

# 化合物半导体

**CS** COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2025年 12月/2026年 1月

释放纳米压印光刻  
的潜力



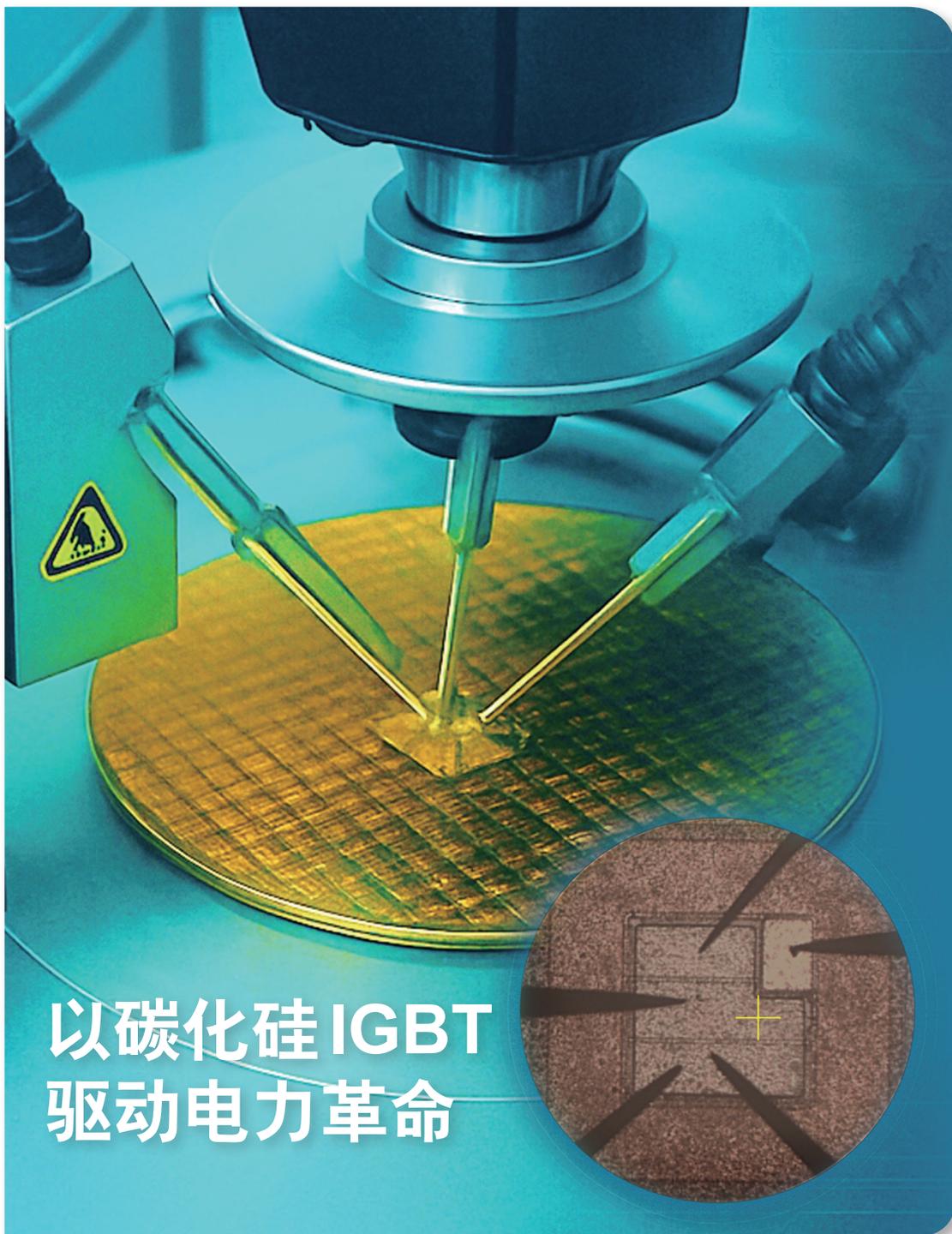
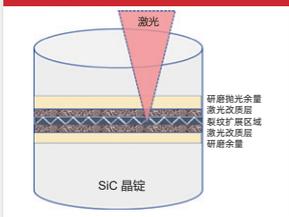
氮源MBE瞄准采用  
ScAlN的HEMT器件



利用p-GaN屏蔽层  
提升开关速度



4H-SiC晶体低损耗  
高效率激光剥离技  
术研究



## 以碳化硅 IGBT 驱动电力革命

ACT INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

[www.compoundsemiconductorchina.net](http://www.compoundsemiconductorchina.net)

# 深得 MBE 精髓

## 研发及生产设备全球市场最大拥有者

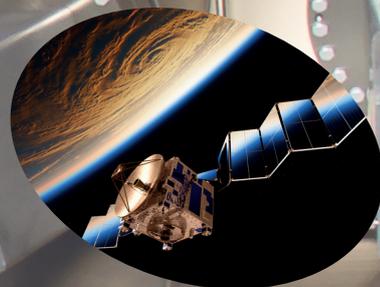
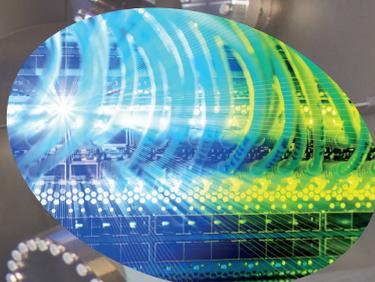
MBE不仅可以让我们去发现，更可以让我们去实现。

*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

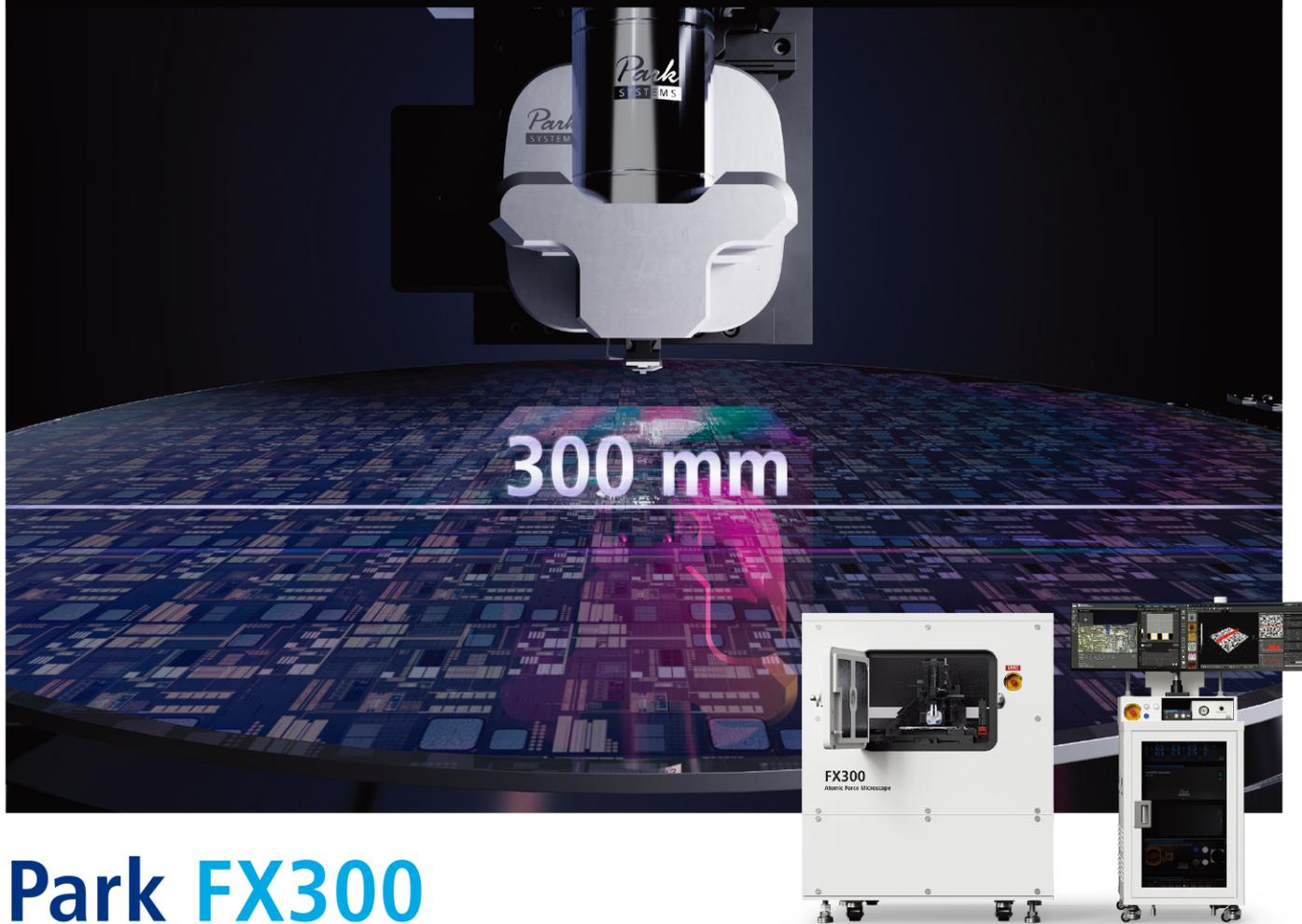


RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com  
www.riber.com

# 推动科研成果向 300毫米晶圆生产的转化



## Park FX300

### 助力从研发到生产的高效过渡

FX300可实现从实验室研究到生产环节的顺利衔接，能够测量从小样品到300mm晶圆的各种尺寸，支持广泛的原子力显微镜模式，适用于半导体检测及先进材料研究等多样化应用。

### 为创新而设计

配备自动探针识别与更换、快速激光对准功能，并结合SmartScan AI智能控制，实现从研发到质量管控的高效扩展。

### 值得信赖的精密表现

具备更清晰、更稳定的成像效果，更好的控制噪声与漂移，并通过优化的SLD光源，提供可靠的测量结果。



扫码了解更多

半导体薄膜物理沉积设备供应商

**FERMI 费勉仪器**

创立于2017年,提供设计开发、集成测试、售后服务等一站式供应服务平台。

主营业务:半导体装备制造、精密零部件制造、不锈钢真空腔体焊接制造等。



MBE-800 cluster 分子束外延系统



MBE-1000 cluster 分子束外延系统



LFPC-600 真空解理和钝化系统



HLFPC-800P 原子氢清洗钝化系统



PV-200C全自动磁控PZT薄膜生产线

费勉仪器科技(南京)有限公司  
Fermi Instruments (Nanjing) Co., Ltd.

YIP HOTLINE 联系热线 **+86-25-5888 3672**

南京市江北新区智达路6号智城园区3号楼 info@fermi.com



费勉仪器公众号



费勉仪器官网

## 封面故事 Cover Story

### 14 以碳化硅IGBT驱动电力革命

#### Driving the electric revolution with SiC IGBTs

我们的“面向未来的可再生与可靠能源碳化硅解决方案”(FOR2ENSICS)项目由欧盟地平线计划资助,旨在通过基于超高电压碳化硅IGBT的中压直流转换器填补这一空白。通过从串联中压(1.2kV-6.5kV)碳化硅MOSFET或硅IGBT转向超高电压碳化硅IGBT,我们有望释放多项关键优势,包括降低导通损耗、简化驱动要求、缩小占地面积和降低成本。然而,实现这一技术需要器件制造、钝化、封装和转换器组装方面的协调专业知识——这些目标通过集合工业界和学术界的广泛专长得以实现。

- 纳扎雷诺·多纳托,剑桥大学

## 编者话 Editor's Note

### 04 碳化硅革命: AI算力热管理的范式跃迁

#### The Silicon Carbide Revolution: A Paradigm Shift in AI Compute Thermal Management

- 陆敏

## 业界动态 Industry

### 06 牛津仪器为COHERENT提供用于6英寸磷化铟晶圆制造的全自动加工设备助力下一代人工智能应用开发

Oxford Instruments provides COHERENT with fully automated processing equipment for 6-inch indium phosphide wafer manufacturing to accelerate next-generation AI application development.

### 06 SEMI报告: 2027年全球半导体设备销售额预计创历史新高,达1560亿美元

SEMI Report: Global Semiconductor Equipment Sales Projected to Reach Record High of US\$156 Billion in 2027.

### 07 Coherent官宣: 扩展300mm碳化硅平台

Coherent Announces Expansion of 300mm Silicon Carbide Platform.

### 08 全球首个8英寸蓝宝石基氮化镓功率器件量产落地

World's First Mass Production of 8-Inch Sapphire-Based GaN Power Devices Achieved.

### 08 天域半导体拟募资17.44亿港元,正式登陆港交所

Tianyu Semiconductor Plans to Raise HK\$1.744 Billion in Hong Kong IPO.

### 08 芯联集成与中国长安汽车深化合作共拓新能源与智能化产业新局

Gree Electronics × University of Electronic Science and Technology of China: Joint Research Center for Silicon Carbide Devices officially inaugurated.

### 09 韩国企业PowerCubeSemi计划上市: 全球首家氧化镓厂商加速引爆下一代半导体赛道

South Korean PowerCubeSemi Plans IPO: World's First Gallium Oxide Manufacturer Accelerates Next-Generation Semiconductor Race.

关于雅时国际通讯 (ACT International)

ACT 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 INTERNATIONAL 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

Evatec专栏 Evatec Column

10 量产制造中的AlScN 压电薄膜极化控制  
Polarization Control of AlScN Piezoelectric Thin Films in Mass Production  
- Evatec公司

技术 Technology

19 射频等离子体源在宽禁带半导体光电子器件制造中的关键作用  
The Key Role of RF Plasma Source in the Manufacture of Wide Bandgap Semiconductor Devices  
- 张培宣<sup>1</sup>, 郭维<sup>1</sup>, 张朱锋<sup>1</sup>, 高汉超<sup>1,2</sup>, 谢斌平<sup>1,2</sup>  
(1 费勉仪器科技(南京)有限公司, 2 费勉仪器科技(上海)有限公司)

22 释放纳米压印光刻的潜力  
Unleashing the potential of nanoimprint lithography  
- 王楠王、林忠祥、李国源; Quantum NIL Corporation  
郭浩中、谢钦伟、许文正; 鸿海研究院半导体研究中心

26 氨源MBE瞄准采用ScAlN的HEMT器件  
Ammonia MBE targets HEMTs that feature ScAlN  
- YVON CORDIER; UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR, CNRS-CRHEA

30 利用p-GaN屏蔽层提升开关速度  
Cranking up the switching speed with a p-GaN shield  
- NAOKI TORII, DAISUKE SHIBATA, MASAHIRO OGAWA, MASAO KAWAGUCHI, HIROYUKI HANDA, NAOHIRO TSURUMI, SATOSHI TAMURA AND YOSHIO OKAYAMA, 松下公司

34 4H-SiC晶体低损耗高效率激光剥离技术研究  
Research on Low-Loss and High-Efficiency Laser Stripping Technology of 4H-SiC Crystals  
- 邹兴, 胡浩林, 许益民, 王映德, 王启璋, 万玉喜; 深圳平湖实验室

科技前沿 Research Review

41 掌握带AlN缓冲层的HEMT制造技术  
Mastering the manufacture of HEMTs with an AlN bufer

42 铝处理提升绿光miniLED的效率  
Aluminium treatment boosts the efficiency of green miniLEDs

43 两步退火改善SiC界面  
Two-step anneal aids SiC interfaces

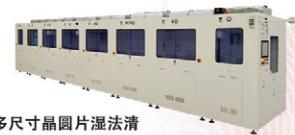
44 广告索引 Advertisement Index

《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/研究员
- 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, 台湾鹏正光电创始人, 佛山照明LED事业部创始人

专注于化合物半导体、Si材料、集成电路(IC)微机电系统(MEMS)等领域

槽式湿法制程设备



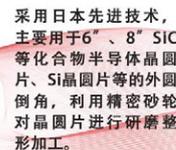
用于批量式多尺寸晶圆片湿法清洗工艺, 清洗过程将晶圆直接放入工艺槽内, 无需片盒, 进一步提高晶圆的清洗效果。

单片湿法制程设备



主要用于多尺寸SiC等化合物半导体晶片、Si晶片等材料的单片腐蚀、清洗、刷洗工艺。

全自动晶圆倒角机



采用日本先进技术, 主要用于6"、8" SiC等化合物半导体晶圆片、Si晶圆片等的外圆倒角, 利用精密砂轮对晶圆片进行研磨整形加工。

CDS化学供给系统



为清洗设备供给化学药液的专业系统, 能够有效防止药液泄漏和环境污染。

北京华林嘉业科技有限公司  
Beijing CGB Technology Co., Ltd.

网 址: <https://www.cgbtek.com>  
电 话: 0316-7678695 400-650 7658  
华东服务中心: 无锡市新吴区IC设计大厦B座1003-1004  
总部地址: 北京市经济开发区科创十三街18号院30号楼  
制造基地: 河北省廊坊市香河机器人产业园3期A栋

- (华南区) 负责人: 130 5158 6635
- (华东区) 负责人: 139 1127 1076
- (华中区) 负责人: 180 1536 7016
- (海外区) 负责人: 130 5158 7785
- (大项目部) 负责人: 139 1029 7918
- (技术支持) 负责人: 139 1127 9276



公众号  
官网

## 碳化硅革命：AI算力热管理的范式跃迁

人工智能的狂飙突进，正在将半导体产业推向一个前所未有的临界点。当英伟达传出将在下一代 Rubin 处理器中用 12 英寸碳化硅替代硅中介层的消息时，业界哗然之余，更应洞察到这背后深刻的产业逻辑——这并非简单的材料替代，而是一场关于热管理的范式革命。

算力每进一寸，散热便热三分。随着 AI 芯片功耗突破千瓦级，传统硅中介层 150W/(m·K) 的热导率早已捉襟见肘。碳化硅以超过 400W/(m·K) 的热导率横空出世，恰似给滚烫的 GPU 核心接通了一条“高速公路”。更妙的是，其半绝缘特性带来的高电阻率，将寄生电感降低了 30% 以上，让 GPU 与 HBM 间的海量数据传输更加干净利落。这种“热电双优”的特性组合，让碳化硅在 2.5D/3.5D 封装架构中展现出独特价值。

但必须澄清一个关键认知：此碳化硅非彼碳化硅。这并非我们熟悉的功率器件应用，而是微电子领域的全新战场。70% 的业内人士仍将思维固着在 8 英寸导电型衬底上，却未曾想 12 英寸半绝缘衬底正在开辟第二战场。这个战场不要求器件级性能，却苛求极致的薄膜平整度与应力控制——当 12 英寸晶圆减薄至 100 微米以下时，翘曲度必须控制在 50 微米以内，这对材料工程提出了近乎苛刻的挑战。

挑战远不止于此。碳化硅热膨胀系数比硅高出 40%，热循环后内应力激增 30%-40%，直接威胁 SAC 焊点可靠性。其杨氏模量更高，导致 TSCV 诱导应力比硅方案增加 30%，铜填充层更易失效。这些“材料基因”带来的本征限制，意味着简单替换无异于缘木求鱼。减小孔径、增加缓冲层、优化金属化方案，每一步都需要工艺创新的精准破局。

成本更是横亘在理想与现实间的天堑。12 英寸硅中介层仅 50 美元 / 片，占先进封装总成本不到 1%。而碳化硅衬底价格动辄数千元人民币，如何将其成本压缩至 250 美元（5 倍溢价）才能叩开市场大门？乍看之下这似乎是个死结，但技术创新总能开辟蹊径：采用 TSSG（液相法）替代 PVT，利用其低温生长、低应力、无凸度的优势获得原生平整表面；再通过激光切片技术，将一片 750 μm 的碳化硅晶圆精准剖分为五片 150 μm 的中介层。这种“一变五”的魔法，配合应力释放与高平整度加工，让成本目标不再遥不可及。

然而，我们必须保持清醒的产业判断。即便技术路径畅通，碳化硅中介层短期内仍将锚定高端 AI 芯片市场。台积电的散热方案库中，硅中介层配升级级液冷技术仍是主流选项；中低端市场甚至可能被玻璃中介层渗透。碳化硅的价值空间，仅存在于那些对散热极度敏感、对性能不计成本旗舰芯片。三年之内大规模替代硅的概率近乎于零，至多是小批量的旗舰产品导入。

这给国内碳化硅产业的启示尤为深刻。一窝蜂投入 12 英寸功率级衬底的同时，是否有人在默默布局半绝缘晶体的生长技术？当全行业聚焦导电型衬底的缺陷密度时，是否有人关注低应力、高平整度的制备工艺？激光切片设备、应力释放方案、高精研磨技术，这些“卡脖子”环节同样需要战略耐心。碳化硅在先进封装中的应用，本质上是材料科学、精密加工与成本工程的三角博弈，任何一环的短板都将导致满盘皆输。

更宏观地看，这场材料革命印证了半导体产业的一个永恒真理：没有完美的材料，只有最适合应用场景的解决方案。碳化硅的热导率优势被应力问题部分抵消，成本劣势需用技术创新对冲，这正是工程世界的常态。我们既不能因英伟达的一则消息就断言硅基封装末日，也不应因短期技术障碍而否定碳化硅的战略价值。产业进步从来不是非此即彼的替代，而是多元技术路线在各自最优解空间中生长。

站在 2025 年的门槛上回望，每一次算力跃迁都伴随着材料的自我突破。但这一次，考验的不仅是材料性能，更是整个产业链的精密协同能力。上游衬底企业能否稳定供应低应力晶体？设备厂商能否提供 12 英寸激光切片方案？封测厂能否建立匹配的 TSV 与键合工艺？这些问题的答案，将决定碳化硅中介层究竟是昙花一现的概念，还是支撑下一代 AI 算力的基石。



社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak  
adonism@actintl.com.hk

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

雅时国际资讯 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 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

© 2025 版权所有 翻印必究



LASER WORLD  
OF PHOTONICS  
CHINA



MESSE  
MÜNCHEN

# 慕尼黑上海光博会

2026.3.18-20

上海新国际博览中心 - 3号入口厅

Shanghai New International Expo Centre

N1-N5、E7-E4馆



扫码立即注册参观



扫码关注光博会

# 牛津仪器为 COHERENT 提供用于 6 英寸磷化铟晶圆制造的全自动加工设备助力下一代人工智能应用开发

牛津仪器公司（股票代码：OXIG）是化合物半导体领域先进的等离子体工艺解决方案的领先供应商。该公司宣布，其正为 Coherent 公司主导的首个全自动化 6 英寸磷化铟（InP）晶圆光子器件制造发挥关键作用。该项目由 Coherent 公司（纽约证券交易所代码：COHR）牵头开展，Coherent 同时也是化合物半导体及高性能光网络解决方案领域的全球领军企业。

牛津仪器的尖端等离子体处理设备是 Coherent 公司突破性成就的核心，助力其在美国德克萨斯州谢尔曼市和瑞典耶尔夫拉市成功扩建 6 英寸磷化铟晶圆厂。这些晶圆厂将在推动人工智能数据中心、电信及传感应用的创新发展方面发挥关键作用。Coherent 公司向 6 英寸晶圆的转型预计将带来显著效益，包括产能大幅提升、芯片成本降低，以及每片晶圆可生产器件数量超过四倍。

牛津仪器公司已提供全自动、高产能的 6 英寸磷化铟（InP）加工设备，助力 Coherent 实现显著的生产效率提升。该先进设备专为支持从 800 G 向 1.6 T 产品的过渡而设计，这是满足人工智能互联和光通信日益增长需求的关键要求。

“多年来，我们一直是 InP 等离子体刻蚀设备在数据通信市场的领先供应商，也是 Coherent 公司的重要合作伙伴。凭借我们所开发的技术结合卓越的服务品质、吞吐量与可靠性正完美契合当前因生成式 AI 应用发布而引发的设备需求激增趋势。我们非常荣幸能在市场拓展的激动人心阶段与 Coherent 公司携手合作，并期待继续研发并推出创新且有价值的等离子体处理解决方案。”牛津仪器等离子体技术公司董



事总经理 Matt Kelly。

Coherent 半导体器件执行副总裁 Beck Mason 博士表示：“Coherent 转向 6 英寸 InP 晶圆制造标志着该行业的一个变革性里程碑。牛津仪器在等离子体处理方面的专业知识对于使我们的 Sherman 和 Järfälla 晶圆厂达到世界级性能至关重要。我们共同推进 InP 技术，以支持更快的网络、更高的效率和将定义连接未来的新应用。”有关更多信息和图像的电子副本，请联系：Grant Baldwin 营销主管 牛津仪器等离子体技术 E：Grant.Baldwin@oxinst.com

## SEMI 报告：2027 年全球半导体设备销售额预计创历史新高，达 1560 亿美元

2025 年 12 月 16 日，SEMI 在发布的《年终总半导体设备预测报告》（Year-End Total Semiconductor Equipment Forecast – OEM Perspective）中指出，2025 年全球原始设备制造商（OEM）的半导体制造设备总销售额预计达 1330 亿美元，同比增长 13.7%，创历史新高；2026 年、2027 年有望继续攀升至 1450 亿和 1560 亿美元。增长主要由人工智能相关投资拉动，涵盖先进逻辑、存储及先进封装技术。

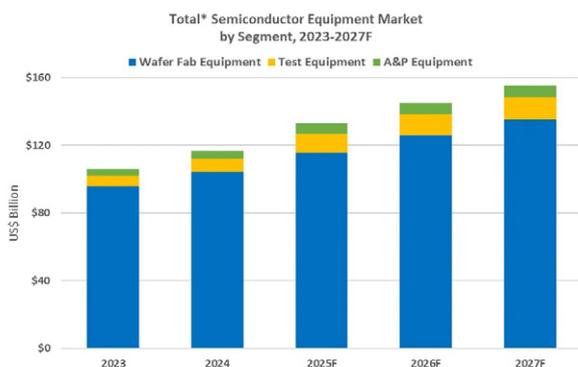
SEMI 总裁兼首席执行官 Ajit Manocha 表示：“全球半

导体设备销售势头强劲，前道与后道设备均有望连续三年增长，2027 年总销售额将首次突破 1500 亿美元。自年中预测以来，AI 需求带动的投资力度超预期，因此我们上调了所有细分市场的展望。”

晶圆厂设备（WFE）领域（含晶圆加工、晶圆厂设施和掩膜/掩模版设备）2024 年创 1040 亿美元纪录后，预计 2025 年增长 11.0% 至 1157 亿美元（此前年中预测为 1108 亿美元），主要因 DRAM 及 HBM 投资强于预期；中国持续

扩产。2026、2027 年预计再增 9.0% 和 7.3%，达 1352 亿美元，设备商将加大先进逻辑与存储技术支出。

后端设备领域延续 2024 年开始的强劲复苏。2025 年半导体测试设备销售额预计激增 48.1% 至 112 亿美元，封装设备销售额增长 19.6% 至 64 亿美元。2026、2027 年测试设备销售额预计继续增长 12.0% 和 7.1%，封装设备销售额预计增长 9.2% 和 6.9%。驱动力来自器件架构复杂度提升、先进 / 异构封装加速渗透，以及 AI 与 HBM 对性能的严苛要求；部分抵消因素为消费、汽车与工业需求持续疲软。

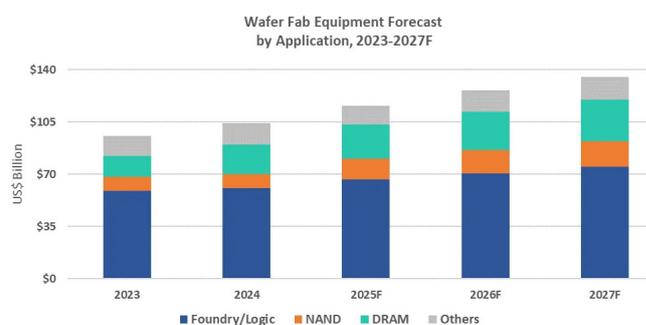


Source: SEMI, 2025 Year-End Semiconductor Equipment Forecast - OEM Perspective  
\*Total equipment includes new wafer fab, test, assembly, and packaging, but does not include wafer manufacturing equipment.  
Totals may not add due to rounding.

用于 Foundry 和 Logic 应用的 WFE 销售额 2025 年预计同比增 9.8% 至 666 亿美元，先进节点投资保持韧性；预计 2026、2027 年再增 5.5% 和 6.9%，达 752 亿美元。芯片制造商持续为 AI 加速器、高性能计算及高端移动处理器扩产，行业将迈向 2 nm 环绕栅（GAA）节点的大规模量产。

存储相关资本支出受 AI 部署带动 HBM 需求及技术迭

代推动，2027 年前将大幅扩张。NAND 设备市场 2025 年预计增长 45.4% 至 140 亿美元，受益于 3D NAND 堆叠技术进步及主流产能扩张，预计 2026、2027 年再增 12.7% 和 7.3%，分别达到 157 亿美元和 169 亿美元。DRAM 设备 2025 年预计增长 15.4% 至 225 亿美元，2026、2027 年再增长 15.1% 和 7.8%，存储厂商持续扩产 HBM 并升级更先进制程以满足 AI 与数据中心需求。



Source: SEMI, 2025 Year-End Semiconductor Equipment Forecast - OEM Perspective

预计至 2027 年，中国大陆、中国台湾和韩国仍将位居设备支出前三甲地位。中国大陆有望在预测期内保持首位，尽管增速放缓、销售额自 2026 年起逐步回落，本土芯片制造商仍在成熟制程及部分先进节点持续投入；中国台湾地区 2025 年支出强劲，主要受益于面向 AI 与高性能运算的大规模尖端产能建设；韩国则凭借对 HBM 等先进内存技术的大量投资，维持设备支出高位。在政府激励、区域化布局及特色产能扩张的推动下，报告涵盖的其他地区在 2026 与 2027 年的设备支出亦将全面增长。

## Coherent 官宣：扩展 300mm 碳化硅平台

近期，Coherent 高意公司宣布其下一代 300 毫米碳化硅（SiC）平台达成重大里程碑，以应对 AI 数据中心基础设施日益增长的热效率需求。

该平台核心是 300 毫米导电型碳化硅衬底，该衬底有着低电阻率、低缺陷密度和高均质性的特点，能有效降低器件能耗、提升开关频率与热管理性能。

除了解决 AI 数据中心热效率不足的痛点外，Coherent 还计划推动该技术规模化量产，同时拓展其在 AR/VR 设备以及电力电子领域的应用。比如用该技术制造更薄更高效的 AR 智能眼镜与 VR 头显波导器件，也能在电力电子领域通过大尺寸晶圆特性降低单芯片成本。

资料显示，Coherent 成立于 1971 年，其业务覆盖激光技术、光电子器件等多个核心领域。2022 年 7 月，Coherent 被 II-VI 公司以约 70 亿美元收购，合并后沿用“Coherent”

作为新公司名称。此次整合实现了技术互补——原 II-VI 在砷化镓、磷化铟、碳化硅等光电子材料和光器件领域的优势，与原 Coherent 的激光系统技术相结合，让新公司具备了从材料到终端产品的全产业链控制能力。

Coherent 高级副总裁兼总经理 Gary Ruland 表示：“人工智能正在改变数据中心的热管理格局，碳化硅正成为实现这种可扩展性的基础材料之一。”“我们的 300 毫米平台计划大规模生产，带来新的热效率水平，直接转化为更快、更节能的 AI 数据中心。”

此前 7 月，Coherent 位于越南的 SiC 工厂正式落成。该工厂耗资 1.27 亿美元（约合人民币 9.12 亿元），将生产碳化硅半导体、光学玻璃和先进光学器件。新工厂将对 Coherent 布局碳化硅及光学产品的产能发挥关键作用。

## 全球首个 8 英寸蓝宝石基氮化镓功率器件量产落地

据广东致能半导体有限公司官微消息，日前，致能半导体携手国际知名 8 英寸 Fab 完成全球首个 8 英寸蓝宝石基氮化镓功率器件量产落地。通过导入行业领先的制造工艺及创新的技术平台，产品在芯片尺寸、生产成本、电学性能、制造一致性等核心指标方面均较竞争技术展现出全面的领先优势。

Test Item	Test Condition	Test Result
HTRB	150C_700V_1000Hrs	PASS
H3TRB	85°C,85%RH, Vds=700V,1000Hrs	PASS
HTGB	150C_-35V_1000Hrs	PASS
HAST	Cascode_100V_130°C&85% RH_96Hrs	PASS
TC	-55 to 150°C @ 500cycles	PASS

8英寸蓝宝石基氮化镓可靠性评估结果（图源：广东致能半导体有限公司）

## 天域半导体拟募资 17.44 亿港元，正式登陆港交所

据半导体产业网消息，12月5日，广东天域半导体股份有限公司（简称“天域半导体”）在香港联合交易所主板正式挂牌上市。

据悉，天域半导体本次 IPO 面向全球投资者开放认购，募资 17.44 亿港元，用于未来五年内扩张公司的整体产能、提升自主研发及创新能力、战略投资及 / 或收购、扩展全球销售及市场营销网络、营运资金及一般企业用途。

据了解，天域半导体成立于 2009 年，是中国最早专注于碳化硅外延片研发与制造的企业之一，上市前曾进行了 7 轮融资，合计融资规模 14.64 亿元。目前提供 4 英寸及 6 英寸碳化硅外延片，并已开始量产 8 英寸外延片。董事长李锡光表示，未来将持续扩充产能、加大研发投入、丰富产品矩阵，深化核心客户合作与产业生态建设，适时推进战略投资与收购。

## 芯联集成与中国长安汽车深化合作共拓新能源与智能化产业新局

11月27日，芯联集成董事长、总经理赵奇率核心团队到访中国长安汽车集团，与中国长安汽车集团董事、总经理、党委副书记赵非等领导展开深度会谈，双方围绕现有合作深化、新业务拓展及长效合作机制建设达成高度共识。

会谈中，赵奇对中国长安汽车取得的发展成果表示祝贺，并详细介绍了芯联集成在半导体领域的全链条解决方案能力、技术迭代与产能规划，强调公司聚焦新能源核心方案与器件平台，持续推进芯片标准化与定制化，助力新能源、智能化产业高质量发展。

赵非对芯联集成的技术实力、全产业链布局与规模化量产能力给予高度评价，对双方现有合作成果表示肯定。他指出，下一步双方需要进一步强化智能网联等智能化领域合作，全面对接新能源汽车核心技术需求，进一步拓宽合作维度。

此外，双方约定将建立年度互访交流机制，推动产品落地与技术创新，实现互利共赢。目前，芯联集成已与中国长安汽车在新能源汽车动力、底盘等领域围绕十余个重点项目开展合作。



此次会谈为双方深化战略合作奠定了坚实基础。未来，芯联集成将与中国长安汽车同向而行，在新能源、智能化等核心领域挖掘更多合作契合点，以半导体核心技术赋能汽车产业高质量发展，携手构建互惠共赢的产业生态。

# 韩国企业 PowerCubeSemi 计划上市： 全球首家氧化镓厂商加速引爆下一代半导体赛道

在韩国半导体产业重振雄风的背景下，PowerCubeSemi 计划于 2026 年在韩国创业板（KOSDAQ）上市，这一举措吸引了投资者的广泛关注。作为全球首家氧化镓半导体制造商，PowerCubeSemi 获得了 60 亿韩元的 IPO 前融资，正致力于在下一代芯片材料领域占据领先地位——这一领域对于韩国深科技竞争力以及全球后硅时代转型都至关重要。

PowerCubeSemi 宣布完成 60 亿韩元（约 440 万美元）的 IPO 前融资，为 2026 年初在韩国创业板（KOSDAQ）进行初步上市审查奠定了基础。

本轮融资吸引了 KDB Capital、KB Securities、Kakao Pay Securities 和 Sopoong Ventures 的参与，而现有股东 Hana Ventures 则通过后续投资加入。

PowerCubeSemi 成立于 2013 年，专注于基于硅（Si）、碳化硅（SiC）和氧化镓（ $Ga_2O_3$ ）的化合物半导体器件。该公司运营着全球首家专门用于大规模生产氧化镓的晶圆厂，目前正与多家寻求高效功率和射频解决方案的全球客户合作。

2025 年 7 月，PowerCubeSemi 在技术评估中获得 A 级评级，符合韩国创业板（KOSDAQ）技术股上市资格要求。该公司计划于 2026 年 1 月向韩国交易所提交正式上市申请。

氧化镓（ $Ga_2O_3$ ）已成为化合物半导体领域最有前途的材料之一，其击穿电压和能量效率远高于传统的硅。

随着各行各业（包括电动汽车、数据中心和国防电子产品）对更高效的电源管理芯片的需求日益增长， $Ga_2O_3$  正在成为全球深度科技竞赛的关键战场。

PowerCubeSemi 取得这一里程碑式的成就，正值韩国政府优先发展半导体自主研发和下一代材料研发，并将此类项目纳入国家增长基金和先进产业组合之际。

投资者认为，该公司在氧化镓方面的专业知识与韩国更广泛的雄心壮志相辅相成，即从存储芯片领域的统治地位扩展到战略化合物半导体领域的领导地位。

韩国日益重视以研发为中心的增长政策，进一步凸显了 PowerCubeSemi 发展轨迹的重要性。政府 2026 年预算扩大了对中小企业和科技企业的研发投入，强化了合作研究和商业化项目。

虽然 PowerCubeSemi 的 IPO 前融资来自私人渠道，但该公司自身的发展历程反映了私人投资和国家研发重点开始趋于一致的趋势——这标志着深度科技加速发展模式的更加协调。



## PowerCubeSemi 投资者和公司声明

CEO 姜泰英对公司下一阶段的增长充满信心，他表示：“我们将竭尽全力完成上市，以回报投资者对我们愿景的信任。”

业内人士指出，投资者阵容——将 KDB Capital 等政策驱动型机构与 KB 和 Kakao Pay Securities 等私营部门实体相结合——反映了公共资本与深度技术商业化路径之间日益增长的契合度。

PowerCubeSemi 的发展轨迹不仅仅代表一次 IPO，它还反映了韩国风险投资和资本市场投资方向的更广泛转变，即转向材料和器件层面的创新，而这些领域历来被无晶圆厂设计和消费科技企业所掩盖。

该公司取得的进展也进一步印证了韩国创业板（KOSDAQ）的技术特供上市体系如何继续作为研发密集型初创企业的替代增长途径发挥作用，减少对盈利指标的依赖，并强调经过验证的技术差异化。

随着半导体行业为全球重组做好准备，PowerCubeSemi 的氧化镓生产能力使韩国能够在后硅材料经济中占据一席之地，与韩国正在进行的 SiC、GaN 和以人工智能为中心的芯片基础设施方面的国家投资形成互补。

PowerCubeSemi 即将进行的 IPO 凸显了韩国创业生态系统正朝着高价值产业创新方向发展，而不仅仅局限于软件或平台规模化。随着全球对节能芯片的需求加速增长，这一案例或将促使国内外投资者重新评估韩国深科技领域的前景。

如果成功，PowerCubeSemi 在 KOSDAQ 的上市可能标志着韩国从半导体制造商向材料创新者转变的关键一步，从而巩固韩国在下一阶段全球芯片制造中的长期地位。

## 量产制造中的 AlScN 压电薄膜极化控制

在压电薄膜技术取得重大突破之际，Evatec 成功开发出氮化铝钪（AlScN）薄膜的极化控制工艺，这一里程碑式的成果为射频器件的大规模制造奠定了革命性基础。Evatec 无线产品营销经理 **Oguz Yildirim** 与工艺工程师 **Demian Henzen** 将为我们带来详细解读。



### 无线通信新纪元

下一代无线通信技术（6G）预计将于 2030 年前后迈入商用阶段。随着 6G 技术标准竞争的日益激烈，射频前端模块正成为终端用户享受 6G 超高传输速率与宽频带优势的核心组件。

虽然射频前端中的多数元件能够适配高频工作环境，但射频滤波器依然是整个系统设计中挑战最大、也最为关键的一环。

在此背景下，周期性极化压电层的实现标志着技术上的重大突破。这类经过人工设计的结构可显著提升谐振频率，为开发满足下一代无线系统要求的高性能滤波器开辟了新路径。

周期性极化氮化铝钽压电层堪称射频滤波器技术的一项革命性进展。通过交替改变压电薄膜的极化方向，该结构能够激发更高阶的声学模态——特别是第四阶厚度伸缩模式。这一创新使谐振器的工作频率达到传统氮化铝钽器件的四倍，覆盖 17-18 GHz 频段，且无需减薄薄膜厚度，从而有效保持器件的品质因数与机电耦合系数<sup>[1]</sup>。

“沉积过程中的  
原位极化控制”



图1: AlN和AlScN层的堆叠设计。

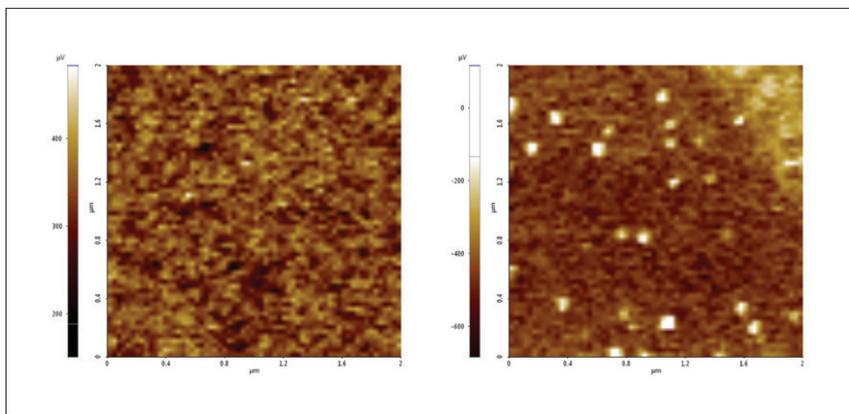


图2: PFM 四象限图像。

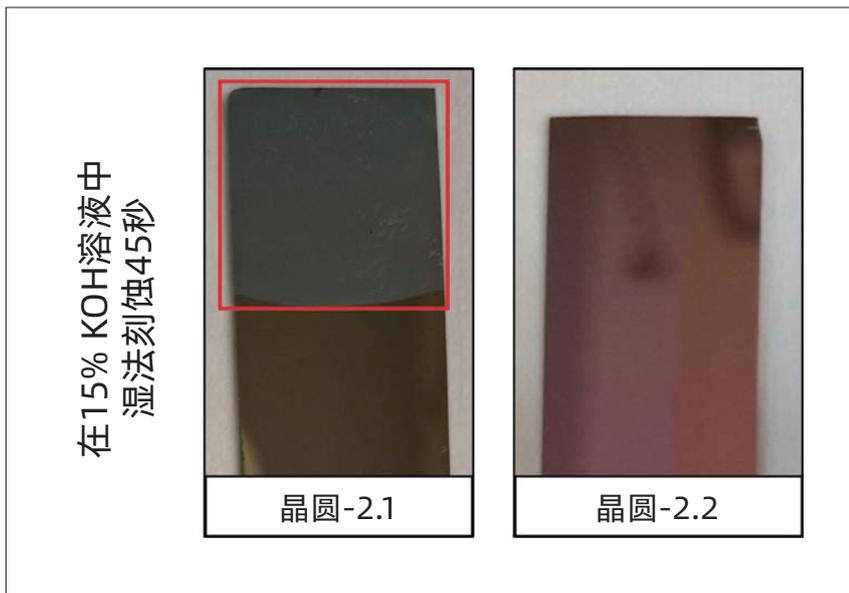


图3: KOH蚀刻结果。

## CLUSTERLINE® 200 极性控制方案

借助 Evatec 的 CLUSTERLINE® 200 集群设备平台，我们的工艺工程团队通过新型硬件与工艺开发的协同创新，实现了对氮化铝 (AlN) 和氮化铝钪 (AlScN) 薄膜极性的精准调控。尤为关键的是，这一突破性工艺无需破坏真空环境，且晶圆在整个氮化铝钪生产过程中可全程在同一设备内完成，相比基于集成工艺的替代方案能大幅降低成本。这一进展与我们针对外延种子层和高温电极的全新解决方案相得益彰（详见《LAYERS》2024 年第 8 期）。

## 查看结果

采用两种不同方法检测 AlN 和 AlScN 层的极性控制：i) 通过 KOH 溶液对 AlN 进行刻蚀。根据极化方向的不同，氮化铝在 KOH 溶液中的刻蚀速率会发生显著变化<sup>[1]</sup>。其二，压电力显微镜 (PFM) 可探测材料上的压电域，其响应会随极化方向改变而变化。

尽管这些结果展示了单层压电堆叠的极性控制，我们同样成功制备出了具有交替极性的双层堆叠结构，目前正在进行器件测试。

[1] M. Izhar ,et al., Microsystems & Nanoengineering (2025) 11:19

[2] E. Milyutin et al, J. Vac. Sci. Technol. B 28 (6), Nov/Dec 2010

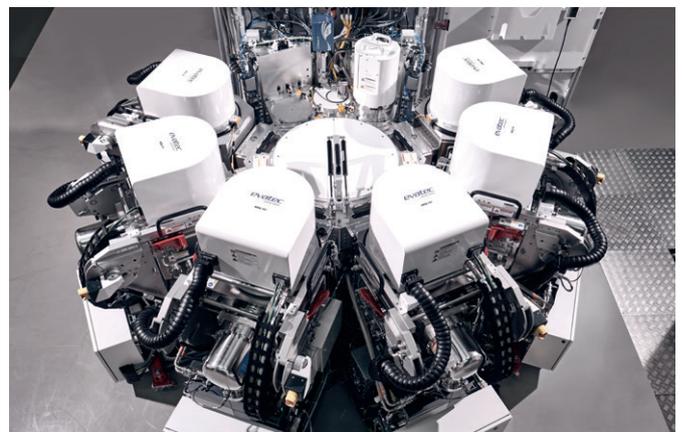
叠层结构	氧化铝	极化反转的氧化铝	氧化铝铪	极化反转的氧化铝铪
	氧化铝	氧化铝	氧化铝铪	氧化铝铪
	电极	极化反转	电极	极化反转
	Si	电极	Si	电极
RC (e)	1.29	1.44	1.63	1.49
PFM/PMF <sub>(AlN)</sub>	1.0	-0.8	1.3	-1.1
PFM/PMF <sub>(AlN)</sub> 理论预期值	1	~-1	~1.5	-1.5
KOH溶液腐蚀测试结果	是	否	-	-

图4: 结果概述。

### Evatec——无线射频器件技术的长期合作伙伴

Evatec 在氧化铝压电层领域拥有超过 25 年的深厚技术积淀，业务网络覆盖北美、欧洲、中国、东南亚、韩国和日本，凭借广泛的设备装机量与成熟的工艺体系，已成为全球射频滤波器技术领域的引领者。我们不断挑战薄膜技术的性能边界，以可靠的解决方案助力客户实现创新突破。

诚邀您与我们携手，共同探索并破解无线薄膜技术领域的核心挑战。欢迎随时联系，开启合作。



CLUSTERLINE® 200

## SPOTLIGHT

### 关于 C 轴极性控制

C 轴极性控制技术使射频滤波器的工作频率，仅由极性一致的薄膜层厚度决定，而不再受制于整体膜层的总厚度。以示意图为例：图 b 展示的是传统射频滤波器，其工作频率由整体厚度决定；而在图 a 所示结构中，虽然膜层的全层厚度保持不变，但通过极性控制将功能层均分为四个极性相同的单元，因而使工作频率达到了传统设计的四倍。

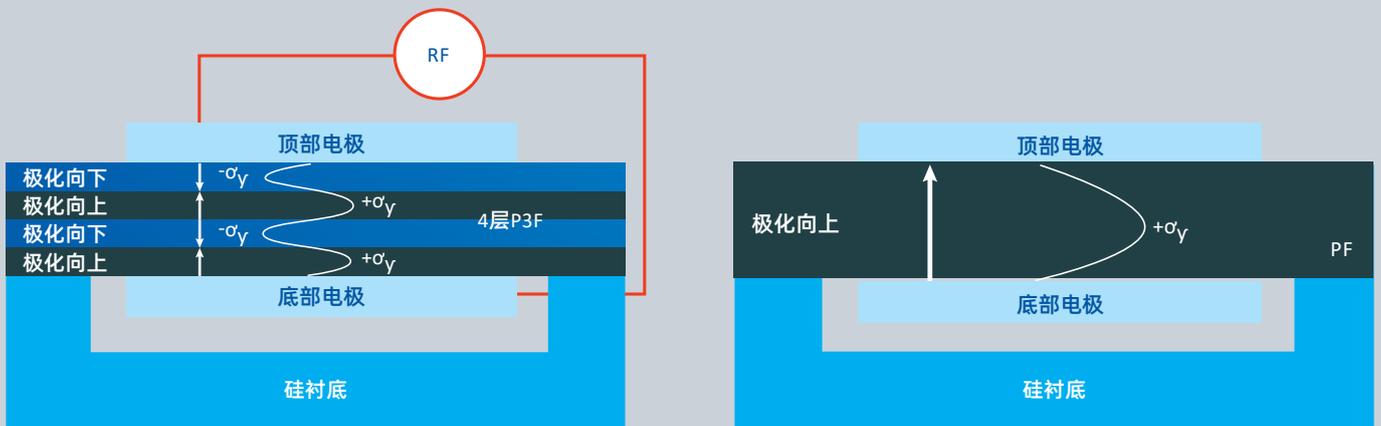
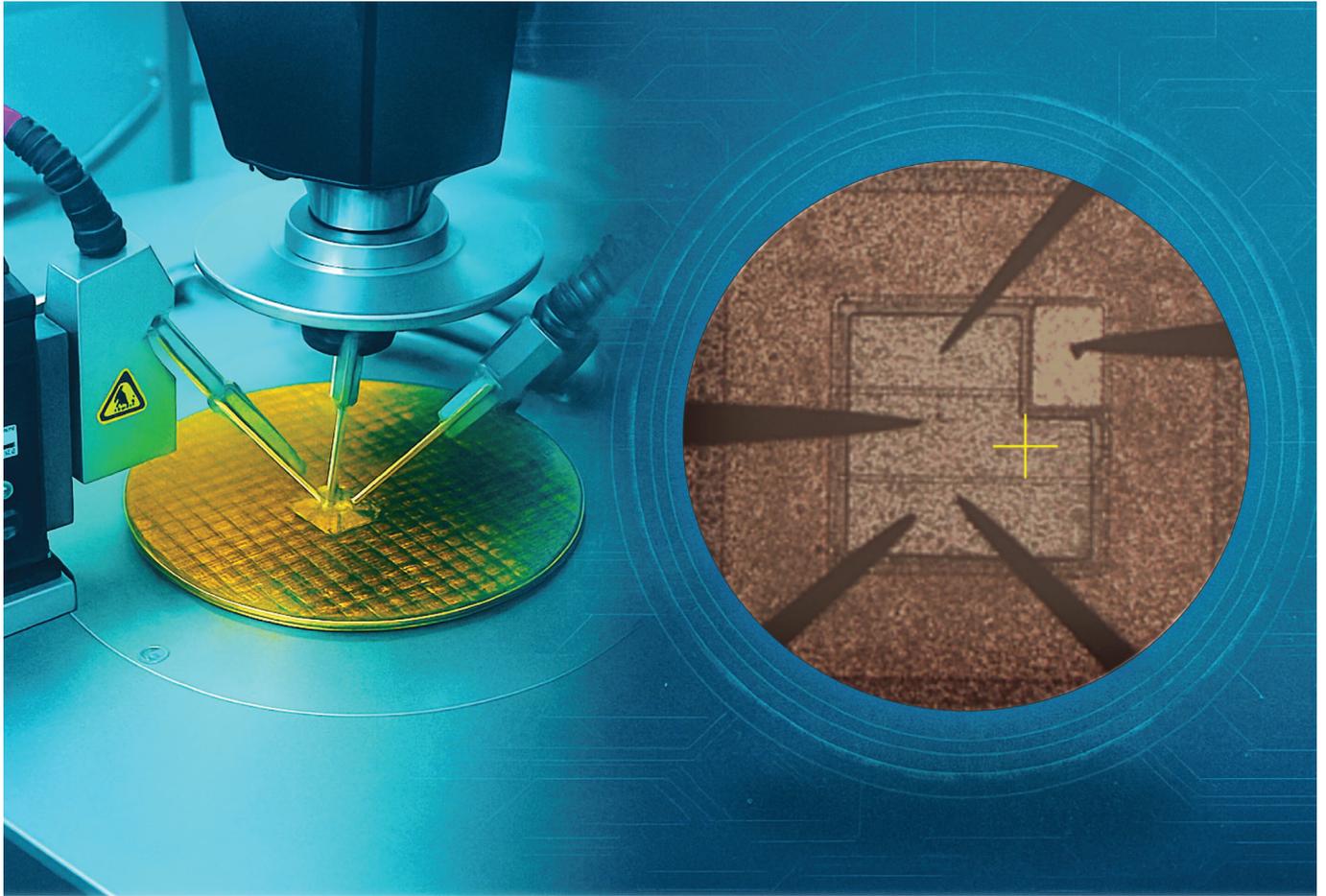


图5: a) 周期性极化压电材料 (P3F) 示意图，展示了压电层中周期性交替排列的极性分布。该结构支持器件以传统压电技术四倍以上的频率工作，且保持极性一致性。  
b) 传统压电技术 (非交替极性结构)



## 以碳化硅 IGBT 驱动电力革命

FOR<sup>2</sup>ENSICS 是一项欧盟资助的计划，其目标是利用超高压 SiC IGBT（碳化硅绝缘栅双极型晶体管）简化中压直流变换器。

作者：纳扎雷诺·多纳托，剑桥大学

**全**球减排和实现气候中和的进程正在迅速改变电力供应和电网基础设施。在这一努力中，关键在于引入新一代功率器件，通过智能地减薄外延层厚度和缩小外形尺寸，以更低的成本实现更高的效率。

实现这一目标的一个有前景的途径是直流配电，它与太阳能阵列和电池系统等可再生能源及现代负载（本就已采用直流运行）高度匹配。但功率电子市场仍然缺乏能够处理 1.5kV 以下到超过 10kV 电压的低成本、紧凑型、高性能直流-直流转换器。

我们的“面向未来的可再生与可靠能源碳化硅解决方案”（FOR<sup>2</sup>ENSICS）项目由欧盟地平线计划资助，旨在通过基于超高电压碳化硅 IGBT 的中压直流转换器填补这一空白。通过从串联中压（1.2kV-6.5kV）碳化硅 MOSFET 或硅 IGBT 转向超高电压碳化硅 IGBT，我们有望释放多项关键优势，包括降低导通损耗、简化驱动要求、缩小占地面积和降低成本。然而，实现这一技术需要器件制造、钝化、封装和转换器组装方面的协调专业知识——这些目标通过集合工业界和学术界的广泛专长得以实现。

## 碳化硅 IGBT 技术

硅基 IGBT 长期以来一直是牵引、工业、汽车和高电压直流系统的主力军，通常工作在 900V 至 6.5kV 范围。其双极型导通有助于克服 MOSFET 的局限性，改善静态压降与关断损耗之间的权衡。

随着 1.2kV-3.3kV 范围的 4H-SiC 单极型器件的出现，硅 IGBT 虽然仍极具成本竞争力，但在中压应用中正在失去优势。然而，对于 6.5kV 及以上电压，即使采用超结概念，碳化硅 MOSFET 也面临缩放和成本限制。一方面，良品率和缺陷密度限制了可实现的最大芯片面积；另一方面，漂移区电阻的缩放使碳化硅 MOSFET 在中等到大电流应用中变得不太适合。

对于超高电压应用——即超过 10kV——在数十至数百千赫兹的适度开关频率下工作时，碳化硅 IGBT 提供了一个引人注目的替代方案。其优势包括避免了串联碳化硅 MOSFET 的一些缺点，后者更容易受到电压不平衡影响，需要更复杂的栅极驱动。此外，碳化硅 IGBT 相比其硅基同类器件具有更薄的漂移区厚度。这为碳化硅 IGBT 带来了根本性优势，由于存储电荷减少而确保开关损耗降低。

享受碳化硅 IGBT 的益处并非易事，因为其设计因材料本身的限制而带来重大挑战。一个问题是较高的正向压降，源于延迟的双极型导通。这一压降——在室温下测量为 4H-SiC 的 2.8V，而硅仅为 0.7V——导致在低中电流下导通损耗增加。另一个值得注意的缺点是少数载流子寿命有

## 项目联盟

FOR<sup>2</sup>ENSICS 是一个由欧盟地平线计划资助的项目，为期四年，从 2023 年 1 月至 2026 年 12 月。该工作分为八个工作包。项目汇集了欧洲领先机构和知名半导体公司组成的联盟，各方为开发颠覆性超高电压半导体器件和技术贡献互补的专业知识。总体目标是使欧洲工业界处于能源转型的前沿，与美国和日本的半导体供应链展开竞争。

联盟成员包括：西班牙国家研究委员会 (CSIC, 协调方)、瑞典 Coherent 公司、英国剑桥大学、瑞士日立能源、法国 Deep Concept 公司、德国不来梅大学、瑞士洛桑联邦理工学院 (EPFL) 和法国 SuperGrid 研究所。这些合作伙伴共同覆盖了从材料和器件设计到封装、系统集成的完整产业链。

限——最近才提升至微秒范围——当扩散长度小于漂移区厚度时，这会降低双极型导通的益处。过去十年中少数载流子寿命的峰值也限制了最大漂移区厚度在 100  $\mu\text{m}$  至 200  $\mu\text{m}$  之间，使其最佳性能窗口位于 10kV 至 20kV 之间——这正是我们 FOR<sup>2</sup>ENSICS 项目的目标范围。

## 背面加工难题

为超高电压应用制造 n 型碳化硅 IGBT 并非易事。挑战源于高质量 p 型碳化硅衬底的缺失，以及需要厚的高质量外延层来支持超过 10kV 的阻断电压。近年来，研究人员探索了不同的制造路线，如翻转工艺——这涉及去除 n+ 衬底并在

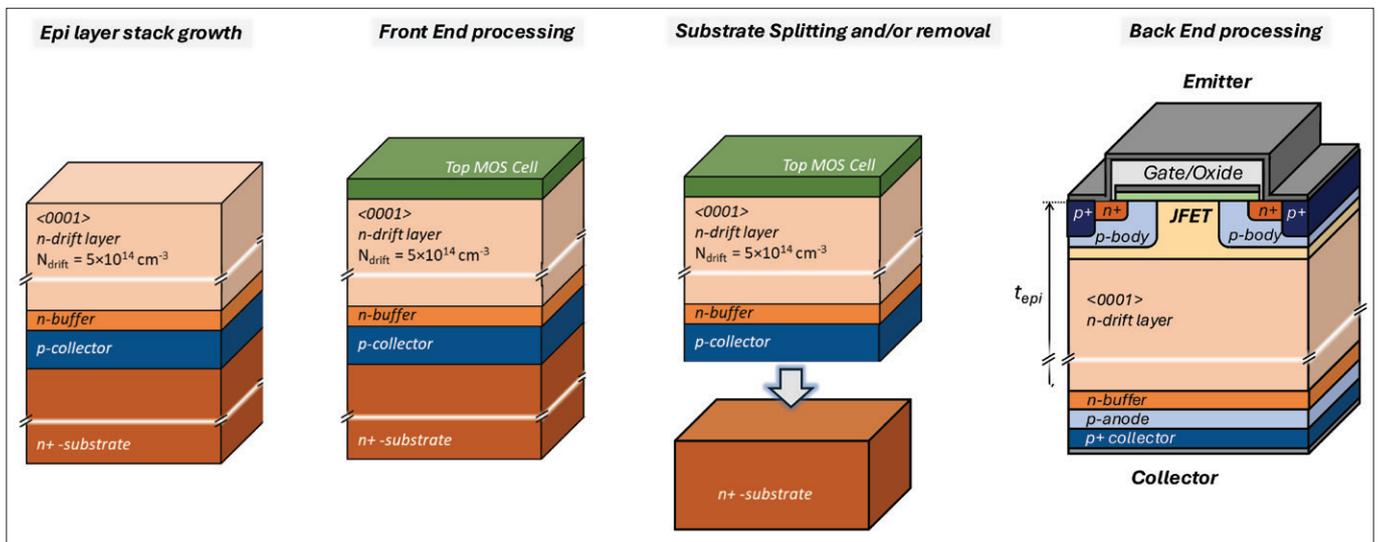


图1: 超高电压碳化硅IGBT制造工艺的流程示意图

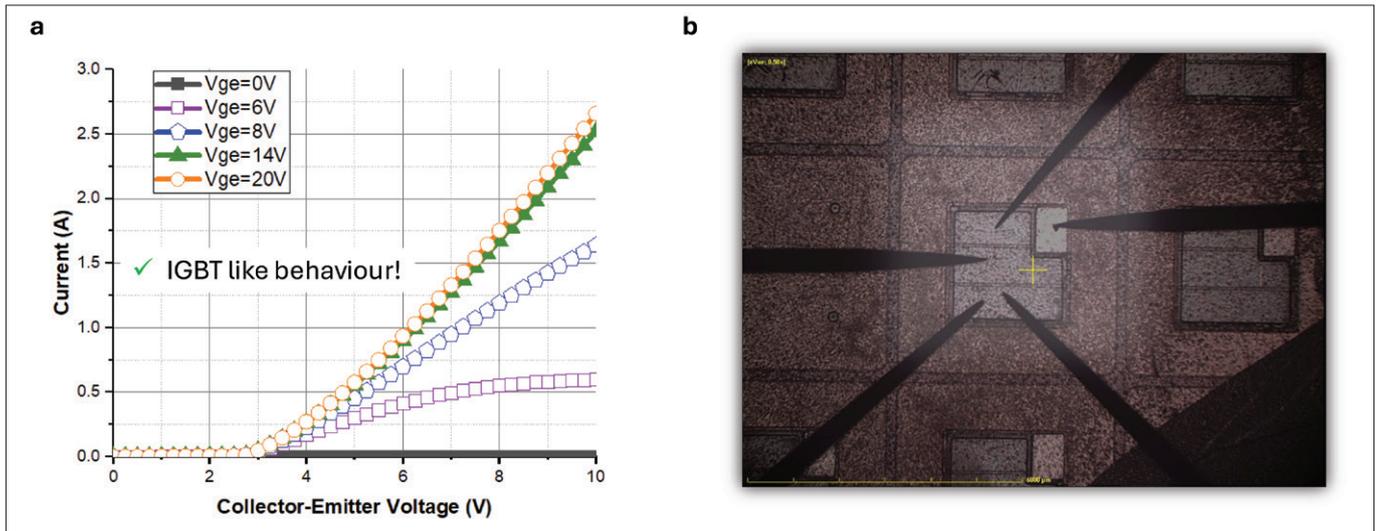


图2: (a) 厚金属沉积前的IGBT特性; (b) 在剑桥大学亨利·罗伊斯高压表征测试平台中进行测试的IGBT显微图像

碳面上形成器件沟道和栅氧化层——同时进行精心的工艺和设计优化。然而，这条有前景的路线尚未产出商用碳化硅 IGBT，主要受限于成本和性能约束（以及机械问题）。

我们的项目正在追求一种更简化的方法，该工艺始终保留厚外延层和衬底。从 n+ 衬底开始，我们的流程包括形成重掺杂 p 型集电极、添加缓冲层、生长外延层，然后制造顶部 MOS 单元。后端加工包括衬底剥离或去除——采用背面研磨、化学机械抛光和刻蚀的组合——以实现衬底再利用（通过 Kabra 切割或类似方法实现的激光切割）或背面接触（见图 1），然后进行背面金属化。

早期试验已交付鼓舞人心的结果，表明我们的方法是一条可行的制造路线。我们的第一批碳化硅 IGBT 器件目前正在测试中，初步结果显示有前景的栅极调制和成功的背面衬底去除（见图 2）。

同时，我们正在生产额定为 3.3kV、10kV 和 15kV 的碳化硅 MOSFET，以在我们的直流 - 直流

转换器双有源桥中与 IGBT 进行基准测试。

由剑桥大学、Coherent、CNM 和日立能源的联盟成员领导这一高电压碳化硅器件制造工作。

### 边缘终端设计

对于额定电压超过 10kV 的超高电压碳化硅器件，采用高效的边缘终端至关重要。能够承受如此电压的传统终端设计往往需要较大的芯片面积——这是在使用必须提供数十安培电流的超过 100 μm 厚外延晶圆时的高成本设计解决方案。目标是在保持稳健阻断性能的同时最小化终端占用面积，并避免对钝化和氧化层完整性造成任何影响。

碳化硅 MOSFET 平台的测试已经证明，边缘终端能够在晶圆级测量期间阻断超过 10kV 电压（见图 3）。我们还开发了用于封装器件的新测试平台，可评估高达 20kV，以及使用专用直流电源在 10kV 以上运行的双脉冲测试系统。下一阶段是在我们 FOR<sup>2</sup>ENSICS 项目的碳化硅 IGBT 晶圆上证明这些终端概念。

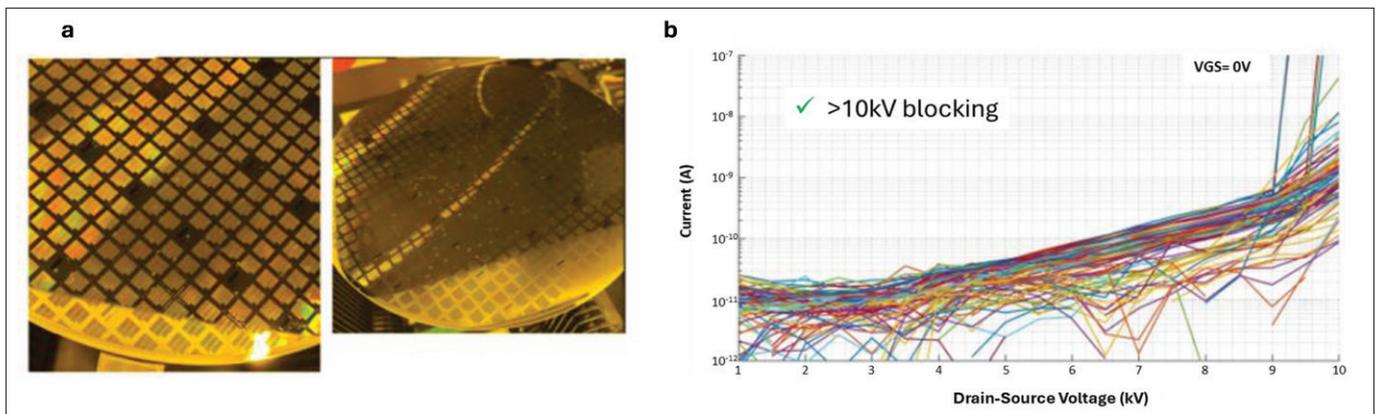


图3: (a) 10kV碳化硅MOSFET晶圆照片; (b) 采用D3终端设计的MOSFET在室温下栅源电压为0V时的晶圆级正向阻断特性

## 封装与可靠性

要释放高电压碳化硅技术的全部潜力，封装必须将电气性能与 15kV 下的长期可靠性相结合。我们的封装设计采用高场钝化和凝胶材料，以在极端电压、温度和湿度下不降低器件性能。该封装支持高电压碳化硅 MOSFET 和 IGBT 的集成(并联或串联连接)，并以碳化硅二极管（二极管模式下的 MOSFET）提供器件制造中所有器件的广泛灵活性。

模块内的 PCB 夹层承载集成无源元件，如栅极驱动电阻、负温度系数传感器和 RC 吸收电路（见图 4 (a)）。由 Deep Concept 和 SuperGrid 研究所领导这项工作。

我们采用了多种标准方法来评估可靠性。它们包括高温反偏测试、时变介电击穿研究以及高湿度、高温和高电压反偏测试。结果证实了我们高电压碳化硅 IGBT 的稳健性。此外，还有一个用于双极型退化研究的多芯片测试平台——能够并行测试多达 16 个器件——现已在不来梅大学投入运行。

## 即将举行的活动和演示器

FOR<sup>2</sup>ENSICS 项目的关键 upcoming 里程碑包括中压直流转换器演示器，采用串联连接的碳化硅 MOSFET。在 2025 年 11 月于里昂 SuperGrid 研究所展示后，基于碳化硅 IGBT 的后续系统演示器将于 2026 年举行，以标志着项目的结束。联盟还将于 2026 年在英国剑桥举办电力半导体暑期学校，旨在通过一系列来自世界各地专家的关于功率器件和电子学的讲座，培养下一代研究人员。项目成果已在 2025 年 11 月于里昂的 ECPE 研讨会上展示。

所有这些活动均欢迎来自 AdvanSiC 和 SiC4GRID 等欧盟姐妹项目的博士生和博士后研究人员参与。这些聚会可以促进欧洲功率半导体社区的知识交流。

## 栅极驱动器与转换器

我们项目的一个主要演示目标是双有源电桥转换器，因其效率和在中压直流应用中的适应性而被选中。首个原型于 2025 年 11 月在里昂

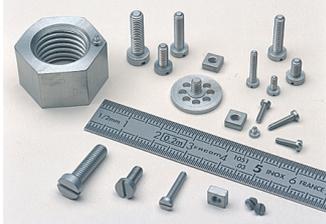


**Large stock of Molybdenum and Tantalum**

**All parts made according to drawings in these materials**

### MICRO-MECHANICS ON STRATEGIC MATERIALS

- In stock for all vacuum and ultra vacuum applications : **Molybdenum and Tantalum screw products** (screws, nuts, rings) « Usable in Clean Rooms »
- In stock for laboratory machines : **Standard substrate support** (Molybloc)  
Dimensions :
  - 1 ½ inches
  - 2 inches
  - 3 inches
 Possibility of substrate support with cavity and washer, on request and according to drawings
- Stock of platens blanks for all types of MBE from various manufacturers.
- « Usable in clean rooms » **Platens and washers** produced according to drawings.







**RABOUTET SA**  
 Avenue Louis Armand • B.P. 31 • 74301 Cluses Cedex FRANCE  
 T. +33 (0)4 50 98 15 18 • info@raboutet.fr  
[www.raboutet.fr](http://www.raboutet.fr)

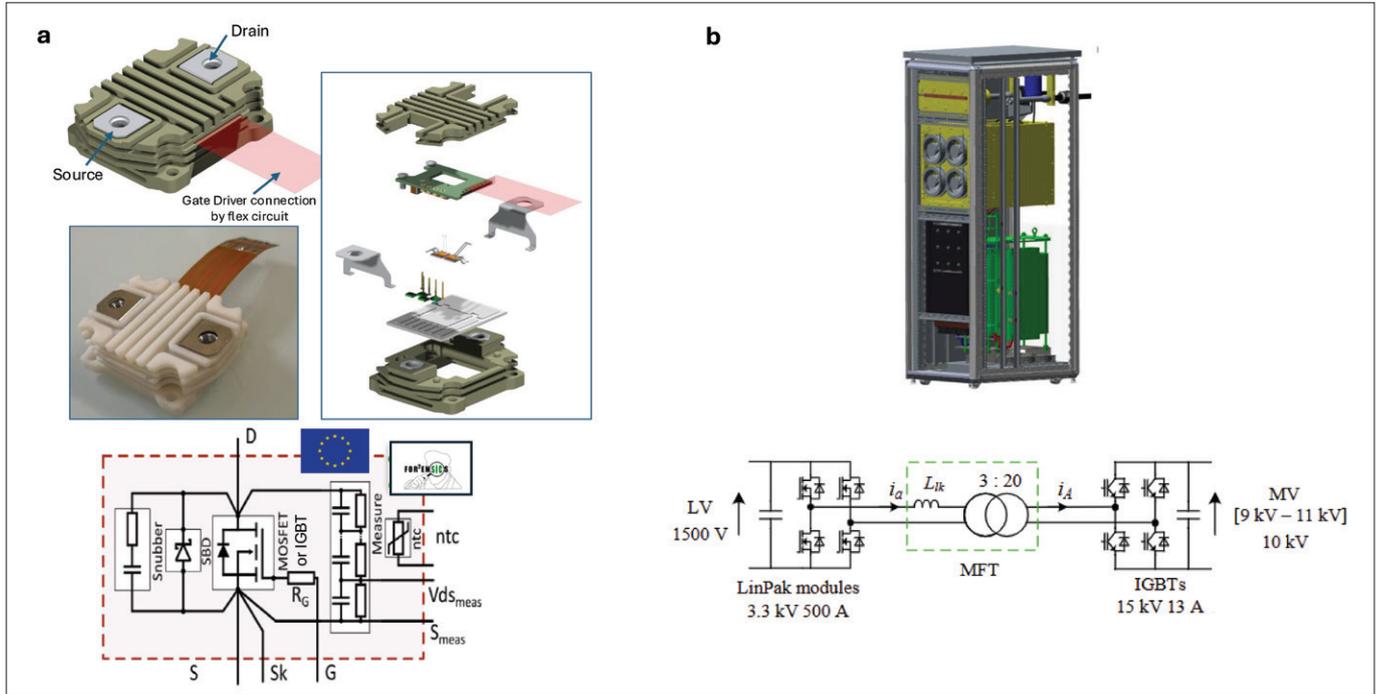


图4: (a) 碳化硅IGBT的超高电压封装概念; (b) 双有源电桥演示器

SuperGrid 研究所展示，采用串联连接的 3.3kV 碳化硅 MOSFET 模块（见图 4 (b)）。该平台作为我们 2026 年后续演示器的基线，将使用本项目的 15kV 碳化硅 IGBT 样品。

我们的单相双有源电桥转换器包含两个全桥——一个连接到低压母线，采用日立能源的 LinPak 碳化硅 MOSFET 设计；另一个连接到通过中频变压器连接的中压母线。转换器受益于能够在数十千赫兹的升高开关频率下运行，因为它不受电网 50/60Hz 的束缚。凭借这种自由度，转换器可以实现更高的功率密度，并由更小的无源元件构成。

转向中压侧的超高电压碳化硅器件也需要先进的栅极驱动器技术。除了将控制信号转换为所需的驱动电平外，驱动器还必须处理短路事件、限制过电压，并采用有源密勒钳位以避免寄生导通。对于串联开关，在静态和动态条件下确保精确的电压共享也至关重要。满足所有这些要求使设计能够集成电压平衡措施和调谐的栅极电阻。由 EPFL 和 SuperGrid 研究所领导这项工作。

我们的双有源电桥转换器特点包括栅极驱动器电源的电流隔离，用于承受高共模瞬变，以及优化的布局以最小化可能损害卓越开关性能的寄生参数。这些设计选择共同确保转换器充分发挥超高电压碳化硅器件的高效率和稳健性，并为在中压直流应用中验证碳化硅 IGBT 提供强大平台。

## 后续步骤

随着项目进入核心阶段，新的 IGBT 器件从工厂产出且封装工作正在进行中，我们的联盟正进入更成熟的发展阶段。我们最近的研究工作集中在进一步改善背面金属化接触电阻和衬底去除，以及开发多芯片封装解决方案——并联连接多达四个器件——以满足最终双有源电桥演示器的更高电流需求。我们还在推进建模和仿真活动，这些工作将帮助提升后续批次中 IGBT 的性能，特别是在电流能力和温度稳定性方面。

在器件和系统层面成功完成概念验证演示，鼓励了我们联盟追求新的想法。它们包括：先进的器件概念，如反向导通碳化硅 IGBT；进一步缩小边缘终端占用面积；采用超高场强钝化材料的新型封装方法；以及随着良品率持续改善而开发更大有源面积。如果您希望保持了解，请在我们的网站和社交媒体上关注项目更新。CS

- FOR<sup>2</sup>ENSICS 已获得欧盟“地平线欧洲”研究与创新计划的资助，资助协议号为 101075672。

## 扩展阅读

- ▶ <https://for2ensics.imb-cnm.csic.es/>  
(FOR2ENSICS 网页)

# 射频等离子体源在宽禁带半导体光电子器件制造中的关键作用

作者：张培宣<sup>1</sup>，郭维<sup>1</sup>，张朱锋<sup>1</sup>，高汉超<sup>1,2</sup>，谢斌平<sup>1,2</sup>

费勉仪器科技（南京）有限公司

费勉仪器科技（上海）有限公司

随着全球能源结构转型进程加速以及高功率、高频电子应用需求的迅速扩张，宽禁带与超宽禁带半导体材料在半导体领域扮演越来越重要的角色。其中，以金刚石、氧化镓 ( $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ )、碳化硅及氮化硼为代表的材料体系，凭借其高击穿场强、优异热导率、高饱和漂移速率和出色的热稳定性等本征优势，在高压电力电子、射频微波器件、深紫外光电探测、量子信息器件及先进封装等前沿领域，展现出巨大的应用潜力与不可替代性。

然而，宽带隙半导体材料的制备工艺和器件工艺长期遭遇关键难题：其强原子键能、高化学惰性以及严苛的外延生长条件，致使传统热外延、物理溅射或化学气相沉积等手段，通常难以达成器件级别的高晶体质量与界面完整性，此外，复杂的表面态也限制了其器件的性能的全面释放。

射频等离子体技术正发挥日益关键的作用。该技术凭借其高能量密度、高反应活性及出色的过程可控性，为突破上述工艺瓶颈提供了有效路

径。特别是在分子束外延、表面清洗以及界面钝化等领域，射频等离子体源能够稳定产生氢、氧、氮等活性粒子，从而实现材料的高质量外延以及表面的高效清洁、缺陷修复、界面优化，显著器件性能。

## 射频等离子体源的原理与技术特征

射频等离子体源通过 13.56 MHz 高频电场激发工作气体（如  $\text{N}_2$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2$ 、Ar）电离，生成包含电子、离子、自由基及中性粒子的高能等离子体。通过调节功率、流量与腔压，可灵活控制粒子能量分布与等离子体密度，实现不同工艺需求下的精确匹配。

RF 等离子体源的主要技术特征包括：

- (1) 高反应活性：能生成高能原子态  $\text{N}^*$ 、 $\text{O}^*$ 、 $\text{H}^*$  等粒子，促进化学反应速率并改善材料表面质量；
- (2) 低温操作与无金属污染：避免高温热裂解导致的衬底热应力，无电极或陶瓷隔离结构有效防止金属杂质污染；

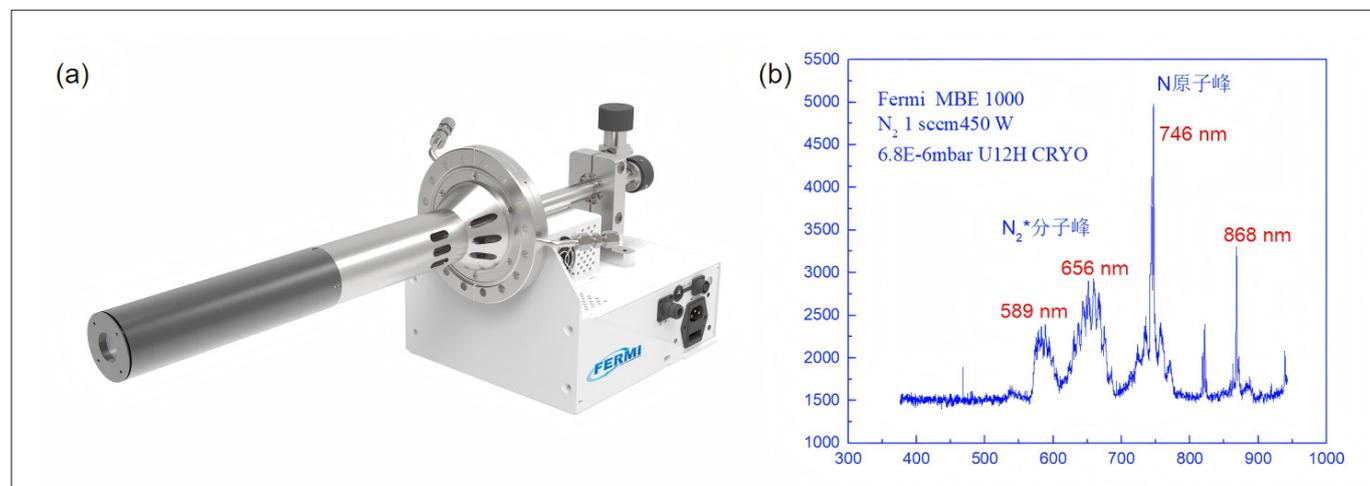


图1：射频等离子体源以及氮射频等离子体源的光谱图



图2: 费勉仪器真空解理镀膜设备LF6P-600

- (3) 均匀性与稳定性优异：电场分布均匀，可在大面积衬底上实现稳定的离子化密度，保证膜层厚度一致性；
- (4) 自动化控制与工艺兼容性强：现代 RF 源具备功率闭环控制与反射抑制功能，兼容 GaAs、InP、GaN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、BN 等多种材料体系，支持 MBE、解理镀膜等多种真空工艺。

这些特性使 RF 等离子体源成为现代半导体器件制备系统中的核心能量与反应单元。

### 射频等离子体源在原子氢清洗中的应用

随着金刚石器件、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 功率电子、SiC-IGBT 高压器件的产业化进程加速，射频等离子体源对于提升半导体界面稳定性、电学可靠性与器件散热性能的影响显得尤为重要。射频等离子

体源通过产生高活性的粒子，能够在不引入机械损伤的前提下，有效去除衬底表面的有机物、氧化物和微颗粒，实现原子级清洁，这为后续高质量的薄膜沉积奠定了至关重要的基础。例如，金刚石在射频氢等离子体作用下，可有效抑制 sp<sup>2</sup> 杂质相，提高外延结构的纯度；Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在射频氧源作用下，可降低氧空位浓度并提升载流子迁移率；SiC-IGBT 的界面氮化可显著降低界面态密度；h-BN 在射频氢等离子体的辅助下，可显著提高其与聚合物的相容性。射频等离子体源通过可控地提供活性粒子通量，实现了安全、低温、高效率的表面清洁过程，已成为高端光电子制造中不可或缺的一环。

### 射频等离子体源在清洗以及镀膜中的应用

激光器在解理形成腔面后，暴露在大气中的晶面极易吸附杂质、形成表面态或发生氧化，导致光吸收增加和反射率不均，从而影响激光器的阈值电流与寿命。在高功率运行时，激光器的输出端面作为整个光腔中能量密度最高的区域，会出现剧烈的温升与光子流轰击效应，极易诱发光致氧化、热应力破裂和光学击穿等器件失效现象，直接影响激光器寿命与可靠性。为抑制上述情况的发生，必须在激光器解理后立即进行钝化镀膜，这样可以减少表面缺陷与吸收中心，降低非辐射复合。在 HEMT 器件的制备过程中，射频等离子体技术可在器件表面原位沉积钝化层（如 BTO、SiN<sub>x</sub> 等）。该过程不仅能封装保护表面，其等离子体中的活性物种还能与表面悬键发生反应，有效钝化界面态、抑制电流崩塌、提升器件击穿电压和射频功率特性，是增强 HEMT 性能与稳定性的关键工艺。射频等离子体源凭借其清洁、改性、沉积的多功能性和工艺可控性，已成为连接高端清洗、精密镀膜与高性能器件钝化不可或缺的技术平台。

费勉仪器提供原子氢清洗和真空解理钝化解决方案，能够实现解理到钝化的全过程射频等离子体技术可在真空条件下实现解理与钝化一体化处理。典型工艺流程包括：

- 1、氢等离子体清洗：利用原子氢去除端面吸附的碳氢残留与氧化层；
- 2、低温等离子体辅助镀膜：在低温条件下沉积高致密度 SiN、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、BTO 等膜层，增强热稳定性与结合力。

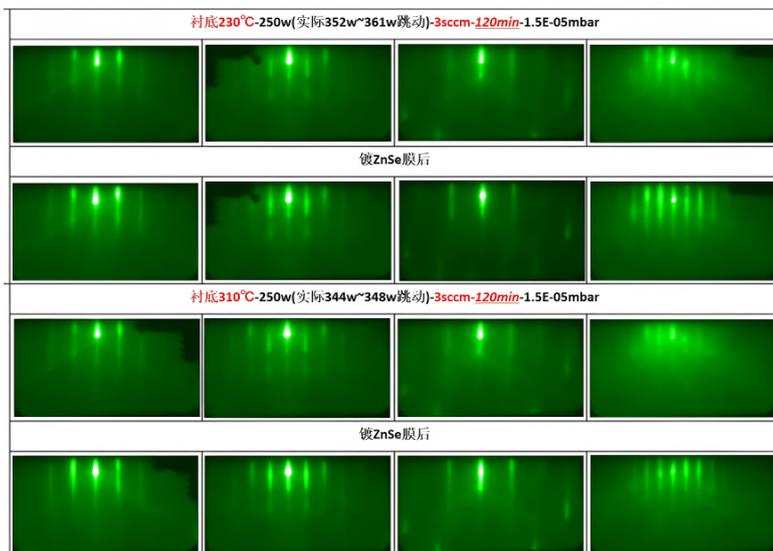


图3: GaAs原子氢清洗以及钝化薄膜的RHEED 图案

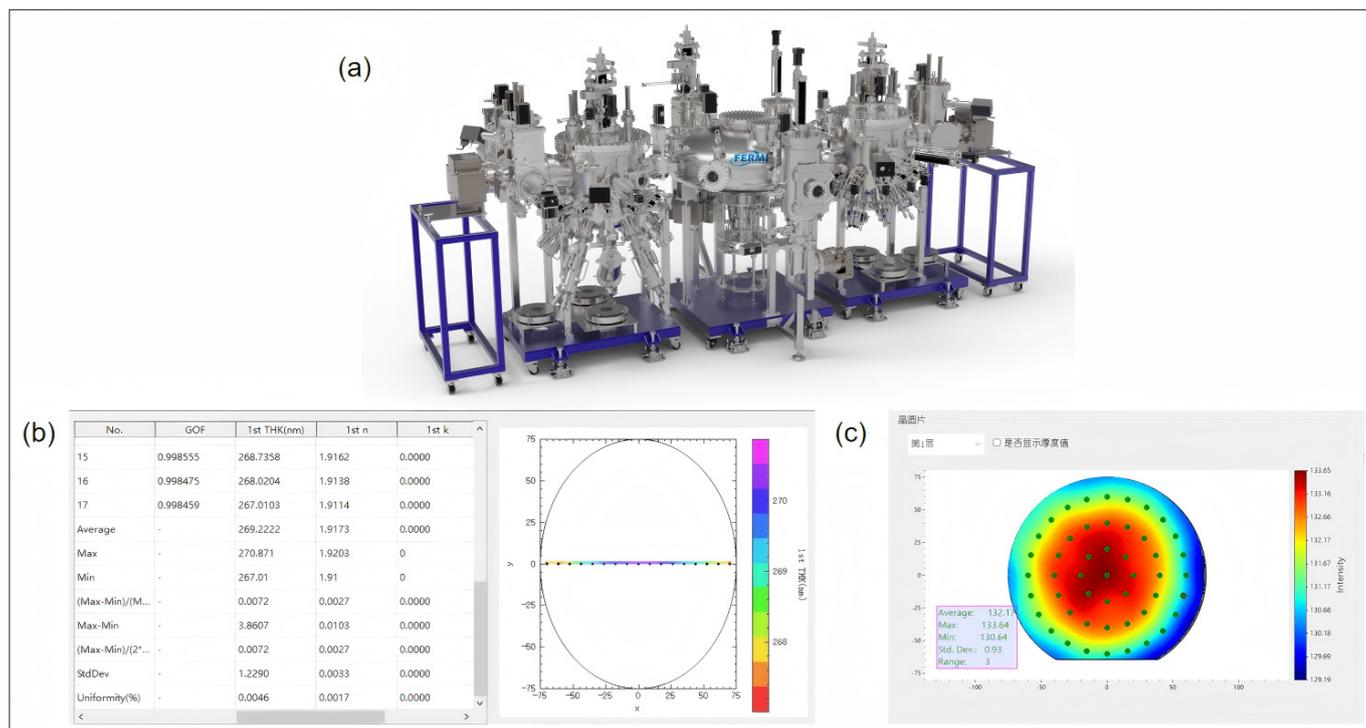


图4: (a) 费勉仪器PAMBE-800cluster系统, (b) Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>厚度不均匀性小于1.5%, (c) GaN厚度不均匀性小于1%。

通过精确控制 RF 功率、气压及时间，可实现温和而高效的界面清洗与钝化。RF 等离子体中粒子能量可控制在 1–10 eV 范围，远低于造成表面溅射损伤的阈值（约 30 eV），保证了器件端面的结构完整性。目前已有多个研究机构的实验证明，射频等离子体技术能有效抑制激光器端面失效，该技术也已被 Lumentum、II-VI、Coherent 等光电子企业广泛采用，实现产业化量产。

### 射频等离子体在分子束外延（MBE）中的应用

MBE 技术能在超高真空中实现原子级外延生长，是制备高纯度半导体结构的核心工艺。然而，氮化物与氧化物体系中，分子 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的惰性严重限制反应速率，而 O<sub>3</sub> 和 NH<sub>3</sub> 属于特气，具有一定的危险性。RF 等离子体源通过电离 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>，生成高活性原子态 N 与 O，可以更好的研究薄膜外延过程中的生长动力学过程。

#### 1. GaN 体系外延

RF-MBE 在 700–800 °C 即可生长高质量 GaN 外延层，显著降低热应力与位错密度。活性氮可以有效填补空位缺陷减少非辐射复合中心，提高量子阱发光效率。该工艺在 GaN 基蓝光激光器、Micro-LED 外延中均展现优越性能。

#### 2. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 体系外延

射频等离子体激发的原子氧为 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 外延提

供高纯氧环境，显著降低氧空位浓度，提高薄膜光响应度与稳定性，促进深紫外探测器与功率器件性能提升。与热氧化相比，RF 辅助外延可在更低温度下实现高结晶度 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜生长，实现更高性能的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 光电子器件。

射频等离子体源以其高能量密度、纯净的反应环境与优异的参数可控性，已成为宽禁带半导体材料（如金刚石、氧化镓、碳化硅、氮化硼等）制备与器件制造中的一项关键共性技术。在工艺层面，它通过高效的表面清洗与活化以及致密薄膜的沉积，显著提升了器件的界面质量、长期可靠性及端面稳定性；在材料生长领域，尤其在分子束外延中，它能够提供高活性的氮、氧原子源，从而有效改善了氮化镓、氧化镓等半导体材料的外延结晶质量。

随着射频电源技术、真空系统设计与智能控制算法的协同进步，射频等离子体技术正朝着集成清洗、活化、沉积乃至外延功能的智能化一体化平台方向发展。展望未来，该技术有望在光电子器件、量子光学系统、深紫外探测及高功率电子等前沿领域发挥更为核心的作用，成为支撑人工智能与第五代移动通信等高端系统所需高性能光通信与功率处理模块的核心驱动力，进而推动半导体制造技术向更程度的自动化与绿色化演进。

# 释放纳米压印光刻的潜力

纳米压印光刻作为一项成熟技术，现已准备好支持 PCSEL 和碳化硅增强现实眼镜的生产

作者：Quantum NIL Corporation的王楠王、林忠祥、李国源；  
鸿海研究院半导体研究中心的郭浩中、谢钦伟、许文正

对于所有类别的半导体器件，其尺寸决定了它们的性能。对于部署在微处理器和射频放大器中的晶体管，栅极长度决定了其性能；而对于激光器，关键特性取决于腔体宽度和孔径。

如今，最积极缩小尺寸的设备是用于每台笔记本电脑、平板电脑、台式机和智能手机中的 IC 里的硅 MOSFET。它们的生产涉及极紫外光刻，可在 300 毫米硅衬底上实现亚 2 纳米线宽的制造。然而，这种推动半导体小型化边界缩放的代价是巨大的挑战，包括异常高昂的制造成本、大量的能源消耗，以及更严格的衬底和材料要求。请注意，这些限制具有广泛的局限性，阻碍了异质材料集成的灵活性，并阻止了跨多样化半导体的成本效益可扩展性。

在该领域产生巨大影响的是 AI 驱动设计方法的快速进步。这导致了高度复杂且准随机设计架构的生成，这些架构优化了系统集成和性能。这些设计可谓是一把双刃剑，在提供卓越效率和功能的同时，却以光刻面临重大挑战为代价——

光刻难以在无需大量工艺调整的情况下适应其复杂性，从而阻碍了它们的使用。

超越硅领域之外，还存在其他需要在非常小尺度上定义尺寸的机会。增强现实 (AR)、先进的 3D 传感和高带宽数据通信 / 电信都需要在器件中集成严格且复杂的纳米图案。同样推动对额外纳米结构制造需求的还有生物技术器件——也称为生物芯片——这类器件往往依赖于在微 / 纳米尺度上的生物相容性材料。

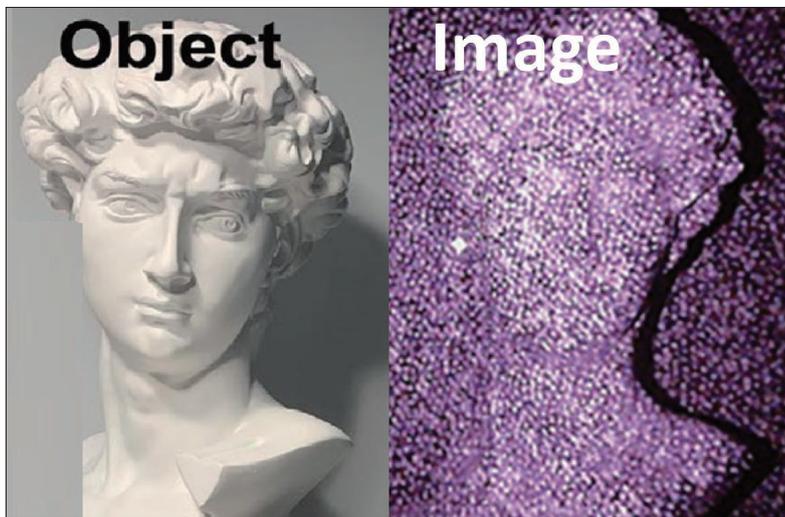
在众多为实现这些目标而竞争的光刻技术中，纳米压印光刻 (NIL) 具有很大前景，有潜力彻底改变纳米技术领域。由于整个工艺的灵活性，NIL 对材料类型和规格不敏感，是生产下一代复杂异质集成器件的一种有能力的制造技术。

NIL 现在是一种成熟的、基于复制的机械工艺。其核心是将图案化模板或模具压入聚合物或抗蚀剂层，以实现图案的转移。由于这种方法，NIL 不受光学限制，是大规模制造纳米结构的有吸引力的选择，因为它避免了多次光学邻近校正需求。此外，它在多个方面优于传统光刻：它不需要昂贵的设备和大量加工，使其成为研究与开发的理想技术；并且与深紫外和极紫外工艺相比，它在类似关键尺寸下消耗的能量和气体要少得多。

用 NIL 定义极小的特征尺寸是可能的。早在 2006 年，该技术就使用由单壁碳纳米管制成的模具，展示了 2 纳米的临界尺寸分辨率。

由于机械图案转移工艺的多功能性，NIL 与极其广泛的材料和衬底兼容——生物聚合物、热固性和光刻胶、金属、塑料、玻璃、化合物半导体、金属氧化物、复合材料和生物功能材料。这份长长的清单包含了许多与硅基半导体设备和工艺不兼容的材料，这凸显了 NIL 的优势之一：它可以

图1: 制作的PCSEL的3D点投影图像



应用于变形模板——例如那些存在翘曲、弯曲或厚度变化大的情况——以及非平面和曲面衬底。

NIL 引起大量关注的一个领域是生物医学，这种光刻形式被视为创建生物功能表面、生物传感器和药物输送系统的有力候选者。NIL 在微/纳米尺度上对生物相容性材料的表面形貌和化学性质的精确控制，使其成为工程生物材料和在分子水平研究细胞相互作用的强大工具。

NIL 还通过推动等离子体学、超材料和量子光子学的进步，在新兴技术中引起广泛关注。这类光刻已被用于创建精确的量子点阵列，量子点可以捕获和操纵单个电子，从而允许创建量子比特——它们是量子计算的关键构建模块。此外，NIL 已用于创建片上集成的纠缠光子对源，这是量子通信和密码学的关键要素。

不幸的是，NIL 的实施仍然存在若干挑战，下面将讨论这些挑战，与最先进的硅基半导体器件相比，这些挑战尤其显著。

这些挑战包括实现大面积（如 300 毫米衬底）上的足够均匀性和可重复性。阻碍成功的因素多种多样，包括压力分布、材料流动动力学和残胶层厚度变化。复杂结构的制作也可能受阻，这些结构可能在 NIL 脱模过程中塌陷或变形。另一个可能影响良率的因素是压印后留下的残胶层厚度，因为这会影响后续工艺。请注意，实现一致的残胶层厚度可能很困难，尤其是对于复杂图案。

虽然 NIL 可应用于许多类别的材料，但仍需考虑材料兼容性。在 NIL 过程中，材料必须流动并贴合压印模具。选择具有所需特性（如低粘度、高保真度和良好的脱模特性）的合适材料可能具有挑战性。另一个需要考虑的因素是，由于 1:1 的工艺比例，制造高质量、无缺陷且具有所需特征尺寸和形状的压印模具可能既昂贵又耗时。这些压印模具必须与衬底精确对准和套刻，以确保图案保真度——任何超出窗口的误对准都可能导致缺陷或图案畸变，尤其是对于多层结构。

最后，与光刻等并行技术不同，NIL 通常是一个串行工艺。这限制了吞吐量，并使 NIL 在保持高分辨率的同时扩大规模进行大规模生产面临挑战。

在 NIL 领域内，已投入大量努力来解决刚才描述的所有挑战。迄今为止的进展亮点包括步进闪光纳米压印光刻技术的发展，以及使用小型无缺陷 NIL 模具的在线或集群工具，这些工具在处

理较大衬底时可提供更好的可重复性。

NIL 的商业应用也取得了重大里程碑，佳能推出了专为制造闪存量身定制的 NIL 系统。这一突破可能为 NIL 在下一代电子和光子器件制造中的部署打开大门。特别是，佳能的技术可用于需要高精度、成本效益图案化的复杂且 AI 优化的架构。

## 弥合差距

我们在 Quantum NIL Corporation (QTNIL) 的团队为 NIL 商业化提供了开创性力量，该公司位于台湾新竹科学园区，并得到鸿海研究院 (HHRI) 半导体研究中心研究人员的支持。我们在这方面的努力为连续的研究和产业进步做出了重要贡献，可追溯至 2007 年，远早于 QTNIL 在 2022 年成立的日期。

我们的关键技术是将 NIL 与传统光刻无缝集成，形成独特的混合 NIL 解决方案，有效弥合这两种技术之间的差距，并使 NIL 能够应用于制造广泛的半导体和光子器件。由于我们的开创性努力，NIL 可应用于多功能化合物半导体器件的微/纳米图案化衬底的大规模生产，包括光子集成电路 (PIC)、高速数据通信激光器和生物医学传感器。

我们公司正是为先进材料工程代工厂提供混合 NIL 工艺流程的专家解决方案提供商。我们已经在提供定制解决方案，以满足行业对先进图案工程技术日益增长的需求。凭借在 NIL 材料、工艺优化、光学对准和设备改造方面的丰富经验，

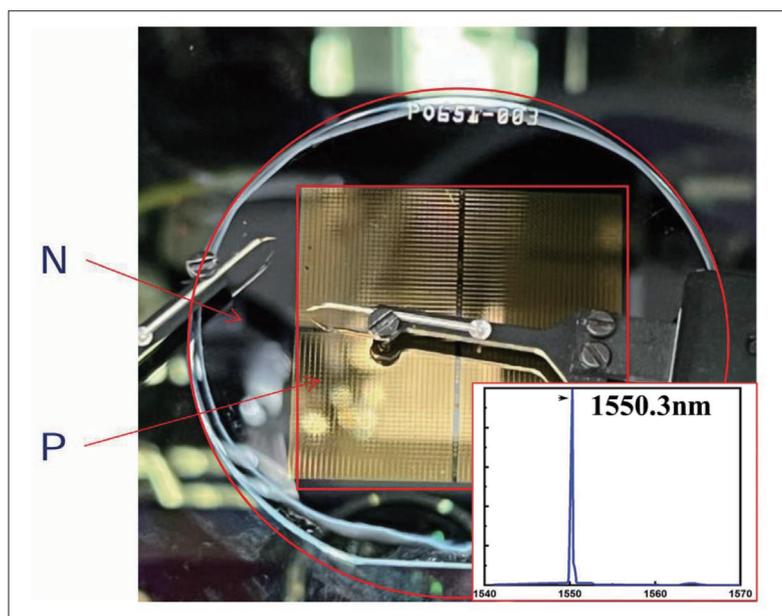
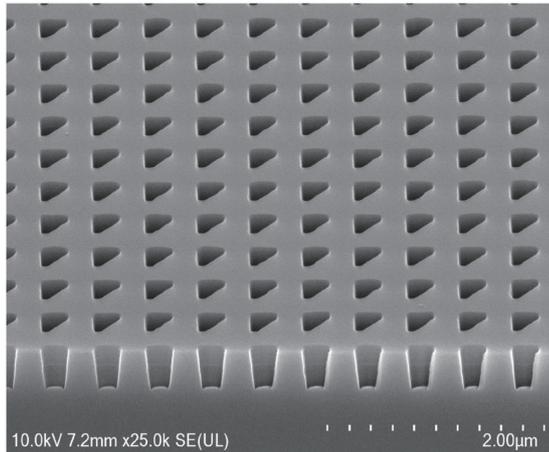


图2：正在经历全面器件预测试的全NIL图案化InP PCSEL晶圆

图3: 使用我们的NIL代工工厂工艺在4英寸InP PCSEL上制作的光子晶体图案的扫描电子显微镜图像



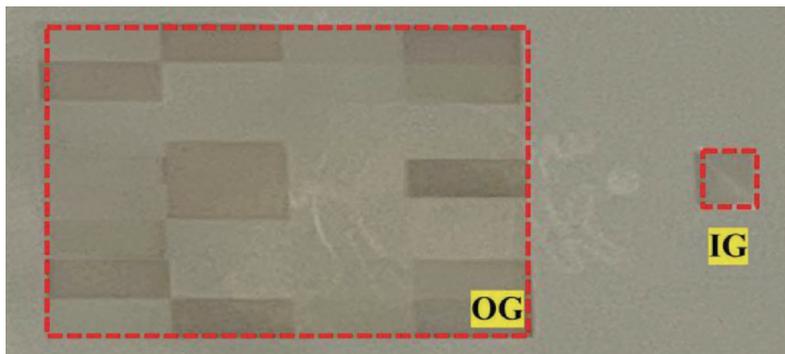
我们的代工厂解决方案与大多数化合物半导体和光学材料都兼容。

我们的关键技术是将 NIL 与传统光刻无缝集成，形成独特的混合 NIL 解决方案，有效弥合这两种技术之间的差距，并使 NIL 能够应用于制造广泛的半导体和光子器件。由于我们的开创性努力，NIL 可应用于多功能化合物半导体器件的微/纳米图案化衬底的大规模生产，包括光子集成电路 (PIC)、高速数据通信激光器和生物医学传感器。

我们公司正将自己定位为专门提供混合 NIL 工艺流程的领先材料工程代工厂。我们已经在提供定制解决方案，以满足行业对先进图案工程技术日益增长的需求。凭借在 NIL 材料、工艺优化、光学对准和设备改造方面的丰富经验，我们的代工厂解决方案与大多数化合物半导体和光学材料兼容。

我们的战略愿景围绕与一级公司和领先研究机构的行业合作扩展，针对数据通信、量子光子学和自主系统中的高价值应用。为了提高我们的竞争力，我们正在通过 AI 驱动优化、机器学习增强的工艺控制以及开发下一代多功能工艺设计套件 (PDK) 来引领 NIL 制造技术的进步。这将简化半导体和光子制造中 NIL 的采用，用于量

图4: 一种具有光波导架构的SiC AR镜片初步类型。IG和OG分别代表输入耦合光栅和输出耦合光栅。



子科学应用，并使我们的公司处于 NIL 商业化的前沿，推动 AI、量子传感、光子学等创新。

### 生产 PCSEL

PCSEL，即光子晶体表面发射激光器，相比现有的激光技术——边发射激光器和 VCSEL，具有优势。PCSEL 的优点包括：能够产生高输出功率的同时垂直发射光；以及尺寸和功率的可扩展性，使该器件适用于高功率应用和长距离探测。

另一个标志性特点是，与传统激光器不同，PCSEL 在保持高输出功率的同时实现单模运转，并具有非常窄的光束发散角。通过对光子晶体的工程化设计，PCSEL 可以实现优异的系统效率、增强的传感分辨率以及紧凑的模块尺寸，使这些器件高度适用于先进应用，如自主导航、长距离光通信和高精度光传感。多集成光子晶体可进一步编程用于 PIC 应用。

2024 年，鸿海研究院 (HHRI) 半导体研究中心展示了一种制造 PCSEL 阵列的新方法，涉及隔离图案的定义（见图 1，该图说明了 PCSEL 阵列在应用于 3D 传感系统时的点投影图像）。与传统 3D 深度传感系统相比，这种新的 PCSEL 系统显示出更高的点投影数量——高出 44%，以及更宽的 158° 视场。这些结果突出了 PCSEL 提供更高传感分辨率、更远探测距离和更好环境适应性的能力，这些都是高精度 3D 传感的关键指标。

我们现在正致力于进一步扩展 PCSEL 的波长，并研究制造这类激光器的可行性（见图 2，正在进行全面器件预测试的全 NIL 图案化 InP PCSEL 晶圆，以及图 3，使用我们的 NIL 代工工厂工艺在 4 英寸 InP PCSEL 晶圆上制作的光子晶体图案的扫描电子显微镜图像）。这些 PCSEL 具有直角三角形图案的光子晶体结构，旨在促进光子行为的非对称方法。

这些 PCSEL 的表征展示了我们代工厂解决方案的优势，该方案能够在任何类型的衬底上直接实现非对称几何结构。这种大规模制造精确光子晶体图案的能力，为 PCSEL 在以下一代汽车激光雷达、高速光通信和 3D 传感等应用中的大规模采用铺平了道路。

2024 年，鸿海研究院 (HHRI) 半导体研究中心展示了一种制造 PCSEL 阵列的新方法，涉及隔离图案的定义（见图 1，该图说明了 PCSEL 阵列在应用于 3D 传感系统时的点投影图像）。与传统

3D 深度传感系统相比，这种新的 PCSEL 系统显示出更高的点投影数量——高出 44%，以及更宽的 158° 视场。这些结果突出了 PCSEL 提供更高传感分辨率、更远探测距离和更好环境适应性的能力，这些都是高精度 3D 传感的关键指标。

### SiC 增强现实镜片

Meta 最近宣布了 Orion AR 增强现实眼镜，利用 SiC 作为核心材料，标志着 AR 显示技术的重大进步。选择 SiC 用于此项任务反映了其卓越的光学特性，包括其高折射率和优异的热导率。

这些优势有助于提升 AR 显示性能，提供更宽的视场、卓越的光学清晰度、更高的耐用性和更好的热稳定性。根据研究，SiC 基 AR 光波导能够实现高达 80° 的视场，显著优于传统高折射率玻璃解决方案，后者通常限制在 40°。

为了利用 SiC 的优势，那些使用这种材料的从业者必须克服其制造挑战。它是一种本质坚硬的材料，这一特性使精密刻蚀和图案化变得复杂。

接受这一挑战，我们正在积极开发用于全彩显示的 SiC 基 AR 镜片，努力方向集中在先进工艺集成和设计适配（见图 4）。

对于这项工作，我们使用了 6 英寸衬底，并考虑了约 2.8 厘米 × 5.5 厘米的 SiC AR 镜片尺寸。通过利用 NIL 和优化的刻蚀技术，我们的目标是在保持其卓越光学性能的同时提高 SiC 的可制造性。我们的成果包括实现增强现实眼镜，利用 SiC 作为核心材料，标志着 AR 显示技术的重大进步。我们的成果包括实现了约 1.5 的 SiC 刻蚀深宽比和约 80 纳米的最小制作尺寸（见图 5）。

我们已展示了使用单波长的初步显示结果（见图 6）。由于光栅的设计复杂性，我们的混合 NIL 解决方案被完全应用于器件和工艺开发。

NIL 现在是一种最有前景的纳米制造技术，可满足积极缩小硅 MOSFET 存储器 / 微处理器以



图6：初步的单波长525纳米显示结果。

及具有亚波长特征的化合物半导体器件的关键需求。这些器件对于推动 AI 和量子计算的进步至关重要。

凭借我们创新的 NIL 解决方案，我们正在推动光学元件制造、量子光子芯片和亚波长结构的边界。随着 NIL 技术的成熟，其在所有类别半导体器件制造中的应用将加速，塑造未来高性能电子和光子学的发展。

作者感谢南安普顿大学的 Martin Charlton 教授在电子束系统能力研究方面的支持，以及 JORJIN Technology Inc. 在 AR 镜片功能方面提供的协助。

### 扩展阅读

- S. Shudo et al. “Nanoimprint performance improvements for high volume semiconductor device manufacturing”, Proc. SPIE 13177, Photomask Japan 2024: XXX Symposium on Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology, 1317708 (2024)
- E. A. Karahan et al. “Deep-learning enabled generalized inverse design of multi-port radio-frequency and sub-terahertz passives and integrated circuits”, Nat. Commun. 15 10734 (2024)
- A.B. Mei et al. “Optimization of quantum-dot qubit fabrication via machine learning”, Appl. Phys. Lett. 118 204001 (2021)
- I.S. Bangroo “The Quest for the Next Generation of Quantum Computing”, Int. J. Sci. Res 6 1452 (2023)
- S. Schofield et al. Roadmap on Atomic-scale Semiconductor Devices, Nano Futures 2025
- W.-C. Hsu et al. “Metasurface- and PCSEL-Based Structured Light for Monocular Depth Perception and Facial Recognition” Nano Lett. 24 1808 (2024)
- B. Nowduri et al. “Nanoimprint lithography-based replication techniques for fabrication of metal and polymer biomimetic nanostructures for biosensor surface functionalization” Nanotechnology 34 165301 (2023)
- L. Xiang et al. “Large-area fabrication of nano-optical structures on a supported lipid bilayer using nanoimprint lithography.” Nano Lett. 12 1919 (2012)

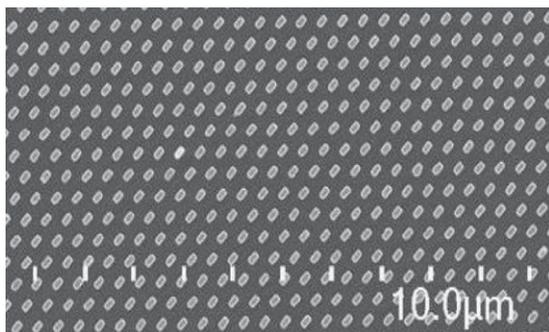


图5：SiC AR镜片输出耦合光栅（OG）组件的扫描电子显微镜图像

# 氨源 MBE 瞄准采用 ScAlN 的 HEMT 器件

通过氨源分子束外延生长的 ScAlN 增强 GaN 基 HEMT，有望改善高频功率器件的性能

作者：YVON CORDIER; M UNIVERSITÉ CÔTE D' AZUR, CNRS-CRHEA

在我们业内，人们投入大量精力开发具有制造更高性能器件潜力的新型材料系统。这项工作通常需要大量开创新领域，但有时考虑在相关领域已取得成功的材料也能获得助力。

多年来，我们重要的收入来源之一是基于 GaAs 的功率放大器 (PA)，其在数十亿部手机射频前端中发挥着关键作用。在手机这一部件中靠近 PA 的另一个关键元件是声波滤波器。多年来它面临的要求变得日益严苛，自 2009 年以来，人们开始关注通过采用钪氮化铝 (ScAlN) 合金来满足这些更严格的要求。这种相对新颖的材料对原有的 AlN 具有吸引力，在原始材料中添加约 20% 至 40% 摩尔分数的钪可实现更大的响应。

近期，由于其宽带隙特性，ScAlN 作为制造电子器件的候选材料开始受到关注，这种三元化合物有望在 GaN 基异质结构中发挥关键作用。这一兴趣往往集中在 HEMT 上，这是一种非常流行的高频电子器件，可基于氮化物家族制造。

与 GaAs 之类的化合物半导体相比，GaN 在制作 HEMT 时具有几个优势。除了临界电场高出十倍——从而提供相应的击穿电压增加——GaN 还具有纤锌矿晶体晶格，产生内部电极化，在表面或该材料与其他化合物的界面处产生电荷。得益于这种无掺杂电荷，在 GaN 和 AlGaIn 等合金的界面上实现了高达  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  的自由电子密度，这超过了典型的 AlGaAs/InGaAs 层形态 HEMT 的五倍以上。

已建立的氮化物的另一个优势是，当 AlN 生长在 GaN 上时，会产生高达  $5 \times 10^{13}$  个电子每平方厘米。然而这种组合的缺点在于铝原子与氮原子之间的自然距离，与镓原子和氮原子之间的距离存在差异。这种失配在晶体晶格内产生相当大的机械应力，阻碍了稳定材料的制造。

由于这个问题，人们对 InAlN 和 ScAlN 等替代合金产生了浓厚兴趣。对于这两种三元化合物，当铝的摩尔分数约为 85% 时，它们在 GaN 上生长时几乎没有应力。

虽然已经投入大量精力研究 InAlN，但 ScAlN 是两者中更有前景的。就电子密度而言，ScAlN 在 GaN 沟道中可达到约  $4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  的值，约为 InAlN 的两倍。高数值受到青睐，因为这有助于在 5nm 至 10nm 的薄膜厚度范围内仍保持超过  $10^{13} \text{ cm}^{-2}$  的载流子密度。这一优势类似于硅 MOSFET 中的氧化物减薄方法，该方法用于限制

短沟道效应——即当将栅极缩小到 100nm 或更小时，会出现漏极电流随栅极偏压调制减弱的现象，缩小栅极可缩短载流子渡越时间并实现数吉赫兹或更高的工作频率。

值得注意的是，与 InAlN 不同，ScAlN 可以是铁电的。这一特性为存储器提供了机会，同时也为 HEMT 阈值电压的编程提供了可能。

### 外延生长的必要性

对于工作频率为几吉赫兹的滤波器制造，溅射可以沉积具有足够化学和结构质量的 ScAlN。但这种薄膜生长形式无法生产具有足够晶体质量和纯度以制造高性能 HEMT 的半导体叠层。因此，异质结构是在单晶衬底（如蓝宝石、硅或 SiC）上外延生长的（见图 1）。

在外延生长技术家族中，等离子体辅助 MBE 制备了第一批 ScAlN 外延层。这种外延形式涉及在高真空下蒸发纯金属原子。由于氮分子非常稳定，该气体通过射频腔体引入生长室，用于产生与金属结合形成 III 族氮化物化合物的自由基。各组分在衬底表面结合，衬底由靠近背面位置的电阻丝辐射加热。

像所有外延技术一样，高质量材料生长需要特定条件。它们包括生长温度，其工作范围由产生氮自由基的条件及其与金属的反应速率决定。GaN 生长的最佳条件依赖于金属与氮的反应以及金属在约 700°C 温度下的再蒸发之间的微妙平衡，导致在表面积聚一层漂浮的镓层。实现这种状态并不容易，因为稍低的温度会导致金属液滴在表面积聚，而较高的温度则会因金属缺乏产生缺陷。生长高质量三元材料层更具挑战性，因为不同金属与氮自由基的反应速率不同，再蒸发速率也不

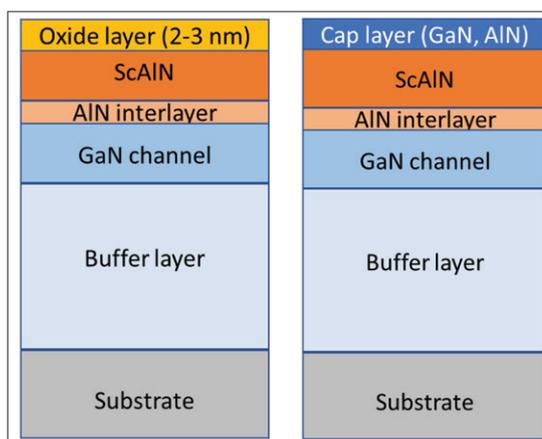


图1：研究中第一代（左）和第二代（右）HEMT的结构示意图横截面

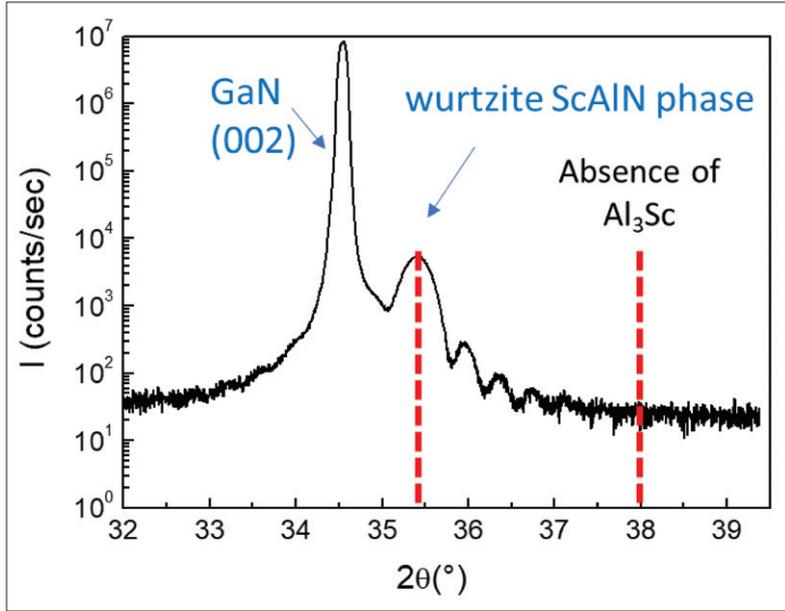


图2: 对通过氨源MBE在GaN/蓝宝石上生长的ScAlN薄膜进行的高分辨率X射线衍射

同。尽管存在这些复杂因素，等离子体辅助 MBE 仍是生长 ScAlN 基 HEMT 最常用的外延技术。

对于氮化物来说，MOCVD 是最广泛采用的生长方法。但它在钪含量有机金属前驱体方面受到限制，这些前驱体的分压不足。虽然新的前驱体正在寻求解决这一问题，但即使在这方面取得成功，仍然面临着在高质量晶体和高纯度材料所需的高温下制造具有尖锐界面的异质结构的挑战。在此背景下，氨源 MBE 具有很大前景，可在约  $800^\circ C$  的温度下实现 GaN 生长，并处于氮过剩的条件下，该条件保证了生长速率和材料特性的易于控制。

采用这种外延技术，我们位于法国 CRHEA 的团队自 20 世纪 90 年代以来一直在开发和改进

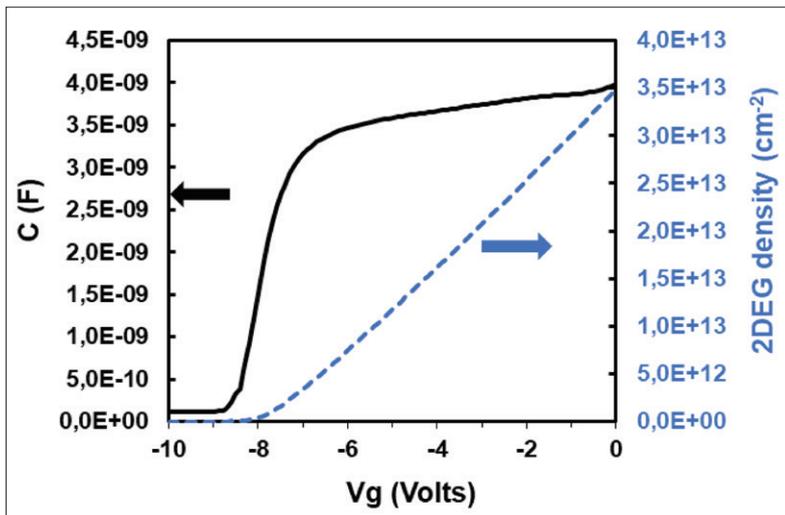


图3: 通过氨源MBE生长的ScAlN/GaN HEMT的电容-电压特性及2DEG中相应的电荷密度

氨源 MBE。通过这种方法，我们借鉴了 MOCVD, 在加热衬底表面热裂解氨。在我们的情况下，温度足够低以限制晶体中的扩散，但足够高以确保生长具有相对较高纯度的平滑薄膜。其他优势包括：氨消耗远低于 MOCVD；该技术生产的未掺杂 GaN 具有足够高的电阻率，可在 HEMT 异质结构上制造功能晶体管；并且由于到达表面的所有钪和铝原子都可以并入晶格，因此便于控制 AlGaIn 等合金的生长。

自本世纪初以来，我们实验室一直使用氨源 MBE 在硅衬底上为射频功率应用生产 AlGaIn/GaN HEMT。通过与 IEMN、苏黎世联邦理工学院、戴姆勒克莱斯勒、泰雷兹和 III-V 实验室等合作伙伴的合作，我们实现了连续波功率密度在 2GHz 下为  $6.6W/mm$ ，在 40GHz 下为  $3.2W/mm$ 。

我们于 2021 年开始研究 ScAlN 的生长。当时，就含钪合金而言，只有 ScGaIn 是通过氨源 MBE 生长的。我们首先关注生长温度的影响，研究得到了法国“未来投资”计划 GaNeX 和欧洲 ECSEL 联合项目 Gallium Nitride for Advanced Power Applications (GANEXGAP) 的资助。

这项研究确定了约  $670^\circ C$  的最佳生长温度窗口，并证明可以在 GaN 上生长具有约 14% 摩尔分数钪的低应变薄膜。在这项工作中，我们的合作者在图尔的 GREMAN 实验室、鲁昂的 GPM 以及意大利卡塔尼亚的 CNR-IMM 研究了薄膜质量，我们还与德国弗莱堡弗劳恩霍夫 IAF 进行了富有成效的讨论。表征迅速揭示了氨源 MBE 用于 ScAlN 合金生长的优势，确定在广泛探索的  $180^\circ C$  生长温度范围内钪含量没有变化，并且可以生长不含金属析出物（如  $Al_3Sc$ ）的均匀随机合金，这些析出物可能困扰等离子体辅助 MBE。

我们通过 X 射线衍射确认了在 GaN/ 蓝宝石上生长的 ScAlN 薄膜的高晶体质量（见图 2）。衍射光谱中的干涉条纹突出了 ScAlN 薄膜表面及其与 GaN 界面的低粗糙度。

为了快速评估我们 HEMT 二维电子气 (2DEG) 中存在的电荷数量（该电荷在 GaN 沟道中形成，位于与 ScAlN 的界面处），我们采用了汞探针电容 - 电压技术。这确定了在具有约 10nm 厚 ScAlN 势垒的 HEMT 异质结构中，载流子浓度在  $3-4 \times 10^{13} cm^{-2}$  范围内。这对高频晶体管来说是非常令人鼓舞的结果。

由于我们的 HEMT 生长在高电阻的缓冲层和

衬底上，我们能够通过涉及涡流的非接触技术确定其输运特性（见图 4）。在这些结果绘图中，虚线代表对应于不同电子迁移率值的计算结果。此外，还有一些使用 Van der Pauw 四探针在这些样品上获得的霍尔效应测量数据。请注意，几乎所有数据都位于两条线之间，对应于电子迁移率分别为  $500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$  和  $1000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。

位于该区域之外的单个结果是针对没有 AlN 中间层生长的 HEMT，由于电子迁移率降低而表现出更高的方块电阻。这一观察结果强调了薄 AlN 层（1-2 nm）在获得具有能量势垒的尖锐界面方面的关键作用，该势垒将 2DEG 限制在 GaN 沟道提供的高电子迁移率区域内，同时不受与界面粗糙度相关的散射影响。

### 关键覆盖层

使用第一代材料，我们制造了具有低栅极泄漏和 2-3 A/mm 漏极电流能力的晶体管。然而，我们发现器件加工过程中缺乏稳定性。我们将此归因于钪易受氧化的影响，这是使用 ScAlN 的一个重大缺点。我们发现，当这种合金表面暴露在空气中时，会自发形成 2-3 nm 厚的氧化层。此外，当浸入光刻胶显影剂中时会发生侵蚀，在器件制造的每个光刻步骤中逐渐减薄膜厚。

为了解决这一问题，我们正在引入覆盖层，在 ScAlN 生长后立即使用薄 AlN 和 GaN 层。根据图 4 所示的数据，覆盖层不会妨碍 2DEG 的输运特性。在势垒层和覆盖层总厚度小于 10 nm 的 HEMT 中，方块电阻低至  $210 \text{ } \Omega/\text{sq}$ 。凭借这些进展，我们在法国里尔的 IEMN 同事已经进行了更稳定的器件加工，实现了基于硅上 ScAlN/GaN HEMT 的、最大振荡频率超过 100 GHz 的短栅极晶体管。

对这些具有 75 nm 栅极的 HEMT 的表征显示，2DEG 载流子密度为  $1.6 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ，迁移率为  $621 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。直流性能评估显示漏极电流密度为 1.35 A/mm，跨导为 284 mS/mm，射频性能评估确定了截止频率为 82 GHz，最大功率增益频率为 112 GHz，表明这些器件是 Ka 波段应用的有前景候选者。

### 下一步工作

我们的努力首次展示了使用氨源 MBE 制造高频 HEMT。在这一基础上，ScAlN/GaN 异质结构可用于功率开关晶体管，只要实现高效的表

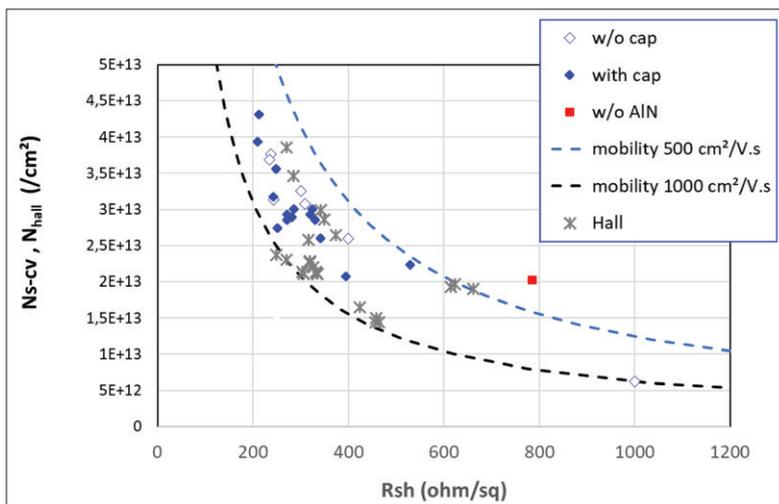


图4：通过氨源MBE生长的ScAlN基HEMT中二维电子气的输运特性

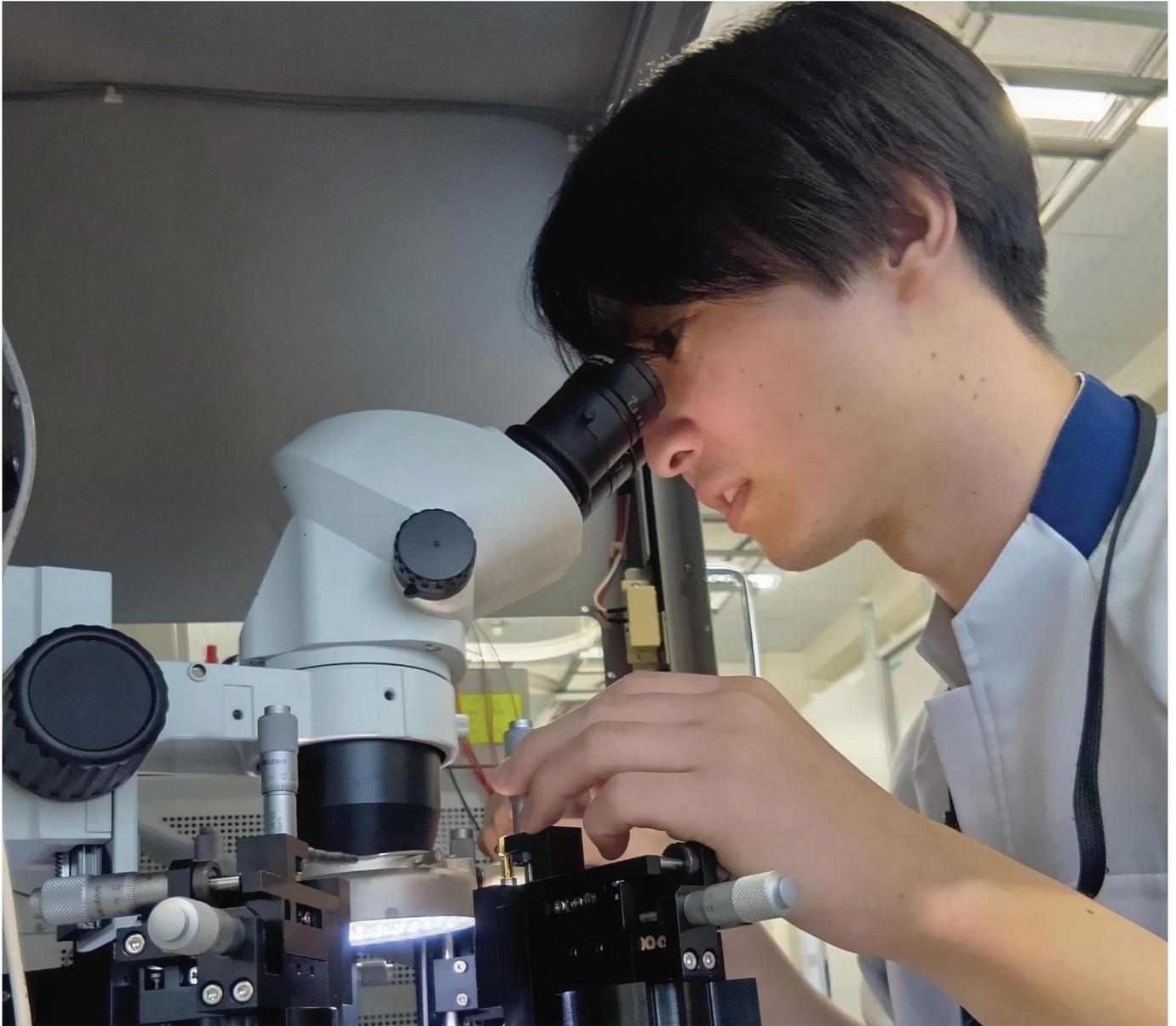
面钝化和保持低泄漏电流，就能受益于低 2DEG 方块电阻。为实现这一目标，我们正在研究原位 SiN 钝化，借鉴我们之前为 AlGaN/GaN 基 HEMT 开发的工艺。

另一条进一步工作的途径是使用外延在其他半导体薄膜或衬底上生长我们的材料系统。这种方法可以使我们更充分地探索由 ScAlN 的压电和铁电特性提供的各种功能，以及更广泛的 ScAl-GaN 化合物。作为这些努力的一部分，在国家项目 TWINS 中，我们正在开发基于声表面波器件和晶体管联合使用的 1-10 GHz 单片压控振荡器。我们还参与了另一个名为 BESAFE 的国家项目，该项目致力于研究铁电存储器。

在我们追求这些项目目标的过程中，可能会产生关于不同共集成材料的特性、可靠性、晶体质量和纯度之间关系的众多问题。可以肯定的是，在我们探索这一全新领域的过程中，前方有令人兴奋的几年。☞

### 扩展阅读

- ▶ C. Elias et al. 'Influence of the temperature on growth by ammonia source molecular beam epitaxy of wurtzite phase ScAlN alloy on GaN' APL Materials 11 031105 (2023)
- ▶ C. Elias et al. 'ScAlN/GaN High Electron Mobility Transistor Heterostructures Grown by Ammonia Source Molecular Beam Epitaxy on Silicon Substrate', Phys. Status Solidi A 2400963 (2025)
- ▶ S. El Whibi et al. 'ScAlN/GaN-on-Si (111) HEMTs for RF applications' Applied Physics Express 18 046501 (2025)



## 利用 $p$ -GaN 屏蔽层提升开关速度

在垂直 GaN-on-GaN 晶体管上增加  $p$ -GaN 屏蔽层可降低电容，并增强大功率、高速开关性能

作者：NAOKI TORII, DAISUKE SHIBATA, MASAHIRO OGAWA, MASAO KAWAGUCHI, HIROYUKI HANDA, NAOHIRO TSURUMI, SATOSHI TAMURA AND YOSHIO OKAYAMA, 松下公司

**功**率电子器件的销售额预计将在整个十年及以后飙升。这一趋势是由电动汽车产量的增加以及数据中心的持续增长所驱动，由于人工智能和机器学习技术的普及，数据中心对电源的要求日益严苛。

对于每一个使用功率电子器件的应用而言，提高效率都是有益的。带来的好处可能包括续航里程增加、电费降低、发热减少以及碳足迹降低。

由于这些卓越效率带来的优势，基于宽禁带半导体的器件正日益受到欢迎。迄今为止，基于 SiC 的器件创造了最多的收入，其中 MOSFET 因成功应用于电动汽车牵引逆变器而登上头条新闻。

然而，尽管取得了巨大成功，SiC 器件仍存在一些重大缺陷。其中包括 SiC 与 SiO<sub>2</sub> 之间的界面，该界面远非理想，导致沟道迁移率低和阈值电压不稳定。

能够避免这些问题的是横向 GaN 晶体管，它已通过主导移动设备快速充电市场实现了可观的销售额。这类器件可生长在低成本的大面积硅衬底上，其优势之一是无需掺杂即可实现高迁移率。相反，器件利用内部极化产生二维电子气 (2DEG)，从而获得高电导率。

这种横向器件是 GaN 晶体管发展的重要里程碑，为智能手机、平板电脑和笔记本电脑等高端快速充电器提供了首个“杀手级”应用。但超越这一应用对于这类横向器件而言绝非易事，因为要在输出电流和击穿电压上达到高值从而提升输出功率极具挑战性。采用这种器件结构时，实现大功率的关键设计考量包括电极面积以及器件表面源漏极之间的间距。

一种非常有前景的前进方向是新的架构，涉及从横向几何结构向垂直几何结构的转变。这种更紧凑的器件由全球多个团队在过去几年中持续研发，其源极和漏极电极位于衬底的两侧，使设计工程师能够在不显著增加芯片面积的情况下按比例提升晶体管的功率。

我们公司松下是垂直 GaN 晶体管的前驱之一。我们开发了一种称为垂直 GaN 结型场效应晶体管 (VJFET) 的高功率变体。该器件采用 *p*-GaN/AlGaN/GaN 再生长工艺制造。

为了使 GaN 器件在系统层面充分发挥其潜力——即助力系统小型化并降低损耗——器件必须具备高速开关能力。这一关键指标由反向传输电容（即栅极与漏极之间的电容）决定，它影响为栅漏电容充电所需的镜像周期。

传统的 VJFET 因栅极和漏极电极相对放置而受限于较高的反向传输电容。但最近我们通过一项突破性的器件改进解决了这一问题：在生长在同质衬底上的常关型 GaN VJFET 上增加 *p*-GaN 屏蔽层（见图 1 的器件结构详情）。

### 仿真研究见解

为了评估和理解该器件的优势与影响，我们对其性能进行了仿真。基准对比器件为结合了常关和低导通电阻特性的传统 VJFET，其采用在 GaN 衬底上再生长 *p*-GaN 栅极 /AlGaN/GaN 的结构。

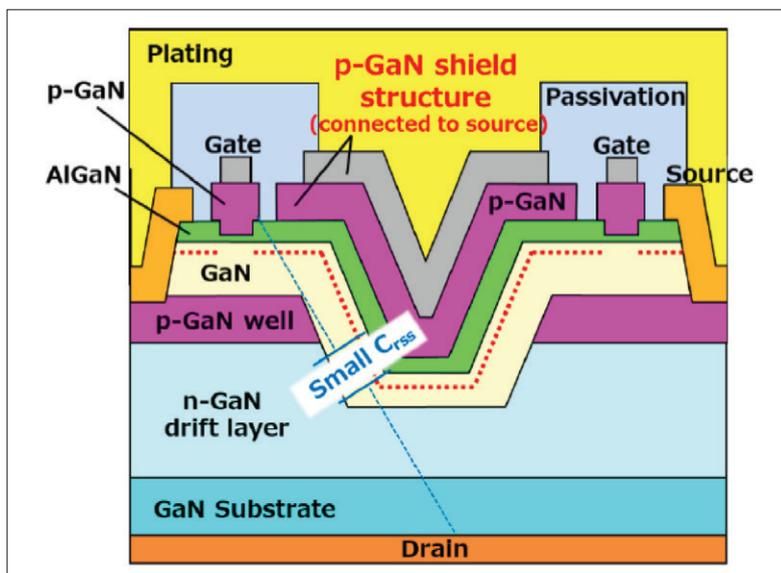


图 1: Panasonic 的垂直 JFET 具有 *p*-GaN 屏蔽结构，由于反向传输电容降低，实现了卓越的开关性能。

我们新型 VJFET 的战略创新在于：在 V 形槽上方引入了与源极同电位的 *p*-GaN 屏蔽层。该器件的栅极在平面侧形成，与 *p*-GaN 屏蔽结构分离。由于 *p*-GaN 阱和 *p*-GaN 屏蔽层有效地屏蔽了栅极与漏极之间，这种设计的反向传输电容远低于传统器件。

对两种 VJFET 的仿真表明，我们改进后的晶体管在宽范围的漏源电压下显著降低了反向传输电容。在高达 500V 的电压范围内，我们器件的反向传输电容远低于 1 皮法，而传统对应器件的值达数十皮法。仿真还显示，缩短 *p* 阱边缘与 *p*-GaN 栅极之间的长度可进一步降低反向传输电容。

我们的仿真还揭示，对于带 *p*-GaN 屏蔽层的 VJFET，AlGaN 势垒层的厚度对常关操作和低导通态电阻有重要影响。通过对该器件建模，我们确定了在栅源电压为 0V 时的导带分布和 2DEG 密度分布。研究表明，在栅极区域，20nm 厚的 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N 势垒层可实现完全耗尽；而在倾斜区域，80nm 厚的 Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>N 势垒层可形成高密度 2DEG 并实现低沟道电阻。

仿真结果进一步显示，V 形槽中的 V 形 *p*-GaN 屏蔽结构不仅大幅降低了反向传输电容，还通过缓解干法刻蚀工艺在 *p*-GaN 阱边缘造成损伤处的电场，抑制了关态漏电流。研究还确定，增加 *p*-GaN 阱底部与 *p*-GaN 屏蔽层底部之间的距离，可通过 *p*-GaN 屏蔽结构对电场的弛豫作用来降低 *p*-GaN 阱边缘的电场强度。然而，这一优势也有代价：随着两者距离增大，*p*-GaN 屏蔽层底部的电场强度会增加。

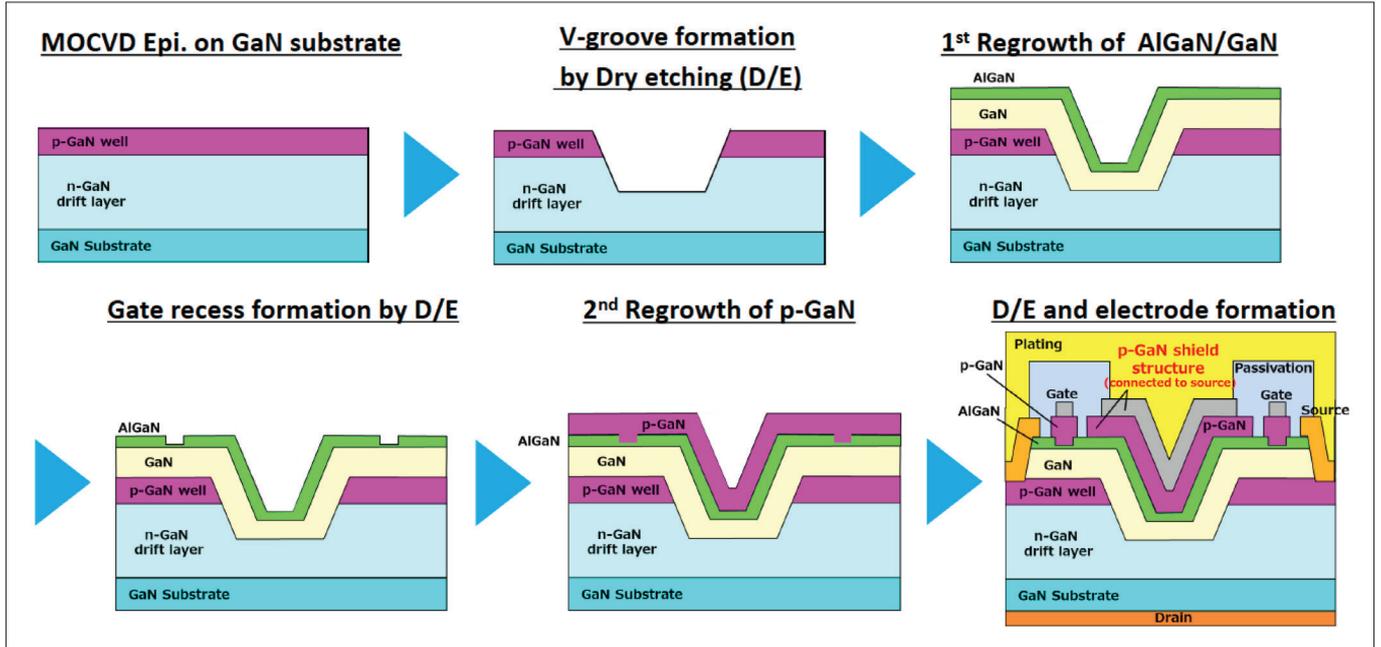


图2: Panasonic制造带p-GaN屏蔽层垂直JFET的工艺流程

基于这些发现，我们得出结论：需要开展实验研究来优化 p-GaN 阱底部与 p-GaN 屏蔽层底部之间的距离，同时实现低关态漏电流。

### 器件制造工艺

制造我们新型 VJFET 的工艺首先将 GaN 体衬底装入 MOCVD 反应腔，沉积 7 μm 厚的硅掺杂 GaN 漂移层（载流子浓度为  $1.3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ），接着沉积镁掺杂 p-GaN 阱层（载流子浓度大于  $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ）。基于此异质结构，阻断电压应超过 900V。

制造工艺的后续步骤包括：在 GaN 外延片上感应耦合等离子体 (ICP) 刻蚀 V 形槽，以及  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  和 GaN 的再生长。我们将  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$

势垒层厚度从 50nm 变化到 80nm，并在栅极下方采用 20nm 的三族氮化物厚度，通过感应耦合等离子体部分去除实现。

为完成 VJFET 的制造，我们增加了 p-GaN 外延层，并选择性地刻蚀该层以形成栅极和 p 屏蔽结构。随后对  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}/\text{GaN}/\text{p-GaN}$  阱进行选择刻蚀以形成源极电极。最终器件采用 Ti/Al 源极电极、Pd/Au 栅极电极、p-GaN 屏蔽电极，以及在 GaN 衬底背面的 Ti/Al/Ti/Pt/Au 电极（见图 2 的制造工艺概述和图 3 的器件扫描电镜图像）。

### 器件表征测试

对我们器件的电学测量（有源区面积为  $0.002 \text{ mm}^2$ ）显示阈值电压为 1.5V。导通电阻随势垒层厚度增加而降低，对于 80nm 厚度，导通

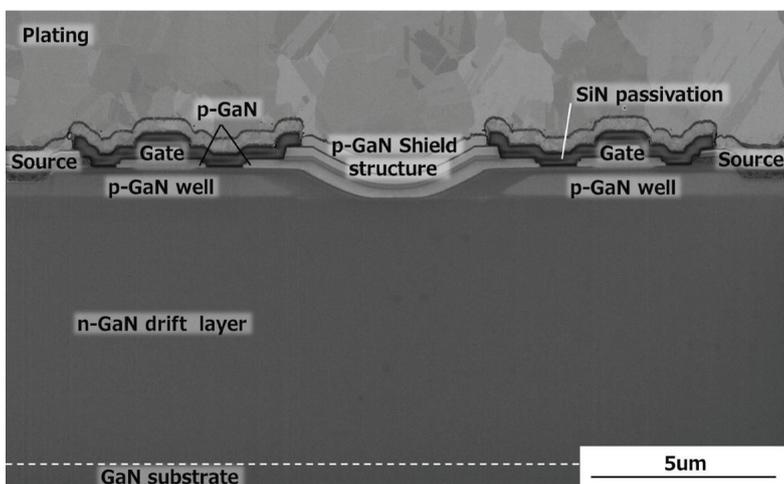


图3: p-GaN屏蔽层垂直JFET的扫描电镜图像

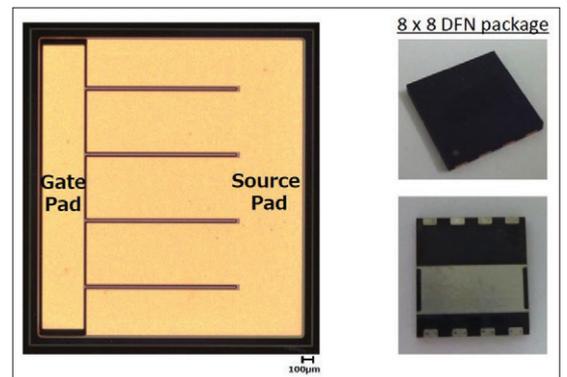


图4: 这款p-GaN屏蔽层垂直JFET专为大电流运行设计，芯片尺寸为 2.9mm × 2.6mm

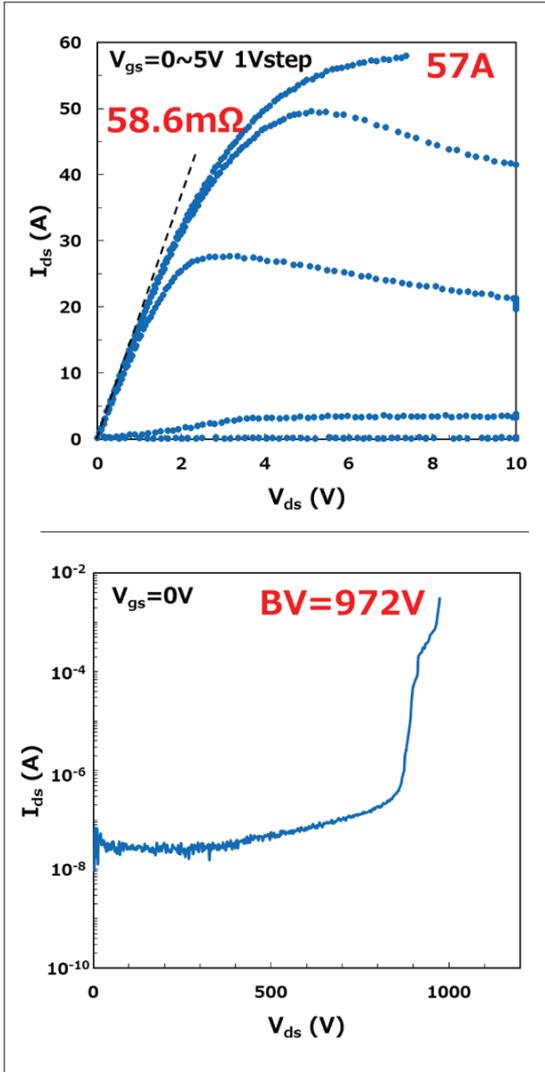


图5: *p*-GaN屏蔽层垂直JFET的导通状态(上)和关断状态(下)直流输出特性

电阻与面积的乘积为  $1.23 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。在不同漏源电压下的关态漏电流曲线显示,当 *p*-GaN 阱底部与 *p*-GaN 屏蔽层底部之间的距离为 200nm 时,漏电流远低于 0nm 或 400nm 的情况。在 200nm 距离时,漏源电压对漏电流影响很小,漏电流约为每平方米数十微安。

我们还评估了一款专为高电流运行设计的  $2.9\text{mm} \times 2.6\text{mm}$  *p* 屏蔽 VJFET (见图 4)。该器件最大漏极电流为 57A, 导通电阻为  $58.6\text{m}\Omega$ , 击穿电压为 972V (见图 5)。令人鼓舞的是,在 500V 漏源电压下,反向传输电容仅为  $2.92\text{pF}$ ——不到传统器件值的八分之一(见图 6)。此外,由于栅极面积减小,输入电容也更低。

我们 *p* 屏蔽 VJFET 的一个关键优值 (FoM)

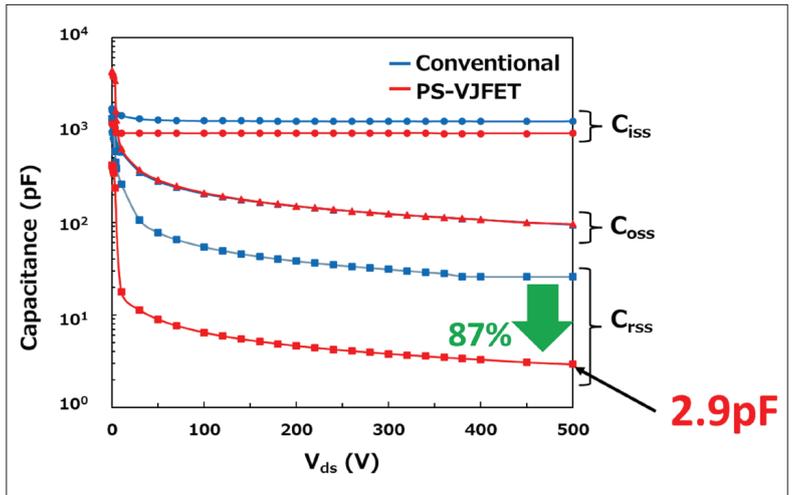


图6: *p*-GaN屏蔽层使反向传输电容大幅降低

是其导通电阻与反向传输电容的乘积。该数值仅为  $171 \text{ m}\Omega \cdot \text{pF}$ , 低于商用的 SiC MOSFET (见图 7)。

我们采用感性负载测试了 *p* 屏蔽 VJFET 在 400V 和 20A 条件下的开关性能。*p* 屏蔽 VJFET 的开通速度为  $76.7 \text{ V/ns}$ , 而传统 VJFET 为  $14.3 \text{ V/ns}$ 。开通损耗相比传统器件降低了 75%。

基于广泛的测试结果,我们可以得出结论:我们新型 VJFET 是服务于需要大功率和高速开关应用的有前景的候选器件。☑

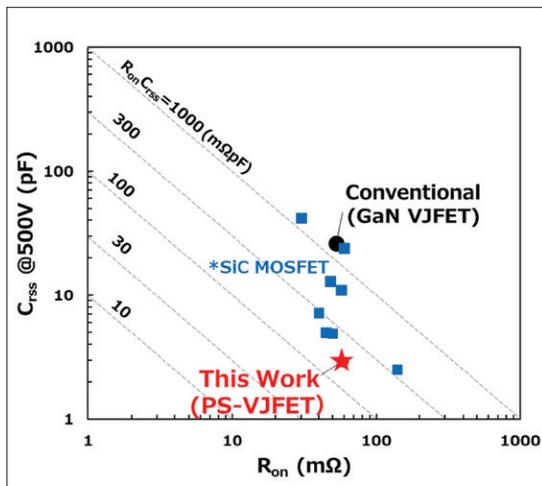


图7: 使用数据手册提供的参数,将Panasonic *p*-GaN屏蔽层垂直JFET与传统器件及650V SiC MOSFET进行基准对比

- 该项工作部分得到了日本环境省“加速实现创新性二氧化碳减排的部件与材料社会应用推广项目”的支持。

# 4H-SiC 晶体低损耗高效率激光剥离技术研究

**摘要：**为降低 SiC 晶锭切割的单片材料损失，实现 SiC 衬底加工单片总材料损失从 280 ~ 300 $\mu\text{m}$  大幅度降低。采用波长 1064 nm 的激光辐照 SiC 晶锭，能量被局域化吸收，瞬间产生极高的温度导致 SiC 单晶发生改质；用外力诱导裂纹产生实现衬底剥离。单晶 SiC 吸收多光子后变成非晶态 Si 和 C，形成 SiC 材料改质层；Si/C 元素含量的 EDS 能谱分析发现在改质层区域 Si 元素重量占比 84%、C 元素重量占比 0.84%，由此说明 C 析出和 Si 富集；裂纹扩展方向沿着解理面 0001 面进行，与晶体物理表面呈 4° 角。工艺优化后，实现 6/8 吋 SiC 衬底单片总材料损失 < 80 $\mu\text{m}$ 。得到结论是 SiC 材料因多光子吸收形成改质层，对改质层厚度和裂纹扩展精准控制，实现 SiC 晶锭低损耗高效率的剥离，降低单片材料成本。

作者：邹兴<sup>#</sup>，胡浩林<sup>#</sup>，许益民，王映德，王启璋，万玉喜<sup>\*</sup>；深圳平湖实验室  
<sup>#</sup>共同第一作者，<sup>\*</sup>通讯作者 wanyuxi@phlab.com.cn

## 1 引言

传统 4H-SiC 衬底制备依赖多线切割技术，该工艺通过高速走线的金刚石线锯和含微米级金刚石颗粒的砂浆对硬脆的 SiC 晶锭进行机械切割。然而，由于 SiC 莫氏硬度高达 9.2-9.5（仅次于金刚石），且具有高脆性与化学稳定性，切割时需施加较大机械张力，导致材料以锯口损失和切割亚表面损伤的形式产生大量损耗：每切割一片厚度约 350 $\mu\text{m}$  的 6 英寸衬底，需多磨削掉 280-300  $\mu\text{m}$  的晶锭材料（损耗率高达 46%），单片切割时间

长达 80/170 分钟（6/8 英寸晶锭）<sup>[1]</sup>。

为突破这一瓶颈，激光剥离技术（原理如图 1 所示）作为一种革命性的晶体加工方法，逐渐成为行业焦点。该技术通过将激光精密加工与可控晶体剥离相结合，利用激光在 SiC 晶锭内部特定深度（通常为距表面数百微米处）扫描，诱导材料发生非线性光学吸收与多物理场耦合效应（如化学键断裂、热致开裂、激光诱导电离等），在晶体内部形成结合力薄弱的“改质层”。随后，通过机械拉伸、超声振动或应力诱导等方式，使晶锭沿改质层精准断裂，剥离出厚度均匀、结构完整的薄层衬底。与传统多线切割相比，激光剥离技术的核心优势在于“低损耗”与“高效率”的协同提升。

激光剥离 4H-SiC 可以显著降低材料损耗。激光剥离理论上可实现近乎“无锯口损失”的切割——深圳平湖实验室的最新研究显示，采用国产全自动化激光剥离系统后，6 英寸 4H-SiC 衬底的单片总损耗从传统切割的平均 280-300  $\mu\text{m}$  降至  $\leq 75 \mu\text{m}$ （降幅超 70%），8 英寸衬底平均损耗  $\leq 80 \mu\text{m}$ ；理论出片数增幅超 40%，大幅提高了高价值 SiC 晶锭的利用率。

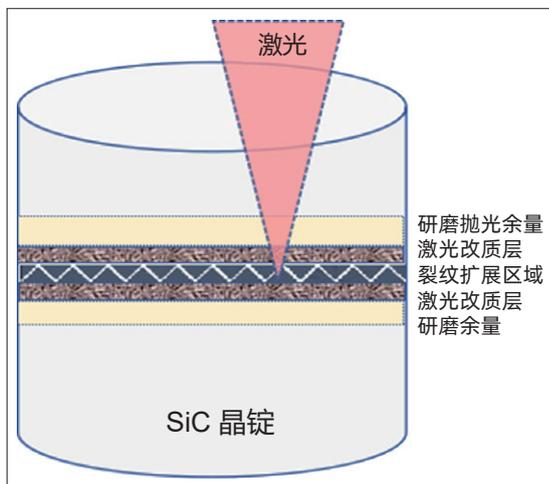


图1：SiC晶体激光剥离原理

深圳平湖实验室从设备到技术实现全方位自主可控，在激光改质机理、改质层深度精准控制及剥离工艺优化等领域持续突破，2025年6月实现单片成本降低约26%，达到国际先进水平，当前4H-SiC激光剥离技术正从实验室走向产业化，成为推动SiC衬底降本提质、加速器件大规模应用的关键引擎。可以预见，该技术的成熟将显著降低4H-SiC器件的制造门槛，为新能源汽车的800V高压平台、光伏逆变器的高效转换及5G通信的高频器件普及提供强有力的材料支撑，助力我国在全球第三代半导体产业竞争中占据战略制高点。

## 2 利用飞秒脉冲激光实现高效率、低损伤的SiC激光剥离的研究

**2.1 实验方法:激光剥离实验过程**(图2所示),具体操作步骤是

1) 对SiC晶锭进行表面研磨抛光处理,确保晶体正反两个面的平行度和激光辐照面的粗糙度 $Ra < 5\text{ nm}$ ;

2) 使用波长1064 nm,飞秒级脉冲宽度,激光重复频率80-400 kHz的超短脉冲激光,在4H-SiC晶片内部聚焦,聚焦深度约为激光辐射面下400-600  $\mu\text{m}$ 平面处,XY载物台吸附晶体后使用滑动方式线性驱动载物台,并控制晶体往复移动,在SiC材料内部形成连续的点状改质区,通过设定激光束能量、脉冲宽度、扫描速度等,最终在SiC晶体材料内部形成整体方向沿SiC晶锭的解理面0001面均匀间隔的改质线;

3) 最后在超声辅助或机械应力作用下使得改质面形成裂纹<sup>[2]</sup>,最终实现SiC衬底片与晶锭成功分离。

在多次的实验过程中,设计正交DOE实验和单因子变量的实验方法进行激光剥离SiC单片材料损耗降低的工艺寻优,经过大量的实验验证和工艺参数的探索和分析论证,最终实现6吋SiC衬底单片平均总材料损耗 $\leq 75\text{ }\mu\text{m}$ ,8吋衬底单片总材料损耗 $\leq 80\text{ }\mu\text{m}$ 的工艺效果。

### 2.2 多光子吸收诱导的SiC晶体内部改质

多光子吸收诱导碳化硅晶体内部改质核心原理是利用超快激光(如皮秒或飞秒激光)通过多光子非线性吸收过程,在材料内部形成改质层,实现非接触式、低损伤的加工。以下从原理、技术优势方面对该技术进行综合分析:

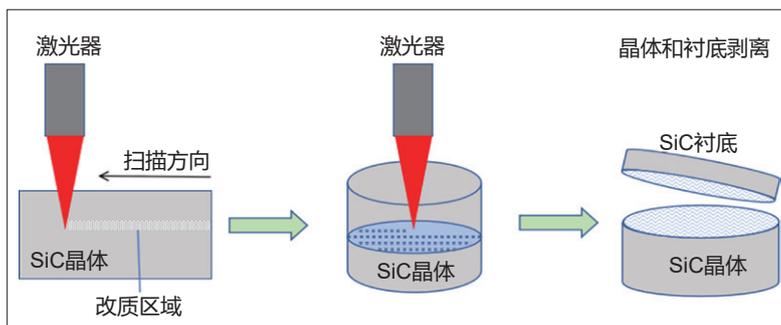


图2: 激光剥离示意图

#### 1) 多光子吸收效应:

SiC是宽禁带半导体(禁带宽度约3.2 eV),对近红外激光(如1064 nm激光光子能量 $1.87 \times 10^{-19}\text{ J}$ (SiC禁带能量 $5.12 \times 10^{-19}\text{ J}$ )在常规条件下需要三光子或三光子以上同时吸收使电子越过带隙,引发电离和化学键断裂。该过程能量转化效率高,几乎不产生热效应,避免材料熔融或热损伤,仅在焦点区域形成改质层(含微裂纹、相变区或折射率变化区)。

#### 2) 改质层的形成与裂纹扩展:

激光聚焦于SiC材料内部,通过“激光垂直改质”技术,在平行于激光传播方向形成损伤层,同时诱发垂直于激光传播方向的裂纹形成。改质层结构包括由热应力或化学键断裂引发裂纹区和裂纹旁边的极小熔融区。

**改质层的形成:**超短脉冲激光(飞秒级)聚焦于碳化硅材料内部,通过光热效应在材料内部形成微裂纹,这一过程中需要精确控制激光能量,避免形成过度的热损伤。碳化硅材料主要发生相变与空洞化,其原理是高能激光导致局部碳化硅非晶化和分解,形成空洞化改质区,改质层深度与激光波长、脉冲宽度等密切相关。

**裂纹扩展控制:**激光剥离通过光子吸收过程实现能量集聚引起内部改质部分体积膨胀,可以大幅扩展裂纹<sup>[3]</sup>。因此,可以入射高脉冲能量的激光,但是随着脉冲能量的提高,改质宽度变粗,纵向改质范围扩大,导致材料损耗增加。根据激光脉冲能量的计算公式: $Q = P/K$ ,Q-脉冲能量,P-激光功率,K-激光重复频率,能够在后续实验过程得到较准确的激光脉冲能量,用于量化研究SiC材料改质的机理。另外在剥离SiC衬底时候需要注意应力场的控制,改质层的微裂纹在机械劈裂时,应力集中效应会引导裂纹沿激光扫描路径扩展,加之 $4^\circ$ 偏轴的衬底需通过激光参数的优化来抑制斜裂纹的过度劈裂现象。

### 2.3 SiC 激光剥离实验结果与讨论

#### 2.3.1 SiC 单晶转化成非晶态 Si/C/SiC

通过激光在 SiC 晶锭表面进行垂直辐照后，在 SiC 晶锭内部聚焦导致 SiC 单晶材料从单晶转变成非晶态。图 3 是激光辐照后 SiC 晶体的截面图的 TEM 照片，显示当激光辐照能量达到 5μJ 时<sup>[4]</sup>，单晶 SiC 吸收激光光子后变成非晶态 Si 和 C 后，形成了 SiC 材料改质层；单晶区（绿色方框内）放大后呈现明显单晶 SiC 的沿 0001 方向的阵列

图；非晶区（红色方框内）放大后，整体形貌呈现非晶态的无序排列；对蓝色方框处进行 EDS 能谱分析，其结果如图 4 所示，区域 1（激光改质区）主要成分是 C 原子重量占比高达 84%，Si 原子只有 0.84%；区域 2（未进行激光改质区）：C 原子重量占比 26%，Si 原子含量 71%；由此说明，激光聚焦区域出现 C 析出和 Si 迁移，Si 原子迁移后在裂纹上面区域又富集，使各自含量发生变化。

具体数据如下页所示：

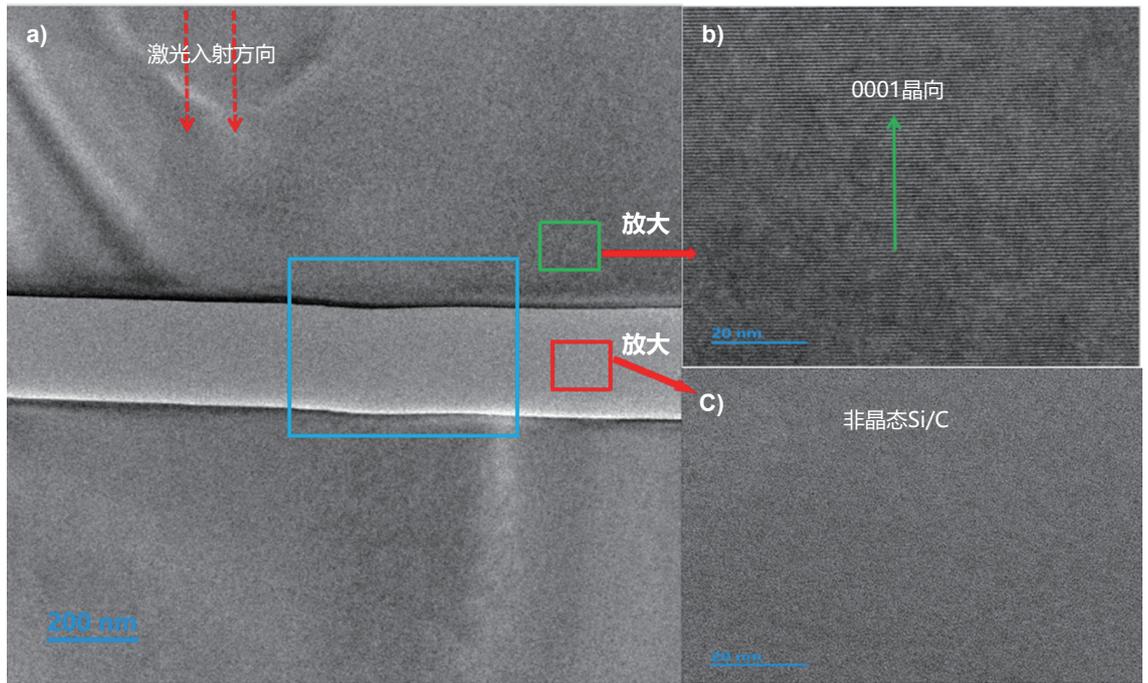


图3：当激光脉冲能量达到Q=5 μJ时，SiC改质后TEM截面图

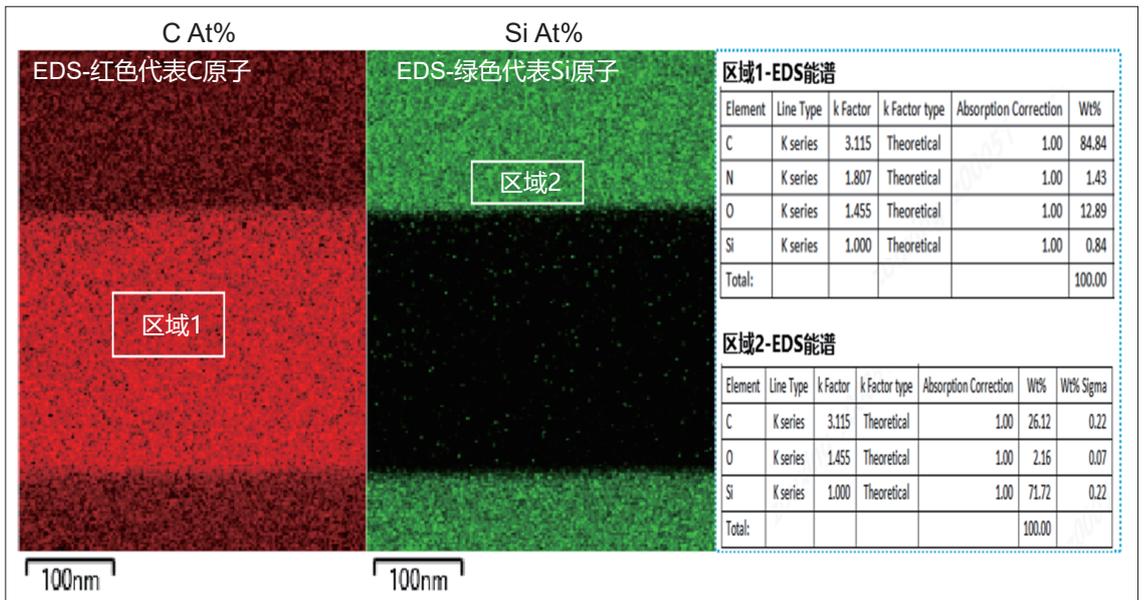


图4：SiC晶体发生改质的EDS能谱图

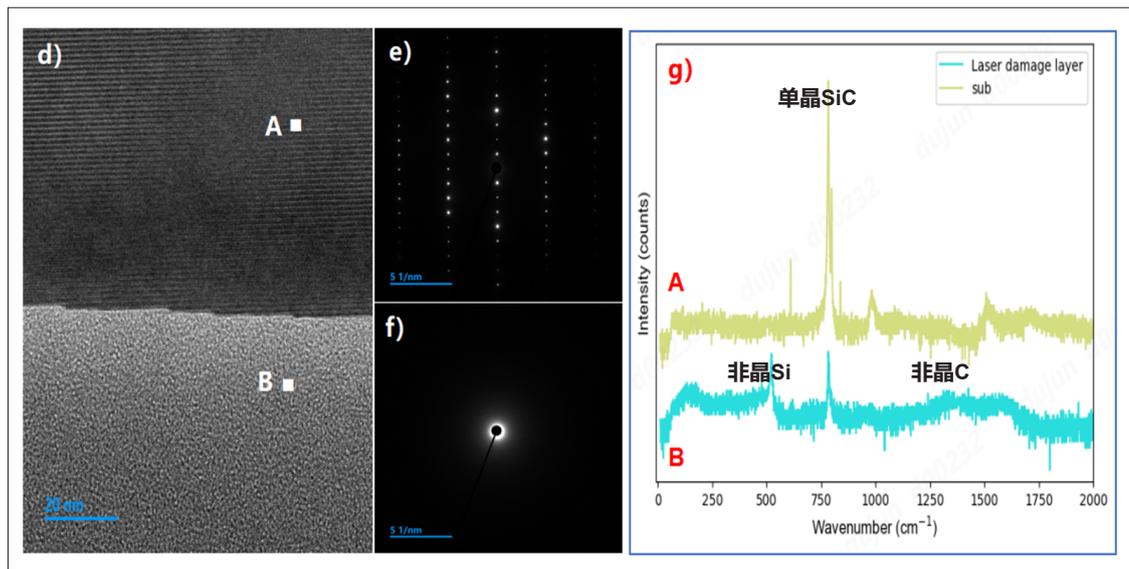


图5: SiC单晶与非晶TEM衍射和拉曼光谱图

为了进一步确认激光辐照后 SiC 单晶转化成非晶态 Si/C/SiC 成分<sup>[5]</sup>, 对图 3 中的单晶与非晶界面进行 TEM 衍射和拉曼光谱检测, 检测结果如图 5 所示: d) 图 A 点 - 激光未改质的 SiC 单晶区域, 图 B 点 - 激光改质后形成的非晶态的区域, e) 图和 f) 图是 TEM 衍射图: e) 对应代表 A 点单晶阵列; f) 对应 B 点非晶态 C/Si/SiC 在 TEM 衍射下的光晕图; g) 图对应 d) 图中 A 点和 B 点检测的拉曼光谱: 黄色拉曼图谱显示,  $777\text{ cm}^{-1}$  附近高强度峰对应单晶 SiC; 蓝色拉曼图谱显示,  $480\text{ cm}^{-1}$  附近指明 B 点形成了非晶 Si,  $1410\text{ cm}^{-1}$  附近形成的宽化峰显示 B 点区域形成非晶态 C<sup>[6-8]</sup>。以上数据进一步证明 SiC 材料在激光辐照后的改质原理。

### 2.3.2 SiC 晶体受激光辐照后裂纹形成和裂纹扩展

通过研究超快脉冲激光对 SiC 晶锭改质层影响, 使用透射电镜分析沿激光扫描方向断裂截面的改质层的形状、截面尺寸、热损伤区域及裂纹(如图 6 所示)。优化激光参数并极小化激光诱导 SiC 改质层厚度和热损伤区域<sup>[9-12]</sup>。通过 TEM、X 射线光电子能谱等分析改质层分离面的形貌变化, 元素组成及相变结构, 优化激光参数并尝试建立单片总材料损耗更低的加工工艺。

图 6 显示 SiC 晶体内部发生裂纹的形成与扩展, 裂纹扩展总体方向沿着解理面 0001 晶面进行。<sup>[13-14]</sup> h) 图呈现激光改质后, 裂纹延伸方向, 如 h 图中的红色虚线所示; i) 图展示裂纹方

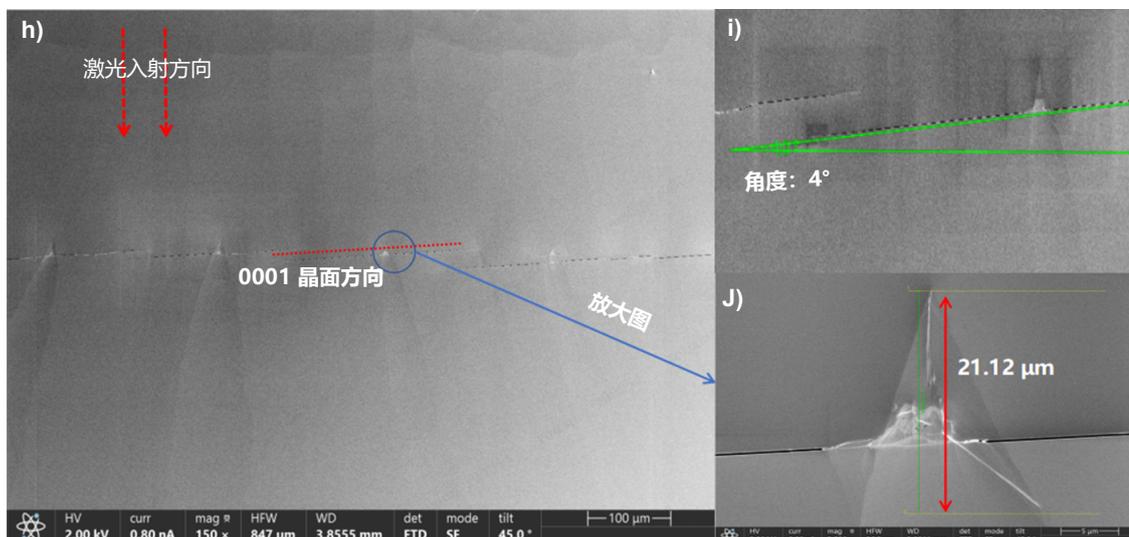


图6: SiC晶体改质后沿激光辐照方向截面的SEM图

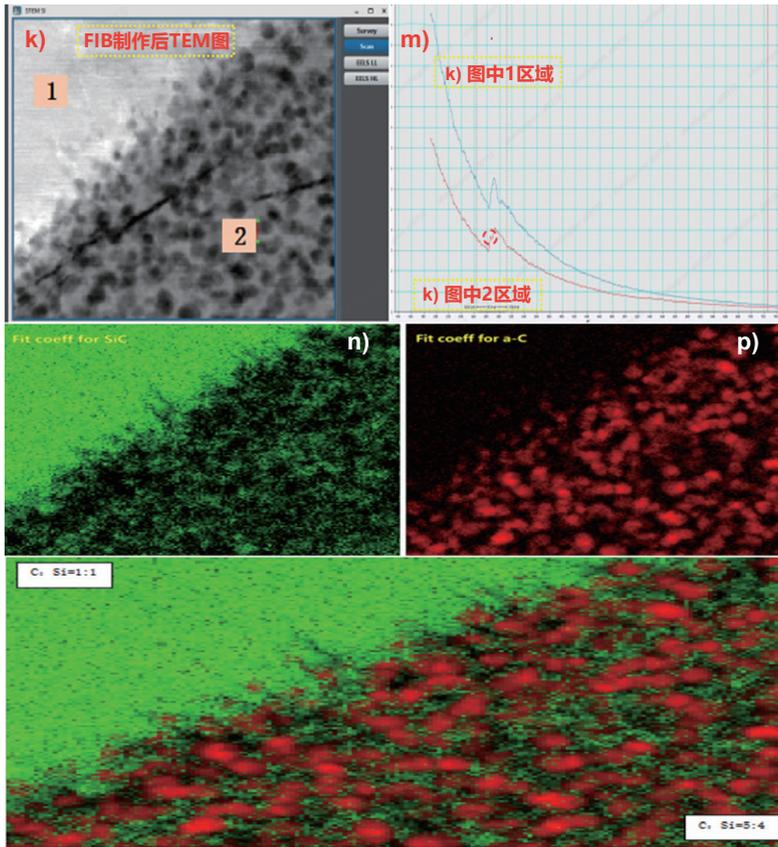


图7: SiC晶体裂纹附近FIB取样后TEM图和电子能量损失谱

向与晶体物理表面（水平方向）成 $4^\circ$ 夹角，即i)图中的绿色锐角所示；J)图显示裂纹扩展沿晶体厚度方向存在较大损伤处的放大图，裂纹高度约 $21.12\ \mu\text{m}$ ，此处说明当前工艺参数下如果4H-SiC晶体0001面偏向11-20面的角度为 $0^\circ$ 时，其单片总材料损失最少为 $21.12\ \mu\text{m}$ ；如果4H-SiC晶体0001面偏向11-20面的角度为 $4^\circ$ 时，由于晶体尺寸的扩大，通过前期实验总结单片总材料损耗一般需要增大到大约3-4倍。

为进一步明确裂纹扩展机制，沿着J)图的中心位置用聚焦离子束（Focused Ion beam，简称FIB）切割制样，然后使用电子能量损失谱EELS（Electron energy loss spectroscopy）分析裂纹附近单晶SiC转变成非晶态C、Si，具体测试结果如图7所示：

图7中k)图是裂纹附件区域TEM图，其中

区域1是单晶SiC未改质区，区域2是吸收激光光子后发生非晶化变化的区域，根据图片中黑白相间的表面形貌判断，该区域可能未发生SiC单晶完全改质。m)图：蓝色曲线对应k)图中所示区域1的电子能量损失谱，曲线上只显示的单一峰表明区域1处只有C原子SP3杂化的 $\omega$ 键，即仅存在单晶SiC；红色曲线所示对应区域2的电子能量损失谱，表明区域2处除SP3杂化的 $\Omega$ 键外，在其左边出现一个小峰（红色虚线圆圈处），代表sp2杂化的形成的大 $\pi$ 键的特征峰，说明无定型C的产生，由此再次明确说明区域2吸收激光光子后，产生非晶态C，同时存在单晶SiC晶体。n)、p)图合成q)图：绿色区域代表SiC单晶、红色区域代表非晶态C原子。激光未改质区域1呈现C:Si比1:1单晶结构；改质区域2，C:Si=5:4，说明该区域由于激光光子能量的吸收促使单晶SiC材料出现C析出现象<sup>[15-16]</sup>。

根据以上的激光剥离实验和相关表征，阐述了单晶SiC晶体使用近红外激光改质的剥离机理，为了更直观的表征单晶碳化硅衬底剥离后的表面形貌，我们采取8 inch 4H-SiC单晶晶体，并使用设定的激光剥离参数进行晶体整面垂直扫描（衬底加工过程如图8所示），得到8 inch SiC衬底。用TEM扫描电镜拍摄其表面形貌如图9所示，表面形貌显示沿激光改质线的垂直方向的平面产生裂纹扩展，且相互延伸交叉后形成了断裂面，最终实现SiC衬底的剥离。

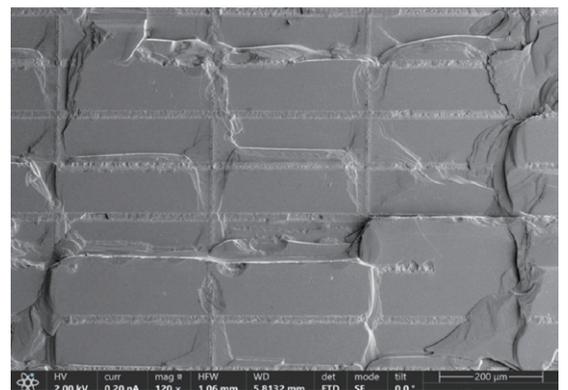


图9: SiC剥离后表面形貌TEM图



图8: SiC衬底激光剥离工艺加工流程

### 2.3.3 SiC 晶圆激光剥离工艺参数分析与优化

#### 工艺参数分析：

**激光能量密度控制：**实验发现，1064 nm 波长激光的阈值能量密度控制在 5-15J/cm<sup>2</sup> 较为合适<sup>[17-21]</sup>，能量低于 5J/cm<sup>2</sup> 导致剥离不充分，超过 15J/cm<sup>2</sup> 则引发微裂纹扩展长度增大较多，导致沿晶体厚度方向损伤厚度较大，影响材料利用率。

**激光光斑形态调节：**激光光斑基本遵循高斯分布，利用光束整形技术，将激光光斑边缘区域能量密度梯度降低一些可有效减少热应力集中，进一步控制材料损失量<sup>[22]</sup>。

**改质层厚度控制：**激光剥离的根本目的在于降低切割时单片材料总损失，为达到材料损失的极优，需要针对 SiC 材料本身特点做具体分析，根据材料的特征确定激光能量、重复频率、聚焦光斑形状、聚焦深度匹配等，以达到我们的切割损失目标。

#### 工艺参数优化：

为进一步优化激光剥离工艺参数，需要从分子动力学模拟理论加深研究<sup>[23]</sup>，但这需要建立在前期大量实验和收集大量数据的基础上，因此制定以下策略。

**短期策略：**建立剥离参数知识库系统，实现激光剥离工艺窗口智能推荐。

**中期策略：**开发 SiC 激光剥离多物理场耦合仿真平台，预测晶体切割质量。

**长期策略：**集成 AI 实时调控系统，达成 SiC 激光剥离实时动态补偿切割<sup>[24]</sup>。

### 2.3.4 激光剥离单片材料损失结果确认

经过多次激光剥离实验和后续研磨、抛光、清洗等工艺后，加工 6/8 英寸衬底各 8 片，统计单片材料损失后如图 10 所示。6 英寸激光剥离 SiC 衬底单片总材料损失：最小值 71 μm，最大值 79 μm，平均损耗 74.98 μm；8 英寸激光剥离 SiC 衬底单片总材料损失：最小值 73 μm，最大值 84 μm，平均损耗 77.13 μm。

统计激光剥离技术用于 SiC 衬底切片效率：实现单片 6 英寸切割时间 ≤ 15 min，单片 8 英寸切割时间 ≤ 20 min，实现激光剥离 SiC 衬底高效率的目的。

## 3 结论

本研究提出使用近红外激光波长 1064 nm 激光聚焦到 4H-SiC 晶圆内部实现 SiC 晶圆低损耗

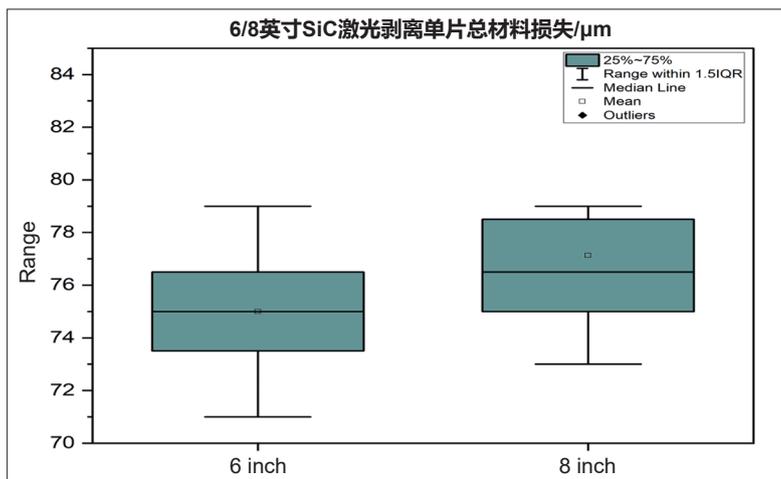


图10: 6/8英寸SiC衬底单片材料总损失统计

高效率的激光剥离方法，旨在将 SiC 晶切割单片总材料损失从 280 ~ 300 μm 降低到 < 80 μm，主要结论如下：

- 1) 当激光辐照能量达到 5 μJ 时，激光聚焦区域出现 C 元素析出和 Si 元素迁移，Si 原子迁移后在裂纹上面区域又富集，TEM、拉曼光谱、能量损失谱表征说明单晶 SiC 吸收激光光子后变成非晶态 Si 和 C 后，形成了 SiC 材料改质层，确认激光能量在 5-15 μJ 比较合适，由此阐明 SiC 激光剥离的改质原理。
- 2) 使用 TEM 分析沿激光扫描方向断裂截面的改质层的形状、截面尺寸、热损伤区域及裂纹，采用 X 射线光电子能谱分析改质层元素组成。表明激光致裂是按照 4H-SiC 的主要解理面 0001 面进行，且裂纹由改质层处产生并沿着 0001 面方向扩展，最终使得相邻改质线产生的裂纹发生交叉，实现衬底剥离。
- 3) 通过激光剥离改质原理和裂纹扩展路径研究，优化激光剥离工艺参数后，实现 SiC 衬底激光剥离单片总材料损失：6 英寸 ≤ 75 μm、8 英寸 ≤ 80 μm；切割时间：6 英寸 ≤ 15 min/pcs、8 英寸 < 20 min/pcs。

#### 致谢 (基金项目)：

本项目资助项目为深圳市科技计划资助 "Shenzhen Science and Technology Program" (KJZD20240903102738050, JCYJ20241202130514019)。

## 扩展阅读

- [1] 胡北辰, 张志耀, 张红梅, 牛奔 .SiC 单晶材料的激光剥离技术研究进展, 电子工艺技术 . 2022 (4) : 192-195.
- [2] Kazuya Hirata, DISCO Corporation. New laser slicing technology named KABRA process enables high speed and high efficiency SiC slicing. Proc. of SPIE VOL.10520, 2018(03):1-6.
- [3] M. Swoboda , R. Rieske, C. Beyer , A. Ullrich , G. Gesell , and J. Richter .Cold Split Kerf-Free Wafering Results for Doped 4H-SiC Boules. Materials Science Forum, 2019(963):10-13.
- [4] Shifei Han, Haijuan Yu, Chaojian He, et al. Laser slicing of 4H-SiC wafers based on picosecond laser-induced micro-explosion via multiphoton processes. Optics and Laser Technology, 2022(154):1-9.
- [5] Yuliang Zhang , Xiaozhu Xie , Yaoan Huang, Wei Hu , Jianguo Long. Internal modified structure of silicon carbide prepared by ultrafast laser for wafer slicing. Ceramics International. Ceramics International, 2023(49): 5249-5260.
- [6] Wenhao Geng, Qinqin Shao, Yan Pei, et al. Slicing of 4H-SiC Wafers Combining Ultrafast Laser Irradiation and Bandgap-Selective Photo-Electrochemical Exfoliation. Advanced Materials Interfaces, 2023(10):1-7.
- [7] Daniel Day, Min Gu. Effects of refractive-index mismatch on three-dimensional optical data-storage density in a two-photon bleaching Polymer. Applied Optics, 1998(37):6299-6304.
- [8] Fu Liu , Jing Xu , Siyuan Yan , Yubiao Zhou , Yi Zhang. Mechanism and regulation of thermal damage on picosecond laser modification dicing of SiC wafer. Chemical Engineering Journal, 2024(493):1-11.
- [9] Y. YAMADA, Y. KANEKO, R. AOKI, J. IKENO and S. SUZUKI. Laser cutting out Process for semiconductor crystal material applying laser slicing method. J. Jpn. Soc. Precis. Eng. 2017(83):375-379.
- [10] E. OHMURA, F. FUKUYO, K. FUKUMITSU and H. MORITA. Internal modified-layer formation mechanism into silicon with nano second laser. J. Achievement Materials Manufacturing Eng. 2006(17):381-386.
- [11] S. TOTH, P. NEMETH, P. RACZ, L. HIMICS, P. DOMBI and M. KOOS. Silicon carbide nanocrystals produced by femtosecond laser pulses. Diamond & Related Materials. 2018(81):96-102.
- [12] R. ZHANG, C. HUANG, J. WANG, H. ZHU, P. YAO and S. FENG. Micromachining of 4H-SiC femtosecond laser. Ceramics International. 2018(44):1775-1778.
- [13] 山田洋平, 小松崎伶美, 菊池拓, 池野顺一 .SiC 精密レーザースライスで, Precision laser slicing technology for single crystal SiC wafer. 砥粒加工学会誌, 2023 (67) : 32-37.
- [14] L. ANG, C. ZHANG, F. LIU, H. ZHENG and G. CHENG. Process mechanism of ultrafast laser multi-focal-scribing for ultrafine and efficient stealth dicing of SiC wafers. Applied Physics A. 2022: Published online.
- [15] M. YAMAMOTO, M. DEKI, T. TAKAHASHI, T. TOMITA, T. OKADA, S. MATSUO, S. HASHIMOTO, M. YAMAGUCHI, K. NAKAGAWA, N. UEHARA and M. KAMANO. Raman spectroscopic stress evaluation of femtosecond-laser modified region inside 4H-SiC. Applied Physics Express. 2010(3)016603.
- [16] K. HIRATA, R. YAMAMOTO, Y. NISHINO, N. MURAZAWA and K. TAKAHASHI. New laser slicing technology of SiC ingot-development of KABRA process. J. Jpn. Soc. Precis. Eng. 2017(83):829-832;
- [17] E. KIM, Y. SHIMOTSUMA, M. SAKAKURA and K. MIURA. 4H-SiC wafer slicing by using femtosecond laser double pulses. Optical Materials Express. 2017(7): 2450- 2452.
- [18] Y. MADA, J. IKENO, and H. SUZUKI. Precision slicing of single crystal silicon using laser slicing technology. J. Jpn. Soc. Precis. Eng. 2019(85):419-422.
- [19] Y. MADA, J. IKENO, H. SUZUKI and H. NOGUCHI, Thinning technology of MgO substrate for diamond growth by laser slicing. Transactions of the JSME. 2021(87):21-22.
- [20] Y. MADA, T. YKEDA, and J. IKENO. Precision laser slicing technology for single crystal SiC wafer 1st report: Study on slicing method considering Kerf-loss. J. Jpn. Soc. Abras. Technol. 2020(64):635-638.
- [21] Y. MADA, T. YKEDA, and J. IKENO. Precision laser slicing technology for single crystal SiC wafer 2nd report: relationship between laser scanning direction and cleavage. J. Jpn. Soc. Abras. Technol. 2021(65):549-555.
- [22] K. Liao, W. Wang, X. Mei, B. Liu, High Quality Full Ablation Cutting and Stealth Dicing of Silica Glass Using Picosecond Laser Bessel Beam with Burst Mode, Ceram. Int. 2022(48) 9805–9816.
- [23] Z. Ning, Y. Lian, L. Jiang, J. Sun, S. Wu, F. Wang, Femtosecond Laser-Induced Anisotropic Structure and Nonlinear Optical Response of Yttria-Stabilized Zirconia Single Crystals with Different Planes, ACS Appl. Mater. Interfaces 2022(14): 39591–39600.
- [24] C. Dutto, E. Fogarassy, D. Mathiot, Numerical and Experimental Analysis of Pulsed Excimer Laser Processing of Silicon Carbide, Appl. Surf. Sci. 2001(184):362–366.

# 掌握带 AlN 缓冲层的 HEMT 制造技术

射频网络的性能有望受益于 150mm GaN 代工工艺制造的 AlN/GaN HEMTs，其采用 AlN 缓冲层

一个美国合作团队正朝着实现基于 SiC 衬底、采用 AlN 缓冲层的 AlN/GaN HEMT 的商用化目标取得巨大进展。

Soctera 与 Qorvo 的合作团队正大力推动 AlN/GaN HEMTs 的商业化进程。这类器件在 SiC 衬底上生长，采用 AlN 缓冲层，具备在高频下提供更高输出功率的能力，成为实现吉赫兹频率更快通信的有力候选者。

然而，迄今为止，AlN/GaN HEMTs 的演示多由学术实验室完成，且仅涉及小尺寸样品。

Soctera 与 Qorvo 合作，使用 150mm GaN 代工工艺，在 SiC 衬底上制造出具有 AlN 缓冲层和超薄势垒的 AlN/GaN HEMTs。这些晶体管具备多项优异特性，为 Soctera 年底开始提供裸片 HEMT 样品奠定基础。

Soctera 联合创始人兼 CTO Reet Chaudhuri 表示，其公司贡献了外延层设计和 HEMT 结构在 SiC 上的外延生长。

“Qorvo 使用 Soctera 的外延片进行器件制造，利用其 150nm RF GaN 技术专长，展现了推动 AlN/GaN/AlN 技术成熟度的强有力合作。”

金属极性异质结构的制造始于将 100mm SiC 衬底加载入 MOCVD 反应器，生长 AlN 缓冲层、厚度小于 200nm 的 GaN 沟道层以及 3nm 厚的 AlN 势垒层。这些层均未故意掺杂。由于 GaN 沟道部分弛豫，该异质结构不太可能为赝晶结构。

电气测量显示，二维电子气 (2DEG) 密度

为  $1.26 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ，迁移率为  $1248 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，薄层电阻为  $442 \Omega/\square$ 。整个外延片的薄层电阻变化仅为 1.5%，显示出高度均匀性，为电子器件提供了良好基础。

团队将外延片加工成栅长为 150nm 的 HEMT，源极和漏极采用二次外延 GaN 接触，栅极为电子束光刻定义的肖特基栅。

HEMT 的特性包括：欧姆接触电阻为  $0.09 \Omega\cdot\text{mm}$ ，开关比约为  $10^6$ ，峰值跨导为  $643 \text{mS/mm}$ ，正常导通行为，夹断电压约为 -2V（定义为漏极电流为  $1 \text{mA/mm}$  时的栅压）。

在 20V 漏源电压下应力测试 1 小时后，漏极电流永久下降 10%。大信号放大评估显示，功率附加效率为 32%，输出功率密度为  $2.68 \text{W/mm}$ 。

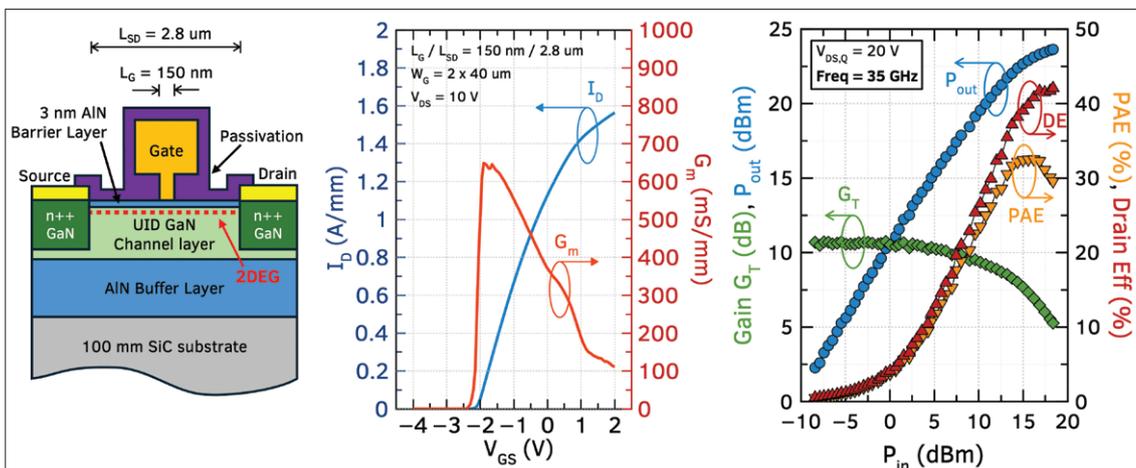
他强调，这些 HEMT 具有超低接触电阻和极高跨导，为构建毫米波功率放大器提供了极佳基础。

“要将这些指标转化为 Ka 波段更高的输出功率，关键在于减少电流崩塌，这需要针对该特定外延结构优化钝化技术。”

Chaudhuri 表示，Soctera 将继续致力于开发比现有产品功率更高、运行温度更低的 GaN 功率放大器。“我们的首批产品器件正在生产代工厂加工，预计年底开始向感兴趣的客户提供样品。”

## 参考文献

R. Chaudhuri et al. Appl. Phys. Express 18 076501 (2025)



Soctera 与 Qorvo 的合作团队已针对 AlN/GaN HEMTs 的漏极电流、跨导、增益、输出功率以及漏极效率和功率附加效率进行了评估。

# 铝处理提升绿光 miniLED 的效率

在量子阱生长后通入三甲基铝气流，实现了创纪录的效率

中国研究人员通过在量子阱生长过程中采用铝处理技术，提高了绿光 LED 的光学效率。

这项由盐城师范学院、中国科学院半导体研究所、厦门大学以及扬州中科半导体照明有限公司合作研发制造的器件，峰值外量子效率 (EQE) 达到 65%，壁插效率 (WPE) 达到 60%。

来自厦门大学的研究团队发言人李洪建表示，这些效率使得他们研发的 miniLED 成为部署应用的理想候选器件。

绿光 LED 的效率不如蓝光 LED，原因在于：压电场会将电子和空穴拉开，阻碍发光；阱中需要更高的铟组分，导致发光猝灭缺陷的密度更高。

由于这些缺点，可见光 LED 存在“绿光 gap”问题。这是全球研究界一直试图解决的重要课题，采用了多种创新方法，包括使用非极性和半极性结构、纳米线、量子点、交错和梯度量子阱以及浅量子阱。

迄今为止，其他中国合作研究团队取得的显著成果包括：在 527nm 处达到峰值 EQE 53.3%，以及在 525nm 处达到峰值 EQE 55.6% 的硅基氮化镓 (GaN-on-silicon) 器件。

李及其同事采用在图形化蓝宝石衬底上生长的器件，超越了这些 EQE 值。

效率下降归因于俄歇复合，导致采用铝处理技术制备的绿光 LED 效率下降。

该器件特点是在 InGaN 量子阱和 GaN 势垒层生长之间进行铝处理。

将蓝宝石衬底装入 MOCVD 反应腔后，研究团队在低温下沉积了 30nm 厚的成核层，接着生长了堆叠结构。

在每个 InGaN 量子阱于 760°C 生长完成后，研究团队向反应腔中通入三

甲基铝持续 10 秒，流速为 8 $\mu$ mol/min，同时保持氮气流动并停止铟和镓源的供应。随后进行 GaN 势垒层的生长，温度升至 940°C。

将外延片加工成倒装芯片 miniLED (台面面积为 0.025mm<sup>2</sup>) 的工艺包括：采用电感耦合等离子体刻蚀暴露 n 型接触层；在 p-GaN 和 n-GaN 表面分别通过电子束蒸发和图形化沉积 ITO 和 Cr/Al/Cr/Pt/Au 层；添加由交替的 Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 层构成的分布式布拉格反射镜；以及形成 Cr/Al/Ni/Al/Ti/Pt/Au 接触电极。

对外延结构的 X 射线光谱分析显示，在 InGaN 量子阱顶部形成了厚度仅约 0.5nm 的 AlGaN 层。根据该测量技术，由于 MOCVD 中的原子过度反应，该 AlGaN 层中铟摩尔分数非常高，铝含量仅为 10% 左右。

研究团队还用高分辨透射电子显微镜分析了材料，发现在 3 $\mu$ m 宽度区域内仅有三个“V”型坑。这一观察结果据称表明有源区的缺陷密度非常低。

铝处理带来更优辐射复合的证据来自时间分辨光致发光。未经该处理的 LED 结构中的激子寿命为 75ns，而改进后的有源区为 17ns。同时，对量子阱表面的原子力显微镜检测确定，铝处理减小了坑的尺寸，并将表面粗糙度从 4.8nm 降低到 1.7nm，实现了台阶流生长。

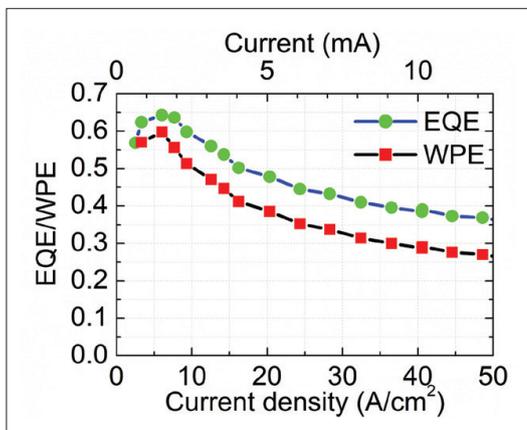
铝处理的另一个好处是减少了峰值波长随电流增加的蓝移。

对于经过铝处理的器件，峰值 EQE 和壁插效率出现在约 5A/cm<sup>2</sup> 的电流密度下，当驱动电流密度升至 20A/cm<sup>2</sup> 时，分别下降至 47.8% 和 38.5%。

“我们认为俄歇复合是 InGaN 绿光 LED 效率下降的主要原因，”李表示，并解释说该合作团队的下一个目标是制造在更长波长下工作的器件，例如发射红光的器件。

参考文献：

Y. Zhao et al. Appl. Phys. Express 18 082001 (2025)



采用铝处理的绿光LED效率下降，归因于俄歇复合，导致效率随电流密度增加而下降。

# 两步退火改善 SiC 界面

在氢气和氩气混合气氛中进行两次退火，可制备出具有高迁移率的可靠 SiC MOSFET

大阪大学的工程师声称，通过两步退火工艺改善了 SiC-SiO<sub>2</sub> 界面的性能和可靠性。

他们的方法包括在氩气和氢气混合气体中进行退火，在提高沟道迁移率的同时改善了抗偏压应力的可靠性，有望提升 SiC 功率晶体管的性能。

尽管 SiC MOSFET 销售额飙升，但这类晶体管存在高密度的界面态，会捕获沟道中的自由电子，导致导电电阻增加，这对于阻断电压在 600V 至 1200V 之间的器件尤为明显。

几十年来，SiC MOSFET 的开发者和制造商投入了大量努力试图改善 SiC-SiO<sub>2</sub> 界面的质量，通过掺入氮、磷、硼等杂质原子获得了一些改进。

自 20 世纪 90 年代末以来，改善 SiC-SiO<sub>2</sub> 界面的标准方法是一氧化氮 (NO) 退火。这种退火可降低界面态密度并提高场效应迁移率，但会导致可靠性下降——例如阈值电压的不稳定性——这可能与界面附近引入氮原子有关。出现的一个重大问题是抗负栅压应力可靠性下降，这限制了可施加到 SiC MOSFET 的栅极电压。

最近，SiC MOSFET 开发者发现，通过在形成栅极氧化层时最大限度地减少 SiC 的氧化，可以改善器件的性能和可靠性。这种方法抑制了与碳相关的缺陷，但由于该工艺依赖于界面氮化，可靠性仍然是一个挑战。

大阪大学研究人员的新方法通过不采用界面氮化，开创了同时提高 SiC 金属氧化物半导体 (MOS) 器件可靠性和性能的先河。

借鉴硅 MOS 技术中广泛采用的方法，他们的突破性工艺基于稀氢退火，包括在栅极氧化层沉积前后进行退火。这两步退火的目的是减少 SiC 表面附近以及 SiC-SiO<sub>2</sub> 界面处的缺陷。SiC 的氧化被尽可能地最小化。

该工艺的成功已通过制造 SiC MOS 电容和 MOSFET 得到验证。为制备这些器件，团队首先先生长了施主浓度约为  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  至  $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$  的 n 型外延层用于 MOS 电容，以及施主浓度约为  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的 n 型外延层用于 MOSFET。

MOSFET 的源 / 漏和体接触区通过 SiO<sub>2</sub> 覆盖

层的离子注入来定义，随后去除覆盖层并替换为碳帽。在氩气中退火激活掺杂剂后，通过低温氧化去除碳帽，湿法清洗样品表面并添加栅极氧化层。

栅极氧化层的形成首先在 1300°C 下于氢气和氩气混合气氛中退火，这一步旨在去除 SiC 表面附近的缺陷。

随后在 HF 酸溶液中清洗样品表面，再通过等离子体增强 CVD 添加 SiO<sub>2</sub> 薄膜。之后，团队在 CO<sub>2</sub> 气氛中于 1300°C 退火 30 分钟，再在氢气和氩气混合气氛中于 1200°C 退火 30 分钟。

为评估该工艺，工程师们还制备了一系列对照样品。一个没有第一步退火，另一个仅用氩气进行第二步退火，还有通过干法氧化以及氧化后最优 NO 退火制备的样品。

对于电容和 MOSFET，氧化层厚度均为 40-50nm，电极由铝制成。

对电容进行的电学测量确定，研究团队的两步工艺在降低界面态密度方面与 NO 退火同样有效。

注意，仅进行第一步退火或仅在氩气中退火的样品，界面态密度明显更高。

二次离子质谱分析显示，NO 退火导致该 MOS 电容界面处的浓度超过  $10^{21} \text{cm}^{-3}$ ，而使用两步工艺时约为  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。

采用研究团队优化工艺制备的 SiC MOSFET 峰值场效应迁移率为  $17.2 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ ，而干法氧化制备的变体仅为  $2-3 \text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ 。工程师们将此改进归因于界面态密度降低带来的自由电子增加。

两步氢氩混合气体退火抑制了平带电压漂移。根据研究团队的说法，这为可靠性的改善提供了证据。

## 参考文献

T. Kobayashi et al. Appl. Phys. Express 18 081002 (2025)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
FERMI	费勉仪器科技(上海)有限公司	www.fermi.com	2
RABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	17
Riber		www.riber.com	IFC
Park Systems		parksystems.cn/nx-wafer	1
SEMICON China 2026		http://host.semiconchina.org/zh	IBC
2026 慕尼黑上海光博会		www.world-of-photonics-china.com.cn	5

## 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。

## 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

Lynn Wang (王清玲), lynnw@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  
Stephen Whitehurst  
stephen.whitehurst@angelbc.com  
Tel: +44 (0)2476 718970

### 销售人员 Sales Offices

**China (中国)**  
**Shanghai (上海)**  
Hatter Yao (姚丽莹), hattery@actintl.com.hk  
Tel: 86 139 1771 3422

Shohan Shen (沈璟晓), Shohans@actintl.com.hk  
Tel: 86 176 2122 8315

Amber Li (李歆), amberli@actintl.com.hk  
Tel: 86 182 0179 0167

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

**Hong Kong (香港)**  
Floyd Chun (秦泽峰), floydchun@actintl.com.hk  
Tel: 852 2838 6298

**Taiwan (台湾)**  
Simon Lee (李若龙), simonl@actintl.com.hk  
Tel: 852 2838 6298

**Asia (亚洲)**  
**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



**SEMICON<sup>®</sup>**  
**CHINA**

Co-located with **FPDCHINA**

# 国际半导体专业展

**March 25-27, 2026**  
SNIEC, Shanghai, China

TRANSFORM  
TOMORROW  
跨界全球 · 心芯相联



**SEMICON China**  
**小程序重磅上线!**



- 观众注册
- 展位地图
- 展商名录
- 同期论坛
- 邀请函
- 现场活动
- 新闻中心
- 更多

微信扫描上方小程序码  
点击右上角“...”  
选择“添加到我的小程序”

### CSC Webinar

1/4/12月  
线上

- 大数据与AI驱动的先导半导体智能检测
- “内卷”与突围：如何破除SiC产能过剩？
- Micro-LED：显示技术的下一个“风口”
- PIC的新应用
- GaN下一个增长极
- 超宽禁带器件：最终解决方案？
- 面向未来通信：5G-A与6G的射频前端革新

### 化合物半导体先进技术及应用大会

6月  
苏州

- 解锁GaN功率电子的下一个增长引擎
- 为SiC产业重新赋能
- Micro-LED：如何赢得市场青睐？
- 创新与布局：如何推进表面发射光电子器件？
- 释放超宽禁带材料的潜力

### CSC化合物深研会

9月  
无锡

#### 主题：破局·增效·可持续——化合物半导体的下一代技术与市场格局

- 破局与突围：SiC产能与可持续发展
- 后台积电时代，GaN市场谁主沉浮？
- 800V HVDC下的价值链博弈：器件供应商如何破局？
- 超宽禁带半导体的“破晓”时刻：氧化镓与金刚石的产业化路径
- 异质集成：超越“摩尔定律”的化合物半导体新范式
- 化合物半导体的“绿色”与可持续性：机遇与挑战并存

### 化合物半导体先进技术及应用大会

10月  
常州

- SiC：迈向8/12英寸与成本效益的规模化之路
- 如何颠覆现有GaN射频市场格局？
- 超宽禁带器件：氧化镓等的潜力与散热瓶颈突破
- 射频设计革新：AI赋能与3D异质集成挑战
- AI+光显：从算力提升到沉浸式交互体验
- PIC：从光通信到量子与传感的跨界革命

### CHIP China晶芯研讨会

5月  
苏州

- TGV技术推动封装应用创新发展
- 面板级封装技术加速崛起进程
- AI驱动光电合封呈现新态势
- 3D封装助力AI算力提升
- 先进封装优化终端设备体验
- 2.5D封装设计实现成本管控
- 混合键合技术持续发展升级
- 推进先进互连技术国产化
- 攻关先进封装新装备技术

### 芯界深研会

3月  
武汉

#### 主题：共筑先进半导体制造芯生态

- 晶栈架构革新3D NAND存储技术
- 存储与AI融合提升数据处理能力
- AI+SMT协同：半导体制造智能化的必然路径
- 大尺寸晶圆均匀性瓶颈：关键技术如何破局？
- 先进封装热失控：器件热管理的突围路径
- 异构集成浪潮：半导体封测的未来范式
- 纳米级失效定位：半导体分析技术的未来方向
- 晶圆缺陷困局：机器学习如何实现“精准预判”？

### 芯界深研会

8月  
合肥

#### 主题：共筑先进半导体制造芯生态

- 车规级SiC模块封装技术研发
- SiC功率半导体产品研发及制造
- 车规半导体SMT贴片与激光焊接协同优化
- 车规芯片供应短缺：产业链如何构建弹性保障体系？
- 宽禁带功率半导体：新能源领域的下一代核心器件
- 未来芯片与先进制造：制程突破与产能保障的联动
- 3D堆叠创新：解锁高密度集成新可能
- 功率半导体新材料应用：重构高效器件技术格局

\*以上主题暂定，请以会议举办议题为准

