Cl_2 基气体干法蚀刻 InP 衬底来形成通孔。使用优化的条件，高达 8 : 1 的高宽比是可能的。在我建混合结构期间，我们的目标是 $10\mu\text{m}$ 深的贯穿衬底通孔。蚀刻后，通过 CVD 用钨填充通孔。任何多余部分都使用化学机械抛光去除，从而留下 InP 表面挖槽的钨通孔。

在形成贯穿衬底的通孔之后，我们采用标准的 InP 器件工艺流程。在后端低 k 电介质和金属化步骤之后，我们准备最上端晶圆表面用于平面 SiO_2 键合到临时硅支撑晶圆上。这种键合的强度和平面性允许 InP 衬底可以减薄到仅 $10\mu\text{m}$ ，从而露出贯穿衬底的钨通孔。

下一步是在 InP 衬底的减薄背面添加铜直接键合互连图案。这将 SiC 上 GaN 衬底与电话性键合结合在一起，然后通过研磨和干法蚀刻的组合来去除硅支撑。

使用扫描电子显微镜检查该结构的横截面，显示了最终 InP 厚度小于 $10\mu\text{m}$ 的目标—这里只有 $4\mu\text{m}$ （见图 4）。这个缺点将通过改进的衬底通孔暴露工艺来加以解决，从而工艺将确保未来批次的晶圆能够有一致的减薄。

我们的 InP HBT 和 GaN HEMT 进行了 DC 和 RF 性能表征。对键合前后结构的测量表明，集成前后的特征保持相似。

尽管 InP 的减薄远低于其目标值，但器件仍保持其性能，即使它们位于高热阻材料例如二氧化

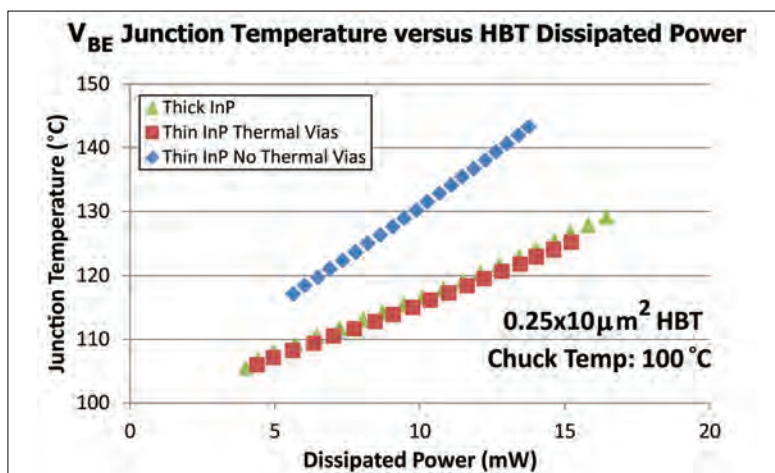


图5.根据基板-发射极结温的测量结果，热通孔允许减薄的InP提供作为基准器件的等效热管理。

化硅和苯并环丁烯之上也是如此。成功源于热通孔，其将来自 InP 衬底的热量分流到低热阻的 SiC 衬底。

我们的工作突出了 3D 晶圆堆叠在化合物半导体电路设计中的好处。得益于我们的射频波束成形器研发工作，使用各种异构集成策略，3D 堆叠已证明可以为 RF 和混合信号毫米波应用提供紧凑的电路设计。

这项研究是在国防高级研究计划局 (DARPA) 资金来源的基础上发展起来的。所表达的观点，意见和 / 或结论是作者的观点，意见和 / 或结论，不应被解释为代表国防部或美国政府的官方观点或政策。CS。

扩展阅读

- D. Green et al., CS-Mantech 2014
- A.D. Carter et al., Indium Phosphide and Related Materials 2017
- A.D. Carter et al., International Microwave Symposium 2017
- Z. Griffith et al., Semiconductor Integrated Circuit Symposium 2014

无银红色 LED 兼备优异的抗硫化性能与高亮度

ROHM 面向汽车领域开发出业界首款完全无银的高亮度红色 LED “SML-Y18U2T”，非常有助于提升汽车刹车灯等在严酷环境下应用的可靠性。

此次开发的产品是用金等其他材料取代了以往晶片键合焊膏及框架所使用的银，实现了完全无银化。此举消除了由于银受到腐蚀而引起 LED 亮

度衰减现象，可提高应用的可靠性。

一直以来，存在元件晶片键合所用的焊膏部位变黑导致 LED 发光强度降低的问题。但是，ROHM 利用从元件到封装垂直统合型生产体制的优势，晶片键合采用金锡 (AuSn)，引线采用金，框架采用金钯 (AuPd)，实现了完全无银化，从而使产品同时具备高亮

度与优异的抗硫化性能。

在硫化试验中，以往使用镀银框架及银浆的产品的的光通量在一个周期 (24 小时) 后为 70%，10 个周期后为 60%，时间越长其光通量越低；而新产品可在 10 个循环 (240 小时) 后依然保持几乎 100% 的高光通量。

改善 UVC LED 的热管理

UVC LED 技术将彻底改变我们在家庭、医院和工作场所的消毒方式。但在实现之前，工程师需要有更好的方法来消除设计中产生的热。

John Cafferkey, CAMBRIDGE NANOTHERM

多年来，人类已经实施了各种消灭物体、表面和消费品中细菌的方法：加热、使用化学药品以及脱水处理。

人们早已了解到，尽管相对较弱，但是自然光可以作为一种灭菌方法。19 世纪后期的实验表明，直接阳光照射足够长时间，放置的水中可以保持没有细菌生长。

后来发现，这产生杀菌效果的原因是自然阳光中存在紫外 C 波段的光（UVC）。今天，我们

可以人为地产生 UVC，并且强度比普通太阳光中的强得多。这种 UVC 发光装置可以为消毒不同材料提供高效的手段。

不管其尺寸或特定的技术，所有 UVC 消毒装置都基于相同的基本原理：UVC 器件发射“杀菌范围”即 200nm 到 280nm 的光，这个光谱域的光可以“破坏”细菌的基因组，使细菌丧失活性，因此可以通过 UVC 光照射任何表面来进行消毒。

使用 UVC 进行材料消毒有许多优点。首先



就是可以避免使用有毒或腐蚀性的杀菌化学药品，因为这可能会留下有毒的副产品。这个优点使得 UVC 非常适合市政级别水消毒等应用，或任何使用化学品可能产生危害或消毒不彻底的情况。

UVC 是处理抗氯性病原体（如贾第虫和隐孢子虫）的更好选择。它或许也可能是消毒常规难以接触区域，或者当表面与清洁化学品接触时会产生污染或者其他方式反应的表面消毒最佳方法。不管购买 UVC 消毒装置的成本是多少，在很多情况下，UVC 装置可以减少公司相关的长期管理费用：比如培训员工使用危险化学品、制定应急计划、制定风险管理以及缴纳保险费用等。

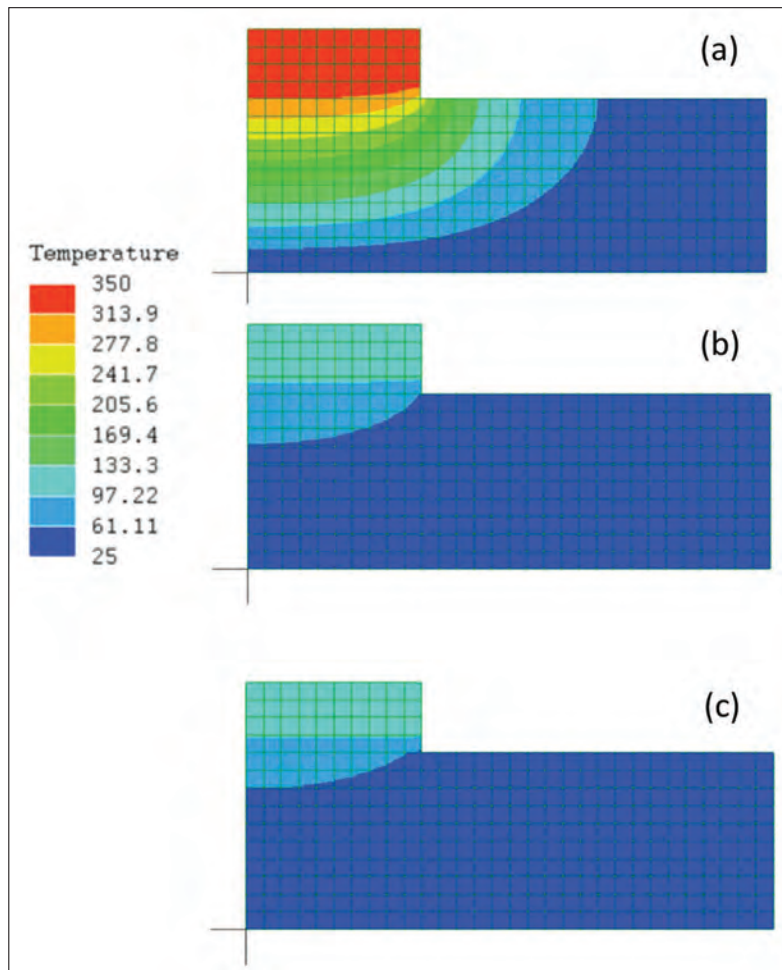
传统 UVC 技术的问题

限制 UVC 技术传播的因素之一，是迄今为

止对于汞蒸气灯的依赖。汞蒸气灯对于某些应用来说非常好，具有足够的亮度、高能效并且可以持续足够长时间。但另一方面，它们又昂贵、易碎、含有有毒的汞，这些都限制了它们可以使用的场合因而应用的数量，所有这些可用场合都可以使用汞但是会要求封闭的回收利用方案。

汞蒸气灯很适合用于市政供水卫生等应用场合，而且这些也是经常在使用的地方。这里，相对较高的灯泡成本是可以接受的，另外尺寸也不是问题，而且工程师可以快速到现场来处理任何的破损。

更重要的是，发生破损从而使公众接触有毒物质的机会实际上是不存在的。但是，由于与以上相同的原因，汞蒸气灯并不适用于更小、更便携的设备，也不适合用于灯可能更容易损坏的消费应用。



热模拟表明， Al_2O_3 (a) 不能应对UV LED导致的热挑战。Nanotherm公司的DMS解决方案 (b) 可以很好地应付热挑战，并且实际上与AlN的热性能相同。考虑到 Al_2O_3 的热导率，Nanotherm DMS地导热率和AlN的导热率分别为25W/mK，150W/mK和170W/mK，这个结果其实不难预期。这里的计算基于“1/4模型”，也就是利用对称性，并考虑均匀和热各向同性的材料。芯片为 $150\mu\text{m}$ 厚 $\times 1\text{mm}$ 每面（因此显示为 $500\mu\text{m}$ ），焊点厚度为 $50\mu\text{m}$ ，衬底的厚度为 $500\mu\text{m} \times 6\text{mm}$ 每面（因此显示为 1.5mm ）。散热器的下表面固定为 25°C 。其中假定芯片内有平衡的发热率，并且热都是从散热器的下表面去除。

LED 的机会

LED 技术已经发展到了一顶的阶段，即紫外 LED 不仅可能，而且也正在成为一系列应用中越来越有吸引力的选择之一。

在某些应用中，UVC LED 比汞灯更具成本效益，而且随着时间推移成本优势会越来越显著。更重要的是，UVC LED 更小巧、更坚固、功耗更低、可以瞬间打开（无需预热时间）、且不含大量的有害化学物质。

根据行业分析专家 Yole Développement 的数据，UVC LED 需要降到 1~4 美元/mW 左右的价格，才能让大众市场所接受。因此，UVC LED 产业一直专注于降低成本。随着工艺进展，UVC LED 的价格在近几年已经下降了 8 到 10 倍。最终的目标是达到 UVC LED 约 1 美元 /mW 的成本。与此

同时，业界一直致力于生产性能更高（每个封装的输出功率大于 10mW）、持续更长时间的器件。

随着成本的降低，UVC LED 的价格已经在更广泛的应用范围内降到了可以接受的区间。

UVC LED 将为消毒装置带来根本性的突破。UVC LED 的小尺寸结合其安全性和低功耗，意味着我们可以很好地将 UVC 嵌入到日常消费品中，比如婴儿奶瓶消毒，比如牙刷架消毒等，使这些物品在使用时可以实现自动消毒。UVC 也可以集成到手持式清洁装置中，用户可以扫过表面、键盘、手机等，或者嵌入到“自我消毒”水瓶中和医疗设备中进行消毒。

但是，为了实现 UVC LED 市场的全部潜力，制造商目前所面临的其余障碍之一就是必须克服的热管理。

热挑战

虽然白炽灯泡能够将热量直接辐射和对流到空气中，但这并不是 LED 的可选方式。UVC LED 芯片每边只有几毫米的尺寸，所以这些芯片的表面积太小，无法通过任何可观的对流来进行冷却。另外每个芯片的温度也太低，难以辐射所产生的大量热量。

从 UVC LED 中去除热量的唯一有效方法，就是通过芯片本身的材料将这种能量通过基板和 PCB 传导到散热器，然后再散发到周围的空气中。

在可见光 LED 的情况下，这个问题通常是通过将 LED 安装在金属覆盖 PCB (MCPCB) 上来加以解决。由于导热系数与成本之比较高，人们通常使用的金属是铝。然后用一层作为电介质的环氧树脂覆盖铝的顶部，将铝与上面的铜电路层进行电绝缘。

然而，紫外线的一个主要问题是它会使环氧树脂等有机物质产生退化。其次，这种堆叠的整体热性能对于 UVC LED 这种特别苛刻的热需求来说，显然是不够用的。

通常，这些要求会让设计人员转向使用陶瓷基板。设计人员可以在两种类型之间选择：氮化铝 (AlN) 陶瓷或氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷。其中，只有 AlN (约 140-170W/mK) 具有足够的导热率，从而可能适应 UVC LED 的应用。

但是 AlN 也很昂贵，并且只有小块可用。同时，陶瓷电路板很脆，使得它们难于进行加工，另外不适用于螺钉安装，并且不适合需要更坚固

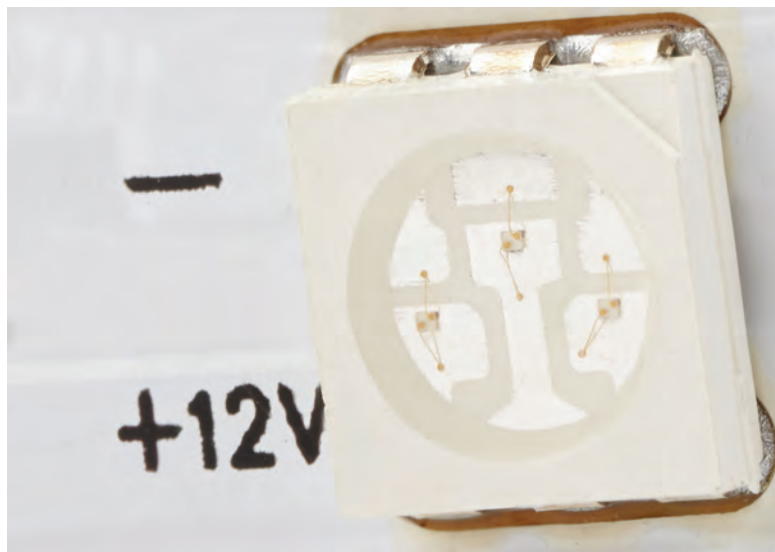
基板的应用。

我们在英国 Haverhill 的剑桥 Nanotherm 公司开发了一项专利工艺，这是一种涉及电化学氧化的“经济”工艺，使设计人员能够同时充分利用 MCPCB 解决方案和陶瓷解决方案的最佳性能。

我们的方法是首先将铝片表面转换成氧化铝 (Al_2O_3) 陶瓷，氧化铝作为介质层。该介质层的厚度可以严格控制到几十微米厚。这个厚度意味着 Al_2O_3 相对低下的热效率将不再是一个问题，我们生成的陶瓷介质层是如此之薄，以至于通过它都能够有效地传导热量。

为了进一步提高整个叠层的导热性，我们使用“薄膜”工艺将电路层“溅射”到该纳米陶瓷电介质上。基本上，铜的原子是“发射”到电路板上的，从而使其原子级地结合到电路板上，因而可以确保最大的热效率。

这样做的结果是得到具有 150W/mK 复合热导率（适用于 UVC LED 应用，并且与 AlN 相当）的类 MCPCB 板，但是其机械强度还可以适合现有的 MCPCB 生产工艺。易于加工，高良率，加



上低成本的铝，这些都使我们的解决方案具有非常好的成本效益。由于没有使用环氧树脂，即使紫外线也不会对其造成退化。

LED UVC 消毒的热潮已经开始，这对每个人都将产生重大的影响。制造商正在制造全新的 UVC 产品，这些产品必将改变消毒的方式，使物体、表面和物质更容易变得安全。

然而，为了达到这个目的，设计人员必须重新考虑他们应该如何应对板级 UVC 器件的热挑战。幸运的是，正在开发的新技术将使 UVC LED 产品向成为商业现实前进了一大步。OSc

为什么紫外 LED 中发热是很大的问题？

热管理对所有 LED 都提出了挑战。然而，随着电磁波谱中光波长向短波方向的移动，外部量子效率 (EQE) 逐步下降。这在 UV 光谱中特别显著，其中 EQE 从 UVA (380nm) 的 40% 下降到 UVC (260nm) 的几个百分点。虽然 EQE 的讨论超出了本文的范围，但对它的理解有助于确定模块基板所需处理的热管理要求。

EQE 是三个因子的乘积：内部量子效率 (IQE)，电注入效率 (EIE) 和光提取效率 (LEE)。

人们正在使用体 AlN 和蓝宝石衬底上 AlN 模板等新方法来改进 IQE。体 AlN 衬底是纯的 AlN 晶圆，用于代替蓝宝石作为外延工艺的基础。体 AlN 使得外延层中具有较低的缺陷密度，低的缺陷密度可以增加 IQE。体 AlN 也是少数能够使用透过 280nm 以下光线的材料之一，而这有可

能会导致新器件结构的产生。

人们正在探索包括量子隧穿降低电阻以及提高 AlGaIn/InGaIn 层电效率等方法，从而实现 EIE 的改进。虽然所开展工作都有正向的反馈，但与理论变成商业现实还相差甚远。

改进 LEE 可以有许多方法，其中包括使用倒装芯片技术、纳米线以及新颖的芯片几何结构。

目前的基本事实是，虽然正在进行重大的研究和开发以期在芯片级别解决 EQE 低的问题，但是波长越短，芯片的效率就越低。这意味着为了获得芯片上能够产生足够有用数量的光，需要足够大的功率输入。这会使得芯片中产生大量的过量热量，这些热量并且必须从 LED 中去除，才能使半导体的结处于最高工作温度以下正常工作。

优化 GaN HEMT 生产

在化合物半导体制造峰会（CS Mantech 2017）上，工程师们展示了如何制备更大增益、更高效率和更高迁移率的 GaN HEMT

作者：Richard Stevenson

GaN HEMT 有许多优点。其主要特性是在非常高的功率密度下运行，并能够提供高效开关能力，同时它也有在高温下工作的有用能力。

由于其优异的特性，GaN HEMT 的销量正在上升。现在净销售达每年上亿美元，通过降低生产成本和进一步提高性能，有望提高单片产出来增加更多的收益。

推动这些改进的是工程师团队。他们愿意在化合物半导体制造峰会上分享经验，今年的会议是5月下旬在印度威尔斯度假村凯悦酒店举行。在这个优美的环境中，他们展示了现有产品的巨大可靠性；透露如何通过单独的源极通道提高功率附加效率；提供了如何优化硅上生长 HEMT 沟道迁移率的见解；并展示了工程化衬底上生长的前景。

极高的 GaN 可靠性

会议上，波音网络和空间系统公司的 Bruce Paine 提交了一篇文章，介绍 GaN HEMT 提供的极高可靠性。他和他的同事 Neil Kubota 发现，在对由商业供应商生产的 GaN-on-SiC HEMT 进行测试时，没有任何广泛报道的失效模式证据，这里使用的工艺技术已经市场化好些年，现在已用新技术进行了取代。Paine 和 Kubota 没有发现器件性能受到“反向压电”效应，表面腐蚀坑，电荷捕获和热电子效应的任何劣化。

“当这些消失的时候，这些部件会持续使用很长时间，直到最后栅极随着金的损耗而开始劣化，”Paine 说。据称金的损耗是这些器件失效的一种新模式。



很大的问题：“这是任何可想到的应用或产品到达寿命后，最终都将会出现的失效模式。”对于 200℃ 沟道温度下测试的器件，平均无故障时间为 1.5×10^7 小时，置信度为 90%。

波音公司的工程师们将通过不同的压力条件后，更仔细地检查器件。“这将是更彻底观察 [金损耗] 现象的努力，”潘恩说。

使用通孔提高效率

为了使 GaN HEMT 能够在更高的频率下工作，制造商已经转换到更短的栅极长度。例如，Qorvo 已经为 Ka 波段产品引进了 150nm 工艺。

减小栅极长度的一个优点是器件增益的增加，预计通过减少源极电感可以进一步推进。在今年的 CS Mantech 会议上，来自 Qorvo 的 Yongie Cui 透露，这种电感降低可以通过引入允许短的源极接地焊盘的单个源极通孔来实现。

使用该公司的 0.15μm GaN 技术，Cui 和同事们制造的器件具有 30μm 乘以 30μm 的单个源极通孔，并将其与具有终端通孔的器件进行了比较。切换到单个源极通孔使得源极电感从 0.0145nH 降低到 0.0099nH，实现了更高的外部稳定增益和最大振荡频率超过 10GHz 的增加。

为了使通孔尺寸尽可能大，并确保从该技术中获益，Qorvo 团队必须减少背面和正面之间的对准偏差。他们成功引进了一个新工艺，将偏差从 7μm 降低到小于 4μm。

团队面临的另一个挑战是解决传统通孔电镀工艺的低良率。由于非优化清洗和预润湿步骤导致的粗糙侧壁和结节，良率可能低于 50%。开发新工艺增加了良率，现在已经超过 90%（见图 2）。据 Cui 介绍，新工艺不会大幅增加制造时间或成本。“我们的 GaN 技术一直就有通孔。”

在 $4 \times 50\mu\text{m}$ 晶体管上的 30GHz 大信号性测量，使用 20V 的漏极偏压和 20mA 的电流，结果显示：具有单独源极通孔的器件达到了 47% 的功率附加效率，输出功率为 3.15W/mm，增益为 7.9dB。相比之下，具有终端通孔的等效芯片有 45.9% 的功率附加效率，3.08W/mm 的输出功率和 7.4dB 的增益。

这两组数据之间的差异很小，可能会让人错失单独源极通孔所能实现好处的广度。

“论文中给出的例子针对我们的四指器件，其中我们比较了三个通孔器件和两个通孔器件的结果。”Cui 说。“如果我们有叉指更多的器件，

新的损耗机制来自对单个布局单元的 4GHz、2W 场效应晶体管系列测试中。当进行 RF 寿命测试时，观察到 RF 功率的突然下降。大部分部件完全停止发挥作用，光学检查显示主要是熔化摧毁了场效应晶体管。

尽管较少数量的部件仍然可以起作用，但它们的栅极电阻从 20Ω/mm 增加到几百。用扫描电子显微镜检查这些部件，表明栅极部分金几乎完全损耗掉了。这些损耗涉及数十微米金的去除，发生的位置很随机。注意，这些缺口并不集中在栅极馈线附近，这里是沿着栅极金属电流密度最高的地方。

Paine 希望向 GaN HEMT 的生产者和消费者保证，由于金损耗导致的器件失效并不是一个

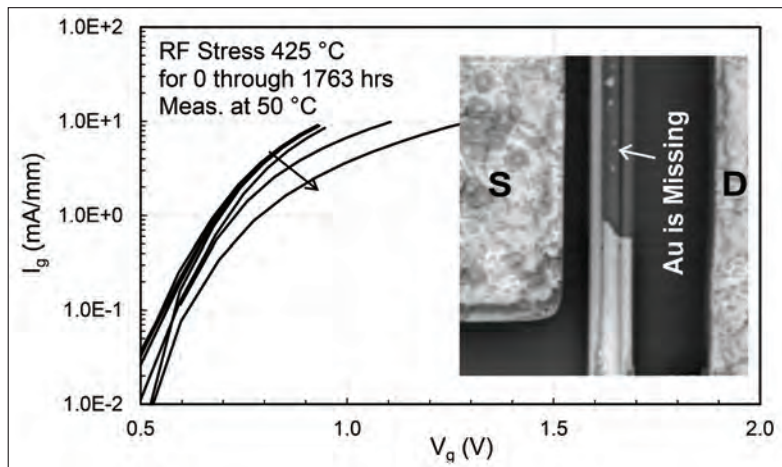


图1. 波音公司的工程师们在商业器件上进行了寿命测试，记录了正向栅极电流-电压曲线。使用0V的源极和漏极电压的单个样品的图中有几条曲线，箭头指示应力时间的进度。插图显示出大的栅极电阻增加后，栅极的20kV背散射扫描电子显微镜图像。图取自靠近栅极末端，与栅极馈线相对的一端。

例如八指，那么对于单独源极通孔的器件，我们将有五个通孔，比终端通孔器件还要多三个。”这种情况下，性能的差异将会变得很大。

另外值得注意的是，测量是在单级上进行的，而MMIC中将使用更多级；并且源极电感的影响是频率依赖的。“我们展示了30GHz下器件的性能，”Cui说。“频率越高，单独源极通孔的优势就越明显。”

增加迁移率

此次CS Mantech会议的另一个亮点是伊利诺伊大学香槟分校(UIUC)的Cam Bayram及其同事发表的文章。这些工程师展示出，当在硅衬底上降低制造成本的AlGaIn/GaN HEMT时，界面粗糙度可以限制沟道迁移率，并最终限制高频性能。

在测量了具有不同缓冲层配置的各种结构后，该团队得出了这一结论。测量表明，GaN层中的面内应力而不是表面缺陷率，管控二维电子气的特性。降低面内应力，由于压电极化减小而导致二维电子气浓度的降低，而由于沟道中界面粗糙度散射的减少，电子气的迁移率将增加。

描述这项工作文章的主要作者Hsuan-Ping LEE告诉《化合物半导体》，许多小组已经评估了缺陷对二维电子气特性的影响。然而，这些先前的研究主要局限于常规的衬底，例如SiC和蓝宝石。

“随着硅衬底出现，以及对复杂缓冲层的需求，应力管理成为突出的因素，特别是对于放大到200mm以上晶圆时，”Lee解释说。

随着硅衬底出现以及对复杂缓冲层的需求，特别是对于放大到200mm以上晶圆时，应力管理成为突出的因素。

Lee和同事们标准的单面抛光硅(111)晶片上，采用三种不同的缓冲层结构来制造AlGaIn/GaN HEMT。一种缓冲结构具有由厚GaN层随后是AlGaIn和GaN组成的三个周期；另一种采用同样的层，但总厚度减少到了三分之一；而第三种仅包括AlN上较薄的GaN层。

为了评估表面质量，工程师们用光学显微镜、原子力显微镜和阴极荧光对所有三个样品进行了检查(见图3)。这三种技术仪器确定了结构中的相似性，无表面裂纹以及类似的表面粗糙度水平，同时揭示出缓冲层越厚，穿透位错密度越低。

这些位错，可分为刃型、螺型和混合型，都会降低器件性能。但是，在Lee和同事制备的样品中，缺陷密度在 $2-3 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$ 范围内，对沟道迁移率影响最大的是应变。“尽可能减少这种缺陷一直是人们期望的，但是我们的工作指出，假定在相同的缺陷水平下，应力管理是对于实现高的二维电子气迁移率才是至关重要的。”

使用范德堡配置，霍尔测量显示出缓冲结构中有AlGaIn的较薄样品室温电子迁移率为 $1802 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。这比其它两个样品更高：较厚样品为 $1295 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ，样品中只有GaN和AlGaIn缓冲结构的则为 $1593 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。

“我们的目标是使用我们最好的应变工程样品，室温迁移率为 $1,802 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ，来推进高频RF器件。”

工程化衬底

避免需要复杂缓冲层的一种方法是转向工程

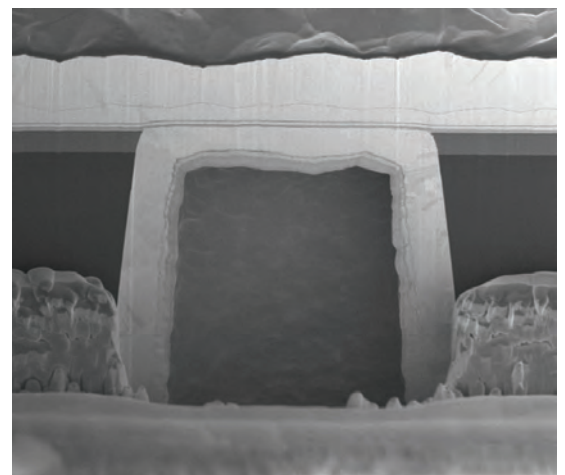


图2. 横截面扫描电子显微镜显示，Qorvo添加单个源通孔的过程可以实现平滑的侧壁和通孔底部的电镀。

化衬底。这种平台的制造商包括加利福尼亚州圣克拉拉市的 Quora 技术公司，它开发了一种工程化衬底，特征在于核心具有与 GaN 相匹配的热膨胀系数，而开盒即用的硅（111）表面用于生长外延 GaN。由此，可以消除了晶圆翘曲的问题，并且没有缓冲层厚度的限制，该厚度会限制击穿电压。

在今年的 CS Mantech 会议上，美国海军研究实验室 Karl Hobart 提交，与 Quora 和 George Mason 大学的工程师共同撰写的论文中，给出在这些衬底上所形成 GaN HEMT 的结果。据 Hobart 报道，Quora 工程化衬底上生长的 HEMT 与当今的硅基器件相比，具有材料和热性能以及电气特性方面的优势。

使用这些工程化衬底，Hobart 和合作者使用与制造硅上 GaN HEMT 非常相似的生长配方。然而，缓冲层堆叠则要简单得多，因为应变管理更加简单。

Hobart 说，生长基础是如此之好，以致可以容纳通过 MOCVD 或 HVPE 沉积的高达几十微米 GaN 材料，而没有裂纹或者破碎。“这种独特能力也可以用于实现垂直功率器件架构。”

通过在 150mm 的 Quora 衬底生长 5 μm 厚的 GaN 层，然后增加 6 μm 厚、掺碳的缓冲层，100nm 非掺 GaN，20nm 厚 AlGaIn 层和 2nm 厚 GaN 帽层，形成了耗尽模式的 HEMT。随后进行外延层的常规工艺，晶体管使用欧姆栅极构建，源极到漏极距离为 5 μm 至 15 μm 之间。

HEMT 表征显示出最大驱动电流为 0.376mA/mm，最大跨导为 155mS/mm，击穿电压为 570V，霍尔迁移率为 1859cm²V⁻¹s⁻¹。

Hobart 认为，这些结果非常令人鼓舞，展示了 Quora 衬底的巨大潜力。该团队正在优化在该平台上构建的 HEMT 外延层和器件结构。

“此外，我们的产业合作伙伴已经展示了商业化工厂环境中，采用 Quora 衬底技术的增强模式 HEMT 器件，” Hobart 说。

考虑从硅衬底切换到 Quora 平台的制造商，可能会关注工程化平台的额外成本。Hobart 给出了保证，认为可以在 Quora 的 200mm 衬底上生产出各种功率器件，成本低于每安培 0.03 美元。这些器件可以包括开关、垂直二极管和工作电压范围为 100V 至 1500V 的其他产品。

Hobart 说：“成本低于 0.03 美元/A 不仅优于现有的硅上 GaN 和 GaN 上 GaN 解决方案，而且与传统的硅基功率分立器件相比都很有竞争力，

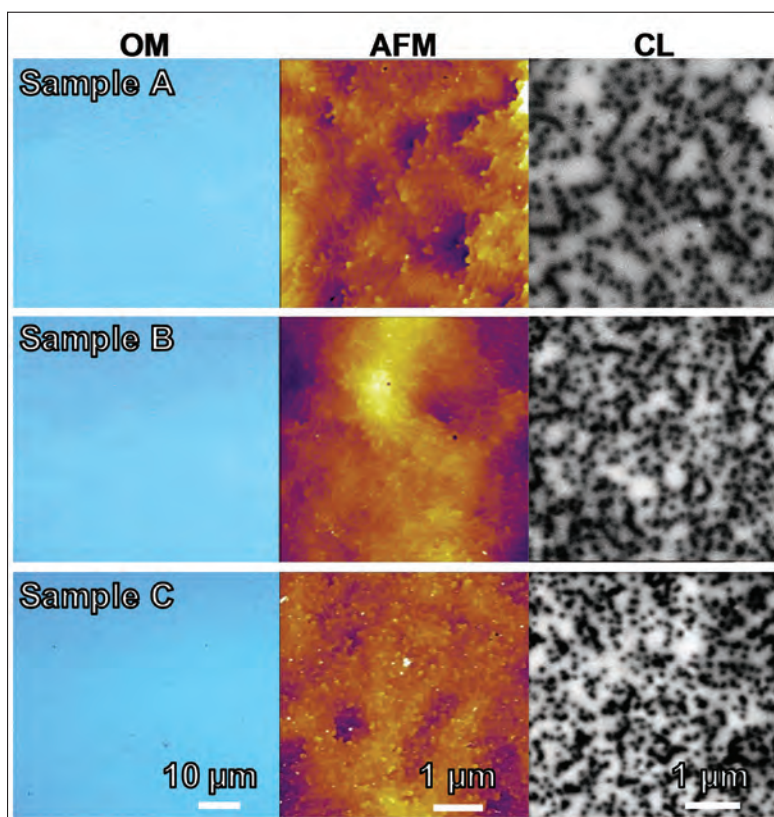


图3. 伊利诺伊大学香槟分校的工程师们研究了不同缓冲层对硅上 AlGaIn/GaN HEMT 表面的影响。该团队采用了三种不同的缓冲层结构：（A）包括厚层 GaN，随后是 AlGaIn 和 GaN 的三周期结构；（B）包括较薄 GaN，随后是 AlGaIn 和 GaN 的三周期结构；以及（C）AlN 上相对薄的 GaN 层。（左）光学显微镜显示出无裂纹表面。（中）原子力显微镜显示出不同的表面形态。（右）阴极荧光全色扫描显示缺陷为黑色点。

比如硅基 MOSFET 和 IGBT。”广泛的认同可以加速 GaN 的应用。

除了试图改善海军研究实验室生产的 HEMT，Hobart 和同事们正在计划展现他们自己的增强模式器件，并评估 Quora 平台上生产的其他器件，如垂直二极管和场效应晶体管。另外的目标是制造垂直开关和 RF 器件，并继续与合作伙伴合作来展示 Quora 的 300mm 衬底。后者的成功将展示该工程化平台相关的长期路线图。

美国海军研究实验室的工程师们以及 Quora，波音，Qorvo 和 UIUC 的工程师们都看到 HEMT 非常有前途的未来。由于其高可靠性和良好的性能，GaN HEMT 已经处于很好的位置，而其发展路径则是更好，更便宜。CS

除了试图改善海军研究实验室生产的 HEMT，Hobart 和同事们正在计划展现他们自己的增强模式器件，并评估 Quora 平台上生产的其他器件，如垂直二极管和场效应晶体管。另外的目标是制造垂直开关和 RF 器件，并继续与合作伙伴合作来展示 Quora 的 300mm 衬底。

GaN 功率器件： 完善垂直架构

优化沟道和鳍形可以以低外延成本和高阻断电压来
生产垂直、常关型 GaN 功率晶体管

Yuhao Zhang, Min Sun, Tomás Palacios, 麻省理工学院

GaN 掀起了电力电子行业的根本变革。它有望减小功率转换电路的损耗，并可能使全球功耗降低 10%。而且，由于能够处理比当今器件高得多的功率密度，可望减小电源系统的尺寸、重量和成本。

最初，GaN 功率器件的发展侧重于横向几何形状。然而，最近对垂直架构的兴趣日益浓厚。这种几何形状的优点包括：实现高击穿电压和高电流水平的能力，而这无需芯片尺寸的放大；卓越的可靠性，这源自于峰值电场从表面到体器件的转变；与横向器件相比时，热管理得以简化。由于这些特性，垂直 GaN 器件将是电流超过 100A，电压超过 600V 的最有可能的竞争者，这是诸如电动汽车和可再生能源处理等许多中和高功率应用的典型要求。

垂直 GaN 功率器件面临的挑战之一是实现常关操作，这和横向结构是一样的。然而，这还不是唯一的问题：许多垂直器件需要 p 型 GaN 或外延二次生长。相比 n 型 GaN，p 型 GaN 更不容易生长，它的受主激活比例很低，而且载流子的迁移率也要低得多。如果再需要外延二次生长，这必将再次极大增加器件制造的复杂性和成本。

为了克服这些困难，我们的团队在麻省理工学院开发出一款新颖的 GaN 基垂直功率器件，其特征在于沟槽和鳍形结构，并且无需生长 p 型材料。

实现常关器件

沟槽结构是许多现代 GaN 垂直器件的关键组成部分。例如，最近它用于沟槽金属 - 绝缘体 - 半导体势垒肖特基整流器中，其中沟槽在肖特基接触处屏蔽了高电场（见图 1 (a)）。沟槽的加入大大增强了 GaN 肖特基整流器的反向阻断特性，将击穿电压提高了一倍，并且在高反向偏置下将漏电流减小了 104 倍。

常关 GaN 晶体管也受益于沟槽的引入。这些之中包括最广泛使用的垂直晶体管架构之一，即电流孔径垂直电子晶体管。这个常开器件结合了 AlGaN/GaN 异质结中沟道二维电子气的高导电性，以及改善的垂直结构电场分布。常关操作有可能通过切换到沟槽式半极性栅来实现（见图 1 (b)）。

从沟槽引入中受益的另一种晶体管架构是垂直 GaN MOSFET。这种改变允许其将常关操作与低导通电阻结合起来（见图 1 (c)）。

完善沟槽制造

沟槽刻蚀和圆角是高压垂直 GaN 器件中制造高质量沟槽的两个关键技术。由于沟槽转角通常与峰值电场的位置重合，因此是最“脆弱”的击穿点，它们的平整度很有价值。如果这些沟槽中有任何粗糙的表面或尖角，则可能发生电场拥挤，导致器件早期击穿。

用于硅和碳化硅器件的传统圆角加工技术不可能获得好的结果。这是因为超过 1000℃ 的高温退火会恶化 GaN 材料质量和器件性能。

为了防止这种情况的发生，我们开发了一种无损伤的 GaN 圆角技术，工作温度仅为 85℃。

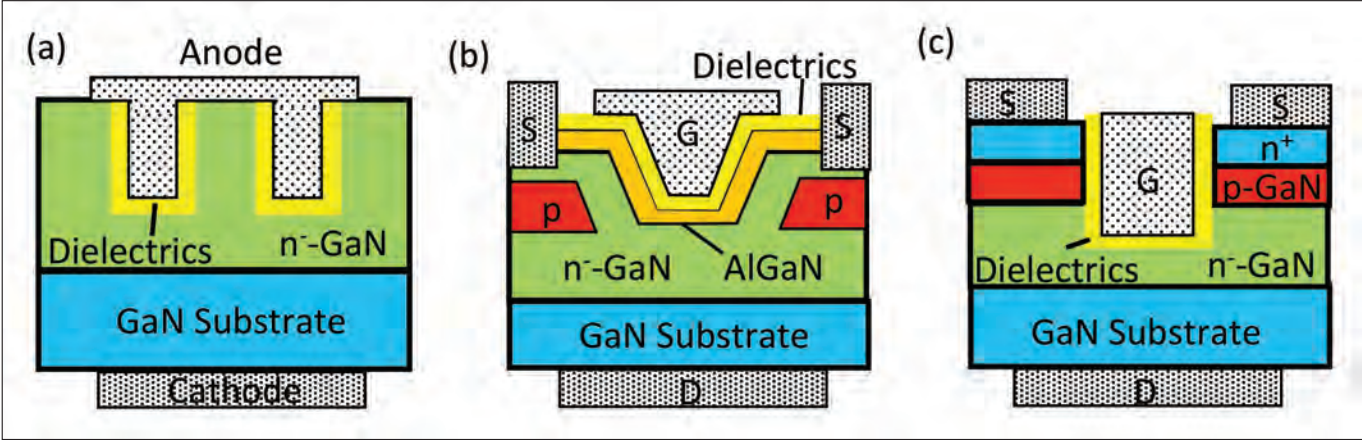


图1. 沟槽结构可用于各种垂直GaN功率器件，包括：（a）金属-绝缘体-半导体势垒肖特基整流器，（b）电流孔径垂直电子晶体管和（c）MOSFET。

它涉及湿法化学处理，使用四甲基氢氧化铵蚀刻，然后使用食人鱼清洗。通过沿着侧壁 m 面和 a 面蚀刻，在蚀刻残余物通过食人鱼清洗有效去除之前，氢氧化物就消除了由于干法蚀刻引起的表面损伤（见图 2（a），（b）和（c））。

我们可以通过调整干法蚀刻条件和应用圆角工艺来控制沟槽的形状。我们通过 TCAD 模拟和实验研究，了解到我们要形成平底圆角的沟槽，因为这是分散电场分布的最有效形状，从而可以提供最好的阻断特性（见图 2（d）-（e））。

沟槽结构阻断能力的改进可以通过添加先进的结构来实现，这会将峰值电场从沟槽转角 / 底部移向远处的体半导体区中。结合注入场环或者

在沟槽底部附近引入碳掺杂的 GaN/p-GaN 杂化阻挡层都可以获得成功。

首次亮相：垂直 GaN 鳍形 MOSFET

在基于沟槽的垂直功率晶体管中，沟槽之间的半导体区域为场效应晶体管提供了沟道。对于电流孔径垂直电子晶体管和 MOSFET，实现常关操作需要在沟道区中进行复杂的外延二次生长或 p 型 GaN 层生长。这两种选择都不是我们想要的：二次外延生长步骤显著增加了器件制造的成本和复杂性；而增加 p 型材料会产生很不理想的传输特性，这是因为这种反转的 p 型 GaN 沟道中电子的迁移率通常比 n 型 GaN 区域中电子的迁移率至

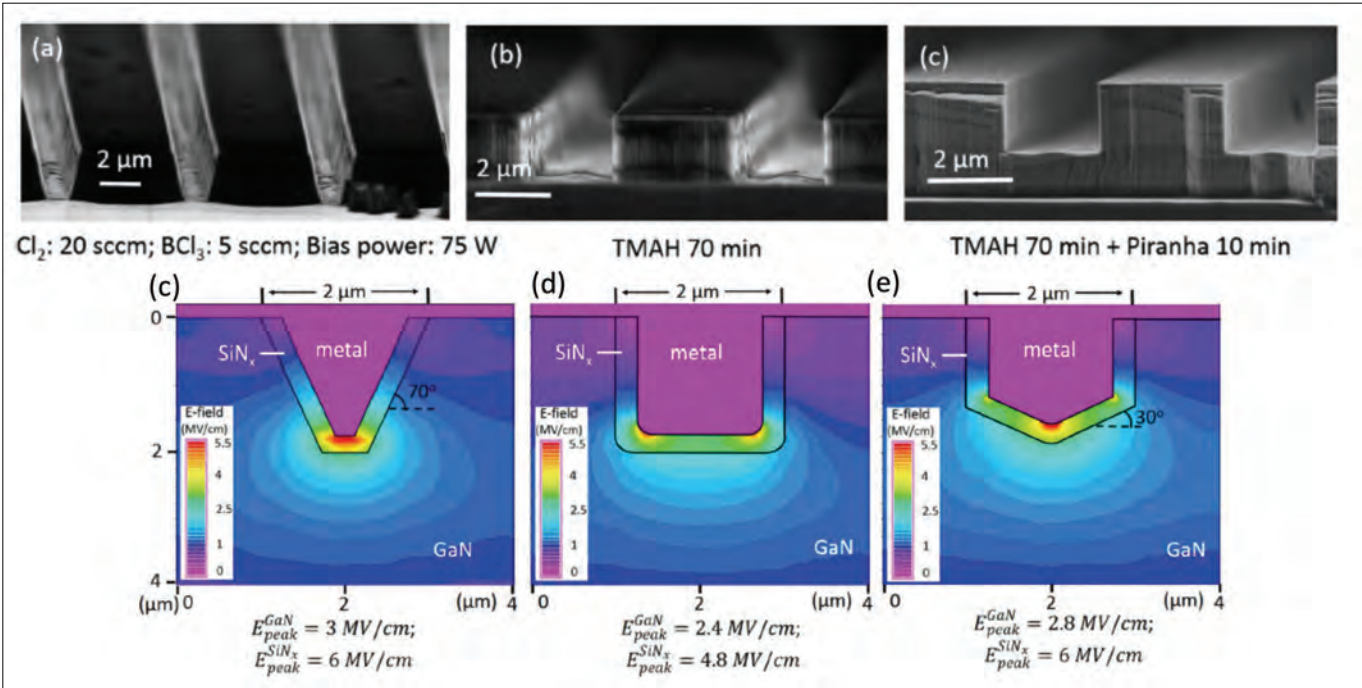


图2. 上部（a）-（c）分别为干法蚀刻后，随之的四甲基氢氧化铵湿法蚀刻，以及额外食人鱼清洗后的沟槽结构横截面扫描电子显微镜图像。下部（c）-（e）分别为具有三种不同沟槽形状的沟槽器件单元的模拟电场分布。

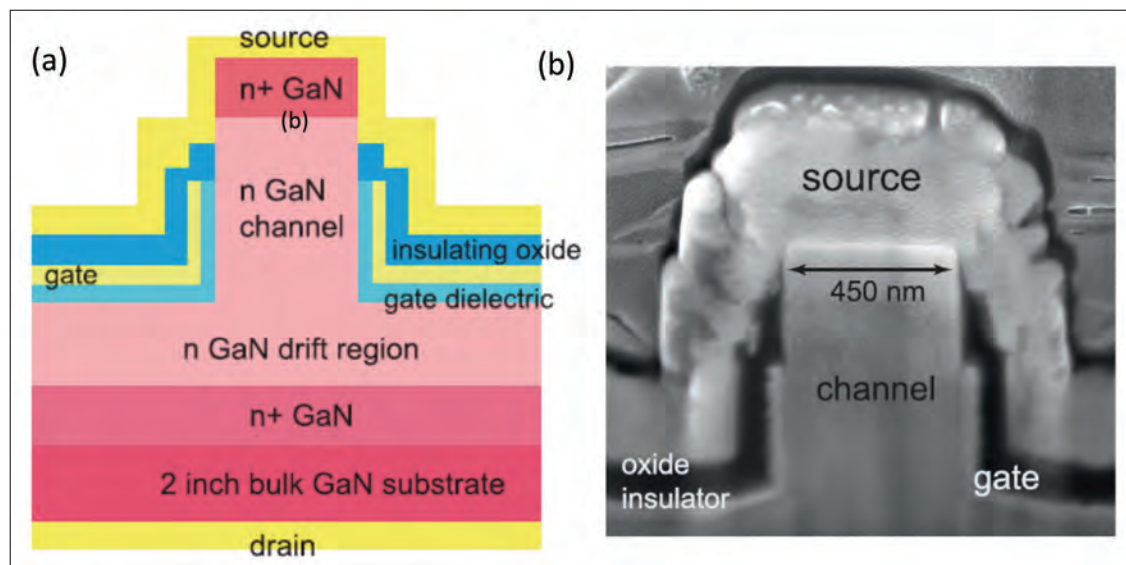


图3. (a) MIT的新型垂直GaN鳍形MOSFET架构。
(b) 所制造的450nm沟道宽度的鳍形器件横截面扫描电子显微镜图像。

少低 50 倍，从而导致很高的器件导通电阻。

解决这些挑战的是我们的 GaN 垂直鳍形 MOSFET（见图 3）。这种开创性的设计仅由 n 型 GaN 层组成，从而消除了材料二次生长或生长 p-GaN 层的需求。利用这种器件几何结构，电流控制可以通过栅极金属电极围绕的窄鳍形垂直 n 型 GaN 沟道来进行。

当我们的器件保持在零栅极偏置时，由于栅极金属和 GaN 之间的功函数差异，鳍形沟道中的电子将耗尽。我们选择低于 500nm 的鳍形宽度，因为这确保了鳍形合并的两个自由表面诱导出耗尽区域，使得鳍形沟道完全耗尽并最终实现常关晶体管操作。

我们能够通过改变鳍形宽度来控制这些晶体管的阈值电压，并报告了超过 1.5V 的值。我们晶体管的另一个属性是鳍形沟道中的高迁移率，这要归功于腔面依赖的沟槽形成和圆角工艺产生的光滑侧壁。

基于这些优化，形成了我们的 GaN 垂直鳍形 MOSFET：800V 阻断电压下仅 $0.36\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 的导通电阻，其正向电流超过 $10^4\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ ；在 600-

800V 的反向偏压下仅 $10^{-5}\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的漏电流。

最近我们取得了更好的结果。通过对电场工程和制造工艺的不断优化，我们已经演示了阻断电压为 1200V，导通电阻为 $0.2\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。这些结果即将发表，并将在今年 12 月旧金山举行的 2017 年国际电子器件会议（IEDM）上公布。

这些令人印象深刻的特性表明，结合 GaN 沟槽和鳍形创新的最新设计，有可能为新一代垂直 GaN 功率晶体管铺平道路，从而能够实现低外延成本、出色的阻断能力和常关操作。这将使得垂直功率器件非常有前途，从而将 GaN 器件的应用范围扩展到高压大电流的电力电子领域。

扩展阅读

Y. Zhang et al. "Novel GaN trench MIS barrier Schottky rectifiers with implanted field rings", 2016 IEEE International Electron Devices Meeting, 10.2.

M. Sun et al. "High-performance GaN vertical fin power transistors on bulk GaN substrates", IEEE Electron Device Letters 38 409 (2017)

Y. Zhang et al. "Trench formation and corner rounding in vertical GaN power devices", Applied Physics Letters 110 193506 (2017)

化合物半导体



•CHINA

《化合物半导体》中国版（CSC）于 2005 年创刊，是全球最重要和最权威的杂志 Compound Semiconductor 的“姐妹”杂志。

《化合物半导体》中国版旨在通过对于全球化合物半导体工业的深度分析、实时信息报道和评论，扩展中国地区读者的专业焦点和全球视野。《化合物半导体》中国版以简体中文按季度出版。编辑内容由 Compound Semiconductor 的专业记者提供，他们具有研究背景，其技术文章和专栏文章得到来自化合物半导体协会主要成员公司的认可。全球电子业领先的独立市场研究咨询机构 IHS IMS Research 也在杂志开设定期栏目。

除了 10,000 名经过审查认证的合格读者，我们亦会在各个地区重要业界活动中免费派发杂志，对于希望在中国市场加强影响的化合物半导体公司，《化合物半导体》中国版是最有效的平台和目标媒体。

免费索阅



加快 GaN 的生长速度

一种由孔隙率控制型陶瓷制成的镓蒸发器掌握着实现非常高 GaN 生长速率的关键。

由于严重缺乏低成本、大直径、高质量的块状 GaN 衬底，因而导致 GaN 功率器件的销售增长受阻。目前，GaN 衬底的商业生产所制造的材料具有昂贵以及尺寸和可用性有限的缺点。不过，鉴于一种由日本丰田中央研究所的一支团队开发的新颖气体工艺（gas process）得到提速，因此这种情况可能会得到全面的改观。

这支来自日本的研究团队刚刚使 GaN 生长速率猛增为原来 5 倍，所采取的方法是用孔隙率控制型 TaC 陶瓷替代传统的坩埚，从而显著地增加了镓源的表面积。

管子通过 TaC 陶瓷的孔隙吸取熔融镓。

具有直径为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的孔隙和相对较高孔隙率（2% ~ 5%）的 TaC 陶瓷形成了两个蒸发器的“构筑材料”：一个蒸发器具有 8 个径向对齐的鳍（外径为 30 mm，高度为 36.5 mm）；另一个蒸发器具有 6 个鳍（外径为 35 mm，高度为 36.5 mm）。

利用具有 8 个鳍和 6 个鳍的反应器分别实现了 $481 \mu\text{m}/\text{小时}$ 和 $764 \mu\text{m}/\text{小时}$ 的生长速率。这两个数值分别相当于 GaN 生长速率升高了 3.5 倍和 5.5 倍。



一种快速、低成本的 GaN 生长工艺，可帮助 GaN 功率电子器件从现有的硅器件手中攫取市场份额。

GaN 是利用该团队的无卤素气相外延工艺，通过蒸发的镓和氨的化学反应生长的。

由于氢气是仅有副产品，因此生长的时间比采用氢化物气相外延（HVPE）技术要长，后者是利用铵灰的产生而缩短了生长过程。

当该研究团队为 GaN 源使用坩埚时，加热至 1590 K 的温度所产生的镓蒸发效率仅为 30%。

虽然可通过提高温度和降低压力获得更高的效率，但是这些选项并未受到人们的追逐，因为它们将损害反应组件的可靠性和耐用性。

取而代之的是，这支研究团队把工作重点放在了通过引入一个鳍状蒸发器来提高蒸发速率上，这种蒸发器采用毛细

管。这些数值的一个含义是生长速率不仅仅由表面积决定：上述两个蒸发器的表面积几乎相等，但是 GaN 的生长速率却有着明显的不同。

另外，研究人员还注意到：生长速率的提升水平与馈送速率的增长水平是非常相似的，这表明是镓的馈送速率限制了 GaN 的生长速率。馈送速率受限于镓蒸气压力的局部饱和。

为避免这一限制，该研究团队得出结论：蒸发器的设计应当使鳍以一种不会导致镓蒸气压力局部饱和的方式覆盖整个氮气流槽。

采用 6 鳍蒸发器的蒸发效率估计大约为 80%，这是一个被认为非常接近实际极限的数值。

在非常高生长速率下的生长条件仍然需要改善，因为目前它们导致了多结晶区的产生。

当以 $200 \mu\text{m}/\text{小时}$ 左右的速率生长时情况就不是这样了。根据 X 射线衍射测量的结果，在此状况下，GaN 层多半是一个单晶体，具有相对较高的质量。

参考文献

D. Nakamura et al. Apply Phys. Express 10 095503(2017)

UV LED 的输出功率超过 1 W

最大限度地减少缺陷使硅基 GaN LED 的输出功率突破了原有记录。

Lattice Power 公司和中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 (SINANO) 的研究人员宣称已经创造了硅基 AlGaN LED 输出功率的新记录。他们研制的芯片尺寸为 $1.1\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ 的 385 nm 器件可在 1 A 电流条件下提供 1766 mW 的输出功率。

在开发这些器件时所获得的深入理解可用于提升 Lattice Power 涵盖 365 nm 至 405 nm 波长范围的 UVA LED 的性能。这些器件用于 LED 光固化, 而且可与荧光粉搭配使用, 以此方法制作的照明产品所提供的光谱范围要比基于蓝光 LED 与荧光粉之传统组合的其他同类产品更宽。

这支研究团队的发言人、来自 SINANO 的孙钱认为: 他们所运用的方法的优势之一是能够减低高功率 UV LED 的生产成本, 这得益于采用了大直径的硅衬底。

“其次, 可采用湿法蚀刻容易地去除硅衬底, 而由此对 UV LED 芯片造成的损坏微乎其微。”

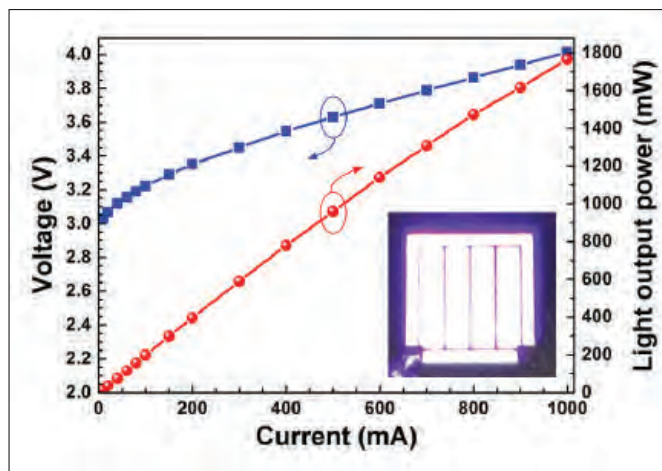
当使用更常见的替代衬底材料蓝宝石时, 需要运用激光剥离技术以制作高功率垂直芯片。据孙钱说, 这种做法是不理想的, 因为它会引起与漏电和可靠性相关的问题。

由于需要生长 AlGaIn 层, 因此不管使用什么衬底, 深紫外光 LED 的制造都是具有挑战性的。晶圆会翘曲、弯曲、甚至出现裂纹, 原因是衬底和 AlGaIn 的晶格常数和热膨胀系数存在差异。使问题更为复杂的是, 这种三元复合体中铝的含量越高, 晶体质量的劣化情况就越严重。这是一个重大的障碍, 因为相比于蓝光 LED, 穿透位错对 UV LED 的内部量子效率的影响要大得多。

为了解决所有这些问题, 孙钱和同事们利用一个可引入压缩应变的 AlN/AlGaIn 多层结构的缓冲层从下面对器件给予支撑。生长过程从一个 300 nm 厚的 AlN 层开始, 接着是 400 nm 厚的 $\text{Al}_{0.65}\text{Ga}_{0.35}\text{N}$ 层、600 nm 厚的 $\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ 层、700 nm 厚的 $\text{Al}_{0.10}\text{Ga}_{0.90}\text{N}$ 层, 最后是一个厚的 $\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 层。

通过增添压缩应变, 该结构不仅补偿了在冷却期间出现的拉伸应变, 而且还导致了穿透位错的倾斜和消失。这些缺陷的滤除可在用一台横截面透射电子显微镜获得的图像中看到。

在缓冲层结构的顶部以 InGaIn/AlGaIn 超晶格的形式添加了一个应变消除层。它在发光区域中形核和扩大 V 形凹坑, 并通过增加输出功率和降低正向电压来改善器件性能。



当以 1 A 电流驱动时, 在 385 nm 波长发光的 UVA LED 可在 44% 的外部量子效率下产生高于 1.75 W 的输出功率。

沉积在超晶格和缓冲层结构顶部的是器件结构, 其具有一个 5 周期多量子阱。接着, 通过把一个金属叠层 (包括一个粘结层和一个以银为基本成分的层, 其中后者充当一个 p 型电极和反射镜) 添加到外延片、然后再把该结构附于一个负责提供后续机械支撑的导电硅载体上, 形成了具有垂直薄膜架构的 UVA LED。化学蚀刻去除了衬底, 在用氢氧化钾进行蚀刻之前对 n 型 AlGaIn 进行粗糙化处理, 从而实现了取光效率的提升。

当以 500 mA 电流驱动并采用 3.63 V 正向电压时, 封装型 LED 可在 53% 的外部量子效率 (EQE) 下产生 960 mW 的功率。提高电压至 4.1 V 将把驱动电流和输出功率分别增至 1 A 和 1766 mW, 但是 EQE 下降至 44%。

这些 UVA LED 具有 $0.76\ \Omega$ 的微分串联电阻, 略高于最好的高功率蓝光 LED。为了修整该电阻, 孙钱和同事们将优化硅掺杂和镁掺杂。

他们的另一个目标是开发短波长器件, 比如那些在 UVB 和 UVC 波段中发光的器件。孙钱认为: “所有这些辛勤的工作将极大地降低 UV 光发射器的成本。”

参考文献

Z. Li et al. Appl. Phys. Express 10 072101 (2017)

了解 microLED 的不足

由于减小尺寸会使间接复合大幅增加，因此会影响 LED 效率。

一支由设在格勒诺布尔的法国 CEA-Leti 和 III-V Lab 的相关人员组成的研究团队承担了一个迄今为止最为全面综合的研究项目，课题内容是研究 microLED 的尺寸、效率，以及这些对于其非辐射复合的影响之间的关系。

描述此项研究活动的论文第一作者 Francois Olivier 认为，这项工作是对 microLED 的效率与其尺寸之间的相互影响进行的首次定量研究。

这篇论文的合著者 Anis Daami 说：“在这项研究中，我们把广为人知和接受的 ABC 模型的参数 A 与 LED 的几何尺寸关联起来。”

该研究团队发现，代表「间接复合」(Shockley-Read-Hall recombination) 的系数 A 与 LED 尺寸有着很强的相关性。同时，标示 LED 光效下降的系数 C 则与芯片的尺寸无关。这些结果意味着侧壁缺陷对于 LED 性能具有巨大的影响。

这一深刻见解将有助于巩固 microLED 的发展，从而使其能够在虚拟现实和增强现实设备中得到应用。

为了解 microLED 中的损耗，研究人员在一系列电流密度条件对外形尺寸从 $4\ \mu\text{m} \times 4\ \mu\text{m}$ 到 $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ 的器件进行了量子效率测量。这些器件的制造是通过把自对准技术应用于 MOCVD 方法生长的 4 英寸蓝宝石基 GaN 外延片来进行的。这些 LED 具有 5 个 3 nm 厚的 InGaN 量子阱，并包括一个电子阻挡层。Olivier 说：“截至今天，我们并未就电子阻挡层对 LED 性能的影响进行过具体的研究。”

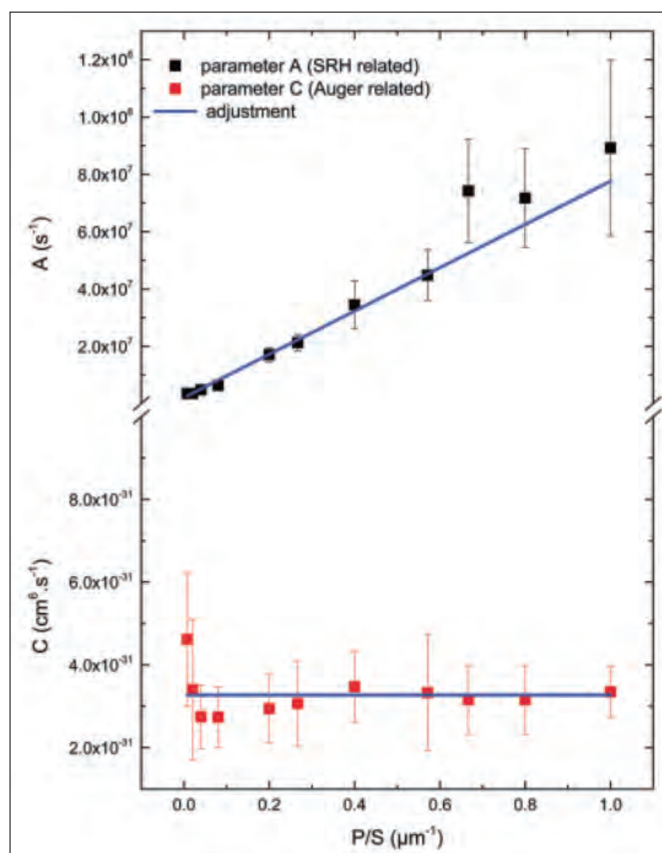
通过使用 ABC 模型，并利用光线跟踪软件估计取光效率，Olivier 和同事们获得了与相关文献的记述相一致的系数 A 和 C 的数值。

他们陈述说，在他们的器件上系数 B 与 LED 尺寸无关，光致发光强度在像素表面上是均匀的，即使对于非常小的像素尺寸也不例外。

形成鲜明对比的是，当 LED 的尺寸从 $500\ \mu\text{m}$ 减小至 $4\ \mu\text{m}$ 时，系数 A 几乎增加了两个数量级。这揭示出低电流密度条件下的非辐射复合与 LED 的侧壁（而不是其体积）有关。

侧壁和界面的固有缺点是它们会在晶格中引起间断点。而这些间断点又导致了缺陷的产生，其充当了非辐射复合中心。

Olivier 和 Daami 认为，LED 侧壁的质量越好，缺陷的



随着 microLED 外形尺寸的减小，以及其周长与其表面积之比的增大，间接复合更为普遍。这表明侧壁缺陷损害了 LED 性能。与光效下降相关的系数 C 几乎与 LED 尺寸无关。

密度就越低。“这有一个非常重要的含义，就是通过改善辐射复合与非辐射复合之比可提高 LED 效率。”一种用于提升 microLED 效率的选项是使侧壁钝化。

microLED 的系数 C 几乎与其尺寸无关。这表明：不管是什么原因造成的 LED 光效下降都与器件的尺寸无关。

据该研究团队说，俄歇复合很可能是造成这种光效下降的主要原因。不过，他们认为相关技术文献中展开的争论仍将继续。

目前，该研究团队正在开展改善其 LED 加工工艺的工作。“较小的像素尺寸和多色显示器现今正处于调查研究之中。”

参考文献

F. Olivier et al. Appl. Phys. Lett. 111 022104 (2017)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AIXTRON SE	德国爱思强股份有限公司	www.aixtron.com	BC
EDI CON China	电子设计创新大会	www.mwjournlchina.com/edicon	IBC
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	7
INNOVION		www.innovioncorp.com	1
IQE		www.iqep.com	IFC

欢迎投稿

《化合物半导体》(CSC) 是针对中国化合物半导体及光电市场出版的专业杂志, 用简体中文出版。

本刊主要报道化合物半导体相关的材料、工艺、设备、器件、模块/组件、封装技术, 及其发展趋势和相关厂务设施。与读者一起紧跟行业发展, 共同面对在研发、制造过程中遇到的问题及挑战。

本刊的读者是活跃在化合物半导体及光电行业的技术管理人员、项目经理、科研人员、工程师以及从事开发、制造、工艺的专业人士。

本刊文章精选自英国物理协会著名杂志《Compound Semiconductor》, 翻译并编辑成形; 我们也报道全球平面显示制造商和研究机构的最新技术与资讯, 以及撰写其他与本地市场息息相关的新闻和文章; 并选编专业投稿。

本刊欢迎读者和供应商投稿, 文章一经采纳, 将在印刷版本和网上刊登。CSC 将为设计者和管理人员, 提供一个展现国内外厂商的最新成果的平台。

文章投稿指南

1. 文章主题突出、结构严谨、短小精悍, 中文字数不超过 3,000 字;
2. 文章最好配有两幅至四幅与内容相关的插图或表格; 插图与表格分别用图 1、图 2 或表 1、表 2 的次序编号, 编号与文中的

图表编号一致;

3. 请注明作者姓名、职务及所在公司或机构的名称。作者人数以四人为限;
4. 请勿一稿多投;
5. 请随稿件注明联系方式(邮编、地址、电话、电子邮件)。

新产品投稿指南

1. 新产品必须是中国市场新上市、可以在中国市场上买到;
2. 有关新产品来稿的内容应包含产品的名称、型号、功能、主要性能和特点、用途;
3. 短小精悍, 中文字数不超过 300 字;
4. 来稿请附产品照片。最好是在单色背景下简单的产品实物照片, 照片的分辨率不低于 300dpi;
5. 注明能提供进一步信息的人员姓名、电话、电子邮件。

优先刊登中文来稿(翻译稿请附英文原稿)。来稿请用电子邮件寄到: sunniez@actintl.com.hk。

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。



www.compoundsemiconductorchina.net

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

HK Office (香港办公室)
ACT International (雅时国际通讯)
Unit B, 13/F, Por Yen Buiding,
No. 478 Castle Peak Road,
Cheung Sha Wan,
Kowloon, Hong Kong
Tel: 852-28386298

Publisher (社长) - China
Adonis Mak (麦协林)
Adonis@actintl.com.hk

Editor in China(中国版编辑)
Sunnies Zhao (赵雪芹)
sunniesz@actintl.com.hk

Sales Director (销售总监)
Steven Gan (干辉)
steveng@actintl.com.hk

UK Office (英国办公室)
Angel Business
Communications Ltd.
6 Bow Court,
Fletchworth Gate,

Burnsall Road, Coventry,
CV56SP, UK
Tel: +44 (0)1923 690200
Chief Operating Officer
Stephen Whitehurst
stephen.whitehurst@angelbc.com
Tel: +44 (0)2476 718970

销售人员 Sales Offices

Asia (亚洲)
Mark Mak (麦协和)
markm@actintl.com.hk
Tel: 852-2838 6298

China (中国)
Shenzhen (深圳)
Jenny Li (李文娟)
jennyli@actintl.com.hk
Gavin Hua (华北平)
gavinhu@actintl.com.hk
Tel: 86-755-2598 8571

Shanghai (上海)
Hatter Yao (姚丽莹)
hattery@actintl.com.hk
Amber Li (李歆)
amberli@actintl.com.hk
Linda Li (李承珍)
lindali@actintl.com.hk
Tel: 86-21-6251 1200

Beijing (北京)
Cecily Bian (边团芳)
cecilyb@actintl.com.hk
Tel: 86-135 5262 1310

Wuhan (武汉)
Sky Chen (陈燕)
skyc@actintl.com.hk
Tel: 86-137 2373 9991
86-27-5923 3884/1564
Eva Liu (刘婷)
eval@actintl.com.hk
Tel: 86-138-8603 3073
Grace Zhu (朱婉婷)
gracez@actintl.com.hk
Tel: 86 159 1532 6267

Taiwan, Singapore, Malaysia
(台湾, 新加坡, 马来西亚)
Mark Mak (麦协和)
markm@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

Korea (韩国)
Lucky Kim
semieri@semieri.co.kr
Tel: 82-2-574-2466

US (美国)
Janice Jenkins
jjenkins@brunmedia.com
Tel: 724-929-3550

Tom Brun
tbrun@brunmedia.com
Tel: 724-539-2404

Europe (欧洲)
Shehzad Munshi
sm@angelbcl.co.uk
Tel: +44 (0)1923 690215
Jackie Cannon
jackie.cannon@angelbc.com
Tel: +44 (0) 1923 690205



2019

Electronic Design **Innovation** Conference

电子设计**创新**大会

首席赞助商:



钻石赞助商:



企业赞助商:



主办单位:



2019年4月16-18日

国家会议中心

中国北京

mwjournalchina.com/edicon

敬请光临 IMS 1834 展位

AIXTRON

Our technology. Your future.

您认为,

全球大趋势需要 性能最佳的三五族化合物材料.

我们也这样认为.

AIX 2800G4-TM

三维传感
增强现实
自动驾驶
云计算
物联网/5G
下一代显示设备



发现AIX 2800G4-TM.

实现砷磷基材料下一
代应用的创纪录设备.



使用市场顶尖的技术
实现行业内最佳良率
和最高生产力.

