化合物半导体

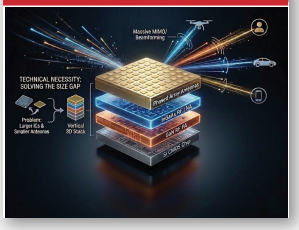
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2026年 10/11月

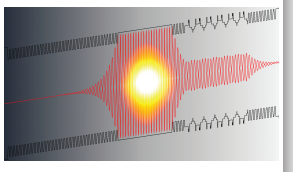
驱动氧化镓的商业化



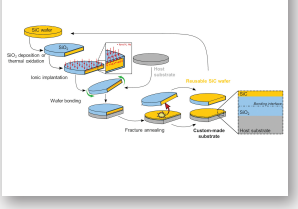
面向未来无线通信的“三剑客”



用抗反射VCSEL变革激光雷达



SiC：光子学的解决方案？



常州臻晶半导体有限公司

液相法碳化硅单晶生长装备



液相法碳化硅单晶炉　　籽晶粘接炉

联系我们

地址：常州市武进国家高新技术产业开发区武宜南路377号19号厂房一层东

联系电话：19952805727

扫码联系我们

ISSN 2789-2735

深得 MBE 精髓

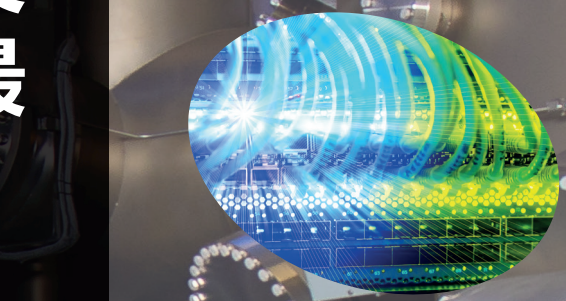
研发及生产设备全球市场最大拥有者

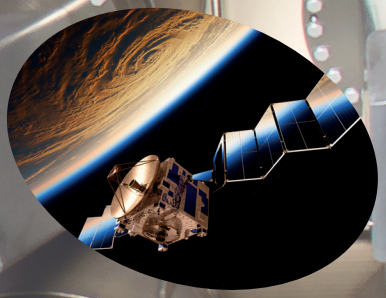
MBE不仅可以让我们去发现，更可以让我们去实现。

*Riber*是*MBE*设备和相关服务的世界主要的供应商。

拥有*30*年的经验，设计与客户密切相关的系统是公司的核心理念。*Riber*发明并设计的主要功能目前在所有*MBE*系统中都能找到。

*Riber*在*MBE*技术的发展中起着关键作用，为客户提供从设备配置到外延生长的整套解决方案。











RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

ACT INTERNATIONAL

国际知名媒体授权
报道全球高新科技信息



免费
索阅

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
半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的专业读者及与会者

品牌会议

VisionCon 视觉系统设计技术会议

SSOTC

EDICON Electronic Design Innovation Conference 电子设计创新大会

AI 工业技术及应用研讨会

LaserFocusCon 激光聚会

CSCON CHINA

CHIP China 晶芯研讨会

CleanRooms China

国际代理

CQ Publishing (Japan)　Chomdan (Korea)　Pan Global (Europe)

Endeavor Business Media (USA)　Horizon House (USA)　Angel Business Communications (UK)

目录

Contents

09 封面故事 Cover Story

金刚石的双重功效

Double duty diamond

显在斯坦福大学，我们追求这种统一的方法，利用金刚石——一种将异常高的热导率与强电绝缘性相结合的材料。通过在完全制造好的AlGaN/GaN HEMT顶部直接集成一层低温生长的多晶金刚石薄膜，我们将世界上导热性最好的材料，放置在离沟道热点区域极近的位置——那里正是热量产生最强烈的地方。在这个顶部位置，金刚石将热量从有源区高效散播出去，而不形成电导通路，同时充当表面钝化层。这种双重作用改善了热学和电学性能。

— 斯坦福大学的Jeong-Kyu Kim和Srabanti Chowdhury



编者话 Editor's Note

04 **当AI为材料出题**
When AI creates questions from material

- 陆敏

业界动态 Industry

05 **射频GaN知识产权竞争加剧**
RF GaN IP competition intensifies

05 **Sivers投资3000万美元扩建苏格兰InP工厂**
Sivers invests $30 million to expand Scottish InP fab

06 **安森美推出"嵌入式功率平台"**
Onsemi introduces'Embedded Power Platform'

06 **保时捷在高阶音响中引入GaN**
Porsche introduces GaN for high end audio

07 **NoMIS演示6.5kV SiC MOSFET**
NoMIS demos 6.5 kV SiC MOSFET

08 **Besxar完成首次太空飞行**
Besxar completes first space flight

08 **IQE宣布与Quintessent达成外延合作协议**
IQE announces epitaxy agreement with Quintessent

关于雅时国际商讯 (ACT International)

ACT INTERNATIONAL 雅时国际传媒集团成立于1998年，在高增长的中国市场上为众多高科技领域提供服务。通过其产品系列，包括印刷和数字媒体以及会议和活动，雅时国际为国际营销公司和本地企业提供了进入中国市场的机会。雅时国际的媒体品牌为电子制造、机器视觉系统、激光/光子学、射频/微波系统设计、洁净室/污染控制和半导体制造，化合物半导体，工业AI等领域的20多万名专业读者和受众提供服务，雅时国际也是一些世界领先的技术出版社和活动组织者的销售代表。雅时国际的总部设在香港，在北京、上海、深圳和武汉设有分公司。www.actintl.com.hk

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，亦是中国唯一专注于化合物半导体产业的权威杂志，重点介绍国外先进技术和产业化经验，促进国内产业发展，为国内读者提供化合物半导体行业的专业知识。内容涵盖晶体的特性研究，器件结构的设计，生产中用到的材料、设备、软件、测量、厂房设施，以及有关市场分析和动态。

扫一扫
免费下载电子书

化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2026年 8/9月

目录

Contents

技术 Technology

13 **驱动氧化镓的商业化**
Driving commercialisation of gallium oxide
– Richard Stevenson采访NextGO Epi的两位联合创始人

16 **面向未来无线通信的“三剑客”**
The triumvirate for tomorrow’s wireless
- KAIST的Jaeyong Jeong、Chan Jik Lee、Yoon-Je Suh、Nahyun Rheem、Bong Ho Kim、Joon Pyo Kim、Juhyuk Park和Sanghyeon Kim

20 **用抗反射VCSEL变革激光雷达**
Transforming lidar with anti-reflective VCSELs
- Vertilite的Dong Liang、Cheng Zhang、Zhitong Luo、Shouzhu Niu、Pengfei Zhang、Song Liu、Huijie Li、Ryan Z. Rao、Li Zhao、Xiaochi Chen、Hanxuan Li和Yijie Huo

24 **SiC：光子学的解决方案?**
SiC: A solution for photonics?
- CEA-LETI的St é phanie Huet

29 **飞行时间二次离子质谱（TOF–SIMS）分析技术在半导体芯片材料/缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用（连载二）**
Studies and Applications of Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (TOF-SIMS) Analysis Technique in Semiconductor Chip Material/Defect Characterization and Process Optimization (Part 2 of a Series)
– 华佑南，朱雷，赵弇斐，李晓旻，胜科纳米（苏州）股份有限公司；郭茹，方浩原，李雯琪，高聚宁，北京艾飞拓科技有限公司

科技前沿 Research Review

34 **革新短路可靠性**
Revolutionising short-circuit reliability

34 **V型缺陷提升绿色LED效率**
V-defects boost green LEDs efficiency

35 **更优的p–GaN欧姆接触**
Superior p-GaN ohmic contacts

36 **广告索引 Advertisement Index**

《化合物半导体》编委会 （排名不分先后）

张国义教授 北京大学东莞光电研究院荣誉院长，中国有色金属学会宽禁带半导体专委会顾问委员会委员
王新强教授 北京大学博雅特聘教授，博导
孙 钱博士 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 研究院、博导、副主任
刘红超博士 安徽长飞先进半导体有限公司 首席科学家
李哲洋博士 怀柔实验室 资深技术专家 教授级高工，博导
李顺峰博士 苏州半导体激光创新研究院 执行院长
佟存柱教授 中科院长春光学精密机械与物理研究所 常务副主任/研究
陈明祥教授 华中科技大学/武汉利之达科技 教授/首席专家
周贞宏博士 BelGaN CEO
张昭宇教授 香港中文大学（深圳）理工学院副教授 深圳半导体激光器重点实验室主任
孙海定博士 中国科学技术大学微电子学院 研究员、博导
钮应喜博士 中国科学院半导体研究所，教授级高工
郑中屏博士 台湾工业研究院光电所资深研究员，台湾鹏正光电创建人，佛山照明LED事业部创建人

全球知名权威杂志
Compound Semiconductor的中国版

化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA



双月刊，每期发行覆盖30,000名专业读者，并在全国重点产业活动赠阅。

提供关于全球化合物半导体行业的深入分析和及时信息报道，是化合物半导体材料和器件业专业人士重要的信息源。

免费索阅



CS CHINA CON 化合物半导体 先进技术及应用大会

由雅时国际商讯主办，会议专注搭建全球化合物半导体行业范围内产、学、研、政信息交流和商务合作的精准交流平台，着眼行业前沿议题，洞悉行业最新需求，汇集国内外领先跨国科技，与专家学者共探行业发展方向，共同探讨化合物半导体产业开拓创新的解决之道。

当 AI 为材料出题

谈 AI，人们习惯谈算法、谈算力、谈模型参数的军备竞赛。但走到 2025 年，一个越来越清晰的事实摆在产业面前：AI 的下一量级增长，卡在物理世界——卡在每一度电如何进入芯片、每一份热如何离开芯片、每一个比特如何在机柜之间流动。而这些问题的答案，都写在化合物半导体材料里。

从电网到芯片的供电链路上，800V 直流架构正在重构数据中心的能源版图：碳化硅守着中高压变换的主航道，全球 8 英寸产线密集落地，中国企业在导电型衬底上已拿到全球主导份额；氮化镓在服务器电源的中低压段快速渗透，把电源模块的功率密度推向新高。互连链路上，800G 光模块规模上量、1.6T 开始放量、共封装光学登上舞台，藏在每一只激光器芯片下面的磷化铟衬底，从三十年不温不火的小众材料变成 AI 集群的刚需。散热链路上，金刚石以五倍于铜的热导率站到了 AI 芯片热管理的最前沿。而击穿场强约为碳化硅十倍的氧化镓，正瞄准电网级超高压应用蓄势待发。五类材料，各守一段链路，共同回答 AI 出的考题。

更值得关注的是，2025 到 2026 年，四个技术突破正在改写材料产业的成本曲线与工艺范式。德国 element 3–5 公司的 NLE 低温外延技术，以约九成的能耗和工艺气体节省，挑战外延环节 " 高温、高能耗 " 的百年惯例；液相法碳化硅在今年完成从 6 英寸到 8 英寸的密集跨越，让终结 PVT 法三十年统治的接班路线第一次清晰可见；我国原创的铸造法氧化镓，让大尺寸超宽禁带衬底第一次兼具低成本、大尺寸与完全自主产权；而韩国团队在《自然》杂志报道的常压液相法金刚石，打破了 " 金刚石必须高压生长 " 的七十年定式，为金刚石的大面积化打开了大门。这四项突破的共同点是：它们都不是渐进改良，而是范式变量。

这条链路的另一端，AI 也在反向重塑材料产业本身。晶体生长百年来的 " 黑箱艺术 "，正在被贝叶斯优化、数字孪生和 AI 缺陷判读改写：过去以年计的工艺窗口摸索，如今几十轮实验即可收敛；良率归因周期从周级压缩到小时级；" 一键长晶 " 的自动化平台已经走进车间。材料企业的核心资产，正从不可复制的工艺秘方，转向可以复利积累的工艺数据与模型。AI 向材料要性能，材料向 AI 要效率——两条链路在同一个回路里闭合，这就是我们所说的 " 共生飞轮 "。

当然，乐观之外必须保持清醒。碳化硅衬底成本仍高、8 英寸良率爬坡艰难、氧化镓的热导率与 p 型掺杂短板、金刚石的大尺寸单晶瓶颈、镓铟原料的供应链风险，以及 AI 资本开支波动带来的需求错配，都是横在产业化路上的现实关卡。但这些痛点不是缺陷清单，而是下一轮超额利润的分布图——谁先解决纯度、良率、装备与标准，谁就能把 AI 需求转化为定价权。

半导体行业有一句老话：一代材料，一代器件，一代系统。今天或许要加上一句：一代材料，也定义一代智能。当供电、散热、互连的物理瓶颈被逐一拆除，AI 的增长将不再受制于瓦特，而是受制于材料迭代的速度。对所有深耕化合物半导体的从业者来说，这是挑战，更是最好的时代。



化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

社长 Publisher
麦协林 Adonis Mak

荣誉顾问 Honorary advisor
郝跃院士 Academician Hao Yue

主编 Editor in Chief
陆敏 Min Lu
MinL@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,
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 25988573
Fax: 86 755 25988567
武汉 Wuhan
Tel: 86 27 82201291

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

ACT INTERNATIONAL

ISSN 2789-2735
© 2026 版权所有 翻印必究

射频 GaN 知识产权竞争加剧

专利活动正在放缓，而在某些技术细分领域和地区，竞争正在加剧 ——KnowMade

据 KnowMade 在其最新报告《2026 年射频 GaN 技术专利格局分析》中称，射频 GaN 技术正进入一个新的增长与战略竞争阶段。该报告基于对 5300 项专利的分析。

虽然电信基础设施仍是一个重要市场，但需求正日益得到国防、电子战、反无人机系统和卫星通信的支持。

与此同时，产业格局正被整合、技术许可、专利转让、制造主权倡议以及影响关键材料和工艺获取的限制所重塑。

KnowMade 的分析揭示了一种双重趋势。随着技术成熟，射频 GaN 整体专利活动正在放缓，但在某些技术细分领域和地理区域，竞争正在加剧。组合广度、国际专利覆盖以及对关键工艺技术的控制，正成为知识产权战略中越来越重要的维度。

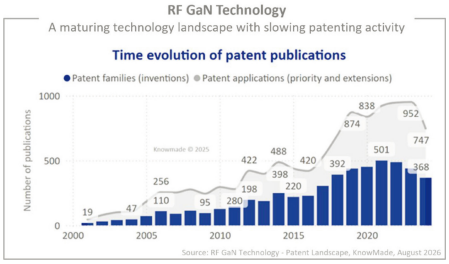
GaN-on-SiC 仍是高功率电信、雷达和电子战应用的参考平台。然而，衬底供应、制造诀窍、漫长的认证周期以及向更大晶圆直径的过渡，维持着很高的进入壁垒。

与此同时，GaN-on-silicon 正从一个新兴平台向早期工业化迈进，由 8 英寸制造提供支撑。它的发展可能为较低功率的射频架构创造机会，并在更长期内为 10GHz 以上的 FR3 和 6G 应用创造机会。尽管如此，成本竞争力、热管理、可靠性、工艺成熟度和可扩展性仍是重要的技术挑战。

创新也在向 GaN-on-diamond 和 GaN-on-AlN 等更长期的平台延伸，这些平台旨在克服当前的热学和性能限制。尽管它们的工业应用仍受到成本、制造复杂性和认证要求的制约，但专利活动可以帮助识别那些已经在这些新兴领域建立地位的机构。

日本公司在射频 GaN 晶圆和外延片领域继续保持着强大的专利地位。住友电工和日本碍子位列既有领先者之中，而信越化学已成为一个重要的挑战者。这些专利组合反映了衬底和外延对器件性能、制造控制和供应链的战略重要性。

美国玩家在器件和下游技术领域保持着特别强大的知识产权地位。在 Wolfspeed 射频业务及相关专利资产转让之后，Macom 凭借其在射频 GaN 器件、封装和电路领域的知识产权广度脱颖而出。其专利组合使该公司拥有横跨整个价值链的最全面地位之一，并说明收购和专利转让如何能够迅速



重塑竞争格局。

中国领先的射频 GaN 专利地位仍主要由国有背景机构和学术机构推动。中国电子科技集团公司（CETC）和西安电子科技大学尤为突出，其中西安电子科技大学已成为射频 GaN 器件领域国内领先的专利申请机构。与此同时，包括华为、Enkris 和汉骅半导体在内的工业企业正变得更加引人注目，表明中国的创新基础正逐步从机构主导走向多元化。

专利保护策略也变得越来越全球化。美国公司正越来越多地将其申请延伸至欧洲和中国，而日本玩家自 2022 年以来已将其专利保护扩展到美国和中国。因此，欧洲正作为一个战略性专利司法辖区而日益重要，因为企业寻求在射频 GaN 供应链、市场和工业能力所在的地区保护其技术。

Sivers 投资 3000 万美元扩建苏格兰 InP 工厂

公司将使该工厂的年产出提高到超过 1 亿只连续波 DFB 激光器

瑞典公司 Sivers Semiconductors 宣布投资 3000 万美元，大幅扩建其位于苏格兰格拉斯哥的 InP 制造工厂，为公司预期由 AI 数据中心和光网络增长所驱动的客户量产爬坡做好准备。

扩建完成后，该工厂预计每年可支持超过 1 亿只连续波（CW）DFB 激光器的生产，同时增加新工艺能力、提高自动化程度和增强制造灵活性。扩建计划将于 2026 年下半年启动，预计于 2027 年第四季度投入运营。

Sivers 表示，这项投资标志着公司从 Fab-Lite（轻晶圆厂）制造模式向混合制造（Hybrid Manufacturing）战略转型的重要一步，将不断扩大的内部制造能力与战略代工、封装和制造伙伴相结合。

Sivers 总裁兼首席执行官 Vickram Vathulya 表示：“当今 AI 基础设施建设的规模正在整个光供应链中创造前所未有的需求。”

“我们的客户需要大幅增加的激光器生产能力，同样重要的是，需要确信当他们的项目爬坡时供应将到位。这项投资使我们能够与我们的代工伙伴一起满足这一需求。”

随着超大规模运营商建设更大的 AI 集群并转向更高速的网络架构，对先进光互连技术的需求正在加速。Sivers 相信，基于 InP 的激光器和半导体光放大器将在实现这些系统所需的高性能、高能效光连接方面发挥越来越重要的作用。

Sivers 首席运营官 Neeraj Chopra 表示：“为 AI 基础设施扩展光子学规模，需要的不仅仅是增加产能。它需要的是一种为灵活性、质量和长期客户需求而构建的制造战略。”

格拉斯哥扩建将补充 Sivers 更广泛的制造生态系统，包括其代工、封装和制造伙伴的布局。

这种混合制造方法旨在提供更大的生产可扩展性、地域灵活性和供应链弹性，同时为 Sivers 的核心光子学技术保持战略性内部制造能力。

安森美推出“嵌入式功率平台”

新架构使用硅晶圆本身作为封装，将电气、机械和热设计结合在一起

安森美（Onsemi）推出了嵌入式功率平台（Embedded Power Platform，EPP），这是一种使用硅晶圆本身作为封装的新架构，能够对功率系统设计采取更集成化的方法。

EPP 设计具有可扩展性，从一开始就使电气、机械和热设计结合在一起，帮助客户在 AI、电气化和自动驾驶应用中实现更高的功率密度、改进系统性能并加快开发。

安森美总裁兼首席执行官 Hassane El-Khoury 表示：“几十年来，半导体和封装一直被视为各自独立的技术。EPP 通过使硅本身成为系统架构的一部分而改变了这一点。”

“EPP 将先进的半导体技术、制造和系统级优化整合到一个共同的架构中，该架构可以随未来的创新而演进。这种方法将重新定义功率系统的构建方式，并为 AI 基础设施和电气化创造新的基础。”

安森美将 EPP 描述为将封装从被动外壳“重新构想”为主动贡献于系统性能的组成部分。通过使用硅晶圆本身作为封装，EPP 能够在高度集成的晶圆级架构内实现硅、SiC 和 GaN 技术的无缝集成和互连。

多个器件——包括 FET、驱动器和控制器——可以嵌入到单一封装中，并针对电气、热和机械性能进行共同优化。这使得完整的功率系统协同设计成为可能，使电气、热和机械特性可以从第一天起就一起评估和优化。其结果是更高的功率密度、改进的系统性能、更低的开发复杂性和更快的上市速度。

EPP 采用安森美标准的 12 英寸硅晶圆制造能力，将成熟的半导体设计工具、晶圆级制造和先进的仿真能力应用于功率系统集成，在加快开发的同时帮助改进性能。

斯巴鲁（Subaru）公司是 EPP 的首批早期合作参与伙伴之一，正与安森美合作评估该平台如何支持未来的电气化车辆平台。

通过此次合作，斯巴鲁将获得工程样品、仿真模型和技术专长的早期使用权，双方将共同探索提升车辆性能、简化开发和加速上市的机会。

安森美表示，EPP 以可协同设计、协同仿真和协同优化的共同平台取代了传统的顺序开发模式。

这种方法旨在帮助客户根据应用实现三到五倍更高的功率密度。其他好处包括：开发周期最短可至四个月；更好的热性能和散热；通过降低寄生电感减少电气损耗；以及跨功率等级、器件类型和应用扩展共同架构的能力。

例如，据安森美称，一款用于 AI 的早期 EPP 固态断路器设计比现有设计体积小约 50%、温度低约 20%。通过减少封装开销并使用整个 EPP 区域来传导热量，EPP 可以支持更紧凑的功率系统，改善热管理，并在 AI 基础设施中实现更高的功率密度。

电动汽车牵引逆变器通常受效率损耗、热限制、开发复杂性和系统尺寸的制约。安森美表示，EPP 通过最高四倍的功率密度和比传统方法低 15% 的功率损耗来应对这些挑战，从而实现更小、更轻、更高效的逆变器设计。

此外，其可扩展架构支持跨越低端到高端车辆应用的单一逆变器平台，使汽车制造商能够在多个车型和功率等级中复用共同设计。这种方法可以降低研发和制造成本，加快认证和开发周期，提高车辆续航里程或降低系统成本，并帮助新车辆项目更快上市。

EPP 预计将于 2026 年开始向汽车及 AI 领域的战略客户和生态系统参与者送样。

保时捷在高阶音响中引入 GaN

宣布全球首款采用 GaN 技术的量产级高阶汽车音响系统

保时捷已为其首个汽车应用采用了 GaN 技术，用于 Burmester 3D 高阶环绕声音响系统。

这款基于 GaN 的芯片负责处理为 400 瓦低音炮放大器供电所需的电压转换。该技术计划于 2027 年在一款未来的保时捷车型中首次量产亮相。

2024 年春，保时捷的一个团队开始与斯图加特大学鲁棒功率半导体系统研究所合作，开发首个基于 GaN 的低音炮原型。

负责保时捷战略半导体管理的 Lars Heuken 表示：“我们专注于高效电压转换这一基本技术挑战。在跑车中，效率和重量是至关重要的因素。”通过与一家国际芯片制造商和一家音频开发伙伴的密切合作，团队成功打造出一款可量产的低音炮。

为保护作为项目一部分而开发的创新成果，保时捷表示已提交多项专利申请。

Heuken 说：“潜力是巨大的——而这仅仅是开始。无论在何处进行功率转换，GaN 都是理想的选择。”在保时捷跑车中可以设想许多应用领域，我们正在更详细地研究它们。例如，该半导体可用于高压系统的功率转换。

Heuken 表示，这使得 GaN 对电动跑车的高压系统尤其具有吸引力。“质量和切实的客户利益是我们一切工作的核心。”

负责保时捷魏斯阿赫开发中心音响系统创新的 Steffen Burosch 评论道：“强劲的低音基础是客户对保时捷所期待的情感体验的一部分。我们系统的功率储备能够实现自信而动感的音质再现，这与我们跑车的性格完美契合。”

他补充说：“我们特别在汽车音响领域看到更多机会，并已在定义下一个创新领域。”

“我们专注于高效电压转换的基本技术挑战。在跑车中，效率和重量是至关重要的因素。”

NoMIS 演示 6.5kV SiC MOSFET

公司按计划推进通往 10kV 和 20kV SiC IGBT 的高压路线图

美国 NoMIS Power 公司——一家 SiC 功率半导体制造商——宣布成功演示了其首款 6.5kV 大芯片 SiC 器件。

该器件实测阻断电压超过 8kV，导通电阻 90mΩ，漏极电流 55A。NoMIS 表示，这一结果将其平面 SiC 器件技术从成熟的 3.3kV 器件带入高压等级，并为公司即将推出的 10kV MOSFET 和 20kV SiC 器件奠定了清晰、经过验证的路径。

目前，NoMIS Power 的高压 SiC 路线图分为三个阶段：3.3kV 已量产，6.5kV 送样，10kV 在研。

完整的 3.3kV SiC MOSFET 系列已量产，涵盖 80mΩ（34A）、50mΩ（55A）和 25mΩ（105A）器件，采用 TO-247-4L-HC 封装和裸片形式，并辅以 50-160mΩ SiC 双向开关和 500A 半桥功率模块。

6.5kV 现正向美国客户送样。经过演示的大芯片 SiC MOSFET 现正送样供评估，并支撑着一个不断扩展的 6.5kV 产品线，将增加导通电阻变体、小芯片器件、混合结势垒肖特基 FET（JBSFET）器件以及独立二极管。JBSFET 结构可防止体二极管退化问题，使其对关键应用非常鲁棒。

目标应用包括高压直流输电（HVDC）、固态变压器、脉冲功率、轨道牵引以及兆瓦级电动汽车充电。

标准量产 6.5kV 器件计划于 2026 年第四季度推出，并将向商业客户供货。

10kV 及以上正在开发中，于 2026 年第四季度送样。产品线包括 MOSFET、二极管、混合（JBSFET）器件以及 SiC 绝缘栅双极晶体管（IGBT），面向电网级 HVDC、下一代牵引和先进脉冲功率，将路线图延伸至 20kV。

NoMIS 联合创始人兼首席执行官 Adam Morgan 表示：“演示 6.5kV 阻断超过 8kV，证明了我们的平面 SiC 平台能够顺利地从如今发货的 3.3kV 器件扩展到高压等级。”

“高压 SiC 正成为数据中心、电网、航空航天和国防电源系统的基础，它应当在本国制造——我们正在打造行业可以对照认证的国内来源，从如今的 3.3kV 和 6.5kV，到 10kV MOSFET 和 20kV SiC IGBT。”

6.5kV 大芯片 SiC MOSFET 现正送样给美国客户进行评估，标准量产器件计划于 2026 年第四季度推出。

NoMIS Power 正与系统开发商就设计导入、定制电流额定值和封装开展合作。正在评估用于 HVDC、固态变压器、脉冲功率、牵引、高功率充电或航空航天和国防平台的高压 SiC 的团队，可以联系 NoMIS Power 以对接其 6.5kV、10kV 和 20kV 路线图。

NoMIS Power 在纽约州奥尔巴尼纳米技术综合体（Albany Nanotech Complex）内的工厂设计 SiC 器件、封装和功率模块。



Besxar 完成首次太空飞行

华盛顿特区初创公司迈出太空半导体制造的第一步

总部位于华盛顿特区的初创公司 Besxar——其目标是在太空制造半导体材料——已公布了其首次飞行“Besxar Flight-1”任务的结果。

2026 年 7 月 5 日，两个由 Besxar 制造的“Clipper 级”罐体搭乘 SpaceX 猎鹰 9 号一级助推器飞行，并在助推器返回地球后被完好回收。

这是首次搭载定制晶圆盒、电源、航空电子设备和印刷电路硬件的飞行，所有这些均由 Besxar 内部设计和制造，并在首次飞行中通过了验证。

该任务携带了 Besxar 自有的 GaN-on-sapphire（蓝宝石衬底氮化镓）、未掺杂硅和裸蓝宝石晶圆样品，以及来自学术研究合作伙伴弗吉尼亚大学（UVA）和德克萨斯大学奥斯汀分校（UT Austin）的 GaAs 和 AlInAsSb 晶圆。

Besxar Flight-1 的主要测试目标，是验证罐体设计在引入真空方面的可行性与性能——简而言之，它能像一个洁净室那样工作吗？该罐体需要：在飞行的所有阶段、再入和回收过程中保持结构完整性；在飞行过程中允许真空进入罐体以暴露测试材料；并防止污染物进入罐体。飞行后测试表明，Besxar 的罐体按预期运行。

Besxar 还测试了罐体设计安全携带晶圆通过整个飞行剖面的能力。罐体搭载了由多种不同化合物半导体材料构成的多片晶圆样品，初步分析表明没有一片受到损坏。Besxar 工程师对照飞行前标记检查了晶圆和罐体内部，未发现开裂、翘曲或可见损伤。为 UVA 和 UT Austin 搭载的衬底目前正在两所大学进行独立分析，这可能会在材料层面产生关于真空暴露对化合物半导体材料及其性能影响的更多数据。

Besxar 最终的太空制造过程将是完全自主的，这需要大量的实时数据和测试基础设施。公司为 Flight-1 建立了该数据收集系统的初步基础，并表示将在后续飞行以及最终的太空制造运营中对其加以扩展。该公司表示，数据系统运行良好：Besxar 能够收集整个任务过程中的压力、加速度、热、振动和冲击数据。其中一个罐体按预期运行，第二个罐体在记录飞行数据时出现了异常。Besxar 表示，正在为下一次飞行完成其异常审查工作。

Besxar 创始人兼首席执行官 Ashley Pilipiszyn 表示：“这是一项令我们无比自豪的成就。在短短九个月内，我们就能够设计并测试我们太空化合物半导体晶圆制造技术的初步关键能力。我们证明了硬件是可行的，我们的系统能够经受太空飞行的极端考验。现在我们有了真实的数据，更重要的是，拥有了一支具备有效载荷集成、太空飞行和回收经验的团队，随着我们朝着路线图的下一组技术里程碑迈进，这支团队只会加速我们的工作。”

这次任务和未来的飞行由 Besxar 的早期投资者资助。在任务之前，公司完成了一轮 1030 万美元的种子轮融资，由 Dauntless Ventures 领投，Overture VC、Keymaker VC、645 Ventures、Singh Capital Partners、Koru Capital、Plum Alley Ventures、Mana Ventures 和 Earthrise VC 跟投，使总融资额达到更高水平。

IQE 宣布与 Quintessent 达成外延合作协议

随着 QD Laser 技术进入客户送样阶段，IQE 将通过代工就绪服务供应 6 英寸 GaAs 外延片

化合物半导体晶圆公司 IQE 已宣布与总部位于圣巴巴拉的 Quintessent 达成采购协议，供应量子点激光器（QDL）外延片。

继 2025 年 1 月的初步公告和采购订单之后，两家公司长期合作关系的进一步扩展将使 IQE 通过其代工就绪（foundry-ready）服务供应 6 英寸 GaAs 外延片。这将支持 Quintessent 在其技术向商业部署和新的产品导入推进的过程中开展客户送样。

与传统激光器技术相比，Quintessent 的 QDL 架构旨在为下一代 AI 数据中心实现更低功耗的光互连、更简单的制造和更高的可靠性。

IQE 和 Quintessent 已合作超过十年，致力于将该技术从研究推向大规模生产，并此前曾宣布建立合作伙伴关系，以建立全球首个大规模 QDL 外延片供应链。

IQE 首席执行官 Jutta Meier 评论道：“经过一段成功的开发期，我们很高兴能够在 Quintessent 的量子点激光器技术向更广泛的市场应用和商业化推进之际，与我们的伙伴一起实现客户送样。IQE 在先进外延和大批量制造方面经过验证的专业知识，意味着我们完全有能力支持多种互补光互连技术的规模化，这些技术正在推动 AI 革命。”

Quintessent 首席执行官兼联合创始人 Alan Liu 评论道：“我们为与 IQE 的长期合作伙伴关系感到自豪。AI 基础设施建设的下一阶段将需要深厚的技术和供应链合作伙伴关系，以应对 AI 生态系统所需的规模。”

Liu 补充说：“IQE 一直是一位出色的生产伙伴，帮助 Quintessent 实现我们的激光器和 SOA 技术。我们期待着与 IQE 继续合作。”



金刚石的双重功效

为 GaN HEMT 配备顶部金刚石薄膜，使其能够更冷、更可靠地运行——这要归功于卓越的散热能力和有效的钝化。

作者：斯坦福大学的 Jeong-Kyu Kim 和 Srabanti Chowdhury。

许多射频和微波功率系统的核心，是 GaN HEMT。这些器件将高输出功率、高效率和非常高的工作频率罕见地结合在一起。这一属性集，确保了这类晶体管对众多应用至关重要——范围从雷达和卫星通信，到先进的防御系统和下一代无线基础设施。然而，即使这些高性能 HEMT，也面临一个顽固的内部限制。随着工作功率的增加，沟道内部的自热迅速上升，成为限制最大可实现输出功率、长期器件可靠性和运行寿命的关键因素。

不断上升的沟道温度会同时带来几种惩罚：包括载流子输运退化（迁移率下降）、导通电阻增加和效率下降。因此，纸面上看起来很有前景的性能，在现实中可能难以维持。与此同时，高温加速了触点、势垒层和栅极区域中热驱动的退化过程，导致器件更快衰退并缩短其可用寿命。其结果是：实用射频功率放大器的设计者往往被迫从理论性能极限上后退一步，仅仅为了将结温保持在安全工作窗口之内。这意味着，热约束经常最终定义了输出功率的真实上限，而不是器件的本征电学潜力。

第二个限制出现在器件表面。在这里，陷阱态可能在高频、大信号运行期间引入电荷滞后并扭曲局部电场。这会扼杀最大可用的驱动电流，并使晶体管的行为变得不那么可预测。这种通常被描述为 DC–RF 色散的现象，阻碍

了可用的射频输出，并使器件设计复杂化。

不幸的是，热效应和陷阱效应紧密耦合。更高的温度会加剧陷阱行为；而陷阱会重塑局部电场，并改变功率耗散的位置。这些效应协同作恶，随着功率密度和工作电压的增加，造成更严重的电热可靠性挑战。

工程师们传统上将这个问题视为两个独立的问题：他们通过更好的衬底、更好的封装和外部散热器来解决热限制；并通过引入介质钝化层，在器件单元层面改进电学稳定性。但这种长期以来塑造 GaN 设计的、各自为政的方法，阻碍了这些器件发挥其全部潜力。在热量产生最强烈的地方附近同时解决热效应和表面效应，会更有效。

在斯坦福大学，我们追求这种统一的方法，利用金刚石——一种将异常高的热导率与强电绝缘性相结合的材料。通过在完全制造好的 AlGaN/GaN HEMT 顶部直接集成一层低温生长的多晶金刚石薄膜，我们将世界上导热性最好的材料，放置在离沟道热点区域极近的位置——那里正是热量产生最强烈的地方。在这个顶部位置，金刚石将热量从有源区高效散播出去，而不形成电导通路，同时充当表面钝化层。这种双重作用改善了热学和电学性能。

热瓶颈

为了抑制表面陷阱并缓解 DC–RF 色散，

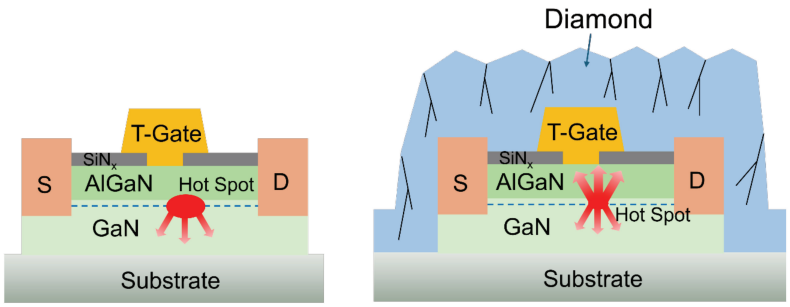


图 1：器件横截面示意图，（左）金刚石集成前、（右）顶部多晶金刚石集成后。金刚石集成增强了从热点散发的热量，实现向上和向下两个方向更高效的热流。

Ga 极性 GaN HEMT 采用了表面钝化。最广泛采用的解决方案是沉积 SiN_x 层——它能提供有效的电学钝化，现已成为整个行业的标准做法。然而，存在一个关键限制：SiN 的热导率相对较低，因此它的使用厚度通常足以确保可靠的陷阱控制。

由于这一弱点，将 SiN_x 与顶部金刚石散热器配对是有问题的。SiN_x 层位于有源区正上方，它是从沟道热点到金刚石层热流路径上的障碍。减薄 SiN_x 层、改善热耦合是可能的，但这要以较弱的表面控制和DC–RF色散的回归为代价。因此，设计者在权衡电学稳定性和热性能时，只能寻求最佳折衷。

但是，能否通过采用集成在沟道热点附近的顶部金刚石层来避免这种折衷？它能否提供类似钝化的表面稳定化，同时保持卓越的散热能力，并减少甚至消除对厚 SiN_x 层的需求？如果这一切成为可能，金刚石将不再仅仅作为散

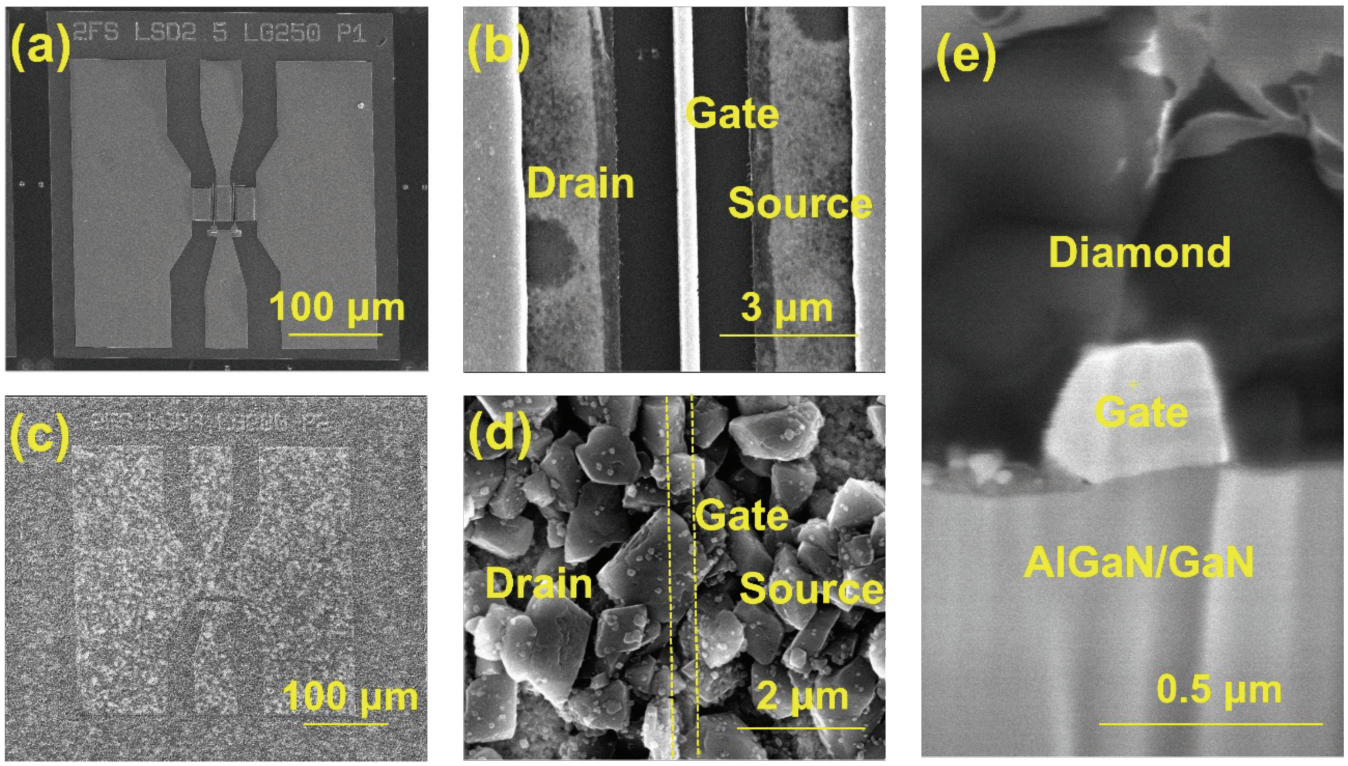


图 2：本工作所制造的 AlGaN/GaN HEMT 的俯视扫描电子显微镜（SEM）图像：(a) 多晶金刚石钝化前；(b) 栅极指区域放大视图，显示相邻的源极和漏极接触；(c) 多晶金刚石钝化后；(d) 被多晶金刚石晶粒覆盖的栅极指区域放大视图。图 (c) 和 (d) 证实了金刚石在整个器件（包括栅极指区域）上的均匀覆盖。(e) 栅极金属区域的聚焦离子束（FIB）SEM 横截面图像，显示顶部多晶金刚石层均匀地包裹栅极金属而无空洞。

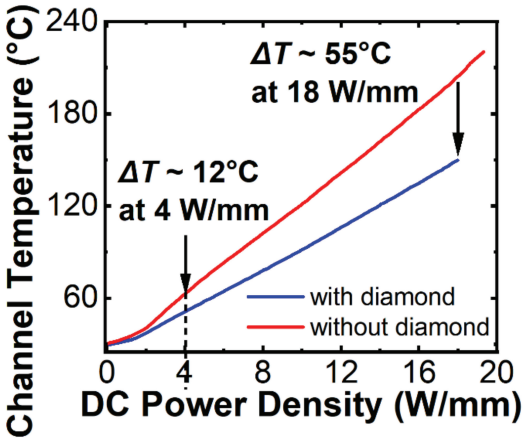


图 3：栅极电阻测温结果，表明顶部金刚石集成后沟道温度显著降低。

热器。相反，它将充当一种新型的双功能钝化层——一种同时改善热提取和抑制色散的组合方案。这对高功率 GaN 器件特别有吸引力。

紧密耦合

为了检验这一理论，我们制造了金刚石涂层 GaN HEMT（见图 1），在低于 500° C 下运行的微波等离子体 CVD 生长工艺中添加金刚石。由于这一生长温度保持在器件兼容的范围内，我们在晶体管完全制造好之后（包括栅极形成和金属化之后）才沉积金刚石。这实现了“器件优先、金刚石最后”的集成顺序，并避免将敏感结构暴露于可能降低性能的恶劣热循环中。

我们的多晶金刚石层约 1–1.5 μm 厚，生长在超薄的 SiN_x 层之上。SiN_x 厚度约 10nm，远薄于通常单独用于钝化时的厚度。根据电子显微镜和横截面分析（见图 2），我们在器件表面（包括狭窄的栅极区域）实现了均匀、无空洞的金刚石覆盖。我们的晶粒结构支持有效的横向热扩散，我们的几何结构确保热通路极其接近沟道。在这种结构中，一个超薄介质将金刚石层与有源区隔开。这种架构提供了强的热耦合，同时改善了有源区附近的陷阱环境。

更冷的沟道

为了量化我们技术的热效益，我们采用了栅极电阻测温法。在校准栅极电阻的温度依赖性之后，我们在器件耗散功率的同时监测其电阻，并将该信号转换为平均沟道温度。这提供了一种直接的电学方法，用于跟踪现实高功率工作条件下的内部发热情况。

我们的测量显示器件温度显著降低（见图 3）。当 HEMT 提供接近 18W · mm^{-1} 的直流功率密度时，金刚石集成使平均沟道温度下降了约 55° C。在较低的功率密度下，这一温差会减小，但在接近 4W · mm^{-1} 的功率密度下仍有 12° C。这些结果证实：添加顶部金刚石层引入了一条高效的热通路，并显著降低了有效热阻。

除了降低工作温度之外，热量还开始向不同方向流动。随着我们技术的引入，除了通过 GaN 外延层向下流入衬底外，热量还向上扩散到金刚石层。由于金刚石位于非常接近热点的位置、并具有较高的面内热导率，热量在器件表面被横向重新分配。这种扩散对多指射频晶体管特别有益，因为它对抗局部加热——局部加热会造成强温度梯度并限制均匀的电流分布。

陷阱控制

电学测量表明，我们的金刚石层提高了表面稳定性。我们通过在高频运行条件下检查表面陷阱来验证这一点——具体方法是：在电学应力的静态偏置条件下，将直流电流 – 电压特性与短脉冲电流 – 电压特性进行比较。当陷阱效应显著时，脉冲电流会降低，并与直流行为出现明显差异（见图 4）。这种不良现象被称为电流崩塌，是器件表面电荷俘获的公认特征。金刚石沉积之后，色散显著降低。

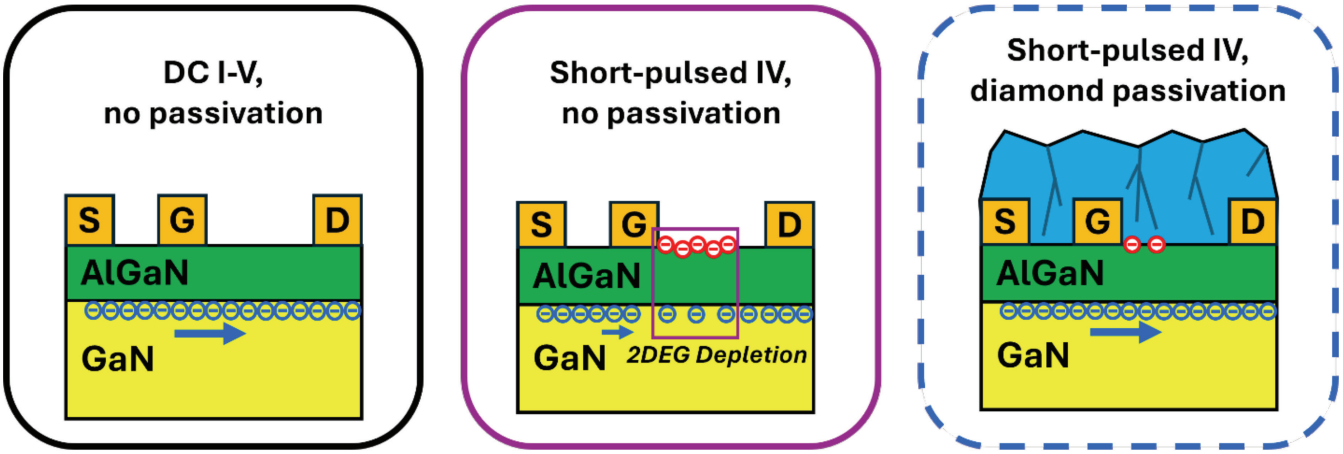


图 4：AlGaN/GaN HEMT 中 DC–RF 色散的概念及金刚石钝化效果的示意图。没有钝化时，表面陷阱在直流条件下影响很小，但在短脉冲工作下它们会俘获电荷，导致沟道耗尽和电流崩塌。有了金刚石钝化，表面俘获被抑制，沟道电荷得以保持，从而在动态工作下维持稳定的电流。

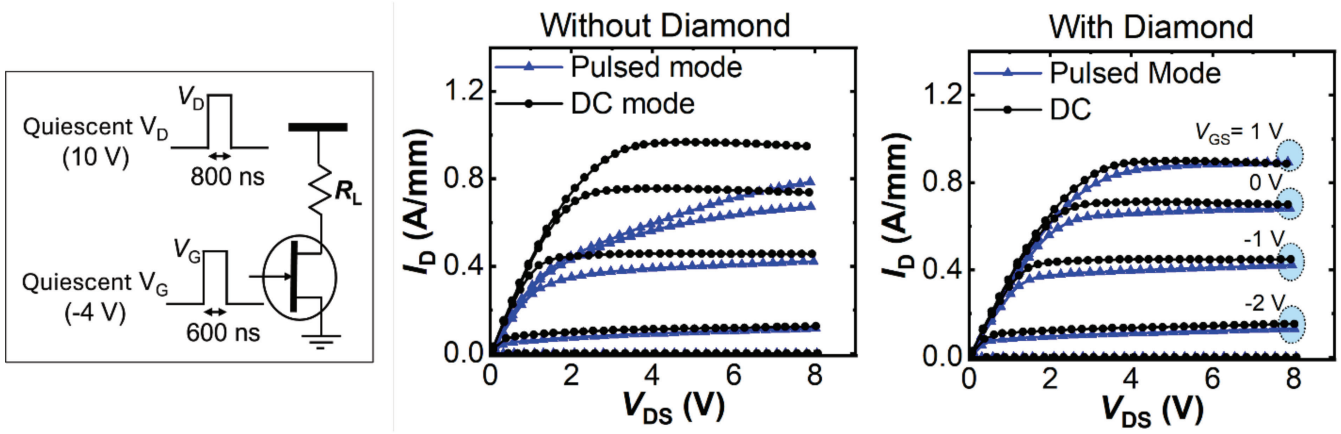


图 5：无（左）和有（右）金刚石钝化的 GaN HEMT 的实测直流和短脉冲 I–V 特性。没有金刚石时，脉冲漏极电流相比直流行为的明显降低，表明存在由表面陷阱引起的强 DC–RF 色散。有了金刚石钝化，直流与脉冲电流之间的差异显著缩小，证明了对电流崩塌的有效抑制和动态性能的改善。

导通电流失配几乎消失，即使在更苛刻的偏置条件下，膝电压的移动也很小。

对多个器件的调查显示：金刚石集成将色散值从约 30–40% 降低到大约 5–8%（见图 5）。这一抑制水平与使用常规 SiN_x 钝化所实现的水平相当。这表明：金刚石覆盖层连同其下方的超薄介质，足以控制陷阱；也说明金刚石在主动参与表面稳定化。换句话说，除了增加热流外，金刚石层还改善了电学性能。

扩展前景

我们的研究提供了一个早期的范例，说明低温 CVD 生长的金刚石层如何在两个方面改善传统的 GaN HEMT：减少表面陷阱和增强散热。在具有先进场板设计的更高电压 GaN HEMT 中，随着功率密度的增加，自热会变得更加严重。这使得热阻成为限制性能的关键因素。

由于我们的技术将金刚石层放置在非常接近沟道热点的位置、且中间没有厚的 SiN_x 介质层，随着放大器运行期间偏置电压和输出功率的增加，冷却效果应该会更加明显。

我们预计：将我们的双功能金刚石层应用于高压 GaN 晶体管，将实现更高的输出功率、改进的效率和更长的器件寿命。我们的初步结果只是一个基线演示；在扩展更激进、功率更高的射频 GaN 器件中，甚至更大的增益是可能的。

超越 GaN

我们的工作指出了热材料应用于化合物半导体器件方式的更广泛转变。金刚石这类材料，不再仅仅作为外部散热器，而是可以成为器件的功能性组成部分。当在低温下、于制造过程后期集成时，金刚石不仅在影响热流——它还在平滑表面电场的峰值并对抗陷阱行为。

一个发挥双重作用的顶部金刚石层——既散播热量、又钝化表面——为生产这样的化合物半导体晶体管提供了一条实用路径：它们运行更冷、在大信号运行下行为更可预测、并能更有效地扩展到更高的功率密度。随着集成技术的不断进步，我们预期：像金刚石这样的双功能层，将在广泛的下一代化合物半导体技术中变得普遍有用。

我们的多晶金刚石层约 1–1.5 μm 厚，生长在超薄 SiN_x 层之上。SiN_x 厚度约 10nm，远薄于通常单独用于钝化时的厚度。

扩展阅读

- J.-K. Kim et al.“Demonstration of the dual role of topside diamond as a passivation layer and heat spreader in AlGaN/GaN HEMTs” IEDM (2025)
- S. Chowdhury,“Diamond Blankets Will Chill Future Chips: A Micrometers-Thick Integrated Layer Spreads Out the Heat” IEEE Spectrum (2025)
- M. Malakoutian et al.“Low Thermal Budget Growth of Near Isotropic Diamond Grains for Heat Spreading in Semiconductor Devices” Adv. Funct. Mater. 32 2208997 (2022)
- R. Soman et al.“Novel all-around diamond integration with GaN HEMTs demonstrating highly efficient device cooling” IEDM (2022)

驱动氧化镓的商业化

一家欧洲氧化镓外延片供应商，正在超宽禁带功率电子产业的诞生过程中发挥关键作用。NextGO Epi 的两位联合创始人接受本刊编辑 Richard Stevenson 采访。

RS：Andreas Fiedler，作为 NextGO Epi 的联合创始人，同时也是已从事这种材料研究十年的人，多年来你一直倡导氧化镓在功率电子领域的前景。你预计这种氧化物将在哪里产生最大的影响？

AF：眼下，是在固态变压器。我们电网中的可再生能源越多，我们就越必须应对智能电网和电网路由问题，因为可再生能源存在波动。到目前为止，这一点一直是由基于蒸汽的发电厂中的大飞轮来覆盖的，但由于我们想摆脱这些——因为它们通常通过燃烧某些我们不希望进入大气的东西来产生蒸汽——我们需要固态变压器来管理我们的电网。你需要一种半导体，能够帮助你在高功率水平下管理 10kV 以上的电压。氧化镓有潜力实现这一点。

市场上还没有足够的材料。研究界基本上在为自己供应材料，以完成研究。现在大公司想跳进来。必须有人来满足这一需求，而我们能做到这一点。我们必须建立一个氧化镓子供应链，专为欧洲而建，以对未来可能发生的任何情况保持韧性。

RS：Ta-Shun Chou，作为 NextGO Epi 的首席执行官，你掌握着氧化镓产业的脉搏。你会如何描述当前的局势？

T-S.C：从 2022 年起，多家供应商开始供应至少 4 英寸的氧化镓。现在更多初创公司和企业表现出兴趣，来自中国、日本、台湾和美国。今年我们看到了 6 英寸甚至 8 英寸氧化镓的演示。我们相信，我们现在正处于过渡阶段。工业界玩家正在制作原型，展示氧化镓可以成为碳化硅和氮化镓的竞争对手，而不再是论文中一种很酷的材料。最有可能的是，在未来两三年里，你会看到第一款氧化镓产品问世。

RS：为什么现在是 NextGO Epi——一家欧洲氧化镓外延片供应商——出现的恰当时机？

T-S.C：首先，对半导体材料来说，尺寸很重要。现在我们看到更多 4 英寸和 6 英寸衬底变得可用，而且价格正在下降。

我们的客户和合作伙伴说：“我想试试氧化镓。能给我一些外延片吗？”这表明，在获得高质量、大直径外延片方面存在一个瓶颈。

我们的合作伙伴 Aixtron 拥有一台氧化镓 MOCVD 设备。

所有这三个因素促使我们推动 NextGO Epi 的成立。对于外延业务来说，这种业务通常只存在于新一代材料的开端。如果你来得太晚，就没有你的位置了。所以，这就是我们决定立即加入的原因。

RS：你声称 NextGO Epi 是欧洲唯一的氧化镓外延片供应商。在美国和亚洲还有其他外延供应商吗？



图：NextGO Epi 用于生产其 Ga2O3 外延片的 Aixtron CCS 系统。

T-S.C：还有其他几家外延片供应商。它们在中国、日本和美国。

氧化镓外延主要有三种技术：HVPE、MBE 和 MOCVD。我们在美国和日本的合作伙伴以 MBE 和 HVPE 更为知名。中国的一些供应商也在探索 MOCVD 等技术。

我们相信，MOCVD 总体上更适合大规模、高均匀性的外延片生产。我们在 MOCVD 工艺开发方面拥有 10 年以上的经验。我们在整个行业中拥有独特的地位。

AF：在这种材料向功率电子市场过渡的早期阶段，拥有多家供应商是件好事。大多数研发部门不希望材料出现垄断。他们说：如果你是唯一的公司，我们就不会在这方面投资。如果你出了什么事，我们需要有其他人能提供材料；否则，我们花在研发上的所有钱都会损失。

T-S.C：我们已经与六家衬底供应商签署了战略合作协议。它们在中国、日本和美国。总的来说，氧化镓还太年轻，谈不上竞争。每个人都想把蛋糕做大。我们也乐于有多家供应商，拥有良好的质量和更低的成本。所有衬底供应商都想把他们的衬底送到我们这里来。如果他们提供好的衬底，对他们自己的业务也有好处。

RS：最近，国际贸易限制阻碍了化合物半导体产业。这对新生的氧化镓产业有何影响？

T-S.C：我们预见，氧化镓成本的下降可能不会那么快。

第二点是，NextGO Epi 是一家总部位于德国的公司。与位于美国或日本的公司相比，我们处于一个非常中立的地位。我们不受到严格出口管制的限制或约束。

RS：NextGO Epi 已经运营了一年多。但团队的历史要久远得多。联合创始人是如何走到一起的，是什么促使三位研究人员转变为联合创始人兼企业

家?

AF：我们在莱布尼茨晶体生长研究所（IKZ）学习期间相识，我们在那里开发了整套技术。我从 2015 年开始，做关于这个材料体系的博士研究，克服了获得高质量材料的问题。

Andreas Popp 于 2017 年加入，起初是博士后。他表现出色，2019 年成为外延生长组组长。

他招聘的第一个人是 Ta-Shun，作为博士生，是在 2020 年。Ta-Shun 以创纪录的时间完成了博士学业。他发表的论文数量超过以往任何博士生，撰写的专利也最多。我很高兴与他合作，因为他不仅聪明——而且工作勤奋。

我们看到了这种材料的明确潜力。2019 年，我们与产业界谈论氧化镓。他们的反应是："我们刚投资了碳化硅。氧化镓是什么？你为什么来烦我们？"五年后，2024 年，产业界来找我们："嘿，你以前提到过的那个氧化镓。你们有没有一些样品可以给我们测试？"

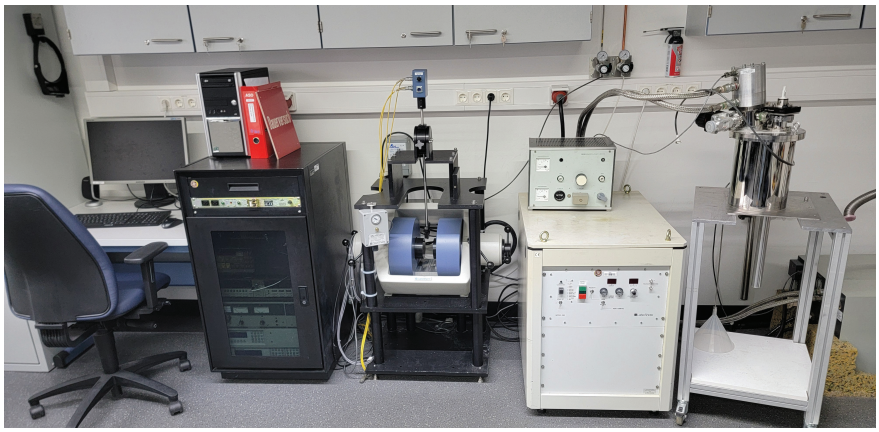
随着这种势头的转变，我们可以将研究推向真正的应用。这也是创业的主要动机。我们做了出色的研究，那些论文反响很好。但当我与研究圈之外的人交谈时，他们从不明白我在做什么。当有一天我能说——这个应用，你手中的东西，来自我的研究——这将是我进入这一领域的强烈动机。

RS：你们在筹集资金方面克服了哪些挑战?

T-S.C：通常，你不能指望投资者投钱给你，好让你去购买硬件设备。尽管你是一家初创公司，他们期望你拥有经营企业所需的所有设备。幸运的是，我们能够解决这个问题。我们与我们的依托研究所联系非常紧密，所以我们能够从依托研究所租赁设备，包括 MOCVD。

第二个挑战是，总的来说，半导体商业模式在欧洲（包括英国）并不常见。所以你不太可能找到一位有背景、能够评估半导体的投资者。

我们非常幸运地找到了一位投资者。他们不了解我们的技术，但他们愿意与我们坐下来，倾听我们，并试图理解我们的技术有多好。



图：用于评估外延层电子迁移率的霍尔测量系统——这是衡量其高质量的关键判据。

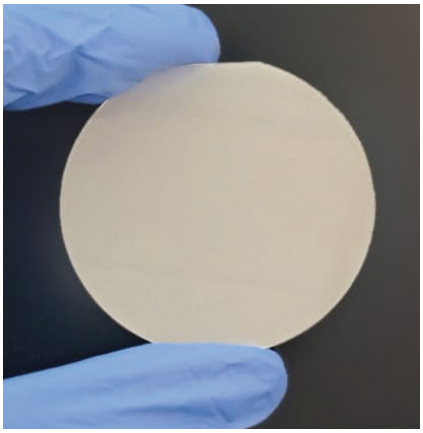
我们还得到了 Aixtron 前首席运营官 Jochen Linck 博士非常好的支持。他恰好是其中一家风险投资基金的有限合伙人。他了解我们的技术，因为 Aixtron 是我们 MOCVD 设备的供应商。他不仅提供商业理解。他基于自己的经验，指导我们并教我们一家外延公司应该是什么样子。他是创始团队的商业导师。

RS：NextGO Epi 使用 MOCVD 生产氧化镓外延片。也有可能通过 MBE、HVPE 和雾式 CVD（mist CVD）来生长氧化镓。你认为所有这些技术各自的优缺点是什么?

AF：MOCVD 是最兼容大规模生产的技术。MBE、HVPE 和雾式 CVD 都受制于低通量或单晶圆生长运行的问题。

MBE 是单晶圆设备，而且在超高真空腔室中拥有无与伦比的精度和纯度。但氧化镓的生长速率非常、非常低。

对于 HVPE，生长速率非常、非常高，但样品非常粗糙、不均匀，并且存在结构缺陷问题。



雾式外延是针对 α 相的。有科学上的原因使大多数人关注热力学稳定的 β 相。一旦你开始加工器件并想要进行离子注入或对接触进行退火，你的 α 相可能会转变成 β 相，因为 β 相才是热力学稳定的相。

对于氧化镓的 β 相，第一批器件是用氮化镓加工工艺配方制造的。它们效果非常好。只需要再多一点优化。

向晶圆厂的过渡可能会非常、非常快。需要的是恒定、均匀的电学性能，而这正是我们可以通过 MOCVD 提供的。

RS：你们是从 IKZ——一个拥有晶体生长专长的研究所——分拆出来的。那么你们为什么不生产自己的衬底?

AF：首先，作为创始团队，我们的主要专长是外延。我们都没有从事过体材料生长。

IKZ 有专家能生产出最好、最高质量的材料。

然而，在德国，能源成本不像其他国家那么低，而且这是一个高能耗工艺。你在 1800° C 下生长，并且必须保持这个温度至少一两周才能长出一个晶体。

在 IKZ 开发的技术不是最便宜的。你有一个非常大的铱坩埚。随着铱价格的波动，当我们把所有因素都放进商业模式中时，我们没有看到自己能与其他全球市场上的公司竞争。所以，我们决定坚持只做外延。

RS：知识产权在我们的行业很重要。NextGO Epi 拥有两项国际专利。它们涵盖什么?

T-S.C：一项是非常独特的监测氧化镓外延生长的技术。第二项是生长非

常厚且高质量的氧化镓薄膜的工艺和技术专利，这对功率电子器件至关重要。

RS：你们在发货前如何表征你们的材料？

AF：在半导体世界，可重复性、可靠性和规格是成功的关键。我们在发货任何产品之前都有严格的质量标准。我们进行 X 射线衍射测量，然后进行霍尔测量，以评估材料的载流子浓度以及迁移率，因为这两个参数对大多数器件来说是最重要的。

载流子浓度能让你洞察：你在多大程度上使掺杂浓度匹配客户的要求，以及你的材料有多洁净。

迁移率直接反映材料的质量。载流子迁移率越高，材料中的缺陷和散射中心就越少。

我们做一些常规筛查，用 AFM 和显微镜，以观察整个表面是否洁净。

RS：你们所有的客户都能将你们的材料加工成器件吗？还是有些客户与晶圆代工厂合作？你认为无晶圆厂（fabless）公司能在氧化镓功率电子产业中繁荣发展吗？

AF：早在 2016 年，当我们给出第一批样品用于制作器件时，他们只是用他们的氮化镓配方。第一个器件直接打破了碳化硅和氮化镓的临界击穿场强纪录。所以，这种材料直接超过了 3 兆伏 / 厘米。这显示了它与氮化镓技术的兼容性。因此，我认为无晶圆厂公司将有很容易的途径进入市场，因为他们可以直接去找任何能够加工氮化镓并愿意接受氧化镓的晶圆厂。

RS：氧化镓有弱点，特别是 p 型掺杂。为什么你认为这不是一个致命障碍？

AF：大多数材料仍然使用 n 型沟道，因为电子的迁移率比空穴高。但 p 型对电场管理确实很重要。

至少有两个非常有前景的解决方案，并已在器件中展示了 8 兆伏 / 厘米的临界电击穿场强。实际上，是器件的外围区域发生了击穿，而不是氧化镓本身，所以人们仍然认为他们可以进一步推高这个数值。

一个解决方案是超高 k 介质。在那里，你有极化电荷帮助你进行电场管理。当然，这只适用于低频器件。但当我们想到以 200kHz 运行的高压器件时，这是可能的。

另一个是集成异质外延或沉积。例如，p型氧化镍或氧化铜，使用溅射——这是任何洁净室中都非常常规的工艺。这就像奇迹一样奏效了。



图：NextGO Epi 创始团队，从左至右：Andreas Fiedler、Ta-Shun Chou 和 Andreas Popp。

RS：氧化镓的热导率大约只有碳化硅的十分之一。这对该产业是个问题吗？

AF：这个课题从早期就一直是研究的一部分。当数值如此之低时，人们直接注意到并说：“我们必须做点什么，否则这种材料永远不会成功。”

研究界提出了有前景的解决方案。任何器件都必须从顶部提取所有热量，因为热量永远不会到达衬底底部。

最有前景的解决方案，是最近由布里斯托尔大学的 Martin Kuball 开发的另一种 CVD 工艺。你在栅叠层和介质叠层内沉积多晶金刚石。多晶金刚石具有如此好的热导率，以至于它基本上能把所有的热量都提取出器件。

你可以在封装方面取得某些进展。我们早期曾与德国的采埃孚（ZF）合作。他们展示了以某种方式封装是可能的，可以把热量导出来。

RS：你们已经在向多个国家的客户发货。这项业务中有多少与学术界的器件开发相关？有多少是工业界的开发？

T-S.C：大多数客户来自其公司的研发部门，或来自学术界。

RS：你们刚刚获得了 200 万欧元的种子轮投资。跟我讲讲你们的投资者。他们为什么支持你们？

T-S.C：我们的领投方是 Vireo Ventures、Ultratech Capital Partners 和 IBB Ventures，以及天使投资人 Boris Habets。他们支持我们，是因为他们相信我们所做的用于功率电子的下一代半导体材料。

RS：这笔投资将用于什么？

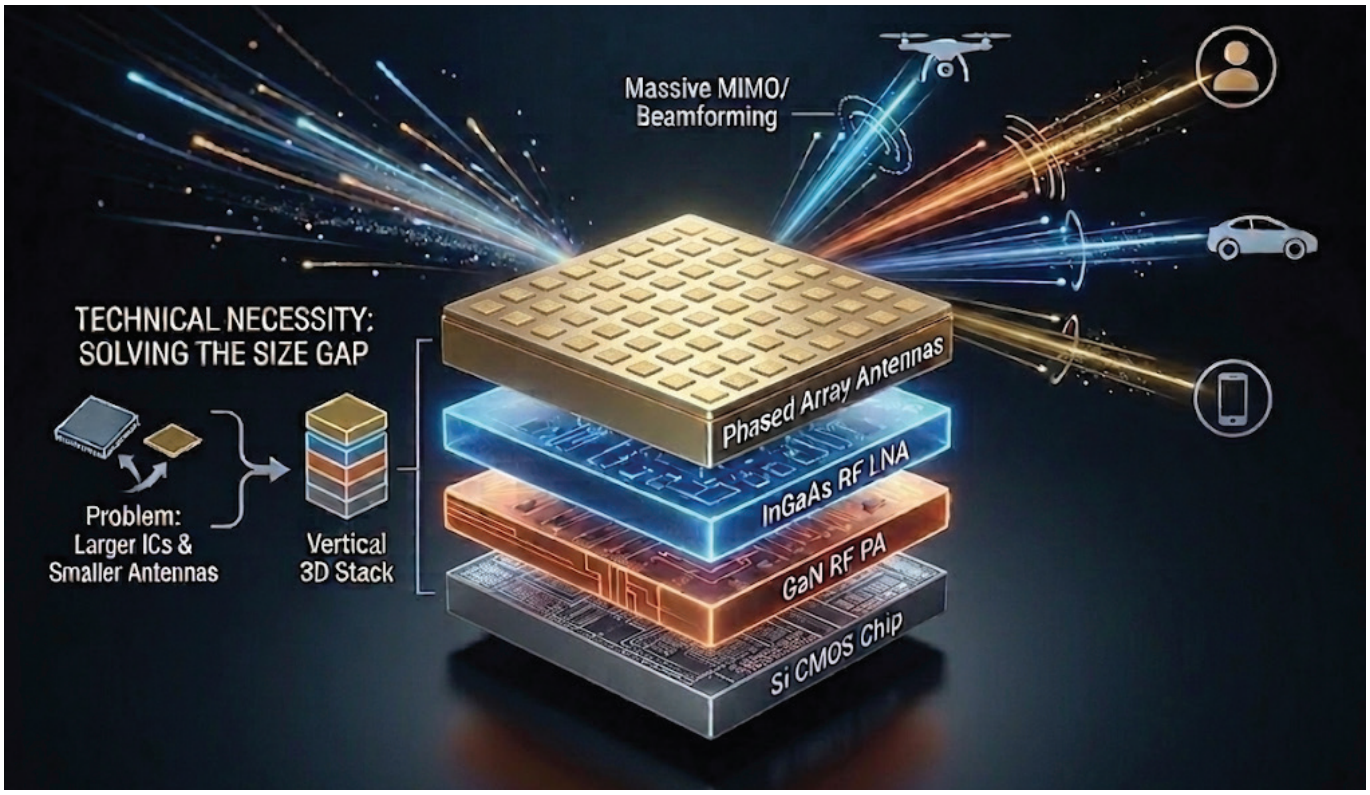
T-S.C：对于一家初创公司来说，一切都是关于增长、增长、增长。我们的团队现在是三位联合创始人，都是氧化镓专家。在接下来的几个月里，我们将有一位新同事加入我们——一名工程师，以扩大我们的生产能力，并使我们能够吸引更多客户转向氧化镓。此外，我们将有一位运营经理加入我们，在日常行政事务上支持我们。我们现场已经有许多学生工。未来，当我们吸引更多客户时，我们肯定会扩展我们的团队。

RS：你们未来 18 个月的计划是什么？

T-S.C：我们应该确立我们的品牌，成为领先的氧化镓外延片供应商。但更重要的是，我们希望进一步推动氧化镓技术，向世界各国的公司提供高质量的外延片，以加速氧化镓的产业化。

我们需要看到一款氧化镓产品。氧化镓外延片本身不是一个产品。用于电动汽车的模块，或用于 AI 数据中心的模块，才是真正的氧化镓产品。我们希望帮助社区中的每一个人实现这一目标。

MOCVD 是最兼容大规模生产的技术。MBE、HVPE 和雾式 CVD 都受制于低通量或单晶圆生长运行。MBE 是单晶圆设备，而且在超高真空腔室中拥有无与伦比的精度和纯度。但生长速率非常、非常低。



面向未来无线通信的“三剑客”

通过在硅 CMOS 芯片上对 InGaAs HEMT 和 GaN HEMT 进行异质单片集成，下一代无线通信系统将从中受益。

作者：KAIST 的 Jaeyong Jeong、Chan Jik Lee、Yoon-Je Suh、Nahyun Rheem、Bong Ho Kim、Joon Pyo Kim、Juhyuk Park 和 Sanghyeon Kim。

无线通信系统是现代基础设施的神经中枢，支撑着大量互联服务。至关重要的是，它们必须提供可靠的连接，以支持自动驾驶和先进 AI 平台的快速扩张。这两种尖端技术都实时生成和处理海量数据，并要求前所未有的传输速度才能有效运行。

为了应对这些苛刻的要求，研究人员必须探索通过基础硬件创新来扩展物理信道容量的机会。在韩国高等科学技术研究院（KAIST），我们的团队正通过在硅平台上集成 III–V 族和 III–N 族晶体管来迎接这一挑战。

这三种材料的组合，正在突破高性能射频的边界。

我们扩展信道容量的努力依托两大物理支柱：扩展可用带宽，以及提高信噪比。更宽的带宽要求向更高频谱过渡——那里目前有更多频谱资源尚未被利用。这一举措必须与在这些频率上保持高信噪比齐头并进——而这要求系统的发射端和接收端都具有卓越的性能。功率放大器必须在信号源头提供高输出功率，而低噪声放大器必须在接收端保持信号完整性。要在这两个方面都表现出色，这两个组件都必须与高增益天线无缝耦合，以确保信号跨频谱的高效辐射和接收。

突破极限

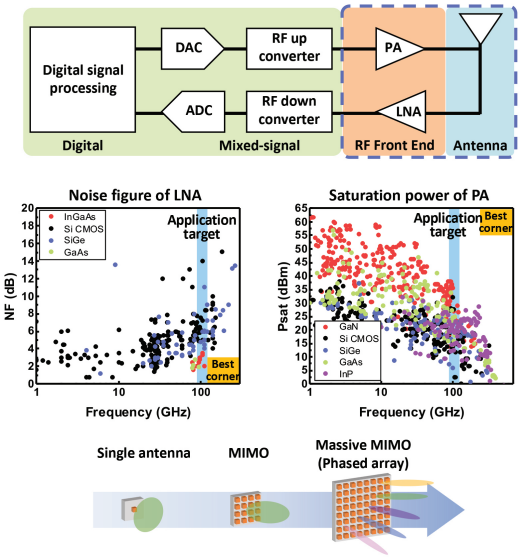


图 1：下一代射频通信系统基本组件示意图。KAIST 选择 InGaAs 和 GaN 用于前端，因为它们在 100GHz 具有卓越的噪声和功率性能。天线技术已经从简单结构演变为大规模 MIMO 相控阵，以满足高容量需求。这种集成策略对于支持未来无线通信的极端数据速率至关重要。

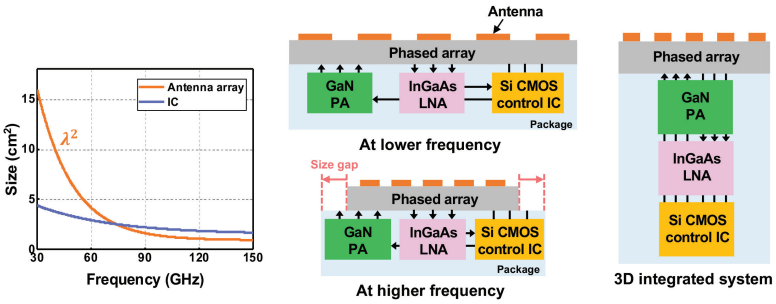


图 2：随着工作频率提高，天线元件与支持集成电路之间的缩放失配造成了重大的架构挑战。天线尺寸按波长迅速缩小，而电路的占用面积仍然相对较大，从而导致物理尺寸差距。垂直 3D 集成通过将功能层直接堆叠在天线阵列下方解决了这一瓶颈。这种方法确保了高频相控阵紧凑、高效的占用空间

半导体材料的物理性质决定了高频通信系统的最终性能极限。在化合物半导体材料组合中，InGaAs 和 GaN 分别是低噪声和高功率应用的首要候选材料。InGaAs 器件以其在 100GHz 范围内卓越的低噪声特性而闻名，使其成为灵敏接收机的理想选择；而 GaN 晶体管在相同频段内提供异常高的功率饱和水平，用于发射。在开发能够充分利用宽带宽、同时保持高信噪比的稳健射频前端的过程中，我们利用了这两种材料。

我们的技术还依托天线设计和空间复用方面的重大突破。

早期无线系统依赖于基本的单输入、单输出结构，这往往限制了容量，并经常受到干扰的困扰。它们已被多输入、多输出（MIMO）配置所取代，后者在拥挤环境中提高了数据吞吐量。然而，随着工作频率提高并向毫米波和亚太赫兹频段迈进，传统架构面临严重的物理限制。

因此，基于大规模 MIMO 系统的相控阵天线技术，正成为下一代无线硬件的领先解决方案。利用先进的波束成形，这些系统将电磁能量集中到精确的空间方向，实现定向通信。空间聚焦是一个游戏规则改变者：通过减少能量浪费和最小化对其他用户的干扰，它显著提高了通信范围和容量。

实现这些阵列，需要将许多独立的天线元件及其相应的控制电路进行密集集成。

遗憾的是，密集集成远非易事。一个主要问题是：传统的 2D 封装技术无法满足现代相控阵天线系统所要求的紧密集成需求。如果采用并排布局，在物理上很难把 InGaAs 低噪声放大器（LNA）、GaN 功率放大器（PA）和基于硅的控制芯片集成在一起。这一挑战之所以出现，是因为随着工作频率提高，天线元件的物理尺寸随信号波长的变化而变化——而支持性的控制电子器件和射频组件的缩放速度要慢得多。这种组件尺寸的不匹配导致了长互连，从而引入寄生损耗并降低高频信号性能。

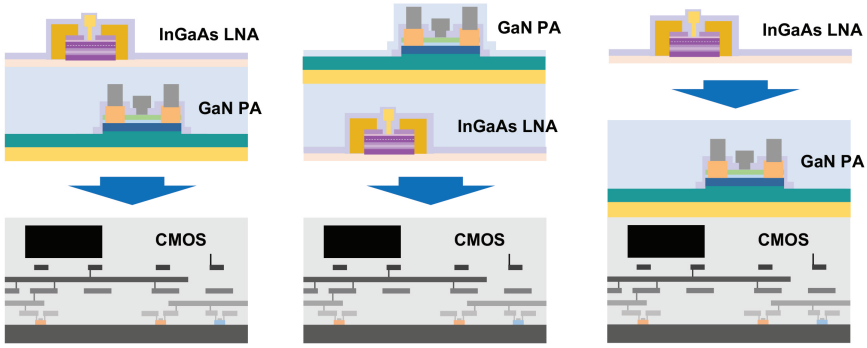
一个强大而引人注目的替代方案是垂直 3D 集成技术。通过允许不同的半导体层直接相互堆叠，这种集成形式最大限度地提高了空间效率，并缩短了有源器件与天线之间的信号路径。

垂直集成：利与弊

垂直堆叠的一大优势是：它允许创建异质系统——其中每种材料都用于其特定的优势，且不损害整体性能。

使用这种方法，我们用具有成本效益的硅 CMOS 工艺处理控制逻辑和复杂的信号处理。同时，高性能射频功能被分配给专门的化合物半导体层，直接键合到硅芯片上。

采用这种策略，我们可以在电气性能绝对需要的地方才使用昂贵的化合物材料。该平台为完全集成的天线模块打开了大门——将所有



Process	Simple (M3D of InGaAs HEMT & Die-to-wafer bonding)	Complex (Additional bonding steps)	Simple
Yield	GOOD (Known Good Die)	GOOD (Known Good Die)	Bad

图 3：3D 集成路径的比较，突出了工艺复杂性与制造良率之间的最优平衡。利用单片集成在键合前构建一个经过验证的射频块，通过“已知良好芯片”方法确保了高良率。其他顺序方法则效果较差，原因是键合步骤增加或显著的良率损失。模块化制造流程为确保整体系统良率提供了最有利的策略。

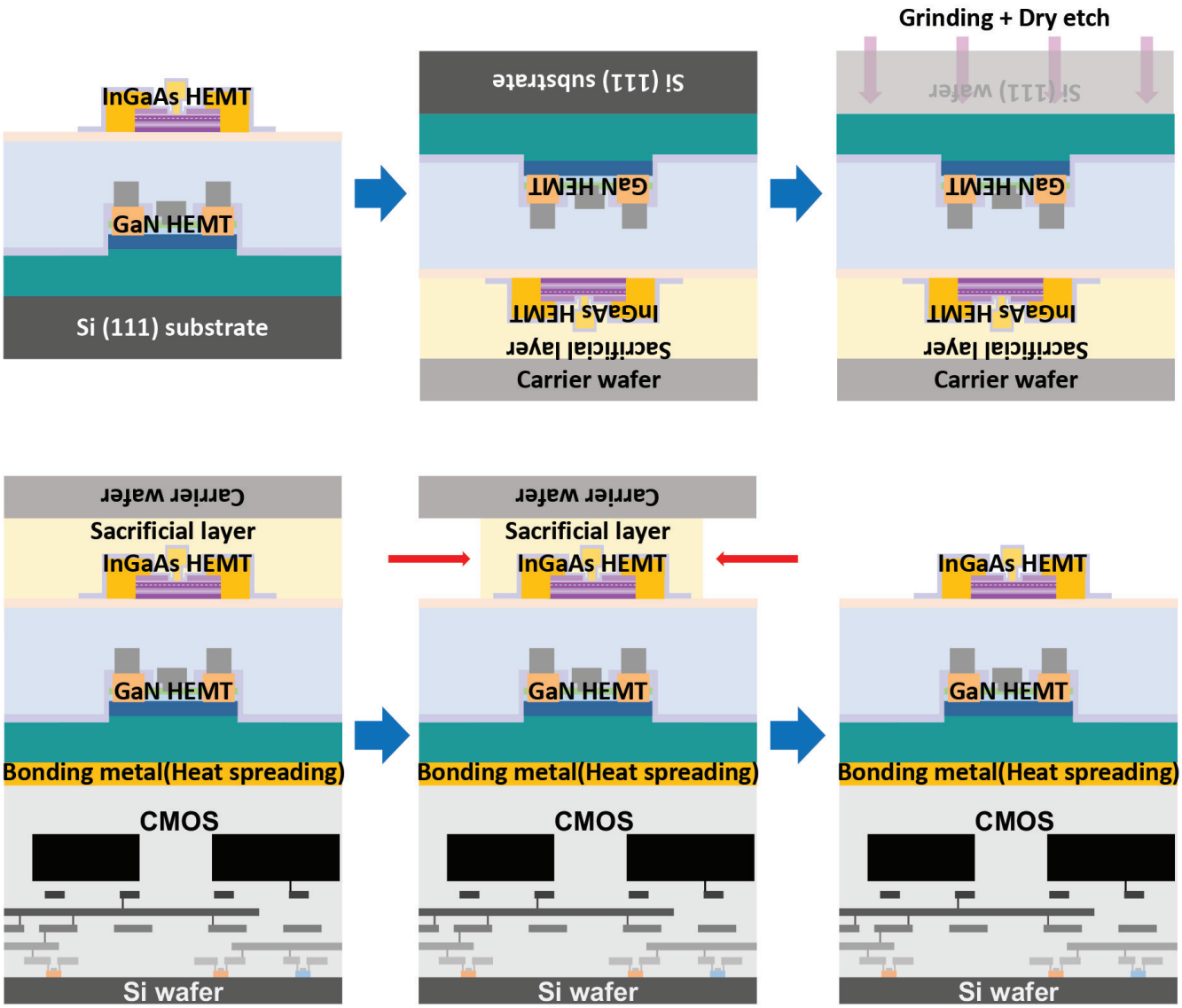


图 4：硅 CMOS 芯片上射频块的 3D 集成工艺流程。

对于键合阶段，我们做出了几个关键的工程选择，以确保最终器件的热学和机械稳定性。为了促进热量从 GaN PA 高效散发，我们实现了一个金属键合界面。这个高功率器件在运行期间产生大量热量，因此热管理对于防止周围器件的热退化至关重要。

必要的组件容纳在单一紧凑的封装之中。

出于对这些架构优势的追求，我们克服了在硅平台上结合不同化合物半导体的巨大技术障碍。由于晶格常数存在显著失配，直接在硅上生长化合物半导体层极其困难。

这些材料的热膨胀系数也存在差异，在制造过程中会导致机械应力和结构缺陷。

另一个障碍是制造 GaN 器件所需的高温，这会威胁芯片上预先存在的结构。为了解决所有这些问题，我们引入了一种创新的制造流程，在不牺牲各自器件性能的情况下稳定这些不同的材料。

通过我们的制造流程，我们实现了一种异质 3D 堆叠架构，将 GaN HEMT 与 InGaAs HEMT 结合在硅 CMOS 芯片上。这一工艺从制造 GaN HEMT 开始，随后集成提供低噪声功能的 InGaAs 层。我们将这两个射频块组合成一个单一的芯片单元，该单元随后被转移到硅控制芯片上。

为了结合不同的材料技术，我们使用了一种复杂的芯片到晶圆（die–to–wafer）键合技术，确保各层之间稳定的机械和电气连接。通过这种方法，我们最大限度地减少了所需的层间通孔数量，并显著提高了高频信号的整体完整性。

在形成我们的异质结构时，我们首先生产一个射频块。这涉及通过单片 3D 集成将 InGaAs 器件集成到 GaN 器件之上。然后，我们使用二次垂直键合工艺，将这个完成的射频块集成到硅 CMOS 芯片上。

我们的方法避免了将单个组件按顺序集成到硅芯片上。如果采用那种方法，在键合之前验证射频块的运行是不可能的。通过避免这种关于“已知良好芯片”（known good die）的限制，我们不会遭受整体制造良率的必然降低。

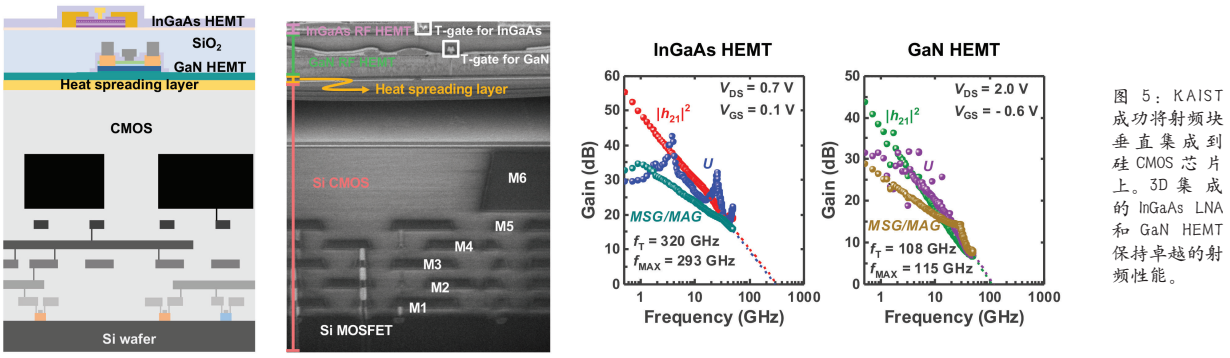


图 5：KAIST 成功将射频块垂直集成到硅 CMOS 芯片上。3D 集成的 InGaAs LNA 和 GaN HEMT 保持卓越的射频性能。

此外，我们不把 GaN 器件堆叠到 InGaAs 器件之上，因为那将涉及一个冗余且昂贵的键合步骤。

工艺设计策略

我们设计的制造序列包含三个主要阶段，从 GaN HEMT 的标准制造开始。其生产包括常规高温退火，以形成源极和漏极欧姆接触。为了随后实现 InGaAs 层的单片集成，我们采用了一种倒置晶体管结构。我们的特定设计选择确保了卓越的对准精度。由此产生的复合块，为通信系统的发射和接收路径提供了高性能引擎。

我们使用两级键合工艺将双材料射频块转移到硅 CMOS 芯片上。首先，我们将射频块以倒置方向键合到临时载体晶圆上，以便去除 GaN HEMT 的硅衬底。去除该衬底后，射频块被永久附着到硅控制芯片的顶部。

整个键合序列在 150°C 以下进行，以保护预制晶体管的完整性。这一低温预算维持了精细的掺杂分布，以及底层硅和化合物半导体器件的金属界面。

通过我们细致周到的方法，InGaAs 和 GaN 晶体管的结构完整性和电学特性在整个集成过程中保持稳定。根据集成后的测试，我们的 HEMT 保持其高频能力而没有显著的性能损失。3D 集成 InGaAs HEMT 的截止频率为 320GHz，最大振荡频率为 293GHz；GaN HEMT 的相应数字分别为 108GHz 和 115GHz。这些结果证实，我们的垂直集成方法能够兼容亚太赫兹频率应用的最苛刻要求。

未来通信前景

我们的研究为高性能化合物半导体的垂直集成建立了一条可行路径。通过最大限度地发挥不同材料体系的优势，我们创建了一个将高功率和低噪声能力结合在紧凑外形中的平台。

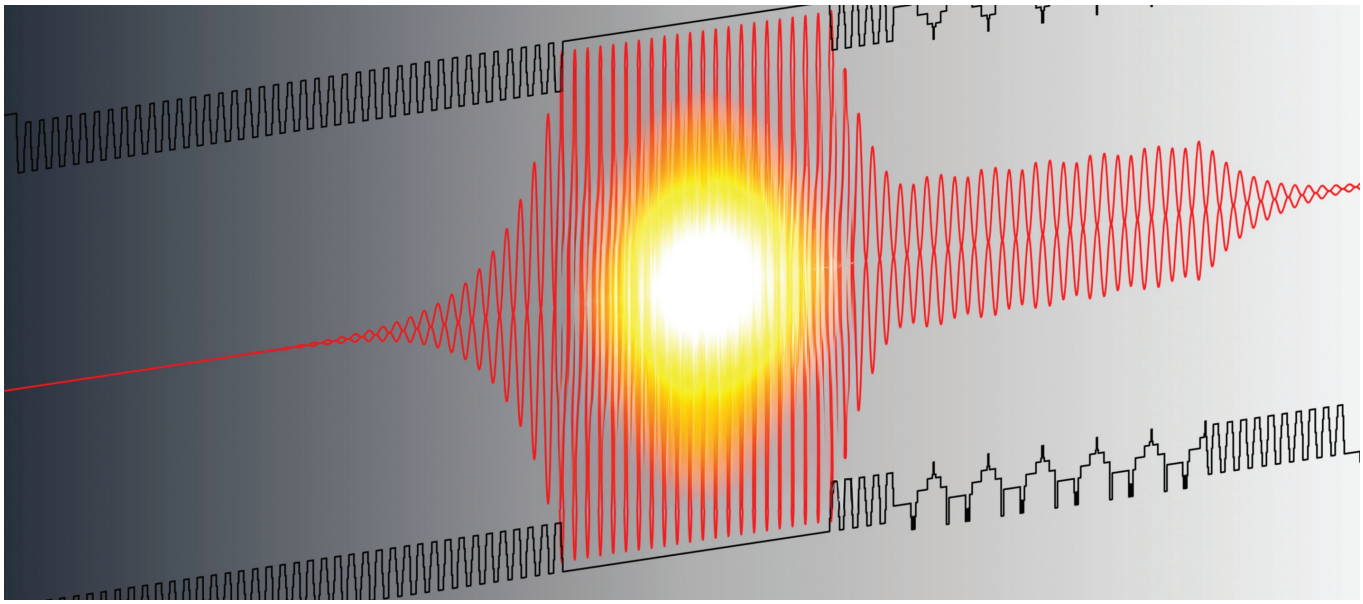
除了这一优势之外，射频前端的物理占用空间也大幅减少——这是未来天线系统发展的一个主要里程碑。

其他团队可能会在我们的基础上继续发展：这项工作为实施下一代无线系统所需的大规模 MIMO 相控阵天线提供了必要的硬件基础。

我们期望我们的 3D 堆叠平台成为未来全球无线通信格局的变革性技术。

扩展阅读

- N. Collaert et al. “From 5G to 6G: will compound semiconductors make the difference?” ICSICT 2020 (2020)
- J. Jeong et al. “Heterogeneous and Monolithic 3D Integration of III–V–Based Radio Frequency Devices on Si CMOS Circuits” ACS Nano. 16 9031 (2022)
- G. Xiaoxiong et al. “W–Band Scalable Phased Arrays for Imagingand Communications”, IEEE Communications Magazine. 53 196 (2015)



用抗反射 VCSEL 变革激光雷达

推动抗反射 VCSEL 从实验室原型走向大规模量产，正在为汽车激光雷达实现经济高效的长距离传感铺平道路。

作者：Vertilite 的 Dong Liang、Cheng Zhang、Zhitong Luo、Shouzhu Niu、Pengfei Zhang、Song Liu、Huijie Li、Ryan Z. Rao、Li Zhao、Xiaochi Chen、Hanxuan Li 和 Yijie Huo。

百多年来，汽车一直在生产线上驶下。在此期间，出现了许多重大变化，包括更高效的发动机、为所有人配备的安全带和制动辅助。但最深刻的变化正在发生——动力来源从燃烧汽油和柴油的发动机，转向由电池供电；以及自动驾驶的引入。

汽车行业的后一场革命，依赖于化合物半导体激光器作为激光雷达的光源。这些芯片满足了设计工程师的需求——他们最看重功率、效率和成本。

对于长距离激光雷达，高亮度——即在最小面积和窄角范围内光功率集中的度量——是关键的性能指标。为了最大化探测范围，传感器需要这样的发射器：能在极低的束散角下结合高输出功率。

作为光源的一个候选者是 VCSEL（垂直腔面发射激光器）。这是一类量产规模非常大的激光器，并已广泛部署在面部识别等短距离消费应用中。但如果要用于激光雷达，它必须提供显著更高的亮度。

有助于实现这一目标的是多结结构的引入，它实现了更高的功率密度。然而，这只是问题的部分解决方案。更高的功率必须与解决传统 VCSEL 架构过度发散的努力相结合——这是 VCSEL 在长距离应用中的一个弱点。

为了满足严格的亮度和发散要求，我们公司 Vertilite 已经开发并随后量产了抗反射 VCSEL（AR VCSEL）。我们这种新型激光器的一个关键特征，是在有源区与传统扩展腔 VCSEL 的扩展腔之间集成了一层 AR（抗反射）层。

实现低发散的关键，在于将横向模式的数量限制到只有几个。在 VCSEL 中，所支持的横向模式数量由纤芯与包层之间的有效折射率差决定——这两个区域分别对应发光孔径的内部和外部。由于 VCSEL 中的氧化层对横向折射率差起主导作用，这个对比度几乎与所谓的“氧化限制因子”成正比。

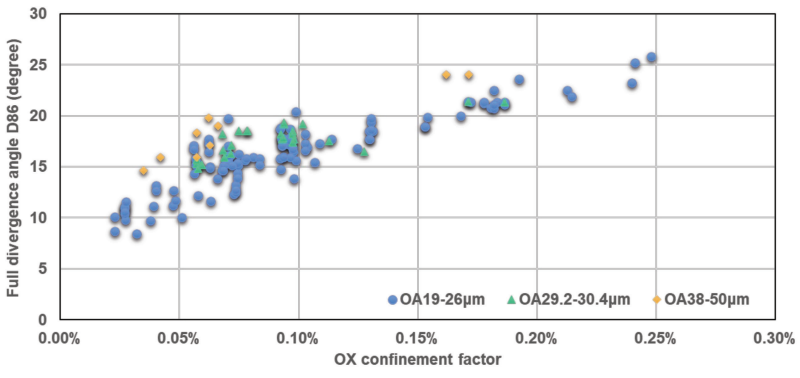


图 1：发散角对氧化限制因子的依赖关系，孔径尺寸范围从约 20 μm 到约 50 μm。

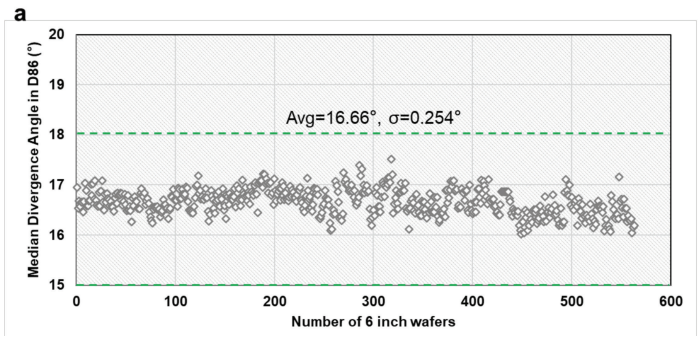


图 2：跨越 500 片晶圆的性能一致性和典型晶圆内发散分布。(a) 一款 AR–VCSEL 产品的 D86 发散角，评估自量产中的 500 多片 6 英寸晶圆。(b)(a) 中 AR–VCSEL 产品在 6 英寸晶圆内的典型 D86 发散角分布。

当 AR 层集成在有源区（电流限制氧化孔径所在之处）与扩展的“储光”区之间时，扩展区内的驻波电场强度会显著增强。这一物理修饰导致氧化限制因子显著降低。反过来，所允许的横向模式数量下降，最终实现更小的发散角。

通过对氧化限制因子的精确控制——从而实现对光束发散角的控制——是通过调整抗反射层的特性和设计来实现的。通过适当的选择，我们设计出的 VCSEL 具有长距离传感所需的窄发散角。

为了展示我们在这方面的能力，我们已经证明了光束发散角与氧化限制因子之间存在明显的正相关（见图 1）。在这项工作中，我们采用一个称为 D86 发散角的度量——它是恰好包围激光总光束功率 86.5% 的圆的直径（与半高全宽相比，这是评估小发散更严格的度量）。我们已经证明，对于孔径尺寸从 5 μm 到 14 μm 的器件，我们能够将 D86 发散角精确控制在 8° 到 26° 的范围内。

我们的关键发现之一是：虽然激光阵列的整体图案并不从根本上改变发散对限制因子的依赖关系，但单个氧化孔径的尺寸很重要。这促使我们将器件分为小、中和大孔径组。我们注意到，发散角通常随孔径尺寸每增加 5 μm 而增加 1° 。使用这项技术，我们在多结 AR VCSEL 中实现了创纪录的 8° 全发散角和约 140kW · mm^{-2} · sr^{-1} 的创纪录高亮度。这些性能指标满足了主激光雷达对探测距离和精度的要求。

量产成功

对于任何器件开发者来说，将技术从实验室推向大规模量产的最大挑战之一，是确保极高的一致性。我们在这方面取得了很大进展——我们的 6 结 AR VCSEL 现已实现大规模量产。

根据来自 500 多片 6 英寸晶圆的性能数据，我们的制造工艺具有卓越的稳定性（见图 2(a)）。在这一巨大样本量上，晶圆中值发散角的平均值为 16.66° ，标准差仅为 0.254° 。这种一致性水平对汽车制造商至关重要，因为他们需要在成千上万颗芯片上获得可预测的性能。

晶圆内分布同样令人印象深刻：针对严格发散规格的良率接近 100%（见图 2(b)）。

基于所有这些结果，我们得出结论：我们的 AR VCSEL 架构是高性能且高度可量产的。我们正在将这种量产上的卓越性过渡到具有更高功率密度的 8 结 AR VCSEL，同时保持同样严格的发散控制。

功率扩展

增加 VCSEL 功率的一个有吸引力的选择，是在同一垂直叠层中集成更多的结。使用这种方法，功率与外延结的数量之间存在线性关系。

我们的 AR VCSEL 发展轨迹包括结数量的快速增加。通常，我们每两年增加几个结。早在 2021 年底，5

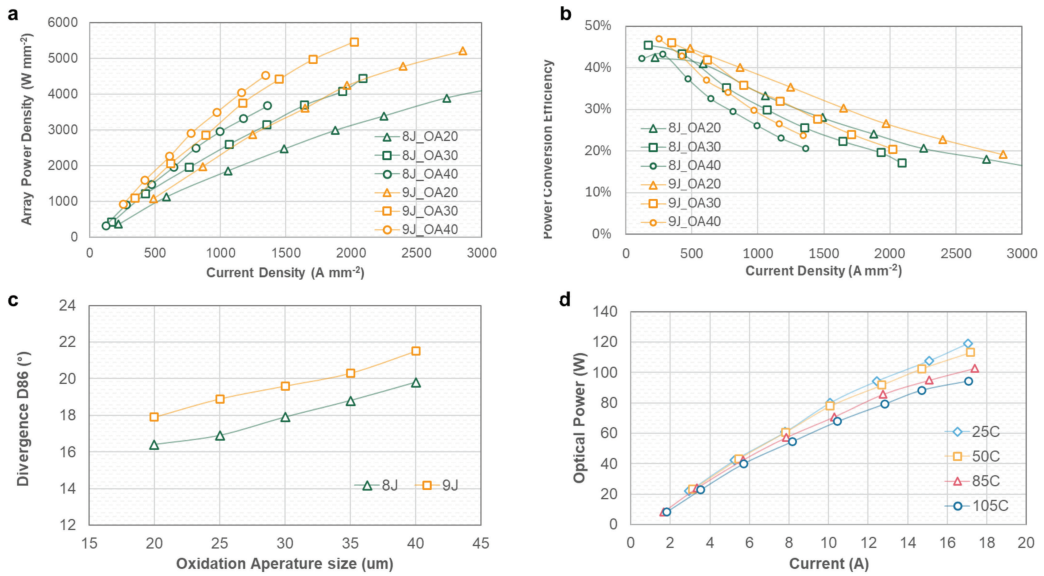


图 3：8 结和 9 结阵列的性能指标，包括功率密度和效率。(a) 氧化孔径（OA）从 20 到 40 μm 的阵列的归一化光 – 电流（L–I）曲线；电流密度归一化到总 OA 面积，阵列功率密度归一化到总阵列面积（即包围所有发射器的最小面积）。(b) 功率转换效率（PCE）随电流密度的变化。(c)8 结和 9 结阵列在各种 OA 尺寸下的远场发散角。(d)9 结、12 发射器阵列（30 μm OA）在 25° C 至 105° C 范围内测量的温度依赖光 – 电流特性。

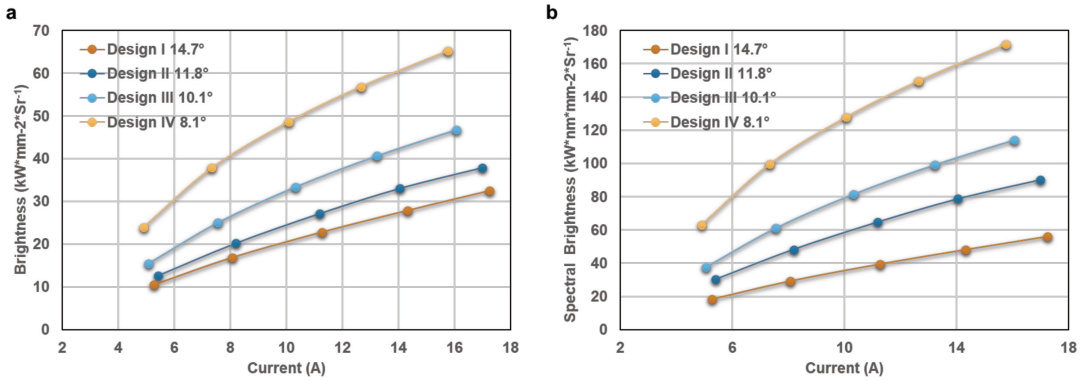


图 4：四种不同外延设计的亮度（a）和谱亮度（b）比较，器件为具有 42 个发射器的 8 结 AR–VCSEL 阵列（OA 24 μm，发光面积 225 μm×218 μm）。

结和 6 结设计还是行业标准，为早期混合扫描激光雷达系统提供了足够的功率。到 2024 年，8 结设计已经出现，显著提升了亮度，并实现了第一波长距离固态传感器。今年，具有 9 个或更多结的结构正进入量产。

我们已经成功驾驭了 6 结、8 结和 9 结 AR VCSEL 量产的复杂性。随着每个额外结的引入，我们在给定电流水平下提高了光功率和效率。我们的 9 结阵列（具有 30 μm 孔径）提供的阵列功率密度达 5450W · mm^{-2}，仅受驱动器最大驱动电流的限制（见图 3(a)）。在各种氧化孔径设计下，这些 VCSEL 的功率转换效率均优于其 8 结阵列，尤其在高驱动电流下。

然而，在扩展到更高功率水平时，必须进行仔细的工程权衡。引入更多的结会增加工作电压，这必须保持在汽车电子驱动器的限制范围内。在考虑这个问题时，另一个值得斟酌的因素是：较大的孔径阵列通常通过减小发射器之间的死区来提供更高的填充因子——但这往往伴随着略高的发散角（见图 3(c)）。

在权衡这些利弊时，我们经常发现 30 μm 器件代表设计中的“最佳点”——在功率密度与光束质量之间的权衡中优于 20 μm 和 40 μm 变体。在实际汽车应用中，我们倾向于建议将电流密度保持在 1000A · mm^{-2} 以下，以确保足够长的使用寿命。

坚固性、亮度与偏振

在涉及半导体激光器部署的各种应用中，汽车环境是最苛刻的环境之一。一个问题是环境温度可能波动。

令我们鼓舞的是，我们的多结 AR–VCSEL 阵列在高达 105° C 的温度下进行的测试结果。在这个极端温度下，我们的发射器仍能保持其室温功率的 80%（见图 3(d)）。特殊设计可以实现更令人印象深刻的高温性能。

在超过 100° C 下增强性能的背后，是一种多管齐下的工程方法。成功来自于两方面：专注于最小化封装和芯片本身的热阻，同时优化量子阱的增益谱。我们精心设计增益峰与腔共振之间的失谐程度，以确保激光器随温度升高仍保持在其最有效的工作区间内。

通过高度重视热鲁棒性，我们确保了采用我们 VCSEL 的激光雷达系统无论在何种环境条件下都能保持一致的探测范围。这是 3 级和 4 级自动驾驶汽车的先决条件。

我们还进行了一系列受控实验，以评估抗反射区的变化如何改变限制因子。我们生产了一组基于 8 结基础外延设计的器件。这些 AR VCSEL 的发散角分别为 14.7°、11.8°、10.1° 和 8.1°。与 14.7° 发散角的设计相比，8.1° 发散角的设计实现了亮度两倍提升和谱亮度三倍提升。随着我们将这些优化过渡到 9 结平台，我们预计亮度水平将进一步提升。

由于激光雷达系统日益复杂，对光源的关注正从原始功率转向信号质量。作为这一趋势的一部分，偏振控制正在成为在复杂驾驶环境中提高信噪比的关键工具。当系统设计人员使用具有固定、稳定偏振的光源时，他们可以在接收端放置一个线性偏振器，以滤除非偏振的环境阳光和其他车辆的眩光。通过这一简单步骤，在某些条件下信噪比可以提高约 3dB——实际上使灵敏度翻倍。

除了噪声抑制之外，偏振特征还为材料分类提供了新的数据维度。不同的路面和物体——如水、沥青、植被、金属或人体衣物——以独特的方式使光退偏振。通过分析这些变

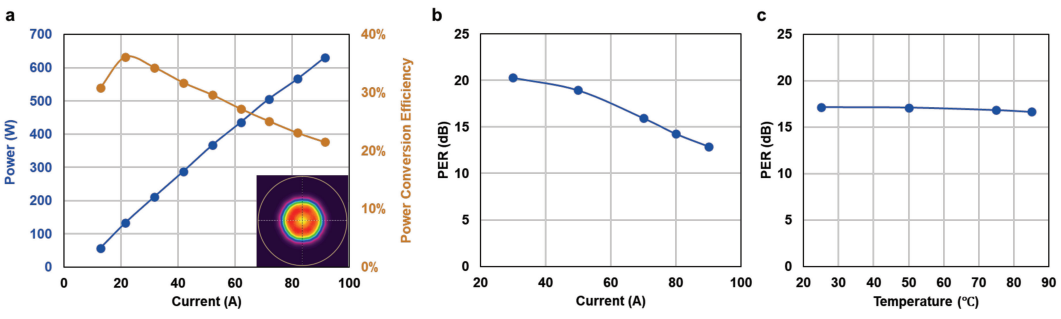


图 5：偏振控制阵列的特性（0.3mm×1.0mm 发光面积，约 24 μm 氧化孔径），显示功率和消光比的稳定性。(a)50° C 脉冲（20kHz，6ns）光–电流特性；插图显示约 70A 时的远场轮廓，D86 发散约 19°。(b)50° C 脉冲工作条件下偏振消光比（PER）随驱动电流的变化。(c) 在约 70A 下从 25° C 到 85° C 测量的 PER 的温度敏感性。

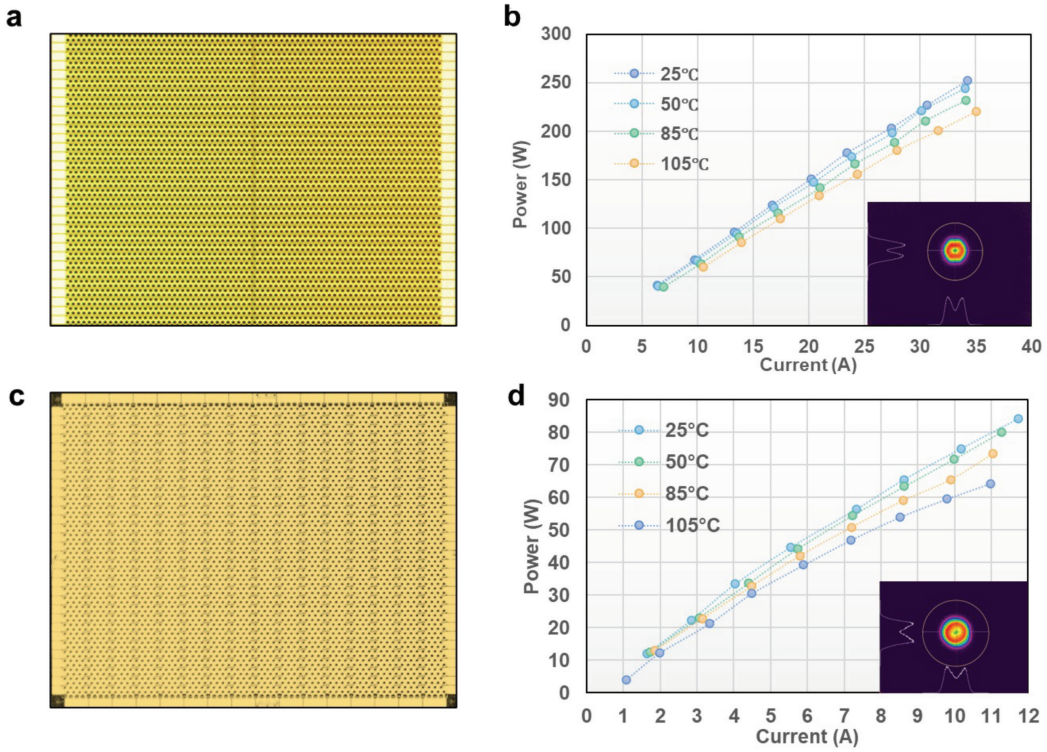


图 6：可寻址 AR–VCSEL 阵列配置和性能。(a) 包含 64 个独立段的一维可寻址阵列的光学显微照片。(b)1D 阵列中单个区段的温度依赖光 – 电流曲线（25–105℃）；插图显示工作期间的远场发射图案。(c) 组织成 32×16 区域的二维可寻址阵列的光学显微照片。(d)2D 阵列中单个区域在各种温度（25–105℃）下的光 – 电流（L–I）特性，插图显示相应的远场分布。

化，自动驾驶车辆可以更好地理解其周围环境。

基于这一机遇，我们开发了带有集成光栅的偏振 AR VCSEL，其产生了创纪录的 630W 偏振输出，偏振消光比超过 12dB。这些偏振 AR VCSEL 在各种工作条件和温度下都能提供这一水平的性能（见图 5）。虽然光栅的集成通常会导致 10% 到 20% 的小功率损失，但我们的高精度制造技术最大限度地减少了这些影响，从而在宽范围的工作电流和温度下实现高功率密度和稳定的偏振。

转向全固态激光雷达

对于汽车传感器而言，“圣杯”是全固态激光雷达。这样的系统非常受欢迎——它结合了紧凑性、经济性，以及没有机械运动部件（机械运动部件容易磨损且需要校准维护）的优势。

为了支持这一转变，我们正在开发和生产一维和二维两种格式的可寻址 AR–VCSEL 阵列。图 6 展示了两个 8 结可寻址阵列：一个 1D 版本（2×32 段），21° 发散角（(a)–(b)）；以及一个 2D 版本（16×32 段），24° 发散角（(c)–(d)）。两个芯片的占用面积均约为 5.0mm × 若干。

虽然当今许多可寻址阵列用于辅助传感器，如盲点监测器或短距离行人探测，但主长距离激光雷达的未来在于全固态配置。这些系统将要求显著低于 18° 的发散角，以在数百米的距离上保持高分辨率。为了满足这一要求，AR VCSEL 架构不仅是有利的——它是不可或缺的组件。这种发射器具有独特的能力：以可寻址格式提供低发散、高功率光。这组优势为未来十年的汽车传感奠定了技术基础。

前进之路

得益于高亮度 AR–VCSEL，可以显著扩展基于 VCSEL 的商业激光雷达的探测范围和精度。

这一突破可能会被广泛采用，因为 AR VCSEL 为所有量程的商业激光雷达提供通用光源。

AR–VCSEL 的引入不仅将性能提升到一个新水平。这一技术突破将对激光雷达的经济性以及电动汽车市场产生深远影响。通过提供一种高性能光源——并利用现有的高产量半导体工艺制造——AR–VCSEL 正在帮助将主激光雷达单元的成本推向关键的 100 美元大关。这是一个临界点，代表着在主流乘用车中实现大规模应用的门槛。

更实惠的成果已经可见。去年，激光雷达在中国汽车行业的渗透率超过 10%，几乎所有主要制造商都将这些传感器集成到旗舰和中端车型中。随着时间的推移，部署将扩展到基础车型，整体渗透率预计今年将达到 20–30%。随着 AR–VCSEL 技术不断成熟和规模化，我们预计这一趋势将加速。

SiC：光子学的解决方案?

通过将可控厚度、低缺陷密度与工业兼容性相结合，Smart-Cut 技术正在创造高质量的 SiC-on-insulator（绝缘体上碳化硅）衬底，为实用的光子集成电路打开了大门。

作者：CEA-LETI 的 Stéphanie Huet。

虽然 SiC 最广为人知的身份是功率电子材料，但这并不是它唯一的应用。这种宽禁带材料正迅速成为下一代光子技术的一个引人注目的平台，应用范围从非线性光学到量子系统。SiC 提供了宽的透明窗口、强的光学非线性和卓越的热鲁棒性——这是很少有材料能同时具备的独特性能组合。

然而，尽管有这些优势，SiC 光子学却未能实现从实验室到晶圆厂的飞跃。这不是由于缺乏性能，而是由于缺乏合适的衬底。要在合理的成本下、大规模地生产高质量的 SiC-on-insulator 晶圆——这对高效导光至关重要——是一个挑战。

克服这一限制是一个关键挑战。如果没有可行的衬底平台，即使是最有前景的器件概念也无法转化为现实世界的产品。

冉冉升起的平台

SiC 的吸引力在于其独特而美妙的属性组合。由于带隙范围约为 2.4eV 到 3.2eV，这种材料支持从可见光到中红外的运行。同时，它表现出二阶和三阶光学非线性，实现了频率转换和高速调制等功能。

在实际应用中，这意味着 SiC 可以支持用硅或 SiN 难以实现的应用。例如在高功率光子学中就有这样的机会。

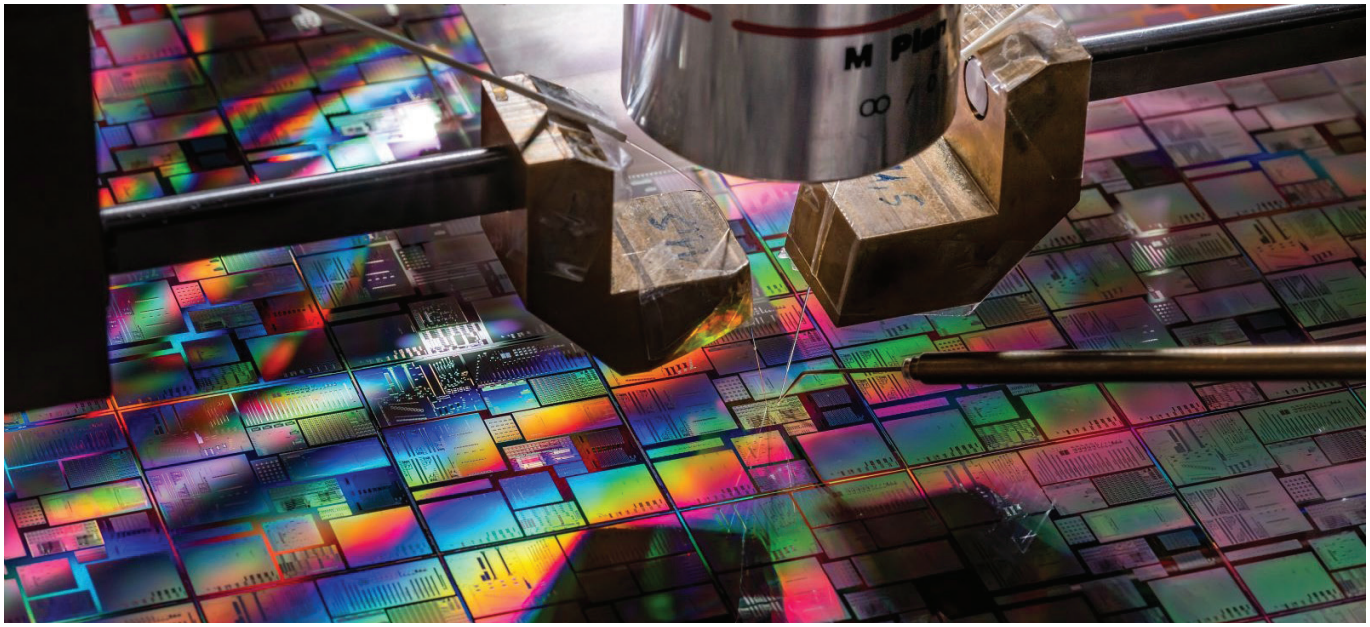
利用这些特性的关键是紧密的光限制。在许多方面，这类似于光纤中遇到的挑战：在光纤中，光在由高折射率纤芯和围绕它的低折射率材料构成的结构中被引导。类似原理也适用于 SiC 光子学波导。

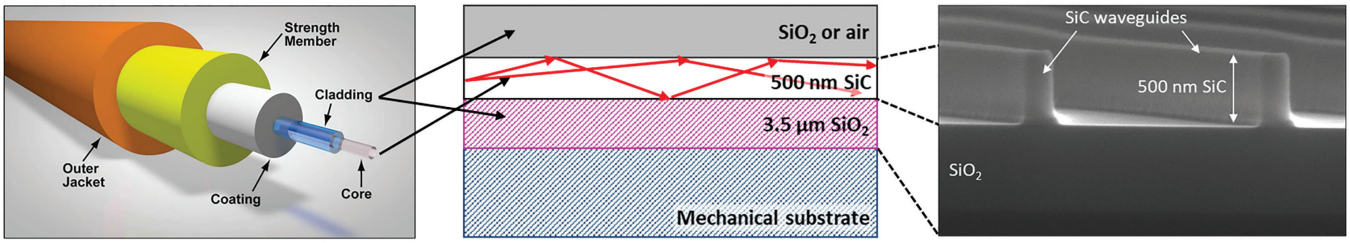
然而，其结构不是圆柱形光纤，而是在芯片上形成的平面波导。在这种情况下，一层非常薄的 SiC 充当导光区，周围的材料确保光被限制其中。

许多由 SiC 制成的器件被设计为在 1550nm 波长工作——这是光通信的标准波长。在这个波长下，SiC 层必须很薄，通常约 500nm。在这一层下方是一个埋藏的二氧化硅层，通常约 3.5μm 厚，其上方或者暴露于空气，或者被另一种介电材料覆盖。

由此产生的叠层提供了强的折射率对比，确保光在 SiC 层内被紧密限制，并在器件中传播。与柔性、可在数公里范围内导光的光纤不同，这些波导是制造在芯片上的刚性结构，光在其中被操纵的距离要短得多。

对于这些基于 SiC 的光学芯片，高水平的控制至关重要。即使厚度或界面质量的微小变化，也会增加光学损耗并降低器件性能。





图：从光纤到芯片——光在光纤（左）中的限制，以及在 SiC–on–insulator 波导（中）中的限制：3.5 µm 氧化物上的 500nm SiC 层能够在 1550nm 实现强限制；扫描电子显微镜横截面图像（右）显示了制造出的波导。

关键瓶颈

开发 SiC–on–insulator 衬底远比最初预期的更具挑战性。与硅光子学不同——后者受益于围绕 silicon–on–insulator 晶圆建立的数十年工业基础设施——SiC 光子学缺乏成熟的、广泛可用的衬底平台。

早期演示采用了定制的衬底，使用键合和减薄技术制造。虽然可以实现出色的材料质量，但存在显著的缺点，包括厚度控制差（厚度变化达到微米量级），以及一个固有的浪费型工艺——大部分原始材料被去除。转向非晶沉积提高了可扩展性，但代价是光学性能：缺乏晶体有序性限制了非线性效应并增加了传播损耗，使这些衬底不太适合要求苛刻的光子应用。

由于这些问题，SiC 光子技术的开发者被夹在中间：一边是性能高但不实用的解决方案，另一边是可扩展但质量较低的替代品。弥合这一差距，对 SiC 光子学的工业化至关重要。

Smart–Cut 的优势

克服这些限制的一条有前景的途径，是转向离子切割技术，特别是 Smart–Cut 工艺。这项技术最初是为制造 silicon–on–insulator 晶圆而开发的，现在正在工业规模上生产出薄、均匀且具有高重复性的 SiC 层。

最直接的应用是低损耗波导、环形谐振器和干涉仪——因为这些器件是光子集成电路的构建块。这些器件用于路由、滤波和操纵光，很像晶体管在传统电子学中控制电信号。

当 Smart–Cut 技术应用于 SiC 时，一层薄的 SiC 晶体层从施主晶圆转移到承载衬底上，中间夹有一层 SiO_2。这一氧化物层提供了在 SiC 层内限制光所需的折射率对比，而转移过程保留了光子器件所需的晶体特性。

这种方法的一个关键优势是其效率。与键合和减薄不同，施主晶圆可以被重复使用，大幅削减了材料消耗和成本。并且可以高精度控制转移层的厚度，从而实现具有优化光学性能的波导制造。

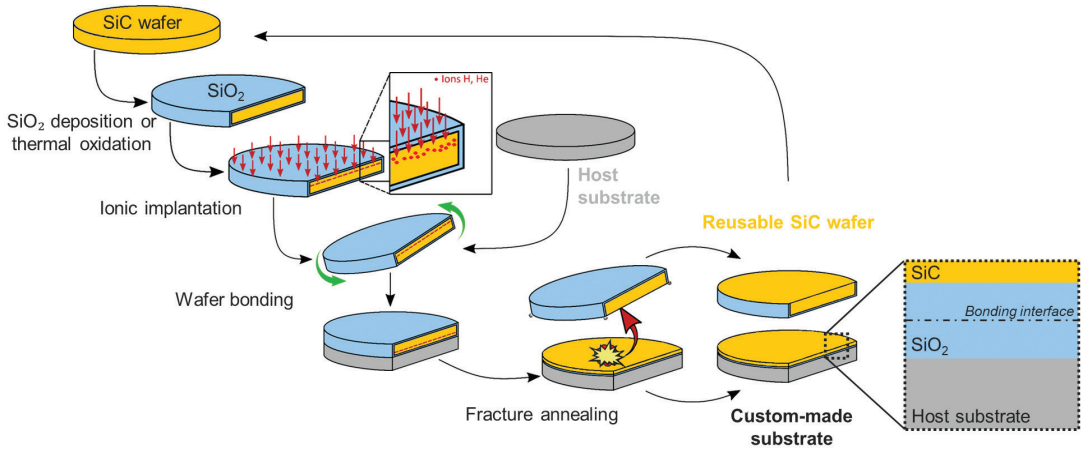
最大的挑战是使 Smart–Cut 适应 SiC——而这并不简单。问题在于：转移层的质量可能在离子注入、键合和高温退火过程中退化。在试图生产出可用于光子学的衬底时，防止这种情况发生至关重要。

工艺控制

为了解决这些挑战，我们在 CEA–Leti 的团队开发了一种基于 Smart–Cut 技术的、经过优化的 SiC–on–insulator 衬底制造工艺。我们的方法专注于三个关键问题：离子注入条件、热预算和表面质量。

我们的工艺从施主晶圆和承载晶圆的准备开始。两者都涂有二氧化硅层。然后，通过氢离子注入在施主衬底内定义一个断裂面。由于这一步骤可能引入降低光学性能的缺陷，我们仔细优化了注入条件，以在保持高效层转移的同时最小化晶体损伤。通过二氧化硅层将两个晶圆键合在一起后，我们使用热退火来诱导 SiC 薄层转移到承载衬底上。

我们工艺的一个关键参数是热预算。1200°C 到 1400°C 之间的退火温度，在恢复转移层晶体质量方面起着核心作用。在 1200°C 退火可实现晶体结构的显著恢复；当我们把温度提高到 1400°C 时，材料质量进一步改善，



图：用于 SiC–on–insulator 衬底的 Smart–Cut 工艺流程，能够实现薄 SiC 层的转移，并通过退火和抛光进行优化以用于光子应用。

接近体材料的质量。

应该注意的是：我们在与硅基衬底兼容的温度下实现了高材料质量。这打开了将 SiC 光子学与常规微电子相集成的可能性。

晶体质量

我们优化工艺的有效性，反映在所得衬底的结构和形貌特性上。在 150mm 晶圆上，我们转移了一层厚度接近 500nm 的 SiC 层——选择这个厚度是因为它是 1550nm 电信波长波导的最佳值。

对于 SiC 光子应用，表面质量同样至关重要。在层转移之后，表面粗糙度可能是一个问题——它处于数纳米量级。但这在化学机械抛光（CMP）之后会显著降低，降至约 0.15–0.2nm。这些超光滑表面对于最小化光子器件中的光学散射损耗至关重要。

在晶体层面，先进的表征技术揭示了退火后材料质量的明显改善。根据 X 射线衍射测量，衍射峰展宽减少，表明晶格无序度降低。拉曼光谱揭示了类似的情况：退火增强了晶体质量。

器件影响

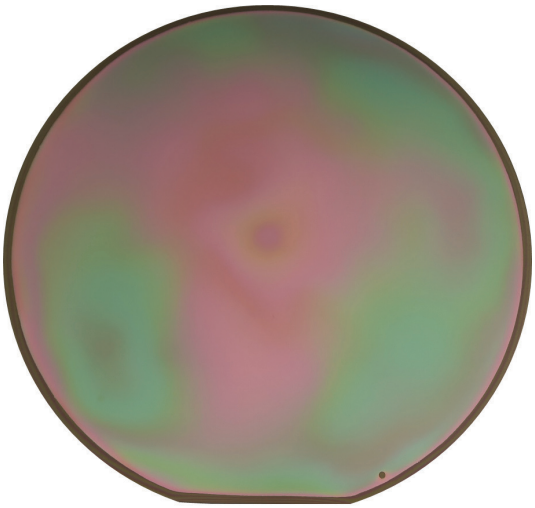
虽然材料表征提供了重要的洞察，但任何光子平台的最终考验是器件性能。在这一背景下，我们的改进对波导和其他集成器件的制造具有直接的影响。

基于这些发现，我们可以得出结论：注入、退火和抛光的组合，产生了适合光子应用的高质量晶体薄膜。

可以预期：精确厚度控制、低表面粗糙度和高晶体质量三者的结合，将削减传播损耗并提高器件效率。更光滑的界面和更少的缺陷应该会减少散射和吸收——这两者对高性能光子器件都至关重要。

缺陷减少

除了确保足够的结构质量外，控制材料内的缺陷也能实现低光学损耗。即使晶体晶格看起来已基本恢复，残余缺陷仍可能与光相互作用并降低器件性能。



图：150 mm 碳化硅绝缘体上外延（SiC-on-insulator）晶圆的俯视图，展示了该平台可规模化制备的能力。

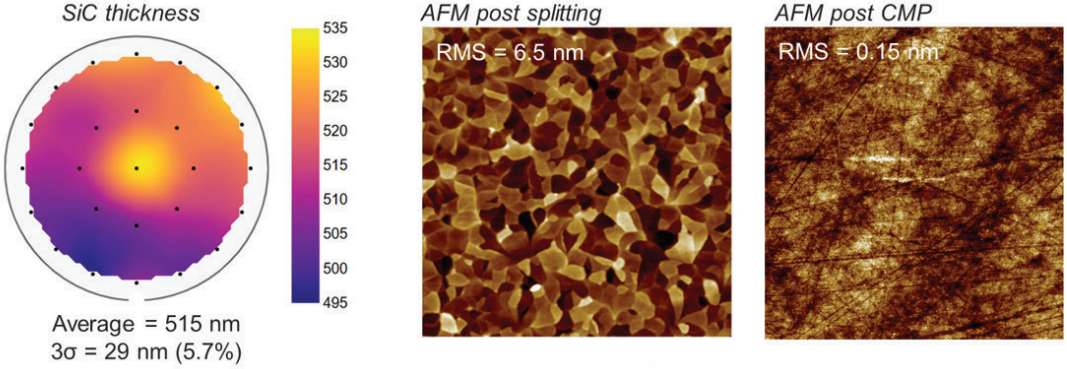
此外，通过在晶圆尺度上生产出均匀的衬底，我们正在为更复杂、更密集集成的器件打开大门。这可能是量子光子学等应用的“游戏规则改变者”——在这些应用中，许多组件必须在单个芯片上相干运行。

有助于确定情况是否如此的是光致发光测量——它对缺陷相关能态的存在高度敏感。使用这种光学技术，我们发现了与注入诱导损伤和转移层内缺陷复合体相关的宽缺陷相关发射带。

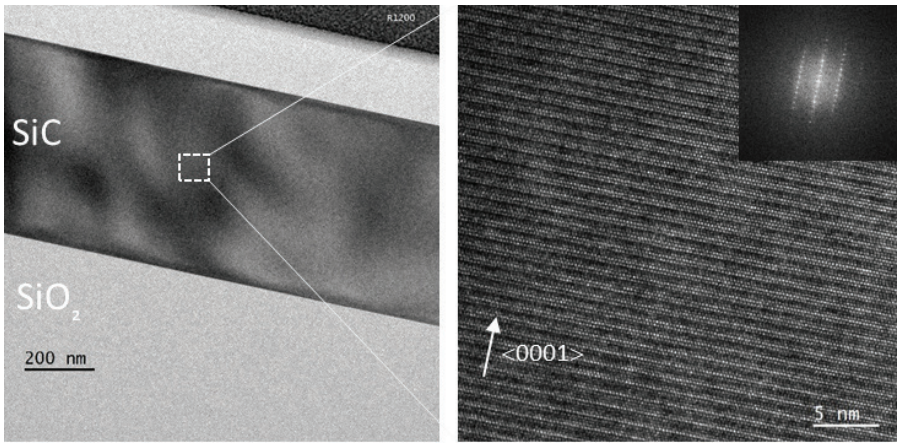
虽然我们的详细器件测量仍在进行中，在这个阶段我们不能透露任何细节，但我们的材料特性为开发有竞争力的 SiC 光子器件提供了坚实的基础。

当我们优化注入工艺时，这些不必要的光谱特征明显减少——而在我们上一代衬底中，这些特征更为普遍。我们发现：随着材料的恢复，缺陷相关发光减少，表明光学活性缺陷密度较低。阴极发光测量支持这一观察，显示深能级缺陷显著减少。

基于这些洞察，我们已经明确：提高晶体质量只是解决方案的一部分。同等重要的是减少残余缺陷群体——因为它们最终决定材料的光学质量及其对低损耗光子应用的适用性。



图：转移 SiC 层在整片晶圆上的厚度均匀性图（左），显示 3σ 非均匀性为 5.7%；原子力显微镜（AFM）扫描（右）比较了化学机械抛光前后的表面粗糙度，显示表面显著改善。



图：1200° C退火后优化的SiC–on–insulator结构的横截面透射电子显微镜（TEM）图像（左）。高分辨率TEM图像和相应的选区电子衍射图样（右）揭示了转移SiC层内的高晶体质量。

幸运的是，我们已经证明：通过仔细控制注入和退火条件，我们可以显著改善SiC–on–insulator的光学质量。

未来的器件

生产高质量的SiC–on–insulator衬底本身并不是目标。这些结构的价值，在于可以在其上构建的光子器件。

当我们超越无源器件时，SiC上存在着硅难以实现的机会。SiC的电光和非线性光学特性可以被用来实现高速调制、波长转换和频率梳产生等功能——所有这些都在电信和光计算领域引起越来越大的兴趣。

另一个有前景的领域是量子光子学。SiC可以容纳发射单光子并充当量子比特的光学活性色心。将这些量子功能与晶圆级光子集成相结合，可以实现用于量子通信和量子计算的紧凑芯片。

由于这种功能组合，SiC–on–insulator是各种集成光子应用的一个有前景的平台。

未来规模

除了即时的性能提升外，我们工作的更广泛意义在于其工业潜力。通过利用Smart–Cut这样的成熟、可扩展的工艺，SiC光子学可以与现有的半导体制造基础设施相结合。

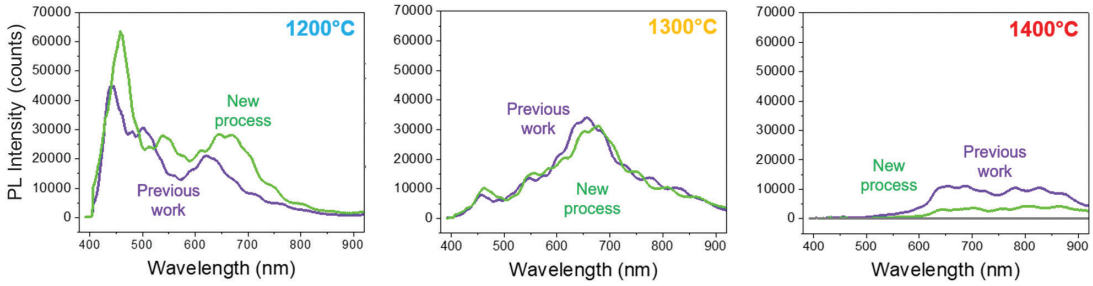
我们工作的一个亮点是：它表明Smart–Cut技术与不同的承载衬底兼容。使用SiC承载衬底可实现高温处理和最佳的材料匹配；而将SiC层转移到硅衬底上则提供了额外的优势——特别是，这种转移促进了与常规微电子的集成，并降低了整体系统成本。

我们可能进一步开发的计划包括：使用多晶SiC衬底来创建完全基于SiC的结构。与此同时，我们可能会将该工艺扩展到更大的晶圆尺寸（如200mm），因为这将是实现商业应用所需规模经济的关键。

更广泛地说，我们的方法提供了一种调和三个关键、且常常相互冲突的要求的方法：高材料质量、工艺可扩展性和成本效率。在所有这三个方面都取得一定成功，是将SiC光子学从实验室转移到现实世界所必需的。

简而言之，我们的工作不仅仅是改进一种制造工艺——它为SiC光子学的工业化打开了大门。通过将Smart–Cut技术与优化的注入和退火相结合，我们提供了一条在保持可扩展性和成本效率的同时实现高材料质量的路径。

随着SiC光子学向实际应用推进，有针对性的高质量衬底的可用性将发挥决定性作用。多亏我们的进步，SiC不再只是一种有前景的材料——它现在正处于成为下一代光子集成电路现实平台的门槛上。



图：在405nm激发下，采用旧工艺和新工艺制造的SiC–OI衬底在(a)1200° C、(b)1300° C和(c)1400° C退火后获得的光致发光光谱。

扩展阅读

- S. Huet et al. “Demonstration of SiC-on-Insulator Substrate with Smart Cut Technology for Photonic Applications” Materials Science Forum 1124 67 (2024)
- S. Huet et al. “Enabling SiC Photonic Platforms with Smart Cut ：Material Quality and Process Optimization of SiCOI Substrates” ICSCRM 2025

表面质谱 | 二维化学成像 | 深度剖析 | 三维化学成像

TOF-SIMS M6 / M6 Hybrid SIMS

飞行时间二次离子质谱系统

M6：高性能 TOF-SIMS 分析平台

TOF-SIMS M6 是一款高性能 TOF-SIMS 分析平台，
可获取样品表面/界面的元素、同位素及分子信息，
适用于二维化学成像、深度剖析和三维化学成像。



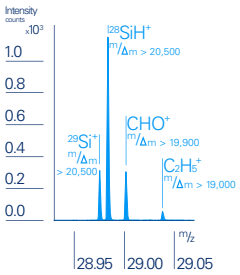
性能优势

高分辨 · 高灵敏 · 多维度 · 广泛的应用能力

1 质量分辨与检测能力

- ☑ 质量分辨率 > 26,000（FWHM）
- ☑ 检测限可达 ppm–ppb
- ☑ 3 m 飞行路径反射式 TOF 分析器
- ☑ EDR 动态范围线性扩展：10 倍和 100 倍

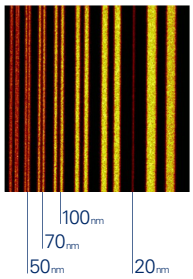
低质量区高分辨谱图（示例）



2 空间分辨与深度剖析能力

- ☑ 最佳横向分辨率 < 50 nm
  （Nanoprobe 50）
- ☑ Fast Imaging 模式
  < 90 nm @ 350 pA
- ☑ 纵向分辨率 < 1 nm
- ☑ 适用于微纳结构成像、多层膜分析与深度剖析

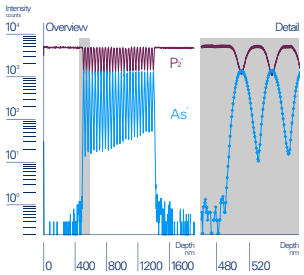
横向空间分辨率（L-200 标准样品）



3 数据质量与分析灵活性

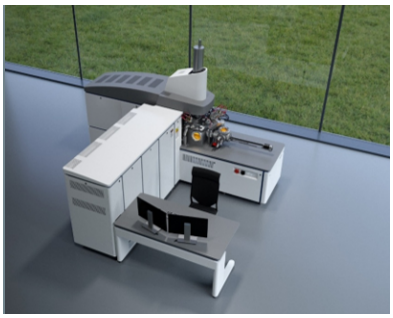
- ☑ Delayed Extraction 模式：兼顾横向分辨率与质量分辨率
- ☑ 样品台接地与电荷补偿：提升绝缘样品测试稳定性
- ☑ SurfaceLab 7 / MVSA：支持谱图、成像、深度曲线及多元统计分析
- ☑ 支持表面质谱、二维化学成像、深度剖析及三维化学成像

深度剖析谱图（示例）



IONTOF公司是TOF-SIMS技术发源地与技术引领者。

M6 Hybrid SIMS：TOF-SIMS 与 Orbitrap™ 联用

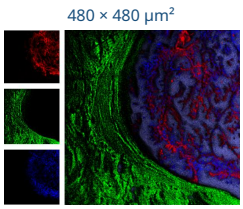


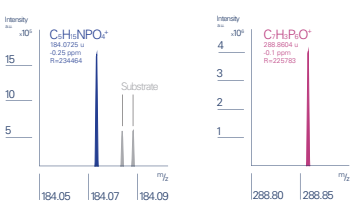
M6 Hybrid SIMS 将 M6 的 TOF 快速成像能力与 Orbitrap™ 的高质量分辨率、高质量精度相结合，适用于复杂有机与生物样品分析，支持对半导体、新能源电池、高分子材料等样品进行超高精度的表面成分定性、成像与深度剖析（如半导体掺杂与杂质分析、光刻胶和功能材料的组分鉴定等）。

Orbitrap™ 质量分辨率	质量精度	支持	适用于复杂有机与生物样品的精确分子鉴定
> 240,000	**< 1 ppm**	**MS/MS**	

案例：生物组织切片的高分辨分子成像

对生物组织切片进行高分辨分子成像，
揭示组织的化学信息分布。





飞行时间二次离子质谱（TOF–SIMS）分析技术在半导体芯片材料／缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用　（连载二）

华佑南，朱雷，赵奔斐，李晓旻
胜科纳米（苏州）股份有限公司，江苏省苏州市工业园区朝前路 9 号

郭茹，方浩原，李雯琪，高聚宁
北京艾飞拓科技有限公司，北京市西城区西直门外大街 18 号金茂大厦 B 座 1109 室

摘要

本文系统介绍了飞行时间二次离子质谱分析（TOF–SIMS）技术，以德国 IONTOF 公司的 IONTOF TOF–SIMS M6 飞行时间二次离子质谱系统为主，详细阐述其在半导体材料／缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用。TOF–SIMS 技术凭借其亚单层表面灵敏度（检测深度仅 1–3 个原子层）、ppm–ppb 级别的超低检测限、高质量分辨率（M/ΔM ＞ 26000）以及同时获取质谱、成像和深度剖析信息的能力，已成为半导体材料表征、缺陷分析和工艺制程优化中不可或缺的重要分析手段。本文详细讨论了 M6 型仪器的核心特点、技术指标和标准化分析流程，并展示了 TOF–SIMS 在集成电路芯片铝合金材料表征、铝焊盘氟腐蚀缺陷表征（包括“花状”缺陷中六氟化铝离子 $[AlF_6]^{3-}$ 的表征与鉴定）、芯片清洗工艺制程优化、PDMS 污染分析、EUV 光刻胶光致产酸剂碎裂路径与深度分布研究、半导体无机结构分析与掺杂定量和在 GOI 失效分析中的应用等案例。本研究为半导体制造领域的技术人员提供了 TOF–SIMS 分析技术的一篇系统性的参考文献。

关键词：飞行时间二次离子质谱（TOF–SIMS）；半导体晶圆制造；材料表征；缺陷表征；工艺制程优化；德国 IONTOF TOF–SIMS M6；氟诱导腐蚀和缺陷。

在本文的第一部分，我们主要介绍了德国 IONTOF 公司的 TOF-SIMS M6 飞行时间二次离子质谱系统和功能，我们将在这一部分介绍该仪器在半导体材料 / 缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用。

三、TOF–SIMS 分析技术在半导体材料／缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用

3.1 TOF-SIMS 离子彩色成像技术在集成电路芯片铝合金材料表征中的应用

铝和铝合金是集成电路芯片中金属互连线和铝焊盘的主要材料。铝合金因其优异的电性能、低密度和耐腐蚀性，被广泛应用于半导体行业和晶圆制造领域。目前，铜是最常用的合金元素之一。铝铜合金中铜的浓度和分布将极大地影响铝合金薄膜的应用性能。现阶段，在铝合金中掺杂 0.5 原子百分比的铜是半导体行业关注的热点问题。为了研究不同铜含量对铝合金晶粒结构和导电性能的影响，我们制备／选择了两种不同的铝铜合金样品进行研究：样品 A：沉积在硅衬底上的 3 μm 厚铝合金薄膜，铜含量约为 4.0 at% 和样品 B：沉积在硅衬底上的 2 μm 厚铝合金薄膜，铜含量约为 0.5 at%（目前半导体工业广泛使用的配方）。

样品 A（Al 合金，4.0 at% Cu）的 TOF–SIMS 分析结果：从表面离子彩色成像结果可以清楚地看到，样品 A 分布非常均匀，几乎不显示晶粒结构。这表明由于没有形成晶粒，样品 A 的导电性能相对较差（图 10）。但是样品 B（Al 合金，0.5 at% Cu）的 TOF–SIMS 分析结果：从表面离子彩色成像结果可以清楚地看到，样品 B 中铜和铝结合形成较大的晶粒。这也表明样品 B 具有相对较好的导电性能，因为样品 B 形成了较大的晶粒（图 11）。这解释了为什么半导体集成电路行业目前普遍使用铝铜合金（0.5% Cu）来制造芯片金属互连线和铝焊盘。

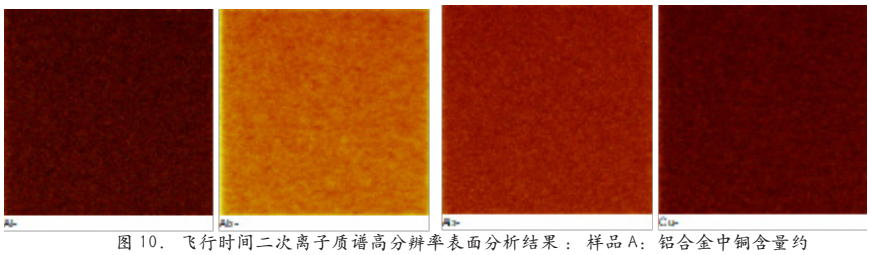


图 10. 飞行时间二次离子质谱高分辨率表面分析结果：样品 A：铝合金中铜含量约为 4.0 at%；从表面离子彩色成像结果可以清楚地看到，样品 A 分布非常均匀，几乎不显示晶粒结构。样品 A 的导电性能相对较差。

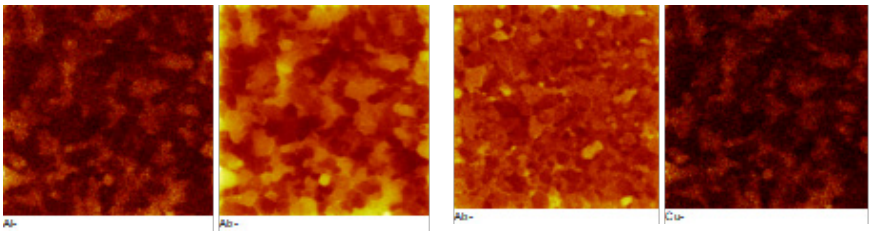
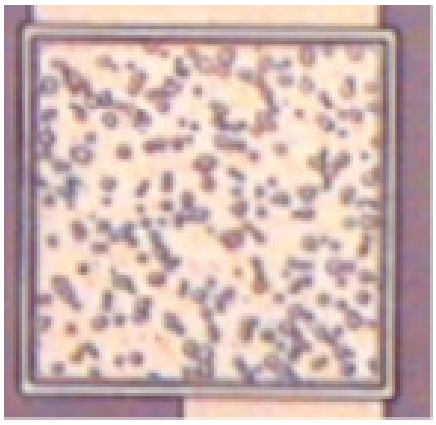


图 11. 飞行时间二次离子质谱高分辨率表面分析结果，样品 B：铝合金中铜含量约为 0.5 at%。从表面离子彩色成像结果可以清楚地看到，样品 B 中铜和铝结合形成较大的晶粒。样品 B 的导电性能相对较好。

3.2 TOF-SIMS 离子彩色成像技术在氟腐蚀导致的缺陷表征中的应用

铝焊盘是集成电路芯片中十分重要的组成部分 [8]。在晶圆制造后端工艺中，含氟气体常用于钝化层（Si_3N_4/SiO_2）的干法刻蚀。如果刻蚀后铝焊盘表面残留氟污染低于一定的水平（小于控制值），那铝焊盘是没问题，在后续的封装中应该有好的良率。然而如果氟的含量超过了控制值，将引发铝焊盘腐蚀，形成氟腐蚀导致的缺陷，然后导致铝焊盘变色和封装中的不粘接（Non-Stick On Pad，NSOP）问题。因此，晶圆厂和封装厂对铝焊盘的质量控制非常重要。在本文中，我们将应用 TOF-SIMS 技术来表征氟腐蚀导致的“花状”缺陷 .

3.2.1 铝焊盘上的氟腐蚀导致的“花状”缺陷



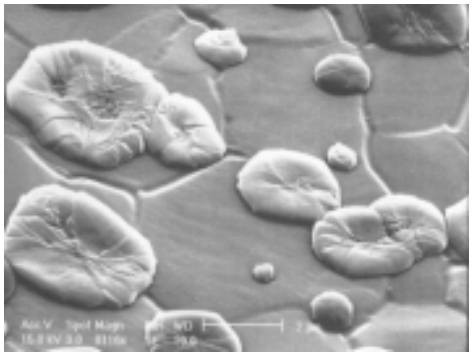
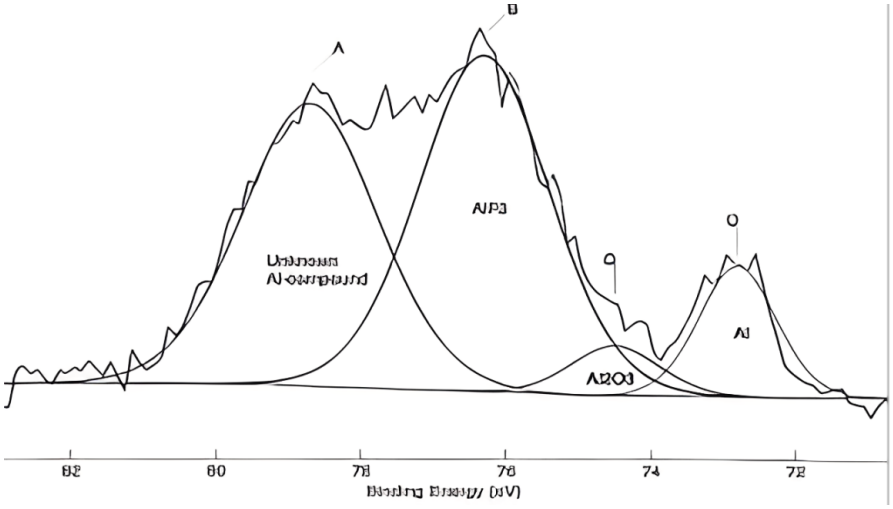


图 12. 光学显微镜显示异常铝焊盘上表面出现小黑点（左），SEM 观察可见氟腐蚀导致的缺陷，缺陷是典型的“花状”缺陷。

缺陷。但是在有氟污染的情况下，一个异常铝焊盘的光学显微镜和扫描电子显微镜照片，铝焊盘表面会出现小黑点，高倍扫描电子显微镜观察可见氟腐蚀缺陷（图 12）。能谱分析（EDS）和俄歇电子能谱（AES）分析证实这些缺陷由氟污染引起腐蚀缺陷。

3.2.2 XPS 分析在“花状”缺陷上发现一个未知氟铝化合物

扫描电子显微镜检查显示受影响焊盘上存在“花状”缺陷，缺陷尺寸约 2 微米，呈六边形形貌。能谱分析发现缺陷处存在高氟信号。X 射线光电子能谱（XPS）分析结果显示：氟含量高达 33.9 at%，与俄歇电子能谱



Element/Compound	Bonding Energy	at%
Al	72.8 eV	10.4
Al_2O_3	74.5 eV	4.6
AlF_3	76.3 eV	45.6
Unknown Al Compound	78.7 eV	39.4

图 13. XPS Al 2p 峰位拟合不仅发现了已知的 Al（72.8 eV）、Al_2O_3（74.5 eV）和 AlF_3（76.3 eV）的特征峰，还发现了一个未知铝氟化合物（unknown Al–F compound），其结合能为 78.7 eV。

一个正常的铝焊盘的光学显微镜和扫描电子显微镜底下应该时焊盘表面洁净，光学显微镜底下铝焊盘不变色和扫描电子显微镜分析无污染物和分析结果（34.7 at%）吻合。深度剖析结果表明氟污染层厚度约 50 nm，远高于正常铝焊盘上的氧化铝层的厚度（约 5 nm）。更为重要的是，在“花状”缺陷上 XPS Al 2p 峰位拟合不仅发现了已知的 Al（72.8 eV）、Al_2O_3（74.5 eV）和 AlF_3（76.3 eV）的特征峰，还发现了一个未知铝氟化合物，其结合能在 78.7 eV（图 13）。

3.2.3 未知铝氟化合物的 TOF-SIMS 鉴定

初步分析表明，AlF 具有 SP 杂化形成的平面三角形结构（键角 120°）。但扫描电镜观察到的“花状”缺陷呈六边形形貌（图 12– 右），与

AlF 的结构不符。因此推测未知化合物并非是 AlF_3，但可能是六氟铝酸根离子 $[AlF_6]^{3-}$ 络合物。文献资料表明，有些元素如铝等可突破八电子结构限制，形成配位数大于 3 或 4 的络合物，如 $[AlF_6]^{3-}$。

为了进一步验证这一推测，我们采用 TOF-SIMS 进行了分析和表征。因为如果这个未知化合物是六氟铝酸根离子 $[AlF_6]^{3-}$ 络合物，在飞行时间二次离子质谱（TOF-SIMS）分析中，六氟合铝酸根 $[AlF_6]^{3-}$ 在质谱图中主要以负二次离子（Negative Secondary Ions）的形式被检测到，由于 $[AlF_6]^{3-}$ 带有三个负电荷，在质谱中很少能以完整的多元电离形态直接打出，它在受到高能一次离子轰击时会发生裂解。其对应的核心特征子峰和碎片峰可能包括以下几种：$[AlF_5]^{2-}$、$[AlF_4]^-$、AlF_3、$[AlF_2]^+$ 、$[AlF]^{2+}$、F^- 和 Al^{3+} 等特征离子碎片。如果我们在实验中能测到这些特征子峰，我们就可以证实这个未知化合物是六氟铝酸根离子 $[AlF_6]^{3-}$ 络合物。TOF-SIMS 离子彩色成像结果显示：“花状”缺陷区域富含 F、Al 以及 $[NH_4]^+$ 和 $[AlF_4]^-$ 离子（图 14）。

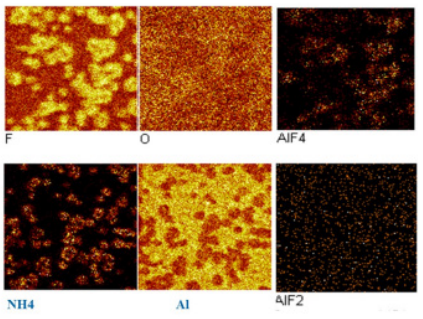


图 14. TOF-SIMS 离子颜色映射结果显示：“花状”缺陷富含 F、Al、$[NH_4]^+$ 和 $[AlF_4]^-$ 离子。

TOF-SIMS 负离子谱显示，含氟污染铝焊盘上 $[AlF_4]^-$ 信号强度为 40491，而正常铝焊盘仅为 27。TOF-SIMS 负离子谱测到大量的 $[AlF_4]^-$ 信号，这足以证明了母分子是六氟合铝酸根 $[AlF_6]^{3-}$。

那么，为什么没有测到 $[AlF_5]^{2-}$ 离子峰呢？我们结合络合物形成常数进行分析：$[AlF_6]^{3-}$ 的逐级稳定常数表明，$[AlF_5]^{2-}$ 稳定性较差（k = 41.7），容易进一步分解为 $[AlF_4]^-$（k = 562）和 AlF_3（k = 7080），这解释了为什么实际检测到了大量 $[AlF_4]^-$，而 $[AlF_5]^{2-}$ 信号较弱或几乎没有测到。所以，核心特征子峰（主要离子）是 $[AlF_4]^-$ 四氟合铝酸根离子），m/z 大约在 103。这是氟铝络合物在负离子模式下最强、最核心、最具标志性的子峰。我们推测 $[AlF_6]^{3-}$ 结构在轰击时极易失去两个 F^- 离子，解离出相对稳定的单负电荷配位构型 $[AlF4]^-$。另外，F^-（氟离子），m/z 大约在 19，也是极强的无机碎片峰，由于氟（F）具有极高的电负性，在 Cs^+ 等一次离子轰击下具有极高的负离子产率，可以用来判断表面存在氟污染或氟化合物的基石。 所以，根据 TOF-SIMS 的分析结果， 我们测到了强的子峰 $[AlF4]^-$（四氟合铝酸根离子），从而证明 XPS 光电子能谱分析的未知化合物是六氟铝酸根离子 $[AlF_6]^{3-}$ 络合物。所以，我们可以将图 13 中的未知铝氟化合物（unknown Al–F compound，结合能为 78.7 eV）标明为六氟铝酸根离子 $[AlF_6]^{3-}$ 络合物，见图 14。

Element/Compound	Bonding Energy	at%
Al	72.8 eV	10.4
Al_2O_3	74.5 eV	4.6
AlF_3	76.3 eV	45.6
$[AlF_6]^{3-}$	78.7 eV	39.4

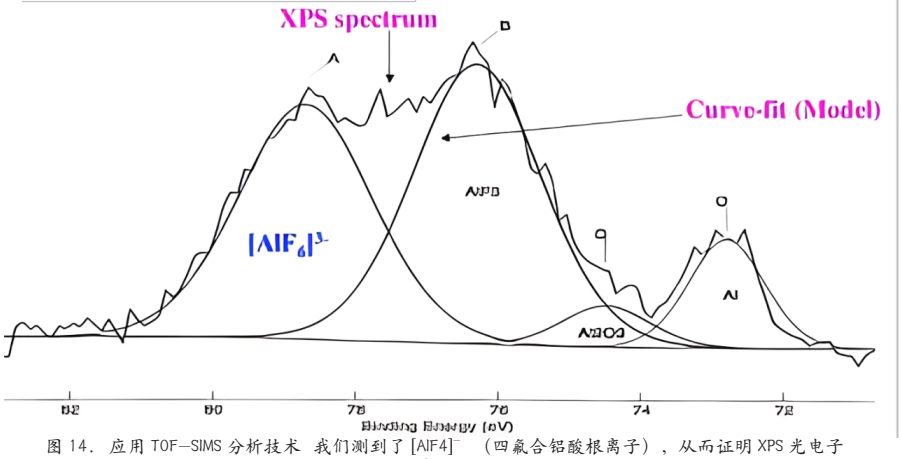


图 14. 应用 TOF-SIMS 分析技术 我们测到了 $[AlF4]^-$ （四氟合铝酸根离子），从而证明 XPS 光电子能谱分析的未知化合物是六氟铝酸根离子 $[AlF_6]^{3-}$ 络合物，其结合能为 78.7 eV。

3.3 TOF-SIMS 离子彩色成像技术在半导体芯片清洗工艺制程优化中的应用

在晶圆制造中，能谱分析（EDS）、X 射线光电子能谱（XPS）和俄歇电子能谱（AES）被广泛用于分析材料和表面化学成分定性和定量分析。但这些分析方法的检测限约为 0.1–1.0 at %，比较高，不能用来优化晶圆厂的清洗工艺制程。而 TOF-SIMS 技术具有更高的检测灵敏度，可以检测到低至 ppm 级别或以下的污染物，是检测离子污染的更好选择 [13]。

在本文中，我们使用了 TOF-SIMS 来优化了晶圆厂的清洗工艺制程。我们知道，优化一个清洗工艺制程，应该考虑 3 个重要因素：

1) 清洗后，污染要清洗彻底，也是就说污染要低；

2) 清洗后，产品要好，也是就说产品要不受影响；

3) 清洗成本相对来讲要低。

我们使用了 TOF-SIMS 来优化了晶圆厂的清洗工艺制程，实验结果汇总在（图 15）。在图 15 中，我们用钠（Na）代表污染元素，铝为产品的代表。我们可以看到：

- **不清洗**：离子彩色成像显示钠离子污染严重，已严重影响铝离子的成像信号。
- **1 次到 7 次清洗**：离子污染（以钠为例）随着清洗次数的增加而降低。钠离子信号从不清洗的 1.42E5 降低到 1 次清洗的 1.18E4、3 次清洗的 9.31E3 和 7 次清洗的 4.91E3。

在选择最佳清洗工艺时，从钠离子污染角度来看，7 次清洗效果肯定最好。但是，我们不仅要考虑清洗去除污染物，还要考虑和确保产品质量不受影响。在这种情况下，我们必须考虑清洗工艺对铝线的影响。基于实验

结果，我们推荐选择 3 次清洗而不是 7 次清洗。因为虽然 7 次清洗可以进一步减少污染，但 7 次清洗后铝线表面已经发生了变化，TOF–SIMS 成像结果显示 3 次清洗后铝线表面显亮，但 7 次清洗后铝线表面开始变暗，这表明作为产品的铝线开始降级了。这可能铝线表面开始形成了氧化铝层。

所以，综合考虑清除污染物和保持产品质量良好，我们推荐选择 3 次清洗工艺。实际生产应用结果也证实了选择 3 次清洗工艺的准确性。此外，选择 3 次清洗工艺也满足了上面提到的工艺成本因素，因为 3 次清洗的工艺成本远低于 7 次清洗的工艺成本。通过这个案例，我们演示了 TOF–SIMS 分析技术可以应用到清洗工艺制程的优化，帮助工业界优化生产制程和节省成本。

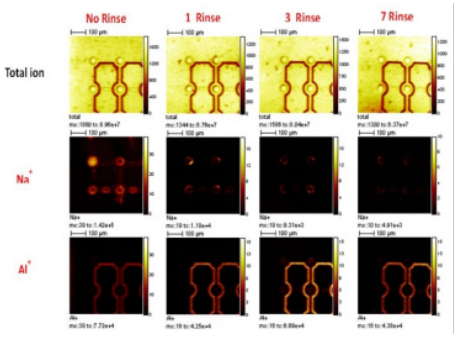


图 15. 应用 TOF–SIMS 分析技术优化了晶圆厂的清洗工艺制程。从没有清洗到 7 次清洗的样品的 TOF–SIMS 离子彩色成像结果。

3.4 TOF-SIMS 在 EUV 光刻胶光致产酸剂碎裂路径与深度分布研究中的应用

极紫外（EUV）光刻作为一种被广泛使用的光刻技术，凭借 13.5 nm 超短辐射波长，成功实现了技术代际跨越。但对于光刻胶层中各组分的分布、化学反应所生成的特定产物，以及能有效完成反应的组分比例（如酸的生成、去保护等）等问题尚未完全了解。在本案例中采用 OrbitrapTM–SIMS 单束模式结合 MS/MS 联用，以 GCIB 作为主束，探究薄层（20–50 nm）CAR 薄膜在 EUV 曝光下光致产酸剂（PAG）的优先断裂路径 [13]。

先前的 TOF–SIMS 分析显示，m/z 277.10 附近存在严重的质量干扰，无法区分目标 PAG 离子（$C_{19}H_{17}S^+$，精确 m/z：277.1045）和可能的干扰离子（如 $C_{22}H_{33}^+$，精确 m/z：277.1001）（图 16）。相比之下，Orbitrap™–SIMS 单束模式结合 MS/MS 具备更优越的质量分辨能力（约为 TOF 的 20 倍）和 ppm 级的质量精度，有效削弱分子干扰，获得真实的 PAG 分子在薄层 CAR 中的分布信息。

3.5 TOF-SIMS 对半导体无机结构分析与掺杂定量的应用

随着半导体器件尺寸持续微缩，传统的表征技术（如常规 SIMS）受限于束斑尺寸，缺乏直接探测 10 纳米以下技术器件的空间分辨率。自聚焦 SIMS（SF–SIMS）利用大束斑，通过选择特征团簇离子将相关信息限制在感兴趣的区域。

然而，SF–SIMS 依赖高质量数团簇离子，极易在飞行时间（TOF）质谱中产生严重的质量干扰。OrbitrapTM 质量分析器相较单一 TOF 可提供高达 20 倍以上的质量分辨率，质量精度降至低于 1 ppm，有望解决这一瓶颈。本研究通过 OrbitrapTM–SIMS 分析，对（1）$Si_{0.25}Ge_{0.75}$ 鳍片（宽 20 纳米）中磷掺杂分布和（2）InGaAs/GaAs 鳍片（宽 16 纳米）中硅和碳含量进行定量分析 [14]。

在 20 nm 宽 $Si_{0.25}Ge_{0.75}$ 鳍片中，干扰峰 $^{30}SiHGe^-$，$SiH^{76}Ge^-$ 和 $^{73}GeO^{2-}$ 等被完全分离（图 17），获得了准确的磷深度分布，测得平均 P 浓度约为 6.8×10^{17} at/cm^3，P 在 Si 中的检测限低至 5×10^{16} at/cm^3，且清晰揭示出本征 Ge 盖层与界面处的磷富集现象。

同时 Orbitrap™–SIMS 较高的质量分辨能力不仅有利于准确量化 SiGe 中 P 掺杂浓度，还可以完全分辨生长在 SiGe：P 鳍片顶部的未掺杂纯 Ge 层。

四、结论

本文系统介绍了飞行时间二次离子质谱（TOF–SIMS）分析技术及其在半导体材料 / 缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用。主要结论如下：

1. TOF–SIMS 技术具有亚单层表面灵敏度、ppm–ppb 级别的检测限、高质量分辨率（M/ΔM > 26000）和宽质量范围（1–12000 amu）等优势，特别适合半导体制造领域的表面分析、缺陷表征和工艺优化。Hybrid SIMS 结合了 OrbitrapTM 超高质量分辨（M/ΔM > 240000）和 M6 的空间分辨能力（横向 50nm，纵向 1nm），为特征成分和结构的定性及定位提供更加可靠的数据能力。

2. 基于 OrbitrapTM–SIMS 的串联质谱与深度剖析技术，揭示了 EUV 曝光下 PAG 分子从光刻胶表面向内部推进的不均匀碎裂路径及其剂量响应规律，为光刻胶优化与最佳曝光剂量的确定提供了科学依据。

3. 通过纳米鳍式结构掺杂与杂质分析案例，展示了 TOF–SIMS 结合 OrbitrapTM 高分辨质谱在消除 SF–SIMS 团簇离子质量干扰方面的作用，实现了对 20 nm SiGe 鳍中磷浓度和 16 nm InGaAs/GaAs 鳍中硅、碳含量的无干扰定量，验证了 TOF–SIMS 在先进纳米器件表征中不可或缺的应用价值。

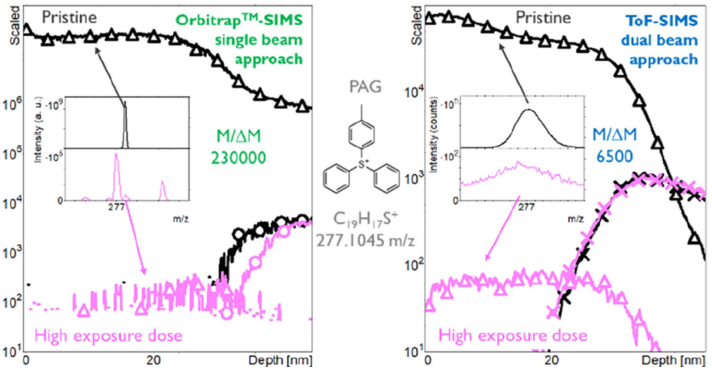


图 16. Orbitrap™–SIMS 和传统 TOF–SIMS 在深剖分析中的质量分辨对比。

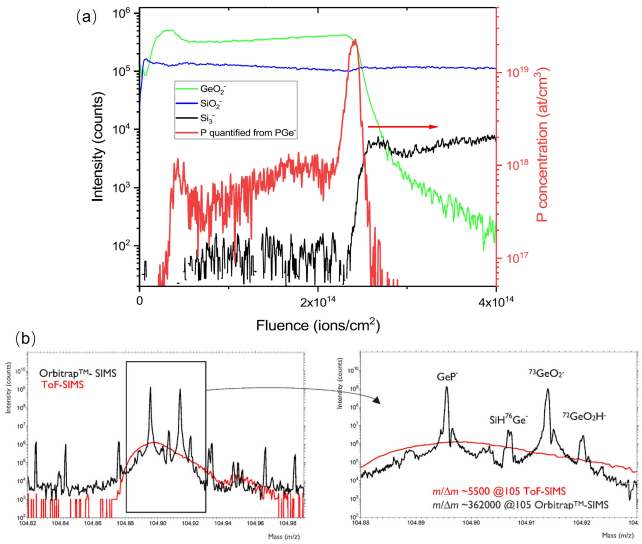


图 17. (a)20 nm 宽鳍上的 OrbitrapTM–SIMS 深度分布（使用 PGe– 定量 P）；(b) 在 SiGe:P 参考样品上测量的 105 m/z OrbitrapTM–SIMS（黑线）质谱。

4. 通过铝合金材料表征的案例分析，TOF–SIMS 离子彩色成像技术清晰地展示了不同铜含量对铝合金晶粒结构和导电性能的影响，验证了半导体行业选择 0.5 at% 铜含量的科学依据。

5. 通过铝焊盘氟腐蚀缺陷的案例分析，我们展示了 TOF–SIMS、XPS、SEM 和 AES 等多种分析技术的协同应用。特别是，我们成功鉴定了一个未知铝氟化合物——六氟铝酸根离子 $[AlF_6]^{3-}$，其 XPS 结合能为 78.7 eV，为教科书提供了新的参考数据。

6. 基于电化学理论和 TOF–SIMS 分析数据，建立了氟诱导腐蚀的理论电化学模型，阐明了氟诱导腐蚀的化学和电化学反应机理，证实了水汽和氧气参与并加强了腐蚀过程。

7. 通过清洗工艺优化案例，展示了 TOF–SIMS 在指导工艺参数选择方面的实用价值，实现了污染物去除与产品质量保护之间的最佳平衡。

8. TOF–SIMS 技术凭借其独特的分析能力和多样化分析模式（谱图、成像、深度剖析），已成为半导体材料表征、缺陷分析和工艺制程优化中不可或缺的重要工具，对于提升半导体产品质量和良率具有重要的支撑作用。

致谢

本文作者们衷心感谢胜科纳米（苏州）股份有限公司和北京艾飞拓科技有限公司团队的大力支持。

参考文献

1.A. Benninghoven, F. G. Rüdenauer, and H. W. Werner, Secondary Ion Mass Spectrometry: Basic Concepts, Instrumental Aspects, Applications and Trends. New York: Wiley, 1987.

2.J. C. Vickerman and D. Briggs, Eds., TOF–SIMS: Surface Analysis by Mass Spectrometry. Manchester: IM Publications, 2001.

3.Y. N. Hua, S. Redkar, C. K. Lau, and Z. Q. Mo, "A Study on Non–Stick Aluminium Bondpads due to Fluorine Contamination using SEM, EDX, TEM, IC, Auger, XPS and TOF–SIMS Techniques," in Proceedings of the 28th International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA 2002), Phoenix, AZ, USA, Nov. 2002, pp. 495–504.

4.D. G. Castner, "Surface Analysis with TOF–SIMS: Spectra, Images, and Depth Profiles," Analytical Chemistry, vol. 82, no. 3, pp. 789–796, 2010.

5.F. A. Stevie and C. L. Donley, "Characterization of Semiconductor Materials by TOF–SIMS," Journal of Vacuum Science & Technology B, vol. 33, no. 3, pp. 03F101–03F110, 2015.

6.H. W. Teo, Y. Yang, Y. Wang, L. Zhu, Z. Q. Mo, S. P. Zhao, and J. Lam, "Feasibility study of TOF–SIMS surface measurement for Aluminum bond pad fluorine contamination," in 2015 IEEE 22nd International Symposium on the Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits (IPFA), Hsinchu, Taiwan, Jun. 2015, pp. 61–63.

7.G. Harman, Wire Bonding in Microelectronics: Materials, Processes, Reliability, and Yield, 3rd ed. New York: McGraw–Hill, 2010, pp. 89–124.

8.Y. N. Hua, et al., "A Study on Fluorine–Induced Corrosion on Microchip Aluminium Bondpads," in Proceedings of the 29th International Symposium for Testing and Failure Analysis (ISTFA 2003), Santa Clara, CA, USA, Nov. 2003, pp. 249–255.

9.Y. N. Hua, L. Zhu, J. Z. Liao, and X. M. Li, "Studies and Joint Application of TOF–SIMS and XPS in Material Analysis and Characterization," in Proceedings of the 31st International Physics and Failure Analysis (IPFA 2024), Singapore, Jul. 2024, Paper 151.

10.J. F. Moulder, W. F. Stickle, P. E. Sobol, and K. D. Bomben, Handbook of X–ray Photoelectron Spectroscopy. Eden Prairie, MN: Physical Electronics, Inc., 1995.

11.F. A. Cotton, G. Wilkinson, C. A. Murillo, and M. Bochmann, Advanced Inorganic Chemistry, 6th ed. New York: Wiley–Interscience, 1999.

12.N. N. Greenwood and A. Earnshaw, Chemistry of the Elements, 2nd ed. Oxford: Butterworth–Heinemann, 1997.

13.A. Franquet, V. Spampinato, S. Kayser, W. Vandervorst, P. van der Heide, "Orbitrap – SIMS analysis of advanced semiconductor inorganic structures," Vacuum. vol. 202, pp. 111182, 2022.

14.V. Spampinato, A. Franquet, D. De Simone, I. Pollentier, A. Pirkl, H. Oka, P. van der Heide, "SIMS Analysis of Thin EUV Photoresist Films," Analytical Chemistry. vol. 94, no. 5, pp. 2408–2415, 2022.

15.Y. N. Hua, G. B. Ang, S. Redkar and Yogaspari, "Failure Analysis of Contamination and Gate/Tunnel Oxide Failure in Wafer Fabrication", ISTFA 2001: Proceedings from the 27th International Symposium for Testing and Failure Analysis, 11–15 Nov, Santa Clara, CA, USA, pp.425–430, 2001.

16.Y.N. Hua, S. Chu, D. Gui, Z.Q. Mo, Z. X. Xing, B. H. Liu, A. Ng and T. Tsai, "A New Failure Analysis Flow of Gate Oxide Integrity Failure In Wafer Fabrication", ISTFA 2009: Proceedings from the 35th International Symposium for Testing and Failure Analysis, November 15 – 19, San Jose, California, USA, p 177–181, 2009.

17.M. Beebe, S. Anderson, "Monitoring wafer cleanliness and metal contamination via VPD ICP–MS: Case studies for next generation requirements", Microelectronic Engineering, vol.87, pp1701–1705, November 2010.

18.L. Zhu, H.W. Teo, K. Ong, Y.H. Huang, Y.N. Hua, "Time–of–Flight Secondary Ion Mass Spectroscopic Characterization of the Nitrogen Profile of Shallow Gate Oxynitride Thermally Grown on a Silicon Substrate", Surface and Interface Analysis, vol.44, pp1558–1564, May 2012.

19.S. Lombardo, J.H. Stathis, B.P. Linder, K.L. Pey, F. Palumbo, & C.H. Tung, "Dielectric breakdown mechanisms in gate oxides", Journal of Applied Physics, vol. 98(12), pp121301–36, December 2005.

革新短路可靠性

配备薄 AlGaN 势垒的 GaN HEMT，展现出优于 SiC MOSFET 和硅功率器件的短路性能。

来自中国的工程师已经证明：引入薄 AlGaN 势垒，可以大幅提高 GaN HEMT 的短路可靠性。该团队——由中国电子科技大学、四川爱联科技有限公司和深圳平湖实验室合作组成——生产的 III–N 晶体管，在 450V 总线电压下可承受多达 12,000 次重复短路循环。相比之下，商用 GaN HEMT 在相同条件下运行时，在第三次循环即告失效。

据团队发言人 Qi Zhou（中国电子科技大学、深圳高等研究院和 UESTC 的附属成员）称，他们器件的鲁棒性将有助于推动 GaN 功率器件在高可靠性功率转换应用中得到更广泛的采用。Zhou 及其同事生产的器件在多个方面表现强劲——它们将 GaN 闻名的卓越开关性能和功率密度，可与成熟硅器件和 SiC 器件相媲美的故障鲁棒性结合在一起。

这些优势将受到电机驱动、工业逆变器、UPS 系统、可再生能源转换器和电动汽车动力总成的设计者的欢迎。在所有这些应用中，短路故障可能在异常运行条件下发生，功率器件必须承受由此产生的异常工况，直到系统级保护检测到故障并安全关断器件。Zhou 说，对短路能力的需求如此关键，以至于它已成为标准化测试的一部分。

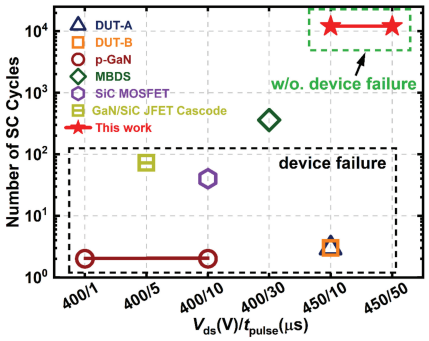
该团队的器件由 150mm GaN–on–silicon 外延片制造，包含：2μm 厚的 GaN 缓冲层、2.85μm 厚的 AlGaN/GaN 超晶格、GaN 沟道，以及厚度为 11nm 的 AlGaN 势垒。加工得到的 HEMT 具有 1.42μm 的 p–GaN 长度、3.32μm 的单个栅极场板和一定长度的源极场板。

Zhou 承认，这个设计可能看起来并不那么激进，因为它只是依靠减小 AlGaN 势垒的厚度来实现。“然而，底层设计并不仅仅是把 AlGaN 势垒做得更薄那么简单，因为势垒与 p–GaN 栅极和整个器件结构紧密耦合。”

“请注意，如果势垒太薄，可能会移动阈值电压，导致可用的栅控余量减小，以及栅驱动需求和相关导通损耗的增加。”Zhou 说，“这对增强型器件尤其重要，因为阈值电压必须保持足够正，以确保鲁棒的常关断运行。”

如果势垒太薄，可能出现的另一个问题是栅叠层上的电场会过强地增加。更强的电场可能促进栅电流注入，可能增加静态栅极泄漏和栅介质的电应力。

Zhou 及其同事避免了所有这些问题，同时仍从减小的势垒厚度中获益——这显著增强了短路事件期间的瞬态栅电流。“这一区别是我们设计的核心：目标不是不加选择地增加栅电流，而是在保持低静态栅极泄漏的同时，在短路故障期间获得强的瞬态栅电流响应，以提供自适应的短路保护。”



图：具有薄 AlGaN 势垒的 GaN HEMT 的短路能力，与其他形式功率器件相比表现出色。

对该团队器件的基准测试显示，它们优于 1.2kV SiC MOSFET 和 650V 硅功率晶体管（见图）。

该团队的下一个目标之一，是进一步优化其 AlGaN 势垒和 p–GaN 栅极结构，以及相关的外延和器件工艺。

与此同时，工作将致力于系统地研究栅极电阻和栅驱动条件对瞬态栅电流响应和短路性能的影响。

参考文献：

N. Yang et al. IEEE Trans. Power Electron. (2026) To be published

V 型缺陷提升绿色 LED 效率

当半环形位错的臂被打开成 V 型缺陷时，绿色 LED 实现了更高的效率。

来自加州大学圣巴巴拉分校（UCSB）的研究人员表明：V 型缺陷和优化的 AlGaN 帽层，可提高绿色 III–N LED 的效率。当这个西海岸团队生产的发射器还采用分布式布拉格反射器（DBR）来提高光提取时，外量子效率峰值达到 44%，电光转换效率（wall–plug efficiency）达到 37%。

生产高效率的绿色 III–N LED 是一个众所周知的挑战，原因在于：生长富铟 InGaN 量子阱需要低温，而这会导致材料质量变差；同时还存在与偏振相关的效应。

当发光波长向更长方向延伸时，量子限制斯塔克效应的增强会拖低辐射复合速率，并增强偏振诱导势垒——这阻碍了载流子注入并导致更高的正向压降。

有助于解决绿色 LED 低效率问题的是 V 型缺陷。这些六角锥形的凹陷包含六个半极性侧壁，通常在动力学受限的低温生长过程中、于位错顶端形成，为量子阱的高效载流子注入提供了一条途径。

据该团队称，有可能通过在图形化蓝宝石衬底上产生纯刃型位错半环，来“恰当地工程化”V 型缺陷密度——这些半环是通过在低温下、以高硅烷或乙硅烷流量生长一个预备层来实现的。当随后沉积低温 GaN 层时，这会将半环位错的臂打开成 V 型缺陷。

团队 LED 的制造过程如下：首先将图形化 GaN–on–sapphire 模板装入 MOCVD 腔室，在 1220°C 沉积 600nm 厚的 n–GaN 缓冲层；随后在 800°C、以 9.9sccm 的乙硅烷流量生长 60nm 厚的半环形成层。据称，需要重硅掺杂来形成将被打开成 V 型缺陷的刃型位错半环。

在 800°C 这一相对较低的温度下生长时，现有位错会打开成 V 型缺陷。为了确保 V 型缺陷尺寸均匀，团队在 1000°C 生长了 60nm 厚的 n–GaN 层，对已打开的 V 型缺陷进行平坦化；然后在 800°C 再添加另一个 60nm 厚的 n–GaN 层，以重新打开这些缺陷。添加由 3.5nm 厚的 $In_{0.05}Ga_{0.95}N$ 和 3.5nm 厚的 GaN 交替层组成的 25 个周期超晶格，进一步扩大了 V 型缺陷。在这个 V 型缺

陷模板上，团队添加了在氮气氛围下生长的有源区（以促进 V 型缺陷传播），它包含 8 个周期，每个周期包括：0.5nm 厚的 GaN 预层（设计用于恢复表面形貌）；随后在 810°C 生长的 3.3nm 厚 $In_{0.15}Ga_{0.85}N$ 量子阱和 2.3nm 厚 AlGaN 帽层；以及量子垒——6nm 厚 GaN 在 850°C 生长，接着 3nm 厚 GaN 在 900°C 生长。

绿色 LED 的生长以在 960°C 添加掺镁 GaN 结束。60nm 厚的 p–GaN 层对已打开的 V 型缺陷进行平坦化，然后添加 12nm 厚的接触层。随后样品在空气中、630°C 退火 15 分钟。

器件测量显示：优化 2.3nm 厚 AlGaN 帽层的生长——具体通过增加镓前驱体的流量、并减少氨的流量——将峰值外量子效率和电光转换效率分别从 29% 和 35%，提高到 34% 和 41%。而将优化的 AlGaN 帽层与 DBR 相结合，则可得到更高的数值：外量子效率 37%、电光转换效率 44%。

用横截面透射电子显微镜检查有源区发现：除了 V 型缺陷外，有源区中还存在沟槽缺陷，它们起源于量子阱与帽层之间的界面。这些沟槽缺陷由一个基面堆垛层错组成，并由充当非辐射复合中心的堆垛失配边界所终止。

在评估其器件时，该团队指出：帽层的质量在效率提升中起着作用。值得注意的是，去年中国的一个团队报告了量子阱生长后立即进行铝处理步骤的 LED，其外量子效率和电光转换效率的峰值分别达到 65% 和 60%。

对于 UCSB 的器件，外量子效率与电光转换效率的数值之间存在显著差异。出于这一观察，团队计划调查 AlGaN 帽层对通过 V 型缺陷进行的横向注入的影响。研究人员希望通过使用他们开发出的生长条件，改善其低温帽层的质量，并最终提高其长波长 LED 的效率。

参考文献：

A. Quevedo et al. Appl. Phys. Lett 129 053301 (2026)

更优的 p–GaN 欧姆接触

在 p–GaN 表面沉积一层非常薄的镁膜，随后进行软退火和化学清洗，即可创建接触电阻极小的欧姆接触。

由名古屋大学 Hiroshi Amano 小组领导的一项合作研究，正在开创一种用于生产具有超低接触电阻的超薄 p–GaN 层的工艺。据该团队——由名古屋大学、康奈尔大学、伊利诺伊大学厄巴纳－香槟分校、MIT、香港城市大学和苏州纳米技术与纳米仿生研究所合作组成——称，他们这种简单的、低热预算的后生长方法，涉及镁沉积、退火和化学清洗，可在薄 p–GaN 上创建高质量的欧姆接触。

广泛的器件都应能受益于该团队的工艺——它实现了仅 $1–3\times10^{-4}\,\Omega\cdot cm^2$ 的比接触电阻。这种超低电阻可降低工作电压、提高效率并削减功率损耗。

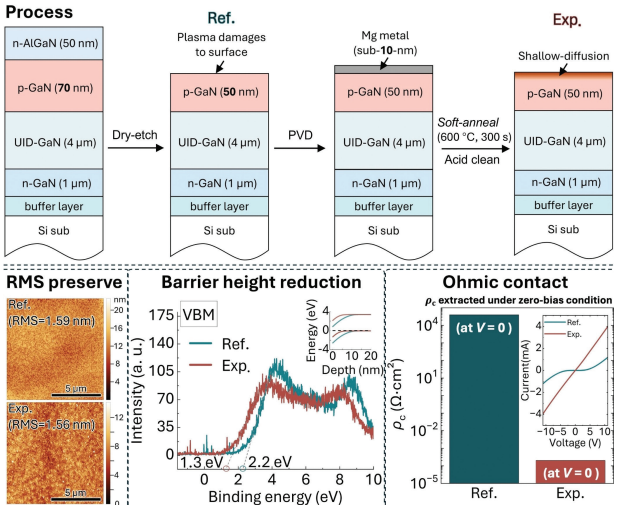
请注意，对于需要非常薄的 p–GaN 层、或易受工艺诱导损伤影响的器件，还有额外的好处。

这意味着 HBT 将受益，因为 p–GaN 基区非常薄——在器件制造过程中，暴露的基区表面可能遭受来自干法刻蚀的严重损伤，而这很难避免。

“相比之下，我们的镁退火方法可以在加工之后直接应用，并提供了一种相对简单的方法来恢复暴露的 p–GaN 表面的电学性能、并改善整体器件特性。”团队发言人、名古屋大学研究员 Haitao Wang 评论道。

这位名古屋大学的研究人员指出：UV LED 和激光器也可以通过该团队的工艺得到改进，因为它使 p–GaN 可以做得非常薄，有助于光提取和光学模式。

“我们的技术在这种情况下很有吸引力，因为它可以改善非常薄的 p–GaN 的接触性能，而不会引入严重的表面粗糙化。这提供了电学性能和光学性能的重要组合。”



图：通过物理气相沉积（PVD）一层薄薄的镁，随后进行“软”退火和酸清洗，获得更优的 p–GaN 接触。

该团队用于生产欧姆接触的工艺，与常规方法明显不同——后者涉及外延生长极薄的、重掺杂的 p^+–GaN 接触层。

据 Wang 称，传统方法对外延生长和掺杂控制提出了严苛要求，并使 p–GaN 表面在干法刻蚀等离子体工艺（在金属电极沉积之前是必需的）下容易受到损伤。

自 2021 年以来，Amano 的团队一直在研究通过在 GaN 表面沉积镁膜来形成低电阻欧姆接触。最初，研究人员生产了数十纳米厚的镁膜，并使用相对较高的退火温度，但这导致退火后 GaN 表面严重粗糙化。现在他们已经改进了工艺：在 p–GaN 上沉积亚 10 纳米厚的金属镁膜，然后进行 5 分钟的 600°C “软退火”，随后进行 HCl 清洗。

X 射线光电子能谱测量显示：价带顶与费米能级之间的能量间隔已从 2.2eV 降至 1.3eV。这表明，软退火降低了金属 /p–GaN 界面处的有效空穴注入势垒，同时收窄了耗尽区并增强了空穴注入。

使用该工艺，团队生产了准垂直 p–i–n 二极管：其 p–GaN 表面平坦、空穴输运特性良好、击穿电压高且泄漏电流低。

据 Wang 称，该团队的下一个目标是：在更多 GaN 器件上证明其技术的通用性，更详细地理解其背后的物理机制，并建立系统化、标准化的镁退火工艺。

参考文献：

H. Wang et al. Appl. Phys. Lett. 129 063306 (2026)

广告索引 Advertisers & Web Index

Advertiser	广告商名称	网址	页码
Riber		www.riber.com	IFC
Evatec AG		evatecnet.com/cn	5
AIXTRON		www.aixtron.com	BC
IONTOF		www.iontof.com	28

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、封测技术，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：minL@actintl.com.hk，lynnw@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。

eFOCUS VIDEO Magazine Webcast
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 (雅时国际商讯)
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)
Min Lu (陆敏), minL@actintl.com.hk

Vivi Zhang (张雨微), viviz@actintl.com.hk

UK Office (英国办公室)
Angel Business Communications Ltd.
6 Bow Court, Fletchworth Gate, Burnsall Road, Coventry, CV5 6SP, UK
Tel: +44 (0)2476 718 970

Chief Operating Officer
Sukhi Bhadal
sukhi bhadal@angelbc.com

销售人员 Sales Offices

China (中国)
Shenzhen (深圳)
Shanghaihai (上海)
Annie Liu (刘映妮), anniel@actintl.com.hk
Tel: 86 135 9024 6961

Bingo Mai (麦镜超), bingom@actintl.com.hk
Tel: 86 133 6020 1191

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

Hong Kong (香港)
Taiwan (台湾)
Simon Lee (李若龙), simonl@actintl.com.hk
Tel: 852 9437 2779

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



全球知名权威杂志

Compound Semiconductor的中国版

化合物半导体

COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

《化合物半导体》

双月刊，每期发行覆盖30，000名专业读者，并在全国重点产业活动赠阅。

提供关于全球化合物半导体行业的深入分析和及时信息报道，是化合物半导体材料和器件业专业人士重要的信息源。

CS CHINA CON 化合物半导体先进技术及应用大会

由雅时国际商讯主办，会议专注搭建全球化合物半导体行业范围内产、学、研、政信息交流和商务合作的精准交流平台，着眼行业前沿议题，洞悉行业最新需求，汇集国内外领先跨国科技，与专家学者共探行业发展方向，共同探讨化合物半导体产业开拓创新的解决之道。



www.compoundsemiconductorchina.net

ACT INTERNATIONAL

AIXTRON

THE G10 SERIES



G10-AsP

1st fully automated AsP MOCVD system enabling 10x lower defect density

Your **Productivity Solution**
for All Advanced Epitaxy Materials

AIXTRON SE - Dornkaulstr. 2 • 52134 Herzogenrath • Germany - Phone: +49 2407 9030 0 - www.aixtron.com