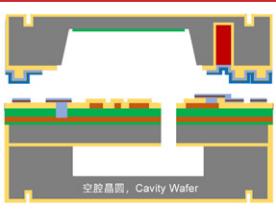


化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2025年 8/9月

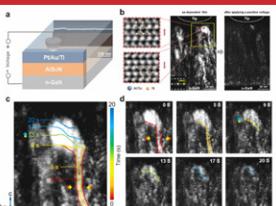
AIScN压电微机电系统共性工艺技术开发



将碳化硅(SiC)送入太空



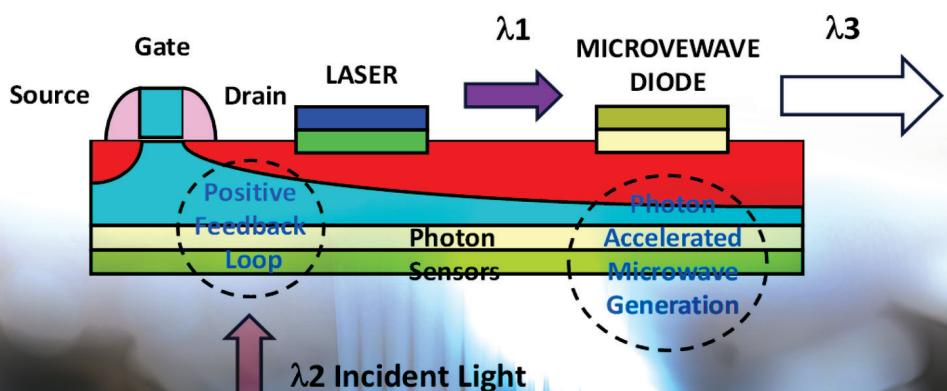
纤锌矿铁电体低场驱动的畴壁运动



Wolfspeed:
重组焕发生机?



ACT
INTERNATIONAL



CMOS：
不止于硅

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。

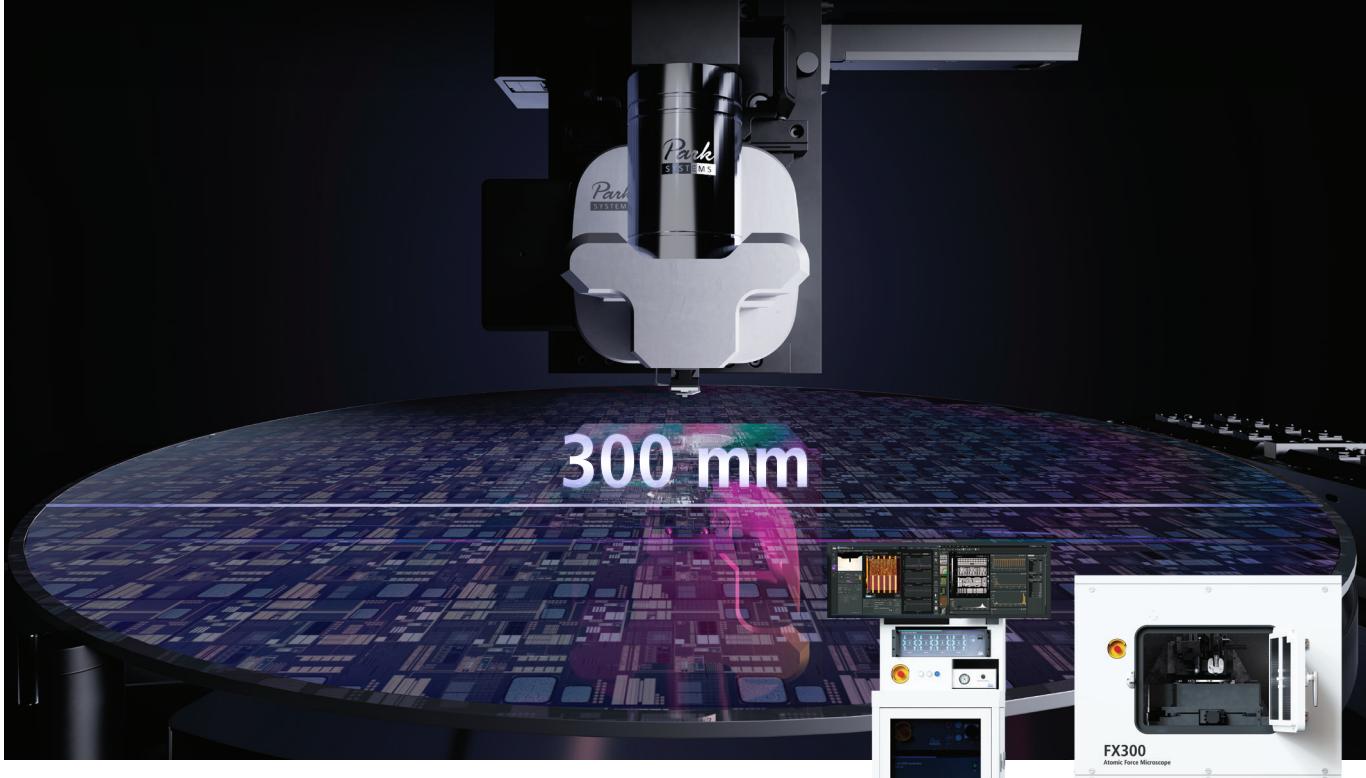
RIBER

info@ribер.com
www.ribер.com

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY



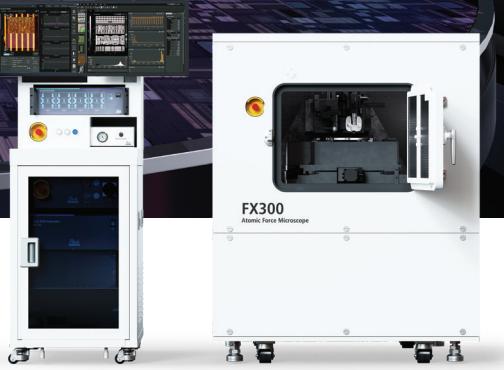
推动科研成果向 300毫米晶圆生产的转化



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300 mm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。



扫码了解更多

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。

Park nano-IR 光谱技术

结合原子力显微镜与纳米红外技术，实现材料化学分析



Park nano-IR将纳米级红外光谱与原子力显微镜相结合，用于化学与材料分析。通过引入先进的红外光谱技术—光诱导力显微镜(PiFM)，并与 Park AFM平台结合，该系统能够支持纳米尺度下的性能分析，为科研人员提供更多样化的分析方法。

parksystems.cn/fx300 | ☎ 400-878-6829

Park
SYSTEMS

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

LFCP-600 真空解理和钝化系统

HLFP-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
Fermion Instruments (Nanjing) Co., Ltd.

VIP HOTLINE +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

11

CMOS: 不止于硅

CMOS: Not just for silicon

尽管CMOS与硅集成电路 (IC) 的制造密切相关，但这一灵活的工艺也可以应用于采用化合物半导体制造光子和微波电路。

- 詹姆斯·潘, NORTHROP GRUMMAN

编者话 Editor's Note

04

当AI遇见化合物半导体：一场改写万亿级市场的“能源革命”正在爆发

When AI Meets Compound Semiconductors: An Energy Revolution Poised to Reshape a Trillion-Dollar Market

- 陆敏

业界动态 Industry

05

英飞凌追投500亿元，拟建全球最大200mm碳化硅功率半导体工厂

Infineon is set to invest an additional 50 billion yuan to build the world's largest 200 mm silicon-carbide power semiconductor fab.

05

安世半导体宣布推出用于AI服务器的SiC二极管

Nexperia announces SiC diodes for AI servers.

06

天岳先进开启招股，拟募资约18亿扩张大尺寸SiC衬底产能

SICC has launched its IPO, aiming to raise approximately RMB 1.8 billion to expand large-diameter SiC substrate capacity.

06

JX拟将InP衬底的产能提高20%

JX to boost InP substrate production capacity by 20%.

06

MACOM完成三角研究园GaN-on-SiC晶圆厂的接管

MACOM completes transfer of Research Triangle Park GaN-on-SiC fab.

Evatec专栏 Evatec Column

07

混合式 DBR——单一工艺变革为Micro LED 生产带来双重效益

Hybrid DBR: A Single-Process Innovation Delivers Dual Benefits for Micro LED Manufacturing

- Chongqi Yu 博士, Evatec

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及产业化经验，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

技术 Technology

- 14 AlScN压电微机电系统共性工艺技术开发
Development of Generic Process Technology for AlScN Piezoelectric MEMS
- 樊雨佳, 王瑜璞, 刘婷, 宋笠, 李良, 张婷, 麦志洪, 湖北九峰山实验室
- 18 将碳化硅(SiC)送入太空
Launching SiC into space
- 安托恩·阿利扎巴拉加, 欧洲航天局
- 23 最新突破: 纤锌矿铁电体低场驱动的畴壁运动
Breakthrough in Promoting Low-Field-Driven Domain Wall Motion in Wurtzite Ferroelectrics
- 刘明睿¹, 孙晓娟¹, 黎大兵^{1,2}
1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所特种发光科学与技术全国重点实验室
2 中国科学院大学材料科学与光电子工程中心材料科学与光电子工程中心
- 26 Wolfspeed: 重组焕发生机?
Wolfspeed: Rejuvenated by restructuring?
- Richard Stevenson, 《化合物半导体》杂志

科技前沿 Research Review

- 28 用于Ga₂O₃晶体管的硅基氮化镓
A GaN-on-silicon foundation for Ga₂O₃ transistors
- 29 用全包围金刚石冷却的射频氮化镓高电子迁移率晶体管
Cooling RF GaN HEMTs with all-around diamond
- 30 武大、西电联合攻关在跨材料、跨功能的宽禁带半导体异构集成领域取得突破性进展
Wuhan and Xidian University have made groundbreaking progress in the field of heterogeneous integration of wide bandgap semiconductors with integration material and functional properties

32 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



北京华林嘉业科技有限公司(CGB)成立于2008年，主要从事半导体、泛半导体、新材料等领域的专业设备的研发、生产、销售及服务。公司研发总部位于北京亦庄经济技术开发区，拥有河北廊坊北方生产基地和无锡华东区域服务中心。同时在日本设有研发中心，专注于产品研发和海外市场服务。

产品应用领域包含：集成电路(IC)、微机电系统(MEMS)、硅材料(Si)、化合物半导体(Compound Semiconductor)、光通信器件(Optical Communication Devices)、功率器件(Power Devices)、半导体照明(LED)、先进封装(Advanced Packaging)、光伏电池(Photovoltaic)、平板显示(FPD)和科研(R&D)等。

作为国内深耕半导体湿法制程设备、全自动晶圆倒角机、全自动刷片机、干燥机、化学品供给系统等设备制造商，CGB始终严格按照国际质量管理体系标准进行全方位和全过程的质量控制，同时注重持续改进及创新。近年来，荣获北京市创新型中小企业、北京市知识产权试点单位、国家高新技术企业、北京市“专精特新”中小企业等称号。未来，我们将不断提升自主创新能力及核心竞争力，为客户提供更加优化完善的技术服务和专业定制化解决方案。



北京华林嘉业科技有限公司

Beijing CGB Technology Co.,Ltd

服务热线 : 400-650-7658
官网网址 : <http://www.cgbtek.com>
总部地址 : 北京市经济开发区科创十三街18号院30号楼
华东服务中心 : 无锡市新吴区IC设计大厦 B1003-1004
北方制造基地 : 河北·廊坊市·香河机器人产业港·3期A栋

(华东/海外区) 负责人: 139 1127 1076
(华南区) 负责人: 130 5158 6635
(西南/西北区) 负责人: 193 2206 6460
(华中区) 负责人: 180 1536 7016
(京津冀) 负责人: 130 5158 6631
(大项目部) 负责人: 139 1029 7918
(MEMS专区/山陕区) 负责人: 180 1239 7806
(技术支持) 负责人: 139 1127 9276



当 AI 遇见化合物半导体：一场改写万亿级市场的“能源革命”正在爆发

7月26日—29日，2025世界人工智能大会在上海掀起狂潮，主题只有八个字——“智能时代，同球共进”。外行看热闹，内行看门道：四大核心技术方向——AI基础设施、科学智能、智能终端、AI赋能新工业化——背后都闪着同一张“王牌”：化合物半导体。

一、AI的“房地产”：算力中心

过去20年，中国靠钢筋混凝土造富；未来20年，数字经济靠“硅+电”造血。GPU、CPU、NPU堆起来的数据中心，就是AI时代的“楼盘”。但马斯克一句话戳破真相：“AI的尽头是能源。”

运行ChatGPT级大模型，电费占TCO 30%~40%。想让每Token成本再降10倍，必须把电“省”出来——这正是第三代半导体碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)的主场。

- SiC模块把服务器电源效率从94%拉到97%，别小看这3%，一个10MW机房一年就能省1000万度电。

- GaN轻载效率逆天，AI推理峰谷差巨大，用它做DC-DC，机房PUE直接打到1.1以下。

一句话：谁能把电省到极致，谁就拥有下一座“数据油田”。

二、AI的“神经系统”：光通信

算力狂飙，数据塞车。GPU之间不是算不动，而是“传”不动。

第二代半导体——InP、GaAs、以及硅光子(SiPh)——把光模速率从400G推到1.6T，延迟降到纳秒级。AI集群里，一张训练网络动辄上万张卡，光互连省下来的时间直接换算成美元。

三、AI的“手脚”：智能终端

“AI有脑无手”？第三代半导体来补全。

- 人形机器人：关节驱动需要高频、高效、高功率密度——GaN电机驱动把体积砍半，续航翻倍。

- AI眼镜：Micro-LED微显示+SiC衬底，亮度冲10万尼特，AR不再“见光死”。

从车规到机器人，从家用到穿戴，SiC/GaN的市场半径正被AI无限放大。

四、AI的“科研外挂”：科学智能

AI反向加速材料发现。Google DeepMind用AI预测220万种晶体结构，其中92%已被实验证。

把算法喂给高通量实验线，SiC、GaN、甚至第四代半导体（氧化镓、金刚石）的试错周期从“年”变“周”。

过去烧炉子找参数，现在GPU跑一夜，炉温曲线自动生成——研发成本断崖式下跌。

五、AI的“工业大脑”：智造升级

传统FAB厂最怕“看不见”的浪费：气体流量偏差0.1%，整批外延片报废。

装上AI视觉+强化学习，MOCVD实时调温、调压，良率从75%拉到95%。

工厂管理成本直降30%，一条6英寸SiC产线一年多出3亿元净利润。

重做一遍的时代来了：

AI是需求革命，化合物半导体是供给革命。两者交汇，把“能耗、算力、效率”三大死结一口气剪开。

所有行业都值得被AI重塑，半导体本身更该“用AI重做一遍”。

下一次，当你再听到“算力焦虑”，请记住：

真正的钥匙，不在更多GPU，而在更高效、更绿色的化合物半导体。

万亿级市场，只等“能源革命”按下启动键。

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

雅时国际商讯 ACT International

香港九龙 B,13/F, Por Yen Bldg,
长沙湾青山道478号 478 Castle Peak Road,

百欣大厦 Cheung Sha Wan,
13楼B室 Kowloon, Hong Kong

Tel: (852) 2838 6298

Fax: (852) 2838 2766

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200

Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 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



ISSN 2789-2735

© 2025 版权所有 翻印必究

英飞凌追投 500 亿元， 拟建全球最大 200mm 碳化硅功率半导体工厂

据外媒报道，近日，英飞凌科技 (Infineon) 宣布将在马来西亚额外投资 300 亿令吉（约合人民币 508 亿元），在吉打居林高科技工业园兴建全球最大 200 毫米碳化硅功率半导体工厂。

报道称，这项潜在投资是马来西亚首相拿督斯里安华于访德期间，在与英飞凌科技高层会晤后所宣布，目前已正式落实。该厂房第一阶段不仅已建成，也已正式投入运作。

根据大马投资发展局 (MIDA) 公告，这是英飞凌在居林高科技园厂房的第三期扩充计划，而首期已投资了 20 亿欧元（98 亿令吉）、第二期 2024 年 8 月又加码投资 50 亿欧元（约 245 亿令吉），此次额外再增加 300 亿令吉。该厂将成为英飞凌最大的 200mm 前端制造基地，专注于汽车、绿色工业电力和电源及传感器系统。

安世半导体宣布推出用于 AI 服务器的 SiC 二极管

安世半导体 (Nexperia) 宣布推出两款 1200V 20A SiC 肖特基二极管，旨在满足 AI 服务器、电信设备和太阳能逆变器应用的电源装置对超低功率损耗整流器的需求。

据介绍，PSC20120J 和 PSC20120 肖特基二极管通过不受温度影响的电容开关和零恢复特性实现了领先的性能。此外，其开关性能几乎完全不受电流和开关速度变化的影响。

它们具备合并式 PiN 肖特基 (MPS) 结构，在抵御浪涌电流上展现出稳健性。这一特性降低了对额外保护电路的要求。

PSC20120J 采用真双引脚 D2PAK R2P (TO-263-2) 表面贴装器件 (SMD) 功率塑料封装，而 PSC20120L 则采用真双引脚 TO247 R2P (TO-247-2) 通孔功率塑料封装。



探索薄膜技术在功率器件中的应用，与Evatec携手前行

从 300 毫米硅片工艺到碳化硅 (SiC) 或氮化镓 (GaN) 上的宽禁带 (WBG) 应用，Evatec 是您在功率器件薄膜生产领域的合作伙伴。

工艺专有技术，包括安全传输减薄晶圆或键合晶圆，结合对晶圆应力和温度的管理，确保您始终走在正确的工艺上。

访问 evatecnet.com/markets/power-devices，了解如何在您的生产中加足马力，奋勇向前，或联系您当地的 Evatec 分公司，网址为 evatecnet.com/about-us/sales-service。

意发薄膜科技(上海)有限公司, Tel: +86 21 6019 1660
Email: infochina@evatecnet.com

天岳先进开启招股，拟募资约 18 亿扩张大尺寸 SiC 衬底产能

大半导体产业网消息，8月11日，天岳先进发布公告称，公司拟全球发售H股4774.57万股股份，其中香港发售股份238.73万股，国际发售股份4535.84万股，另有716.18万股超额配股权，招股日期为8月11日至8月14日。

据了解，天岳先进于今年2月24日向香港联交所递交上市申请。此IPO募资净额约19.38亿港元（约合人民币17.7亿元）。其中，约70%预计将用于扩张公司8英寸及更大尺寸碳化硅衬底的产能；约20%预计将用于加强研发能力，保持公司在创新方面的领先地位；约10%预计将用于营运资金及其他一般企业用途。

天岳先进曾表示，为加快公司的国际化战略及海外业务布局，增强境外融资能力，加强全球合作生态系统建设，扩大客户群并深化客户关系。将根据客户分布情况，在海外建设生产基地，提高公司大尺寸碳化硅衬底的产能，提升对海外客户需求的响应能力。

值得一提的是，2022年1月，天岳先进登陆科创板。据招股书显示，彼时天岳先进拟募资20亿元，所募集资金拟全部投入“碳化硅半导体材料项目”，以进一步提升碳化硅衬底的生产能力。最终实际募资金额达到32.03亿元。

若此次成功完成港股上市，将实现“A+H”的格局。

JX 拟将 InP 衬底的产能提高 20%

总部位于东京的JX先进金属公司拟投资约15亿日元（约合1020万美元），将其位于茨城县北茨城市的矶原工厂的磷化铟（InP）衬底产能提高约20%。

在2019年制定的“JX先进金属集团2040年长期愿景”中，该公司将其重点业务（包括半导体材料、信息通信材料等先进材料）定位为增长战略的核心。为了进一步拓展这些业务，该公司一直在努力打造继半导体溅射靶材、压延铜箔等主力产品之后的下一代收入支柱。

InP衬底有望成为这些支柱之一。InP衬底的应用领域包括光通信发光和接收器件、可穿戴设备中的接近传感器、工业图像传感器。作为全球为数不多的InP衬底制造商之一，JX先进金属公司已致力于这种材料长达40多年。

近年来，生成式人工智能的快速发展催生了对海量高数据处理能力的需求，引发了全球范围内超大规模数据

中心的建设热潮。随着光通信越来越多地用于这些数据中心内的数据传输，JX表示市场对其InP衬底的需求也在不断增长。

展望未来，需要实时性能的应用有望得到进一步发展，例如生成式人工智能、下一代通信、自动驾驶、医疗保健和娱乐。这些应用将需要更快、更大容量的数据处理，同时功耗也会增大。作为这些挑战的解决方案，InP衬底也有望在光子-电子融合技术中得到采用，这些技术正被开发为下一代信息和通信基础设施技术。如果这些技术能得以实现，那么与传统电路相比，它们不仅能在此类应用中提供高性能，而且还能显著降低能耗。

因此，JX先进金属公司决定继续进行15亿日元的资本投资。该公司预计未来InP衬底的需求将持续走高，也正在考虑根据需要灵活地进行进一步投资。

MACOM 完成三角研究园 GaN-on-SiC 晶圆厂的接管

美国马萨诸塞州洛厄尔市的MACOM Technology Solutions Inc（设计并制造射频、微波、模拟和混合信号、光学半导体技术）于2023年12月从美国北卡罗来纳州达勒姆市的Wolfspeed Inc收购了位于北卡罗来纳州三角研究园的晶圆制造厂，近日宣布接管该厂的全部运营控制权。

该厂致力于生产用于射频功率器件和单片微波集成电路

（MMIC）的碳化硅基氮化镓（GaN-on-SiC）工艺技术。其产品主要用于电信系统基础设施和国防电子。该厂是美国国防部认可的可信代工厂。

MACOM总裁兼首席执行官Stephen G. Daly指出：“此次接管比原计划提前了大约六个月。我们的领导层和管理团队正集中精力抓住机会，提高该厂的性能和关键运营指标。”

混合式 DBR——单一工艺变革为 Micro LED 生产带来双重效益

Evatec 高级产品市场经理 *Chongqi Yu* 博士谈到了 Evatec 在 Micro LED 领域的最新工艺进展，这些进展带来了两方面的成果：其一，降低了总体拥有成本；其二，实现了更紧凑的结构，这有助于推动 Micro LED 技术在大众市场的规模化应用。

Micro LED —— 优势尽显

新兴 Micro LED 技术在亮度、对比度和视角等方面的优势已广为人知（图 1），但这并不意味着我们无需为全球合作伙伴提供工艺创新支持，以推动该技术在 2025 年及未来的增强现实等大众市场应用中的普及。

行业领军企业和 Yole Group 等分析机构共同证实，Micro LED 技术及生产趋势正朝着器件尺寸持续微缩与制造成本不断降低的方向发展。采用更大尺寸晶圆仅是降低制造成本的一个方面，而“混合式 DBR”工艺技术的引入则是一个令人振奋的突破，它具有双重优势：一方面可实现更薄的结构 / 器件总厚度，另一方面能显著缩短常规 DBR 沉积的工艺时间。

“混合式 DBR 工艺 —— 晶圆产能提升 50%，总厚度减半”

DBR —— 选择合适的薄膜生产平台架构作为起点

工艺良率同样是降低制造成本的关键驱动因素之一，这意味着采用全自动盒到盒处理工艺，以实现最低颗粒物水平。但这并非终点，溅射技

MicroLED vs. OLED 与 LCD

	LCD	OLED	MicroLED
能耗	中等	中等	中等到低
像素密度	最高1000 PPI	最高4000 PPI（适用于微显示器的 RGB 排列）	单色显示器 > 2000 PPI RGB 显示器 > 4500 PPI
亮度	高（商用电视峰值达3000尼特）	最低	最高（微显示器可达106cd/m ² ）
对比度	低到中等	高（真正黑色）	极高（真正黑色 + 高亮度）
色域	采用QD时色域广	采用滤光片、谐振腔时色域广	色域广（搭配QD色彩转换效果更佳）
使用寿命	良好	中等	最佳
环境稳定性	良好	采用适当封装时中等	最佳
工作温度	-40°C 至 100°C	-30°C 至 85°C	-100°C 至 120°C
切换速度	低 - 毫秒级	高 - 微秒级	极高 - 纳秒级
视角	低到中等	中等到高	高
柔韧性	低	高	中等
成熟度	高	中等	低
成本	低	中等	高（2022年）

图1：消费电子应用中竞争性显示技术的对比（Yole Group 提供）

术凭借更高的薄膜密度与工艺稳定性日益受到青睐，为实现最佳工艺重复性提供了可能。

Evatec 的 CLUSTERLINE® 200 BPM 溅射系统已成为 LED 行业沉积低损伤 TCO 的行业标准解决方案，现在正是采用最新混合式 DBR 工艺方案的时候，这既能降低制造成本，又能减薄高性能反射层的总厚度。图 2 展示了混合式 DBR 工艺的典型工具布局。

混合式 DBR —— 在不影响光学性能的前提下实现更高产能与更薄总厚度

混合式 DBR 工艺技术通过将介质堆叠与金属层相结合，根据 Micro LED 制造商偏好的架构在正面或背面实现

所需光学性能。更少的层数意味着更短的加工时间、更高的产能以及更小规模的器件架构。图 3 展示了结合传统介质堆叠与银层的混合式 DBR 结构的典型 RGB 光学性能。

图 4 展示了在 Evatec CLUSTERLINE® 200 BPM 设备（配置用于 8 英寸工艺）上，混合式 DBR 与传统溅射 DBR 在整体堆叠厚度、工艺时间和产能方面的对比。在 6 英寸或 8 英寸工艺中，所有颜色的产能通常可提升 50% 以上，且反射镜的总层厚可减少 50%。

图 4 展示的结果采用了银基混合式 DBR 结构，但对于偏好铝材料的客户，我们同样可提供工艺解决方案——只需告知需求即可！

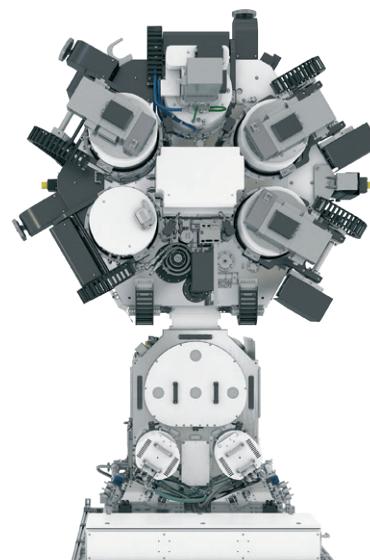


图2: CLUSTERLINE® 200 BPM 系统可配置多达5个工艺模块，用于沉积或蚀刻光学薄膜，搭载先进的工艺控制技术，包括宽光谱光学监控和等离子体辉光监控。

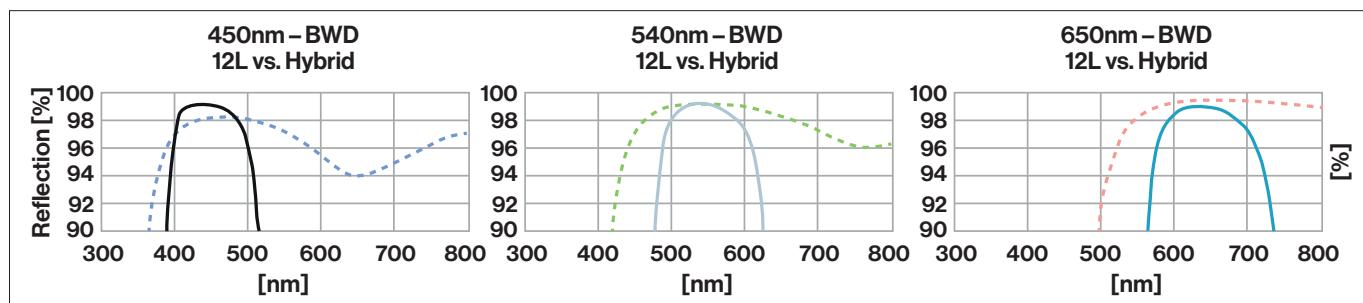
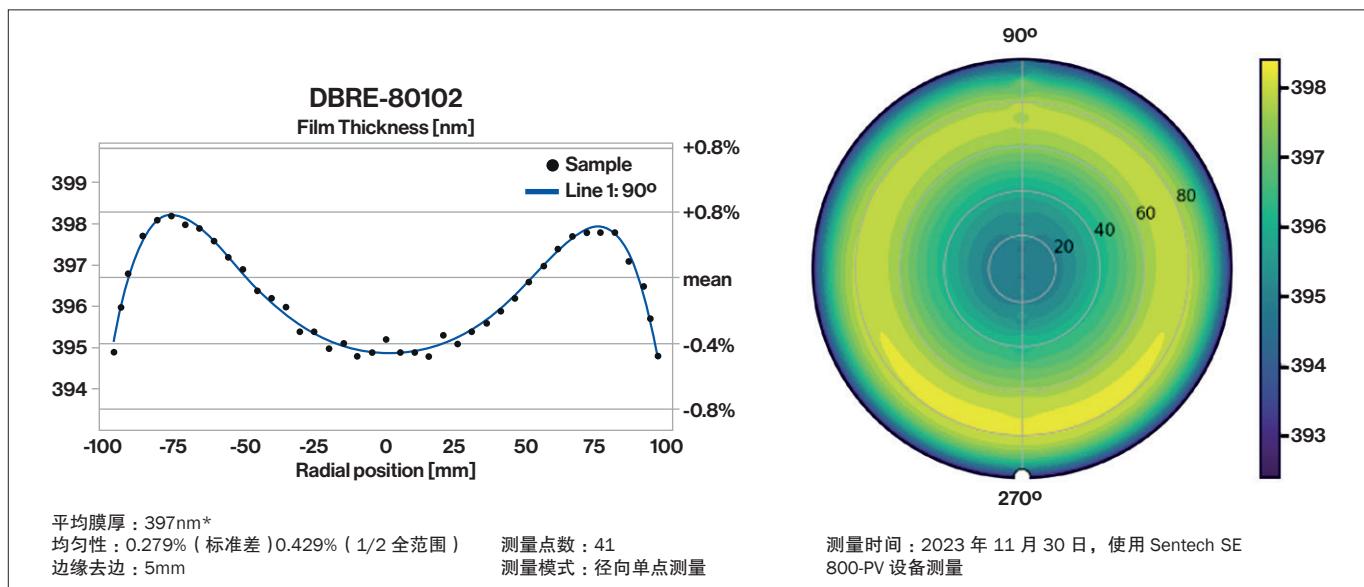


图3: 混合堆叠结构 (---) 与传统DBR (—) 在蓝、绿、红光波段的光学性能对比

Blue – 450nm		Green – 540nm		Red – 650nm	
	12L	混合5L	12L	混合5L	12L
终层	SiO ₂	银 (含覆盖层)	SiO ₂	银 (含覆盖层)	SiO ₂
介质DBR层数	12	4	12	4	12
总厚度 (含覆盖层)	797.4 nm	529.8 nm	987.3 nm	586.96 nm	1177.2 nm
工艺时间 (不装卸的加工时间) + 银覆盖层	01:11:23	00:38:32	01:20:53	00:41:33	01:30:43
D263溅射结果					
最大反射率@nm	99.33% @ 437nm	98.90% @ 461nm	98.99% @ 539nm	99.30% @ 552nm	98.77 @ 637nm
反射率@nm - (背反)	99.23%	98.85%	98.96%	99.26%	98.65%
反射率范围	>98% @ 405-483nm >99% @ 417-463nm	@ 399-554nm	>98.8% @ 517-556nm	>99% @ 487-622nm	>98% @ 597-678nm >99% @ 553-819nm
阻带宽度	78nm @98% 46nm @99%	155nm @98%	39nm @99%	135nm @99%	81nm @98%
8英寸产能					
基板/小时	9.1	13.7	8.2	13.1	7.5
基板/月 (年运行48周, 设备利用率85%)	5198	7825	4684	7483	4284
6英寸产能					
基板/小时	12.1	17.6	11	16.9	10
基板/月 (年运行48周, 设备利用率85%)	6912	10053	6283	9653	5712
图4: 标准与混合式DBR产能对比					

图5：CLUSTERLINE® 200 BPM系统在8英寸基板上沉积SiO₂的均匀性优于±0.5%。

材料	膜层厚度	厚度均匀性		
		WiW	WtW	RTR
SiO ₂ *	300nm	<± 0.5%	<± 0.5%	<± 0.5%
Nb ₂ O ₅ *	300nm	<± 0.5%	<± 0.5%	<± 0.5%
TiO ₂ *	300nm	<± 0.5%	<± 0.5%	<± 0.5%

*带旋转卡盘、PEM和GSM功能

图6a：6英寸基板上单层薄膜沉积均匀性成果

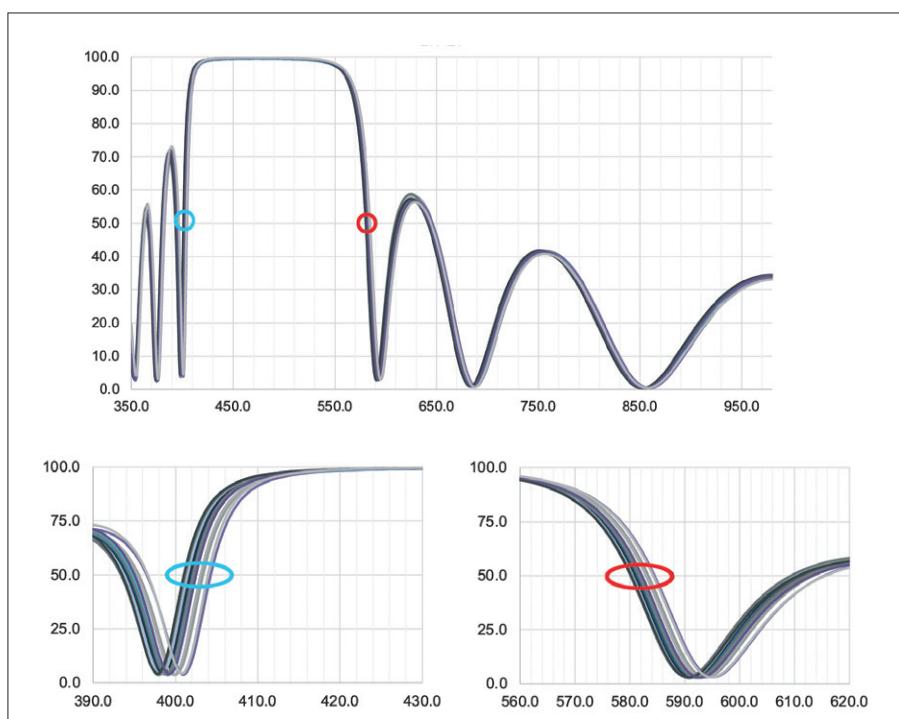


图6a：6英寸基板上单层薄膜沉积均匀性成果

基础系统性能是关键

只有沉积均匀性和批次间工艺重复性等基础系统性能达到 Micro LED 标准要求，才能实现缩短工艺时间、提高沉积速率和增强产能的效益。CLUSTERLINE® 200 BPM 采用先进的工艺控制 (APC) 技术，包括基板原位宽光谱光学监控 (GSM) 与等离子体辉光监控 (PEM)，并结合运用无修正板的动态溅射系统，以满足所需的工艺控制水平。

图 5 展示了在 8 英寸基板上沉积介质材料时典型的膜厚均匀性，优于 ±0.5%。

图 6a 展示了 6 英寸晶圆在片内、片间及批次间的典型重复性，均优于 ±0.6%。图 6b 展示了光学性能的重复性。ES

我们能为您提供哪些支持？

我们的LED工艺专家不仅提供DBR解决方案，还可协助解决金属层和TCO相关问题。如需了解更多信息，请联系我们中国专家团队。

意发薄膜科技（上海）有限公司
上海市普陀区大渡河路556弄1号国浩长风城南座704
Tel: +86 21 6019 1660
Email: infochina@evatecnet.com



Yole Group 视角

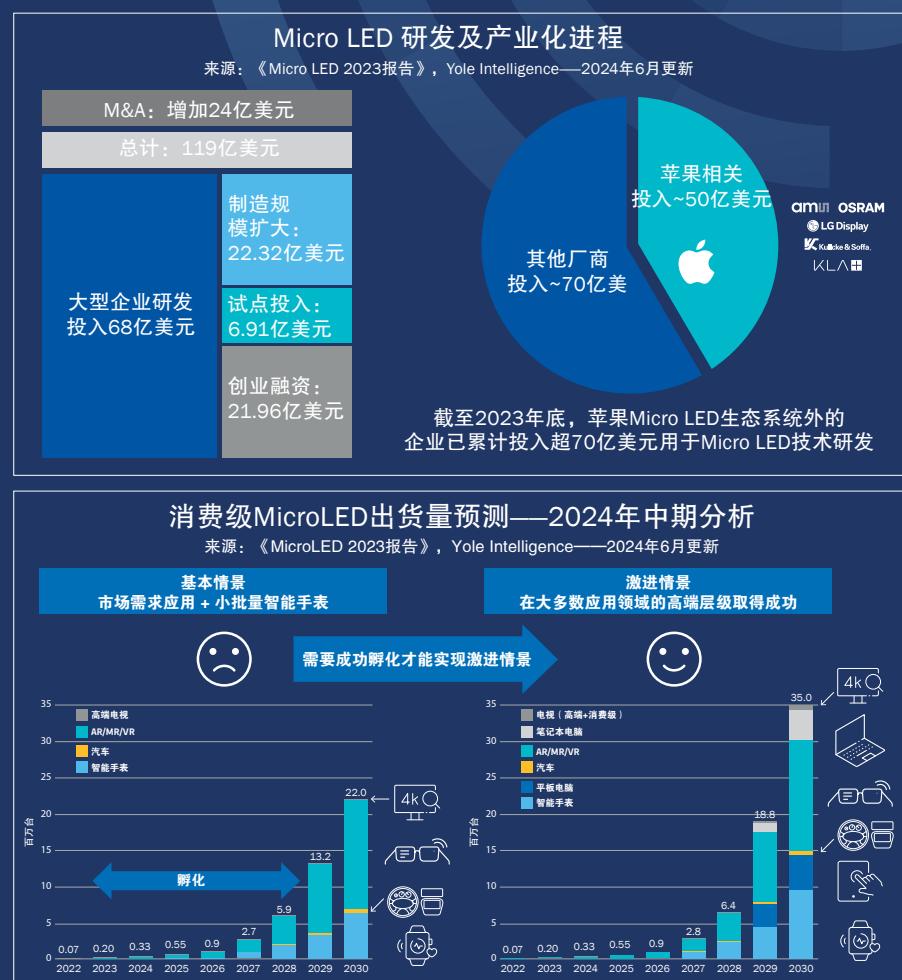
随着 OLED 技术持续进步，苹果的退出加剧了 MicroLED 商业化的紧迫感

苹果于 2014 年收购初创公司 LuxVue，开创了 MicroLED 产业先河。随后花费十年时间及 30 亿美元研发该技术。若非这一浓厚兴趣，大多数 OEM 厂商和显示器制造商对 MicroLED 展现的热情将远逊于现在。

欧司朗投资 13 亿美元建成 200 毫米 MicroLED 晶圆厂以满足苹果需求，并且原计划在 2026 年发布一款苹果手表。但在 2024 年 2 月，苹果公司突然叫停该项目，这一决定在业界引发震动，严重动摇了行业前景。两年前，这原本可能会成为 MicroLED 的末日。然而，Yole Group 认为，MicroLED 现在已经获得了足够的发展动力，可以继续前行。

2023 年末，行业在 MicroLED 领域的直接投资已达到 120 亿美元，并购交易额另达 20 亿美元。其中约 40% 与苹果公司相关。然而，其他厂商投入已达 70 亿美元，且与苹果的举措并无关联。MicroLED 仍是友达等台企长期战略的关键技术。MicroLED 的生态系统持续增强，在近期中国台湾触控展和 Display Week 行业展会上表现亮眼。

要取得成功，MicroLED 必须在保持显著性能差异化的同时，实现与 OLED 相当的成本结构。随着苹果退出，MicroLED 将聚焦于与 OLED 相比具有显著差异化的应用场景：增强现实、汽车电子以及透明显示屏等各类专业应用领域。智能手表市场预测大幅下调，但仍将是 MicroLED 在消费应用领域最易获取的目标市场。友达光电已开始小批量



供货用于奢侈手表的 MicroLED 产品。

尽管苹果项目已终止，行业仍保持良好发展势头，但加速商业化进程的紧迫感日益凸显。随着苹果退出，核心问题是如何培育这一产业。小批量智能手表、汽车及各类小众应用能否推动行业实现规模经济，从而支撑起更大规模的消费应用？这让人想起 OLED 在 2007 年前的处境——当时三

星毅然决然地建立了第一条 AM-OLED 生产线，而那时 OLED 相比 LCD 的优势仍备受质疑。这也正是业界曾期待苹果能为 MicroLED 所做的事情。

未来 18 个月将至关重要。三星会继续坚守 MicroLED 电视领域吗？其他领军企业能否崛起？当前，行业重心已转向中国台湾，但中国大陆可能再次带来惊喜。CS

关于作者

作为 Yole Group 显示器领域的首席分析师，Eric Virey 博士长期专注于 LED、OLED 及显示器方面的技术研究与市场分析。他撰写了大量市场与技术产品分析报告，并主导完成了多个定制咨询项目，内容涵盖商业战略规划、投资标的甄选、并购交易尽职调查、市场与技术分析、成本模型构建及技术趋势追踪等领域。

凭借在 LED/OLED 和显示器行业深厚的专业积淀，Eric 过去五年已在全球超过三十场行业峰会上发表主题演讲。他曾接受全球多家主流媒体的采访报道并被多次引用。Eric Virey 拥有法国格勒诺布尔国立理工学院光电子学博士学位。

CMOS：不止于硅

尽管 CMOS 与硅集成电路（IC）的制造密切相关，但这一灵活的工艺也可以应用于采用化合物半导体制造光子和微波电路。

作者：詹姆斯·潘，NORTHROP GRUMMAN

硅集成电路（IC）——发明于 20 世纪 50 年代——几乎应用于所有领域。它们不仅广泛用于智能手机和计算机，还对汽车、洗衣机、空调、真空吸尘器等设备的运行至关重要。在所有这些应用中，IC 在完全黑暗的环境中运行，因为硅具有间接带隙。由于这一特性，硅可以吸收光，但无法发光。

在我们的日常生活中，电子和光是相互交织的。我们利用电子产生光和其他形式的电磁辐射，例如微波。尽管我们在提到激光和发光二极管（LED）时会想到光子，但它们是电子器件——雷达和微波也是如此。

现在，我们需要开始在集成电路（IC）中应用电子和光子相互交织的原理。相关开发正在进行中，因为化合物半导体（如砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）以及其他 III-V 族和 II-VI 族化合物）如今已与硅结合使用。例如，在 CMOS 漏极区域通过一种称为“选择性外延”的工艺，添加 III-V 族或 II-VI 族材料用于激光或毫米波二极管的微波光子 CMOS。

这些想法可能看起来有点奇怪。你可能听说过 CMOS 这一缩写——它的全名是“互补金属氧化物半导体”——你知道它是一种用于制造数十亿硅集成电路的工艺。但你可能仅限于此。而且，鉴于许多人会认为 CMOS 与化合物半导体无关，你没有深入了解也情有可原。

我理解你的立场——但你可能会落后于时代。部分得益于我们在诺斯罗普·格鲁曼的工作，该公司是激光、毫米波器件和专用集成电路（ASIC）的领导者，我们正在开发一种用于发光结构和微波电路的 CMOS 工艺。这是一个开创性

的突破，它将使化合物半导体和硅能够集成到价值 5000 亿美元且不断增长的 CMOS 行业的几乎所有产品中。

我们的努力并非首次将硅和化合物集成到集成电路（IC）中。硅光子学不再是新事物的日子已经一去不复返了，它由 IBM 和英特尔等公司开创，其产品已占据集成电路行业的一小部分。如今，硅光子学已经进入超大规模集成电路（ULSI）市场，这一点在 2024 年 8 月全球晶圆代工（Global Foundry）的安东尼·于（Anthony Yu）举办的网络研讨会上得到了很好的说明，他的演讲主题是《将硅光子技术推向前沿》。在这种发展中，还有微波光子 CMOS，它涉及包含数百亿甚至数万亿 CMOS 的现代处理器。

基于此类活动，一种新趋势正在出现——几乎所有这些数十亿 CMOS 晶体管不再仅在硅中制造。相反，它们将集成砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）或其他用于激光和微波的化合物半导体。

推动这一变革的背后是现代社会从无线工具向非无线工具的转变，这种转变在智能手机的普

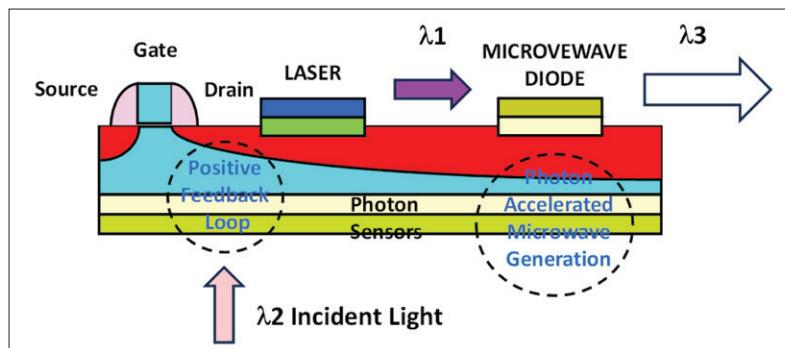


图1：微波光子CMOS和图像传感器。正反馈环路将光转换为光电流。光子加速的微波生成产生调制光波和毫米波。

及和计算机连接性变化中得到了体现。在这种情况下，将化合物半导体与硅结合使用的优势在于无线 ULSI、消除铜线的热量以及与其电阻和电容相关的延迟。有望用无线光子 CMOS 取代 ULSI 中的数十亿铜线。

你可能会好奇如何使用 CMOS 工艺引入 III-V 族化合物。一个说明性的例子是在 CMOS 硅漏极区域添加砷化镓 (GaAs)，使用低温选择性化学气相沉积 (CVD) 或选择性外延。对于前者，CVD 工具包括一个超高真空中的原位腔室，在将晶圆送入 CVD 腔室进行 GaAs 外延之前，会溅射和蚀刻硅上的原生氧化物。请注意，所有这些过程都在高真空下进行。

由于 GaAs 是在硅化物工艺之前的后端工艺 (BEOL) 中沉积的，因此不存在污染问题，可以使用硅线（见图 1 对光子集成过程的说明）。

得益于 III-V 族化合物的引入，微波光子 CMOS 时代触手可及。对于这种技术，光源的选择包括发射波长在 800 纳米到 900 纳米范围内的砷化镓 (GaAs) LED、无阈值隧道激光器以及微波生成器件。请注意，微波光子 CMOS 可以胜过传统激光二极管，因为其具有更好的热可靠性、更高的外部量子效率和更优越的激光性能。

为了制造微波光子 CMOS，在漏极区域制作了一个超低电阻的无阈值隧道激光器或 LED；在阱区、沟道或漏极下方区域添加了窄带隙光子传感器或雪崩光电二极管，这些器件由硅锗 (SiGe) 或其他窄带隙化合物材料制成。此外，在漏极区域还添加了由硅、硅锗 (SiGe) 或其他化合物半导体制成的微波二极管。请注意，MOSFET、激光器、微波二极管和光子传感器是作为一个整体制造的。

除了光源，还转移了适合亚纳米 CMOS 技术节点的介质微光学波导。微光学波导的尺寸可以小于 100-300 纳米，尽管波导的宽度小于光的波长，但光信号仍可以通过全反射进行限制。对于亚纳米节点，沟道长度通常为 5-20 纳米，但 CMOS 的“宽度”可以在数百纳米甚至几微米的范围内。

毫无疑问，这些新型 CMOS 具有巨大的潜力。其中最大的优势之一是激光微波 CMOS 工艺与现有的 CMOS 制造工艺 100% 兼容，不存在交叉污染的风险。另一个令人兴奋的机遇是

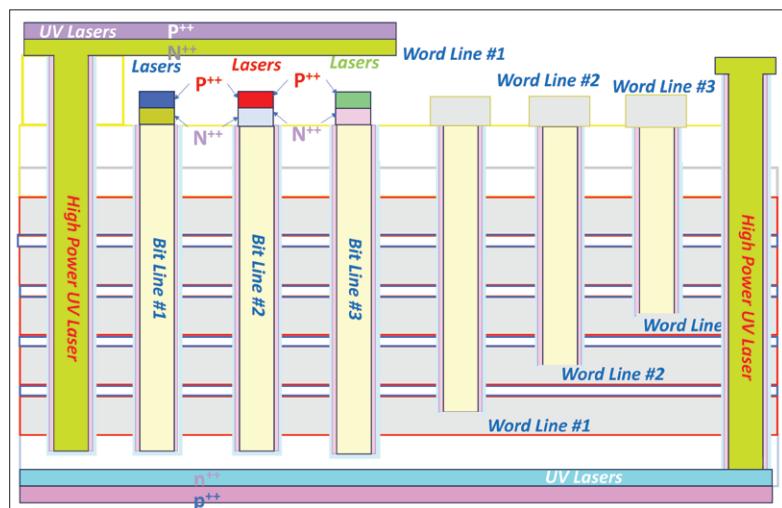


图2: 超高速微波光子垂直NAND

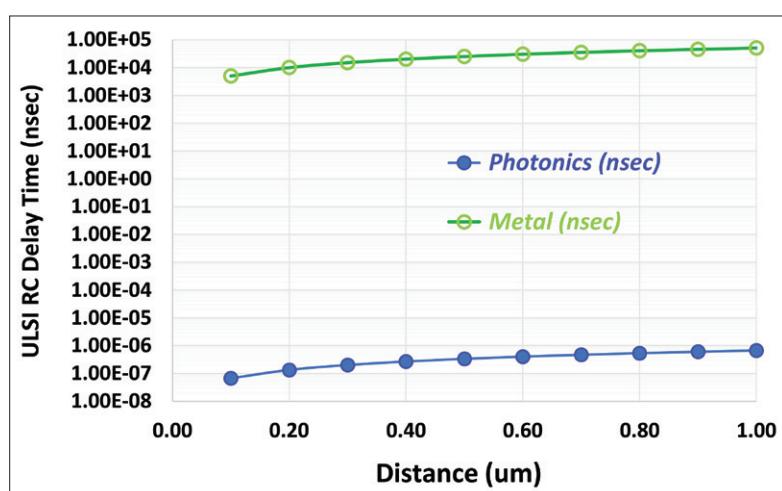


图3: 无线ULSI与光子CMOS——显著降低RC延迟

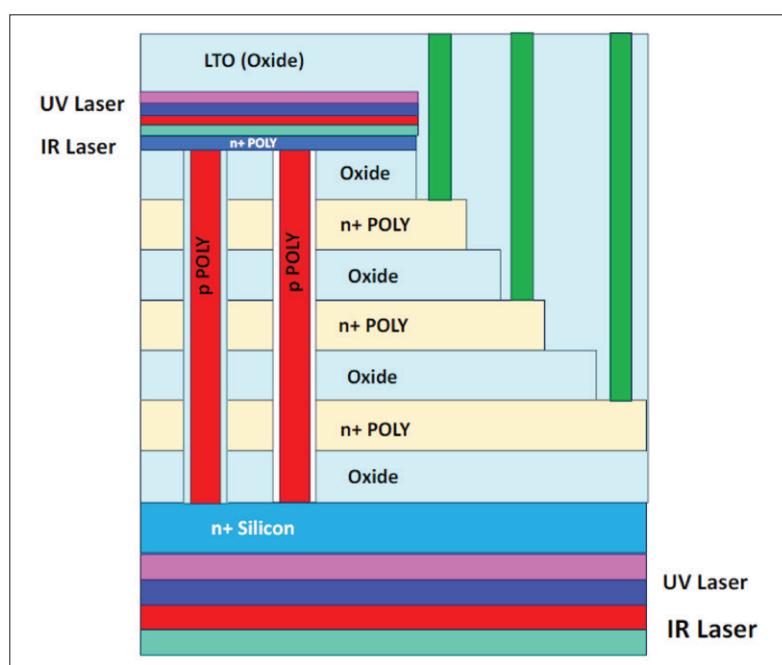


图4: 制造超高速微波光子垂直NAND FLASH (垂直NAND FLASH, 已取代NOR) 的替代方法

引入了更为复杂的非线性光计算。然而，也存在挑战——与已经可用并得以实施的光计算相比，微波计算需要更先进的知识，以及微天线、微波

滤波器、复用器和设计的开发。

我不是说将 CMOS 应用于化合物是件容易的事。但回报是值得努力的。CS

扩展阅读

- ▶ H. Liu et. al. “Near-infrared germanium PIN-photodiodes with >1A/W responsivity,” Light: Sci. Appl. 14 9 (2025)
- ▶ J. Boucher et. al. “Ultra high efficiency 1550nm multijunction pulsed laser diodes,” Proc. of SPIE 7480 74800K (2009)
- ▶ Y. Zhao et. al. “Epitaxially-Stacked High Efficiency Laser Diodes Near 905 nm,” IEEE Photonics J. 14 155706 (2022)
- ▶ Y. Niu et. al. “External-feedback-coupled microring lasers on a III-V-on-Si photonic chip for reservoir computing,” Proc. SPIE 13370, Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits 2025, 133700H (March 2025)
- ▶ Y. Xue et. al. “High-speed and low dark current siliconwaveguide-coupled III-V photodetectors selectively grown on SOI,” Optica 9 1219 (2022)
- ▶ Rizzo et. al. “Fabrication-Robust Silicon Photonic Devices in Standard Sub-Micron Silicon-on-Insulator Processes,” Opt. Lett. 48 215 (2022)
- ▶ R. Palmer et. al. “Low-Loss Silicon Strip-to-Slot Mode Converters,” IEEE Photonics J. 5 2200409 (2013)
- ▶ C. Li et. al. “Subwavelength silicon photonics for on chip mode-manipulation,” PhotoniX 2 11 (2021)
- ▶ J. Pan et. al. “Optoelectronic CMOS Transistors: Performance Advantages for Sub-7nm ULSI, RF ASIC, Memories, and Power MOSFETs,” MRS Advances 4 2585 (2019)
- ▶ Global Foundry, “Bringing Silicon Photonic Technology to the Forefront,” Laser Focus World webinar, August 13, 2024.



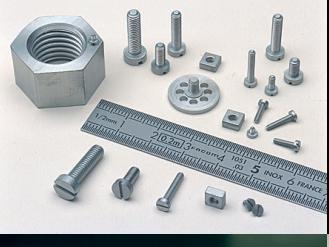
MICRO-MECHANICS ON STRATEGIC MATERIALS

- 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
 Possibilitiy 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.



Large stock of Molybdenum and Tantalum

All parts made according to drawings in these materials









Cleaning and Dégassing

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

AlScN 压电微机电系统 共性工艺技术开发

摘要：使用掺钪氮化铝压电材料，我们开发了一种通用的压电 MEMS 工艺。同时我们设计了一个技术认证平台 (TQV) 来验证该工艺。我们的 TQV 设计是将压电 MEMS 构建为 2.5 维参数化单元 (p-cell) 来区分 MEMS 器件与其他半导体技术 (尤其是 CMOS 技术) 在结构和材料上的差异我们创建了一个定制的 TQV，我们可以在客户产品开发过程中，创建一个定制的 TQV，来优化客户的性能，这个定制的 TQV 中包含客户的芯片设计和我们的 PDK 测试密钥。

关键词：TQV、PDK、压电、AlScN、MEMS

作者：樊雨佳，王瑜璞 *，刘婷，宋笠，李良，张婷，麦志洪
湖北九峰山实验室，湖北 武汉，430206
*wangyupu@jfslab.com.cn

1. 引言

MEMS（微机电系统）是一种微型集成器件（通常尺寸为 $1\mu\text{m}$ 至 $1000\mu\text{m}$ ），它是将机械元件、传感器、执行器和电子元件集成在一个半导体芯片上，它具有体积小、成本低、功耗低、可靠性高且易于批量生产等优点，这使得其成为众多行业不可或缺的关键部件。众所周知 MEMS 已广泛应用于汽车、消费电子、医疗保健和生命科学等领域。在当今社会飞速发展的今天，尤其值得一提的是，人工智能技术同样需要 MEMS 来感知物理世界，而 MEMS 也需要 AI 来充分发挥其价值。这种相辅相成的关系正在推动整个 MEMS 生态系统的创新和增长。据我们了解 MEMS-AI 组合驱动了智能设备、工厂、城市和汽车中的“智能”，而 MEMS 成为了真正赋能我们当今生活的智能、互联和自动化世界的“隐形技术”，其应用领域正在持续快速扩展。压电 MEMS 是最有前景的技术之一。AlN 和 AlScN 谐振器及滤波器的商业成功为压电材料在 MEMS 产业的应用打开了一扇新的大门。目前，人们对基于 AlN 和锆钛

酸铅 (PZT) 的 MEMS 的兴趣日益浓厚，尤其是 AlN MEMS，它已被集成到 CMOS IC 器件中。图 1 是 MEMS 器件的分类表。从中我们可以看出 MEMS 的应用前景非常广阔，产量需求也日益增长，而随着 MEMS 应用地这种趋势，我们不难发现当前的 MEMS 器件开发面临挑战。

传统的 MEMS 器件由于体积小、结构设计独特且产量需求不高，所以通常需要自行定制工艺。我们称之为“一个器件，一个工艺”。因此这种器件开发整个工艺和产品开发大约需要 2 到 3 年，这需要较长时间才能进入市场，这对于产品的营收、企业的发展十分不利。因此很多的设计人员希望通过采用通用工艺的方法来缩短开发时间，并促使更多企业的商业模式从 IDM 模式走向代工模式。这样 MEMS 设计人员可以使用代工厂 MEMS 工艺设计套件 (PDK) 简化其设计，形成自己的设计，然后凭借代工厂的强大工艺，形成自己的产品，从而冻结工艺、通过可靠性认证并证明提高产量的可行性。

本文介绍了我们基于通用 AlScN 压电 MEMS

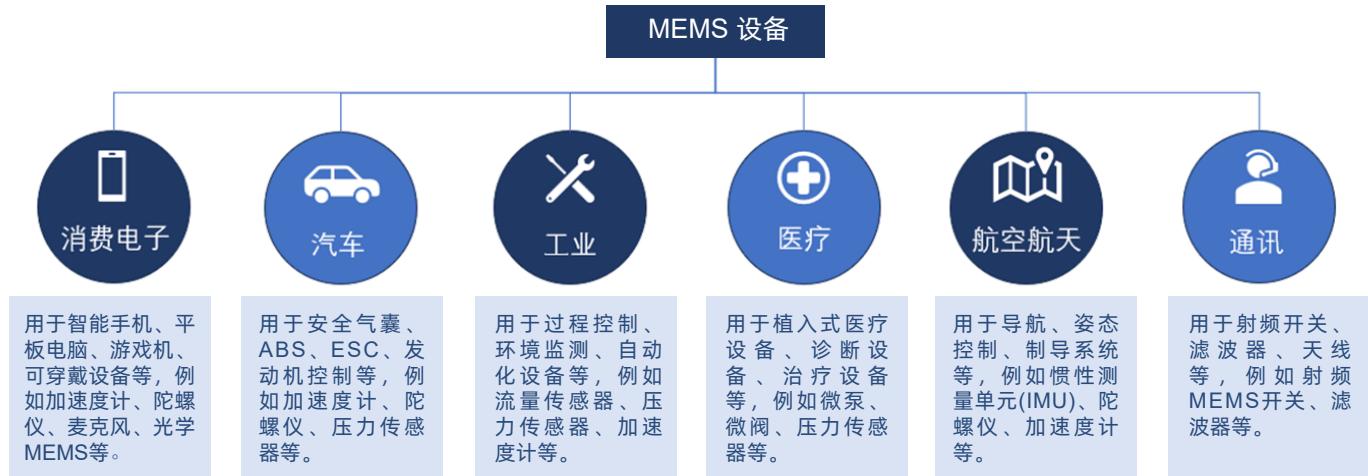


图1: 微机电系统设备按应用领域分类

工艺的技术开发，该工艺可用于制造加速度计、陀螺仪、压力传感器、谐振器和振荡器、超声波传感器和换能器等器件。为了验证该工艺，我们根据工业标准 JEP001 设计了一个技术认证平台 (TQV) 将压电 MEMS 构建为 2.5 维参数化单元 (p-cell) 设计。根据客户产品开发过，我们设计了一个定制的 TQV，其中包含客户的芯片设计和我们的 TQV 测试密钥，用于调整客户的器件性能。其 PDK 文档包含以下信息：

- 1) 材料的机械、电气和压电特性；
- 2) 制造信息以及关于工艺设计规则、层厚度等的规范；
- 3) 工艺流程；
- 4) TQV 过程控制监视器 (PCM) 测试结构；
- 5) 来自 TQV 过程控制监视器 (PCM) 的过程控制数据；
- 6) TQV 原型的仿真和测试数据。

2. 工艺技术认证平台设计

工艺技术认证平台包含用于工艺控制和监控的测试密钥、用于工艺窗口和裕度开发的实验设计 (DOE)、MEMS 元件及其构建模块、MEMS 原型以及用于技术认证的其他可靠性测试结构。图 2 显示了 MEMS TQV 设计的功能模块。为了更好地服务客户，我们推荐对于产品开发和小批量生产采用 MEMS MPW (多产品晶圆) 的解决方。我们也将进行严格的工艺控制为我们的客户带来更高的产品良率。



图2: MEMS TQV 功能模块

要实现一款 MEMS 产品，需要经历 7 个主要阶段：

- 1) 产品概念和市场调研。在此阶段，我们需要验证概

念的价值，了解市场的主要参与者以及产品的未来趋势。

2) 可行性研究。基本上需要考虑两个主要方面即设计和制造流程。根据 IEC 60812 2.0 版、BS EN 60812:2006、AIAG 的 FMEA 标准以及 SAE-J-1739 等行业标准的建议，流程和产品开发的每个阶段都需要进行 DFMEA (设计故障模式和影响分析) 和 PFMEA (工艺故障模式和影响分析)。在此阶段，我们对设计和工艺风险进行了详细分析。

3) 为了最终确定产品定义，我们列出了工艺和产品规格，并将这些信息融入到我们的工艺和产品设计中。TQV 设计已在此阶段完成，PDK 将在 TQV 的工艺技术开发过程中不断完善。

4) PDK 成熟度规划可分为四个阶段：工艺短制程开发、工艺全制程开发、技术认证和原型认证。在产品开发中，我们应根据 JEP001-3A 考虑产品认证。

5) 在工艺开发（包括短制程开发和全制程开发）中，工艺处于严格控制之下，并使用 TQV 测试结构进行监控。定义了用于工艺控制的关键材料和工艺参数。DOE 数据将提供工艺窗口。Cp 和 Cpk 用于判断工艺能力。

6) 对于 MEMS 器件，在第 6 阶段，我们根据 JEP001（针对消费电子产品）以及 AEC-Q 103（针对汽车产品）规划了可靠性测试。这是 MEMS 认证计划。可靠性评估贯穿于工艺开发的所有阶段。并且，我们在每个阶段结束时都会重新评估 DFMEA 和 PFMEA。

7) 第 7 阶段旨在降低成本。良率越高，成本越低。
8) 故障分析提供了查找根本原因的可能性。通过所有测试关键件、组件构建块、原型及其可靠性评估，可以识别故障模式。MEMS 故障分析的挑战在于其具有带腔体的移动组件、较大的分析区域以及较厚的机械结构。为了揭示故障机制，避免使用机械样品制备方法，并且材料分析对于了解材料性能的劣化始终至关重要。

图 4 详细描述了工艺开发流程。

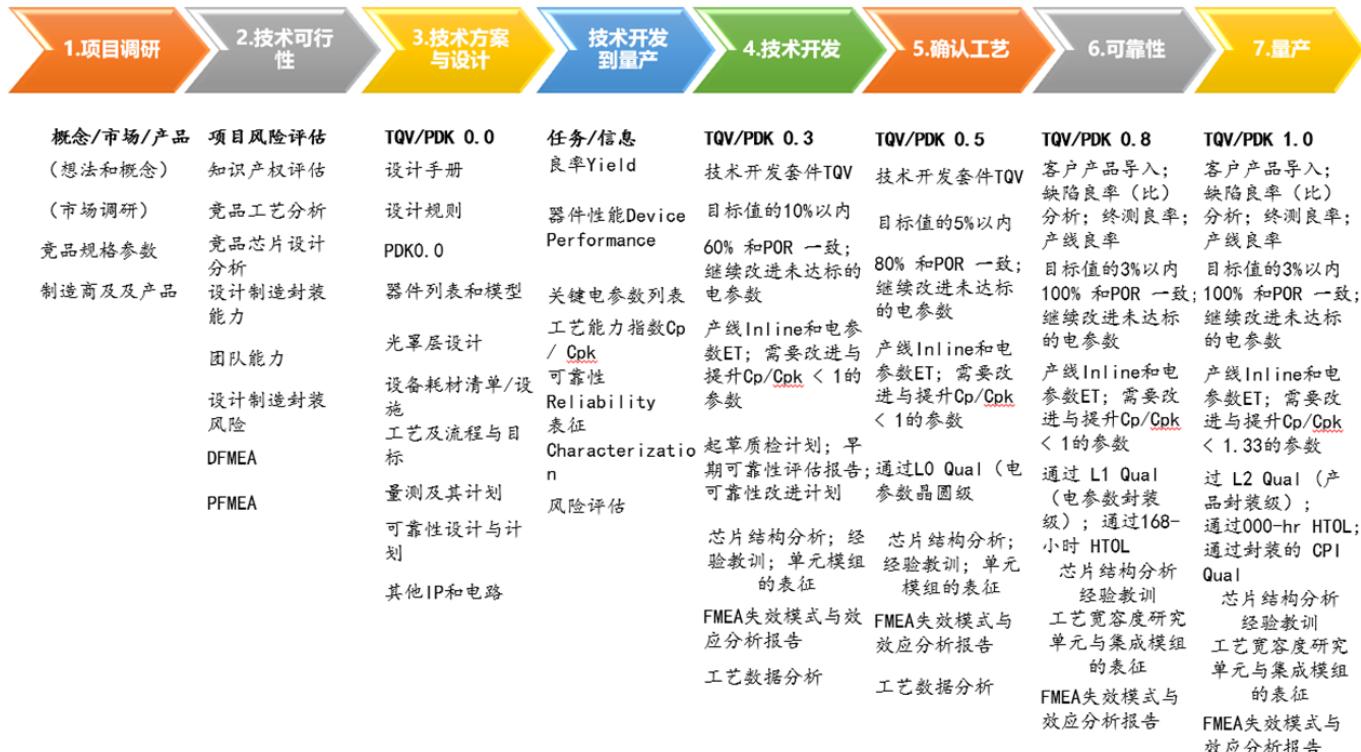


图3: PDK工艺开发路线图

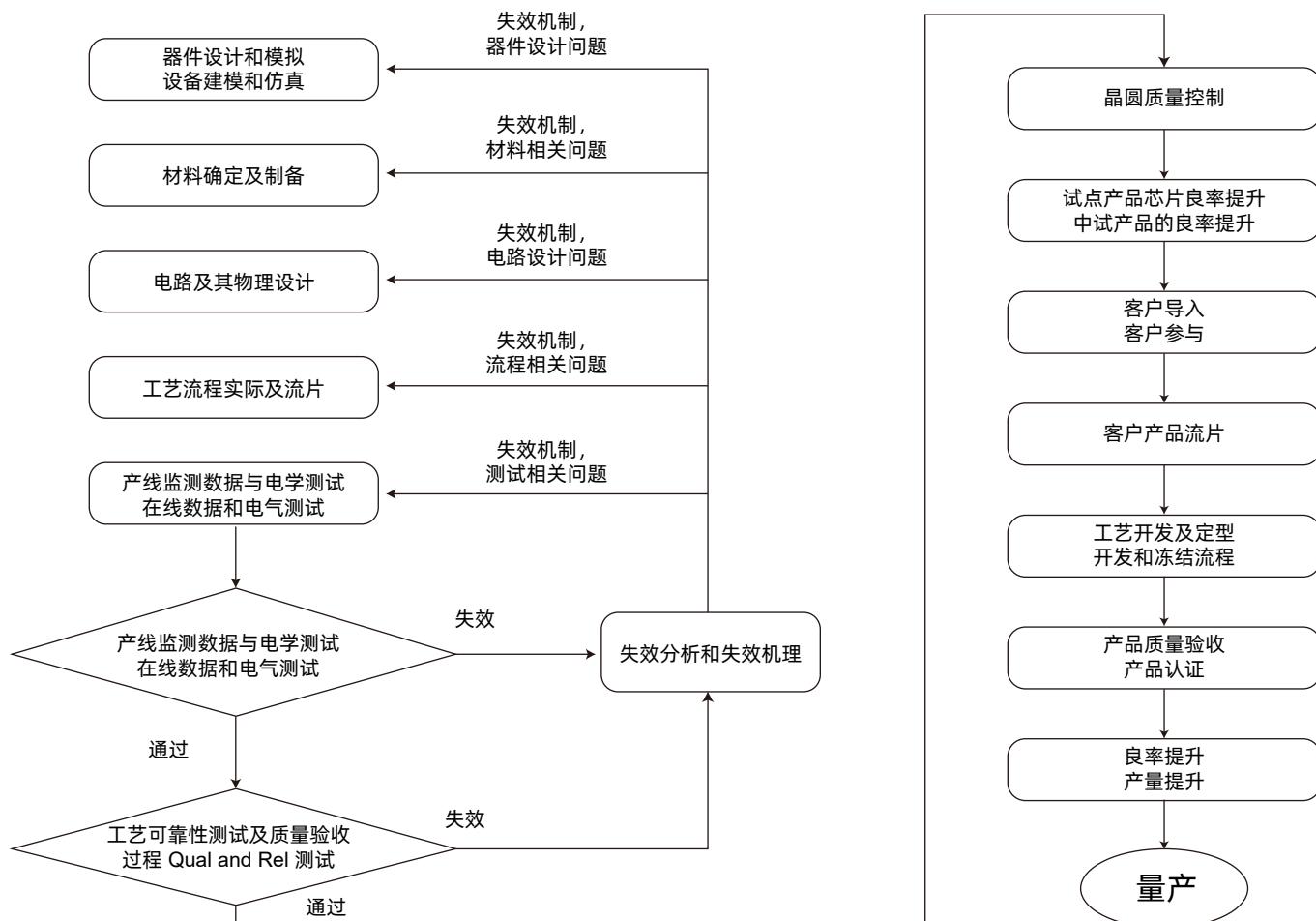


图4: 微机电系统 (MEMS) 工艺技术开发与产品开发流程

3. 关键材料工艺验证

MEMS 器件主要包含三个部分：机械组件、AlScN 执行器和 AlScN 传感器。通用压电 MEMS 结构主要包含三个部分：腔体、MEMS 器件和盖体。工艺中，腔体晶圆通过共晶键合的方式键合到 MEMS 器件 SOI 晶圆上，盖体晶圆则通过共晶键合的方式键合到腔体-MEMS 晶圆上。如果采用盖体，则采用 TSV 技术进行互连。图 5 是 AlScN 压电 MEMSN 振荡器的横截面图。

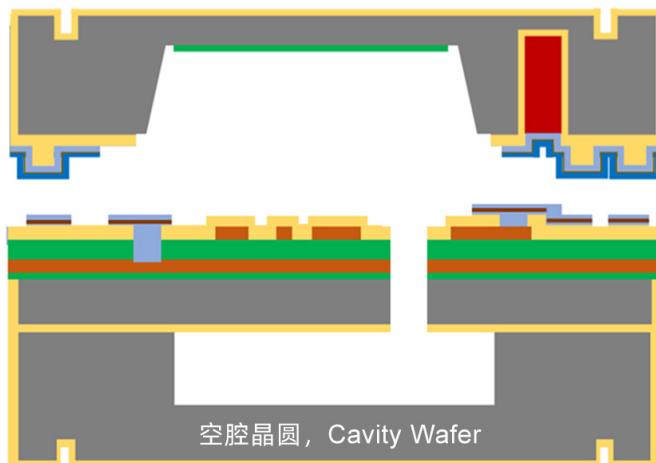


图5: AlScN压电MEMSN振荡器的横截面图

图 6 展示了一个定制的 TQV 的版图分布情况。在设计中，原型芯片参数可以与测试结构的测量数据关联。在开发过程中，对原型芯片和测试结构的故障模式进行了分类。通过调整测试结构的参数，原型芯片的性能得到了调整。

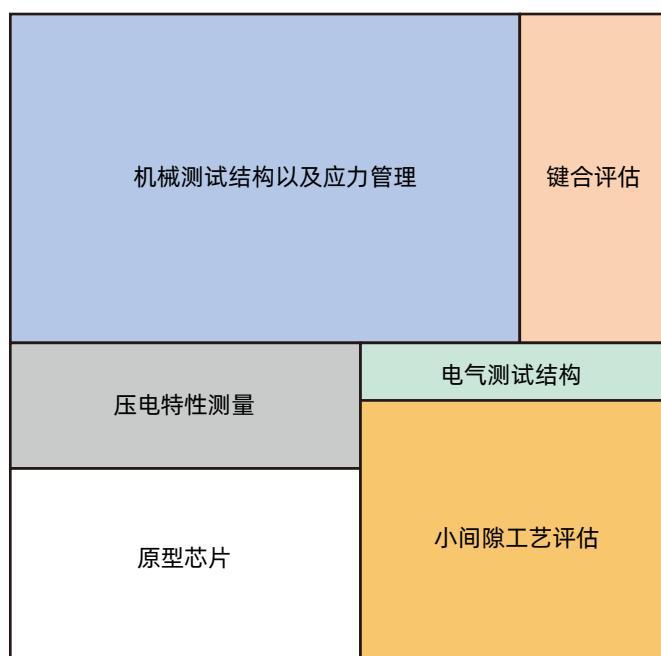


图6: TQV版图分布示意图

压电执行器和传感器是该装置的关键组件。利用压电显微镜 (PFM) 监测 AlScN 压电系数 d_{33} 。使用已知 d_{33} 值

的参考样品来评估薄膜的 d_{33} 。PFM 映射图像如图 7 (左) 所示。厚度为 1 μm 的 AlScN 薄膜沉积在厚度为 300 nm 的 Mo 金属电极上，该电极位于电阻率为 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ 的硅基板上。图 7 (右) 显示结晶性良好的区域的 d_{33} 值为 9.4 pm/V。

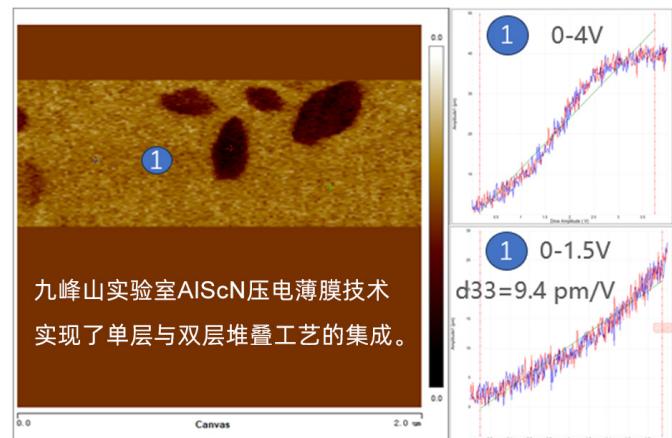


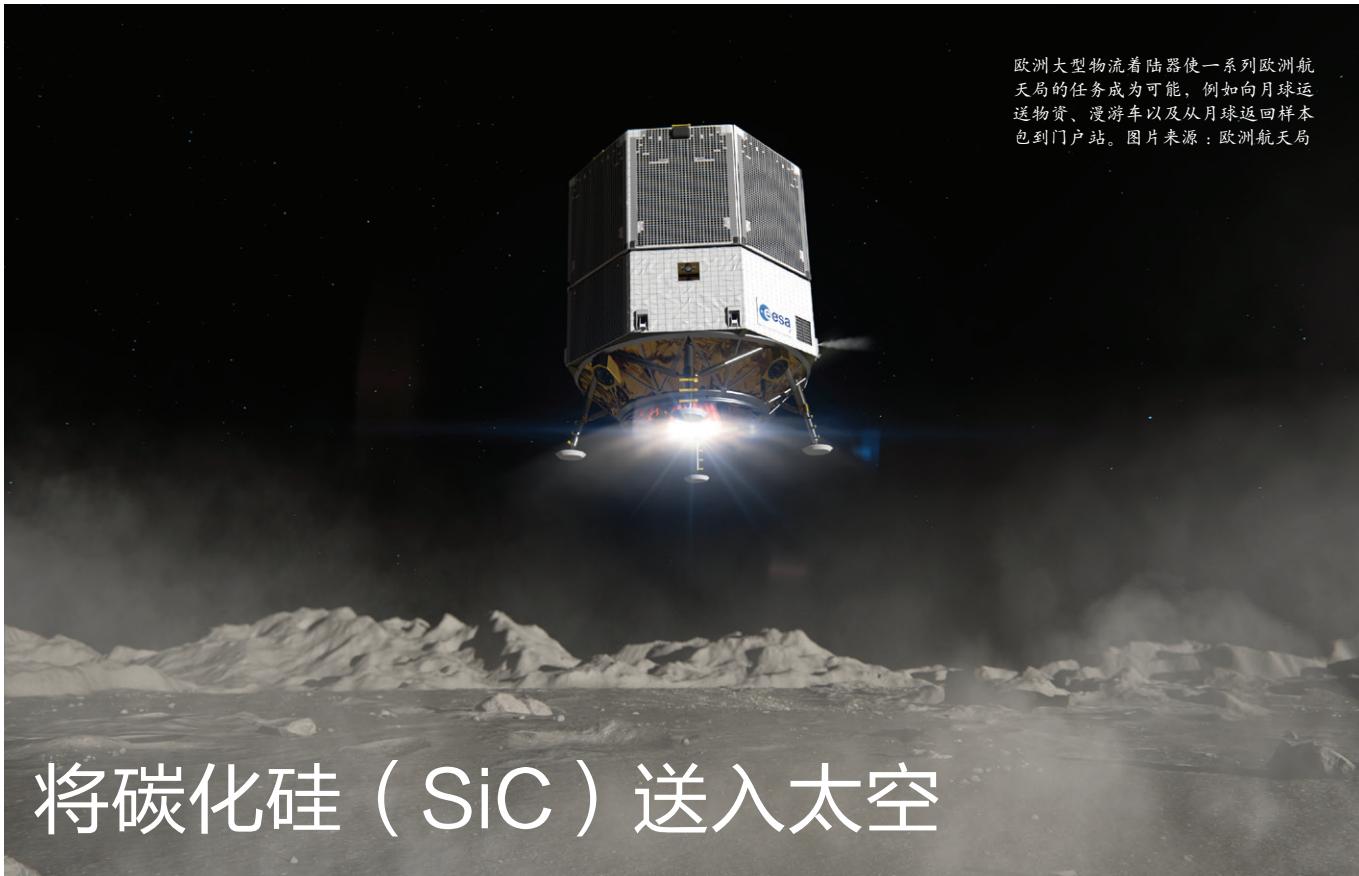
图7: 压电性能 d_{33} 展示图

4. 总结

我们开发了一种通用的 AlScN 压电 MEMS 工艺。为了验证该工艺，我们又设计了一个技术认证平台 (TQV)。由于 MEMS 器件与其他半导体技术（尤其是 CMOS 技术）在结构和材料上的差异，我们的 TQV 设计将压电 MEMS 构建为 2.5 维参数化单元 (p-cell) 设计。在客户产品开发过程中，我们创建了一个定制的 TQV，其中包含客户的芯片设计和我们的 PDK 测试密钥，以此来优化客户的器件性能。CS

扩展阅读

- ▶ [1] 面向 CMOS 集成压电 MEMS 工艺设计套件，Benyamin Davaji、Justin Kuo、Matteo Rinaldi 和 Amit Lal，固态传感器、执行器和微系统研讨会，南卡罗来纳州希尔顿黑德岛，2022 年 6 月 5 日至 9 日；DOI : 10.31438/trf.hh2022.7
- ▶ [2] 一种模块化通用单片集成 MEMS 制造工艺。M. Linares Aranda、W. Calleja Arriaga、A. Torres Jacome 和 C.R. Báez Álvarez。《Superficies y Vacío》30(3): 30-39, 2017 年 9 月；DOI: 10.47566/2017_syv30_1-030030
- ▶ [3] JEP001-2A，晶圆代工厂工艺鉴定指南 - 前端和晶体管级；DOI URL
- ▶ [4] JEP001-3A，晶圆代工厂工艺鉴定指南 - 产品级；DOI URL
- ▶ [5] AEC-Q103-002，基于失效机制的 MEMS 压力传感器器件应力测试鉴定；DOI URL
- ▶ [6] AEC-Q103-003，基于失效机制的 MEMS 麦克风器件应力测试鉴定。DOI URL



欧洲大型物流着陆器使一系列欧洲航天局的任务成为可能，例如向月球运送物资、漫游车以及从月球返回样本包到门户站。图片来源：欧洲航天局

将碳化硅（SiC）送入太空

为了未来的太空任务，电气系统制造商需要更好的功率器件，这一需求由碳化硅满足。

作者：安托恩·阿利扎巴拉加，欧洲航天局

我们将重返月球，并且这一次我们打算在那里长期停留。确保这一目标实现的是阿尔忒弥斯计划，这是欧洲航天局（ESA）、美国国家航空航天局（NASA）以及其他国际和商业伙伴之间的合作项目。我们将共同在月球上建立首个长期人类存在。

实现这一目标的关键需要许多令人惊叹的技术。其中包括：月球门户，首个绕月运行的空间站；月球着陆器，如阿尔戈诺特号，能够运输货物、基础设施、重型机械、漫游车和发电站；以及正在开发中的月球居住模块。尽管所有这些任务的目标各不相同，但它们有一个共同点：对高功率的需求。

详细阐述问题

对高功率的需求是一个重大问题，因为现有

的宇航级硅功率器件无法满足这些高功率任务的技术要求。由于这种不足，太空电力行业正在寻找更优越的替代品。

在欧洲航天局，如同太空电力行业的许多其他组织一样，我们注意到碳化硅功率器件的兴趣和部署显著增加，并且我们一直在研究这是否能满足我们的需求。不幸的是，目前市场上没有宇航级的 SiC 功率器件，因为宽带隙晶体管和二极管的生产商几乎将所有注意力都集中在庞大的汽车行业。到目前为止，普遍的看法是太空市场对 SiC 的需求太小，无法形成商业案例。但随着对高功率需求的增加，这种情况即将改变。

为了简化 SiC 制造商的工作，并确保这些器件能被太空电力行业快速采用，我们与欧洲的主要太空电力公司进行了交流。在这些讨论中，我们专注于明确他们的需求，确定潜在应用，分类主要技术驱动因素，并为 SiC 制造商开辟一个新市场。利用我们所学到的一切，将能够为特定应用设计优化的器件，使太空行业技术转型无缝衔接，并加快这些器件的采用。此外，这一系列事件将为 SiC 制造商创造一个明确的商业案例。

我们将项目分为五个阶段。首先，我们与欧

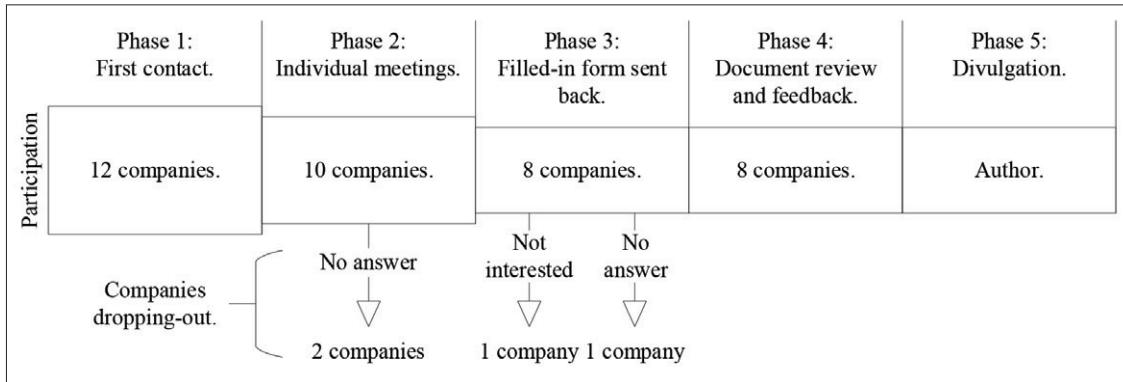


图1：项目组织的各个阶段，以及参与每个阶段的公司数量。两家公司没有回复首次联系邮件，另外两家公司在首次会议后退出。其中一家公司告诉我们，他们主要专注于低功率应用，并且对当前可用的功率器件技术感到满意。另一家公司积极参与会议，给出积极反馈，提出想法，并且在会议后的几个月里提供了进一步的信息。然而，他们未能寄回填写了所需具体信息的表格。我们发出了提醒，但他们仍然没有寄回表格，因此即使我们将他们的反馈纳入了文档，我们也将他们视为退出。在2024年ICSCRM技术讲座之后，这家公司再次联系我们，询问后续信息，我们很乐意提供。

洲最重要的公司进行了初步接触，然后继续进行单独会议，填写专门设计的表格，并收集、分类和记录所有信息。最后阶段，传播，涉及通过各种平台，包括本出版物，向 SiC 社区报告我们的发现。作为这一努力的一部分，我们在去年秋天于北卡罗来纳州罗利举行的国际碳化硅及相关材料会议上进行了技术演讲。

行业需要什么？

在收集和整理了来自不同公司的信息后，我们需要对其进行分类，以确保公众能够获取这一巨大资源。我们根据行业需求进行了首次分类。

我们的关键发现之一是，太空行业需要在其

系统中增加功率水平，同时不降低性能。这只能通过增加系统的电压、电流或两者来实现。由于宇航级器件的阻断电压能力有限，以及其他技术原因，增加电流是最常见的方法。不幸的是，如果不影响性能，就无法在现有最先进的太空功率器件技术上取得这一进展。

太空行业需要的是“更大”的器件，具有更高的阻断电压能力和更高的额定电流，这些优势将允许在单个器件中处理更多功率，同时保持低功率系统提供的性能指标。

需要注意的是，太空行业已经拥有高功率解决方案。他们是如何做到的？通过一些不受欢迎的妥协，例如使用速度慢的高电流器件或将多个

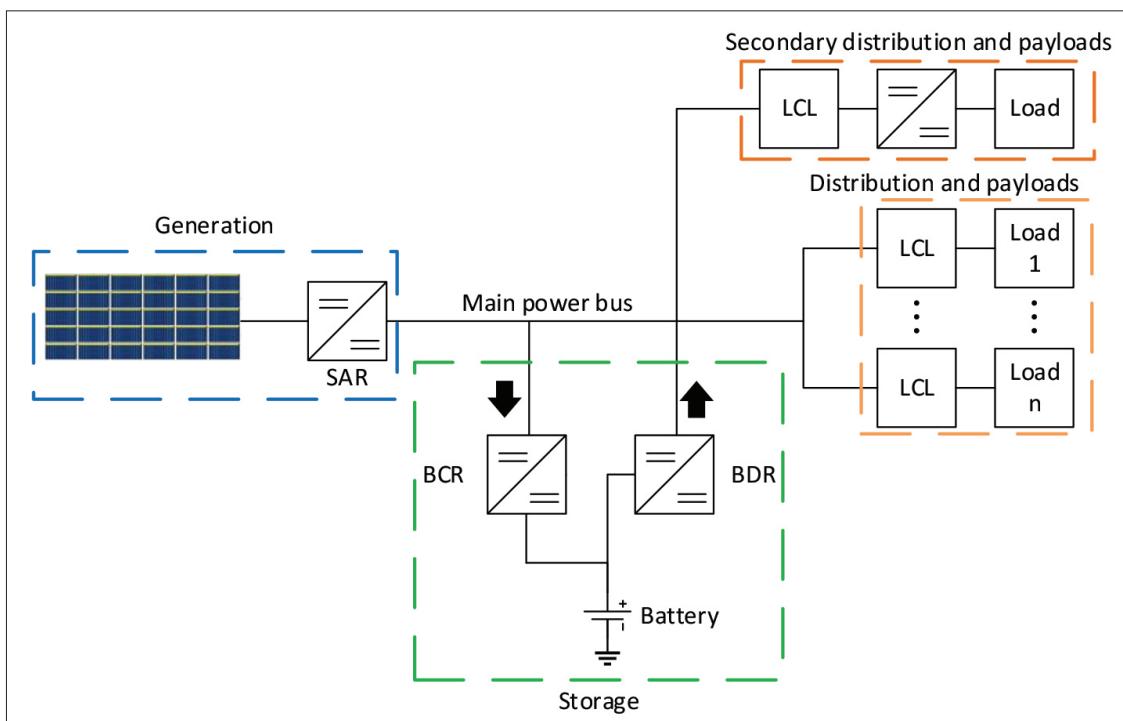


图2：卫星的电源架构包括多个功率转换和分配阶段。每个调节器都是一个转换器，通常基于多个器件。特定负载可能需要二次分配线路，以及自己的直流-直流转换器，以将电压调节到负载所需的水平。这些电子系统中的每一个都需要为未来的任务增加功率，为太空行业在其设计中引入碳化硅器件提供了机会。

低电流器件并联。这些方法导致复杂的布局、高体积和损耗大的系统。由于这些弱点，太空行业渴望改进现有高功率系统的性能。这意味着需要“更好”的器件，在高电压下具有更低的导通电阻，并在高电流下具有改进的开关特性。

哪些应用？

太空系统不过是自主能量生成、存储、分配和消耗的系统。它们可以被视为一个微电网，以孤岛模式在轨道或太空中运行。

与任何自主能量系统一样，产生的电能必须经过转换、分配，然后再进行转换，然后才能被存储或被有效载荷使用——这些是卫星或太空系统的最终用户。直流电（DC）用于太阳能阵列的发电、电池的存储以及大多数有效载荷的消耗。

为了在太空中完成各种任务，需要进行功率转换，主要涉及基于我们研究的功率器件的直流 - 直流转换器。如果有效载荷的功率增加，发电功率也会增加，进而提供功率转换的转换器的功率

也会增加。

太空行业正在考虑在卫星的主要直流 - 直流转换器、太阳能阵列调节器、电池充放电调节器以及为有效载荷供电的转换器中使用 SiC。所有这些直流 - 直流转换器都必须是高功率和高电压的。此外，这些直流 - 直流拓扑结构将倾向于包括一个整流阶段。无论这个整流是通过二极管实现，还是通过同步有源开关实现，这些器件都需要匹配应用的高电压和高功率水平。SiC 还将在锁定电流限制器中发挥重要作用，传统上基于硅 P 型 MOSFET 用于控制简单性，用于管理分配和有效载荷电流限制。然而，这些器件在高电压下的性能会急剧下降，并且电流非常有限，因此高电压和高功率在这种技术下是不可行的。引起关注的替代品包括 N 型 MOSFET，甚至涉及基于氮化镓（GaN）器件的开关配置。然而，随着分配中的电压和功率要求增加，SiC 的吸引力增强。太空行业有兴趣在未来使用 SiC 用于高电压和高功率的锁定电流限制器，以实现高功率分配。

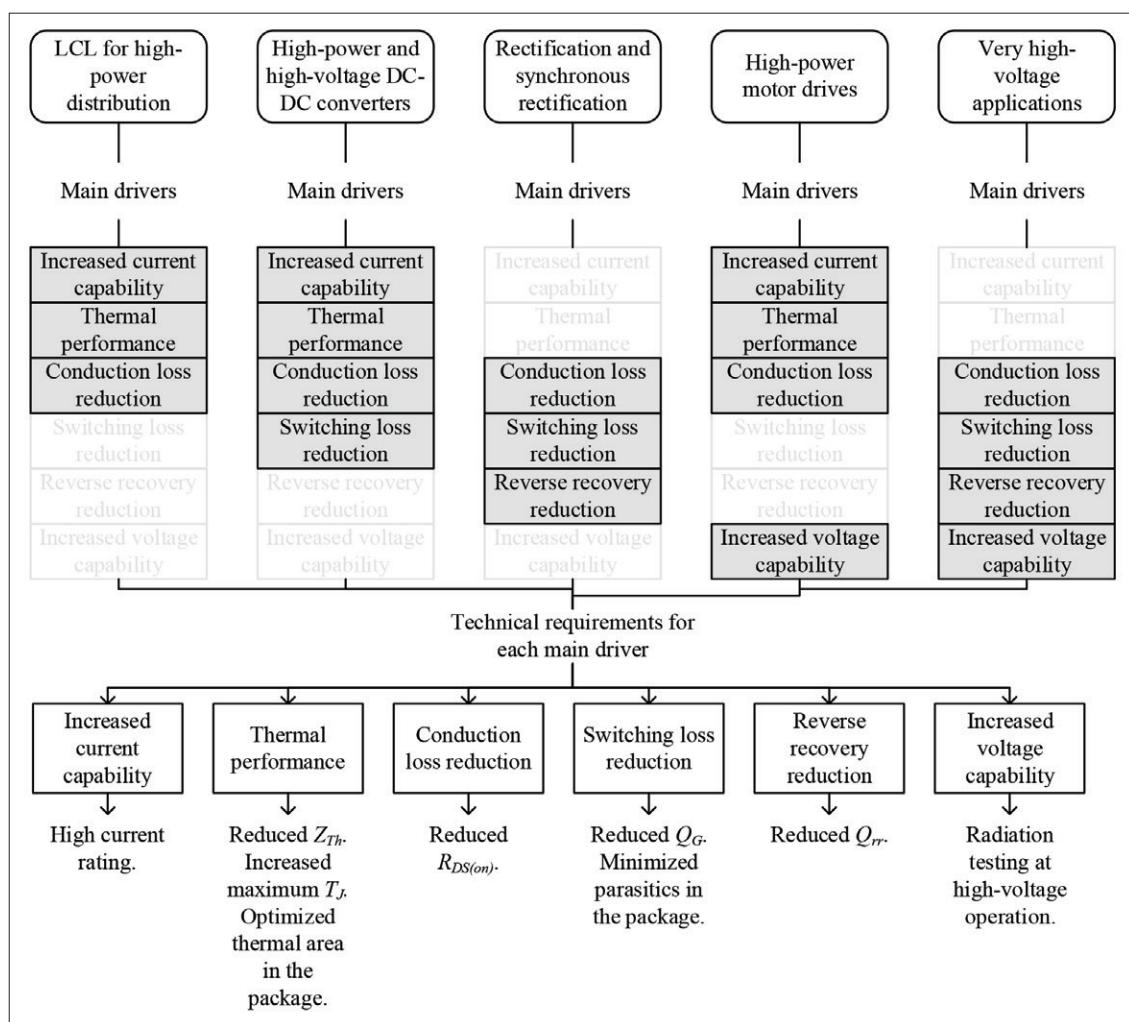


图3：对欧洲航天局的行业反馈中提到最多的应用。在这次信息收集过程中，欧洲航天局确保行业明确指出他们希望在每个应用中优化的主要驱动因素。欧洲航天局还详细列出了新器件需要满足的技术要求，以在每个主要驱动因素中产生积极影响。

此外，对高功率电动机驱动的需求也在增加，主要与月球着陆器和重型机械有关。这些特定的转换器在卫星中并不常见，但它们以类似的概念运行，拥有专用的电池。由于电压限制，这些电动机驱动必须是非常高电流的系统。即使它们只在短时间内运行，它们的性能要求也很难用当今的硅器件来满足。

我们不能不提到非常高电压的应用。这些应用很少，涉及使用几百伏的电压为科学仪器或推进单元供电。如果需要非常高电压的分配，这就需要特定的非常高电压系统，例如电流断路器。对于所有这些应用，需要优化主要驱动器，以改善确定的技术要求。

封装如何？

每个封装都应该是推动者，而不是限制功率器件运行的因素。为了确保这一点，封装必须从设计过程的开始就考虑进去，以确保它能提供特定应用所需的所有功能。

一旦定义了新产品的目标应用，其制造商必须确定主要驱动因素，并开始着手设计封装，以确保它能相应地设计。这种方法可以成为行业采用新产品的一个游戏规则改变者。

在低开关频率下，我们往往你会发现最高功率的应用，例如高功率电动机驱动。在这里，可能会产生几十瓦的热量——这些热量需要从芯片中移除。太空行业正在寻找一种具有优化的热板的特定高功率封装，该热板直接连接到冷却系统，以确保低热阻路径。

与此同时，在需要高开关频率的应用中，所部署的器件具有最低的栅极电荷，因此具有最快的开关动态。由于这会导致转换器中的电流和电压快速变化，因此封装不能有长的键合线和连接，因为这会引入几个纳亨利的电感。在这种情况下，封装必须被设计以确保最佳的布局，并减少开关回路中的电感，因为这将防止在快速开关过程中出现不希望的振铃和过冲。

辐射要求

当 SiC 功率器件在太空中飞行时，它们将暴露在恶劣的辐射环境中。这可能导致单粒子 (SE) 效应，这些效应会降低 SiC 器件在太空中的电压阻断能力。这些效应与高能粒子的冲击有关，导致器件遭受 SE 泄漏 (退化)、SE 烧毁 (完全破

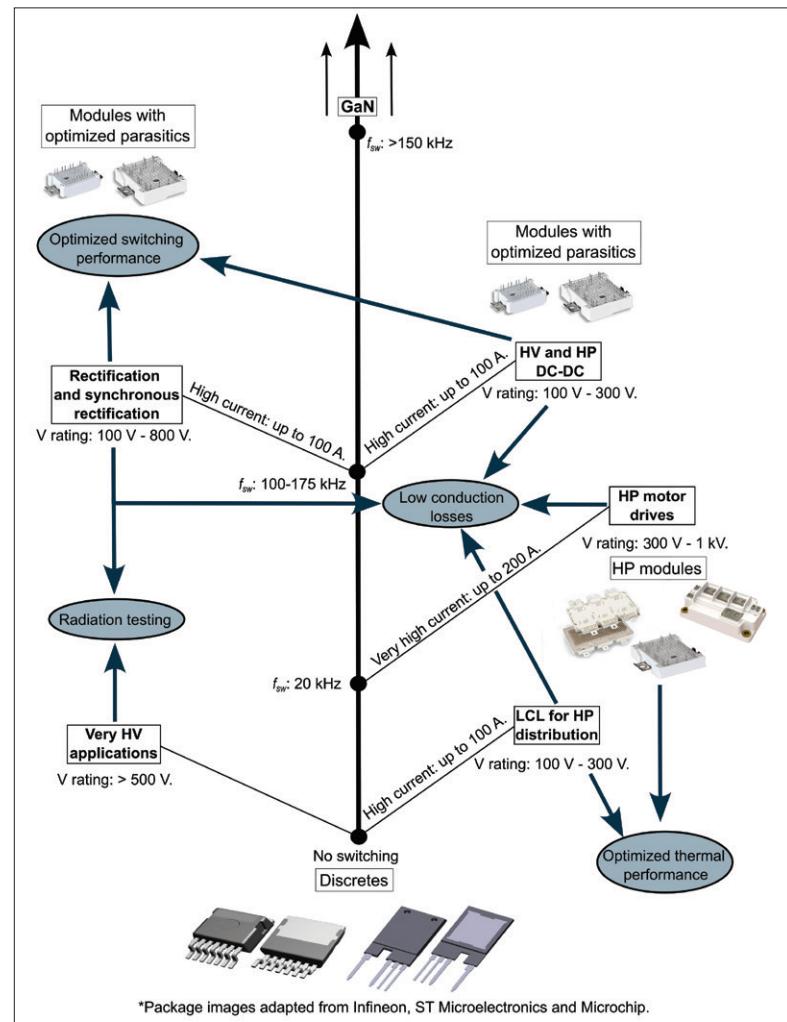


图4：封装应成为功率器件的推动者。由于每个应用都有其自身的主要驱动因素，因此这些应用中使用的器件也应适应以提供所需的性能指标，同时配备封装。从分立元件转向，其中芯片的冷却分别进行，行业看到了引入流行的功率模块的机会，这些模块集成了多个器件。对于非常高功率的应用，通过热板优化芯片的冷却，热板将热量直接传导至冷却系统。对于高频应用，寄生效应对性能的影响更为显著，如果功率模块已经优化了开关之间的连接，则可以减轻功率工程师创建良好布局的负担。

坏) 或 SE 栅极破裂 (如果击中栅极区域)。目前，辐射专家的共识是，防止任何与 SE 相关问题的最佳方法是降低 SiC 器件的阻断电压。通过使用 1.2kV 的 SiC 功率器件，设计者可以在仍然能够在超过 100V 的电压下运行的同时，显著降低 SiC 的阻断电压。

然而，性能比较需要使用工作电压，而不是地面额定值。这是欧洲航天局采用的方法，当使用其测试平台比较宇航级硅和工业级 SiC 的性能时，即使这需要对每个设计进行案例分析。这种对彻底性的需求突显了为什么对新的 SiC 器件进行宇航级鉴定是太空行业的必须。拥有经过鉴定的部件将使航空工程师能够在不需对每个设计进行辐射性能案例分析的情况下进行设计，确保在定义的辐射条件下重复的行为和安全操作。

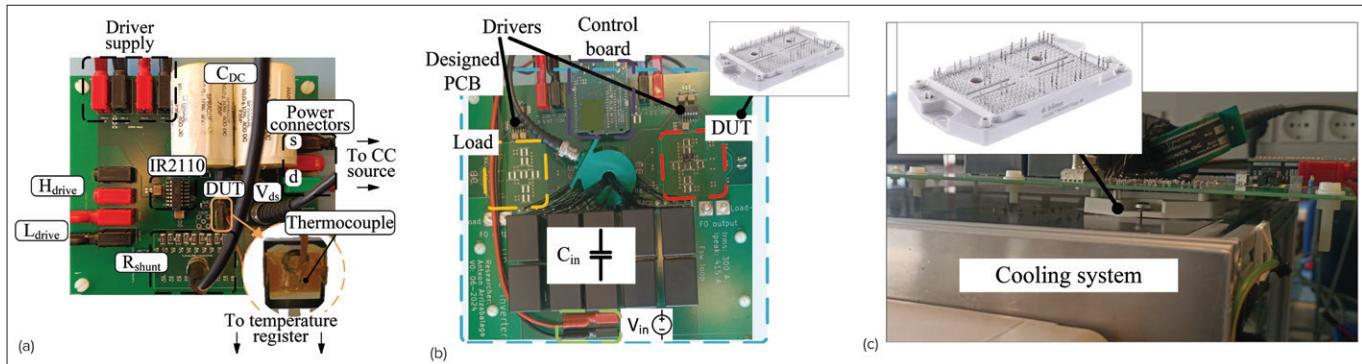


图5：欧洲航天局开发了两个测试平台。一个是用于分立元件，另一个是用于高功率模块。在这两个平台中，所有外围技术均为宇航级，包括驱动器。在仍然使用众所周知的宇航级外围技术的情况下，证明碳化硅功率器件的性能提升，将增加新技术的接受度，加速其采用。这正在欧洲航天局实验室中进行空间运行条件测试，取得了令人满意的结果，增加了对器件技术准备水平的知识。

太空行业会采用 SiC 吗？

了解太空行业如何运作是回答太空行业是否会采用 SiC 这个问题的关键。可以理解的是，这个行业非常注重可靠性。因此，它对进行小的变更持开放态度，如果这些变更能提供可证明的性能提升；但对于对系统进行大的变更则有很大的抵触。太空行业喜欢继续使用其经过充分测试的、可靠的系统，并且有大量的飞行数据支持。

了解这一点后，很明显，如果一种新器件能够部署在传统系统中，它就有更大的机会被早期采用。在我们功率器件的情况下，这意味着使用宇航级的、众所周知的驱动器和外围技术（如 PCB、电容器和连接器）来运行 SiC 器件。采用这种方法可以减少太空电力电子制造商的开发工作量、时间和成本，同时提高他们对新器件的信心。

引入 SiC 的方法应该基于提供性能增强的创新，因为这解决了行业的两个主要需求，我们已经讨论过（回顾一下，它们是增加系统功率水平而不降低其性能，以及改进现有高功率系统的性能）。至关重要的是，这些性能提升要影响目标应用的主要驱动因素，而不改变任何外围技术。

然而，虽然这种方法是确保 SiC 技术被太空行业快速无缝采用的最佳方式，但它对这些宽带隙功率器件的性能是有害的。这是因为使用宇航级的 SiC 驱动器，而不是专门优化的驱动器，会影响功率器件的性能，限制可以享受的好处。至关重要的是，要测试这种未针对 SiC 优化的设置的性能，并将其与现有最先进的系统进行比较。这些测试的成功程度将定义 SiC 被太空行业采用的程度。

欧洲航天局在做什么？

在欧洲航天局，我们正在推进 SiC 器件在太

空应用中的技术准备水平，并测试其在太空运行条件下的性能。我们开发了两个测试平台来完成这些任务：一个用于分立组件，另一个用于测试高功率半桥 SiC 模块。

这两个平台的目标相同，即向太空行业展示，使用 SiC 可以获得性能提升，而无需对系统进行重大更改。通过仅使用宇航级的、众所周知的驱动器和外围技术，我们遵循了太空行业希望的早期技术采用方法。

在分立组件平台上，功率器件是可以更换的。可以在同一系统中焊接宇航级硅和工业级 SiC。通过这个平台，工程师可以在相同的运行条件下比较这两种技术的导通和开关性能。通过高功率平台，我们可以复制高功率电动机驱动的高电流运行条件。成功的测试可能会导致一个高功率半桥 SiC 模块取代多达八个宇航级硅 MOSFET，这一举措可以在系统中引入显著的增益。同样，所有外围技术都是宇航级的，以进行公平比较，并确保被太空行业无缝采用。

如前所述，我们的活动扩展到积极展示我们的结果，并以书面和口头形式分享它们。我们还为感兴趣的公司提供帮助，以及为 SiC 制造商提供指导。

此外，欧洲航天局正在资助宇航级 SiC 开发项目。其中包括 EPOSiC 项目，其目标是开发、制造并全面空间级鉴定一个 300V 50A 半桥 SiC 模块，该模块完全在欧洲制造。这个雄心勃勃的项目展示了我们机构致力于开发将我们带回月球并让我们留下的技术。

与此同时，我们将专注于将 SiC 送入太空。正如 W. 克莱门特 · 斯通所说：“瞄准月亮。如果你错过了，你可能会击中一颗星。”

最新突破： 纤锌矿铁电体低场驱动的畴壁运动

作者：刘明睿¹, 孙晓娟¹, and 黎大兵^{1,2}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所特种发光科学与技术全国重点实验室

²中国科学院大学材料科学与光电子工程中心

以 AlScN 为代表的纤锌矿氮化物铁电材料具有强自发 / 压电极化性能、强铁电性能、高居里温度、CMOS 兼容等优势，解决了传统氧化物铁电体铁电相不稳定、难以与主流半导体工艺平台相兼容等应用瓶颈，在 5G 通讯、电力电子、人工智能等领域具有广阔应用前景。然而，由于其极化反转涉及金属 - 氮原子协同迁移，纤锌矿氮化物铁电体的畴动力学相较于传统氧化物铁电体（单原子移动）更为复杂，导致其具有较高的极化反转势垒，面临高矫顽场和唤醒行为等问题，制约其大规模应用。因此，深入理解这一新型铁电材料极化反转过程中的畴运动机制，以最小的能源成本调控畴壁运动，是这一体系亟需解决的关键科学问题。

近日，中国科学院长春光学精密机械与物理研究所特种发光科学与技术全国重点实验室黎大兵团队联合浙江大学材料科学与工程学院电子显微镜中心田鹤团队在纤锌矿铁电体研究领域取得重大进展，首次揭示纤锌矿氮化物铁电体中低场驱动的畴壁运动新机制，相关研究成果以“Low-Field-Driven Domain Wall Motion in Wurtzite Ferroelectrics”为题发表在《先进·材料》(Advanced Materials) 上。

黎大兵团队与合作者通过在钨探针与 n-GaN 底电极之间施加偏压，利用暗场像透射电子显微镜 (DFTEM) 原位观测到了 AlScN 极化反转过程中畴壁的实时运动过程。[0002] 方向上的金属极性显示为明亮区域，而 N 极性则显示为暗区域。

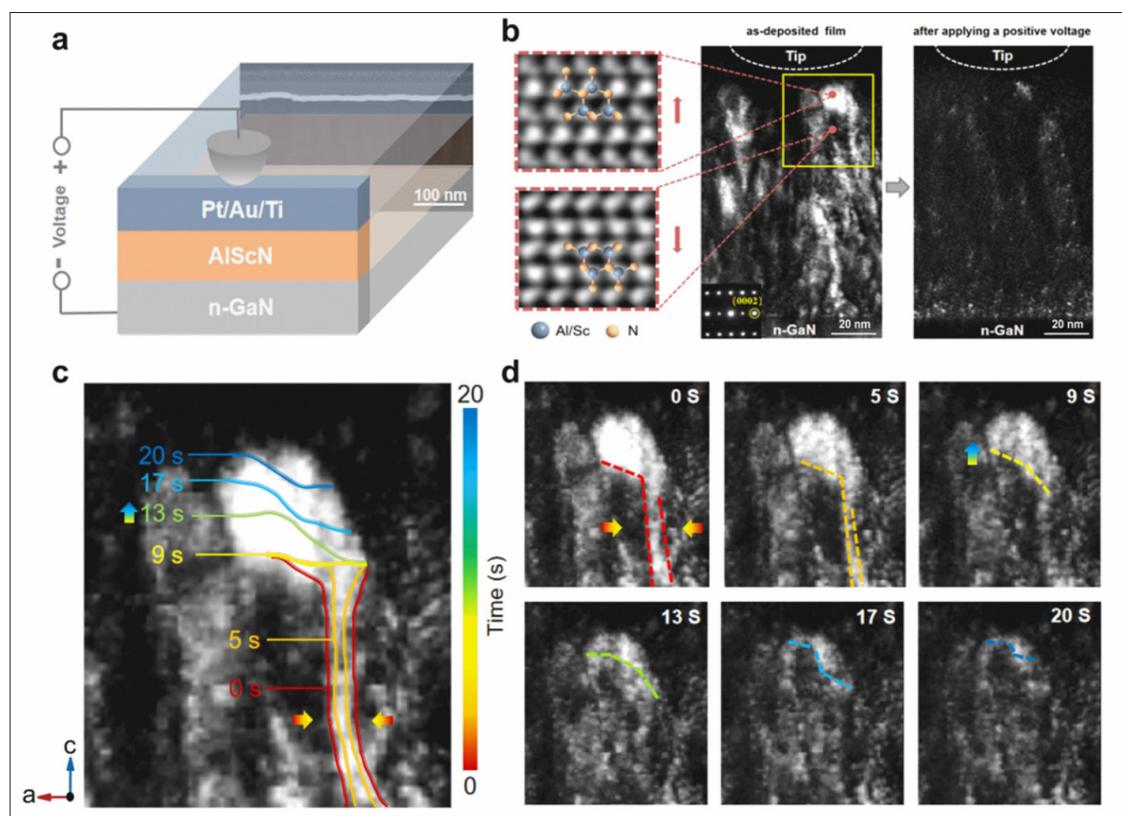


图1：畴壁运动的DFTEM测量。

a) 原位DFTEM与表面探针示意图。

b) (iDPC)-STEM图像显示了暗区(N极性)和亮区(金属极性)，以及施加正电压前后的DFTEM图像。所有亮区在偏压下，金属极性反转为暗区的N极性。

c) 选定区域(图b中的黄色框)中畴壁运动随时间变化的等高线图。

d) 极化反转的时间依赖性DFTEM图像。畴壁的横向运动首先开始，但纵向运动则延迟了9 s。

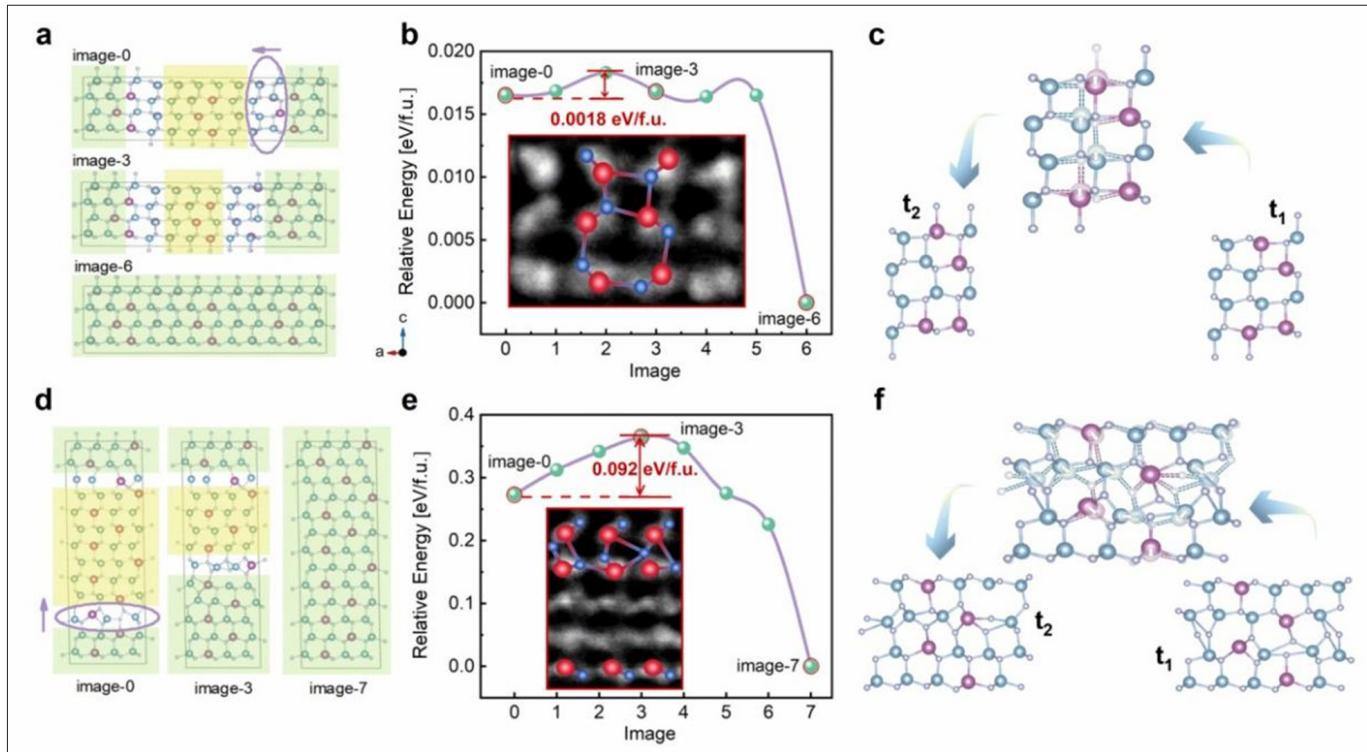
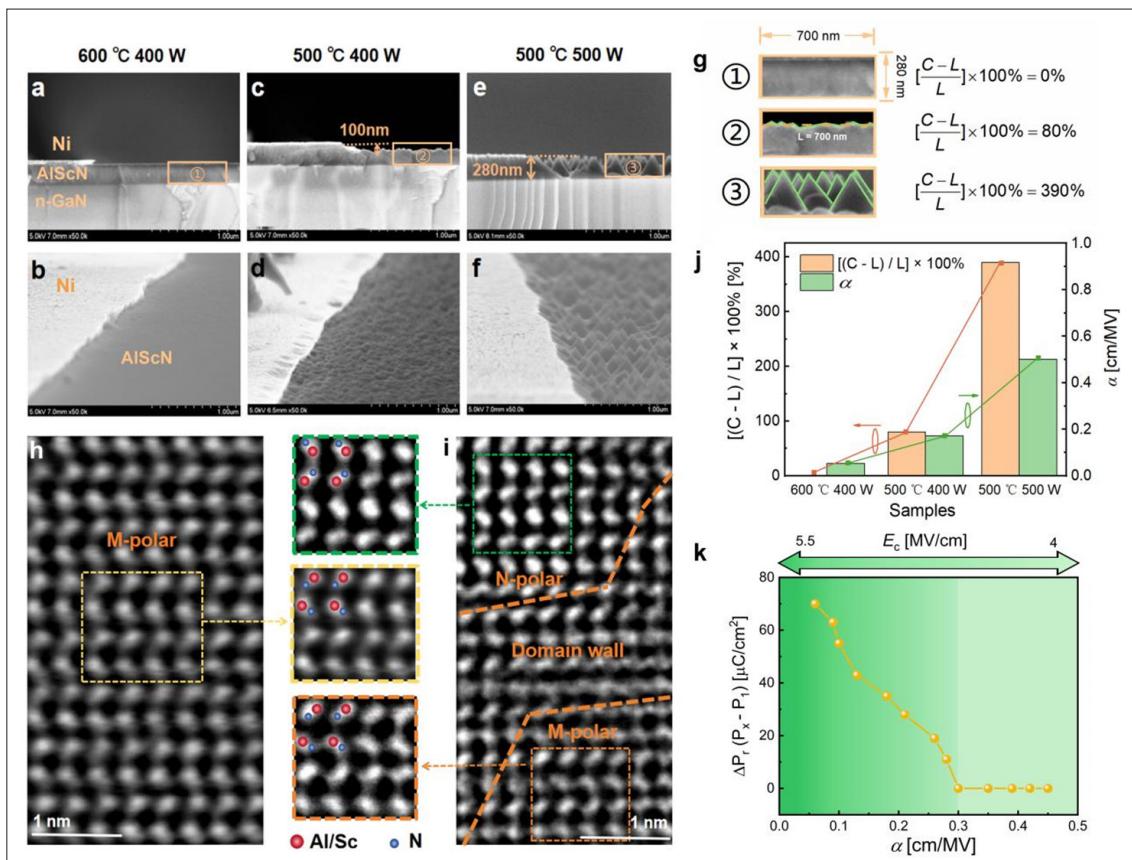


图2：描述畴动力学的理论计算与模型。畴壁a)、b)横向和d)、e)纵向运动期间，AlScN薄膜中不同微观结构的相对能量变化。畴壁c)横向和f)纵向运动期间，畴壁处原子排列变化过程的示意图。插图b)和e)显示了畴壁的iDPC-STEM图像。

图3：湿法刻蚀、STEM 和瑞利拟合的畴壁特性。在KOH溶液中刻蚀后的AlScN薄膜的SEM图像，样品分别在a), b) 600°C 400 W; c), d) 500°C 400 W; and e), f) 500°C 500 W下生长。g)横向运动畴壁密度的半定量计算示意图。iDPC-STEM照片显示了在h) 600°C 400 W下生长的样品的金属极性原子结构，以及i)在500°C 500 W下生长的样品中，将金属极性(右下)和氮极性(左上)区域分隔开来的明显畴壁结构。叠加的AlScN原子结构草图有助于直观展示极化方向。j)不同生长条件下畴壁密度的半定量计算。k)沉积AlScN薄膜的 α 值与唤醒行为/矫顽场的关系。



在顶电极施加正偏压后，畴壁的横向运动（垂直于c轴[0001]方向）优先开始，并在时间延长至9s时完成。然而，畴壁的纵向运动（沿c轴方向）

直到9s才开始，并在时间延长至13s时变得显著。在20s时，大多数区域经历了从金属到N极性的转变。上述结果表明，畴壁的横向运动总是先于

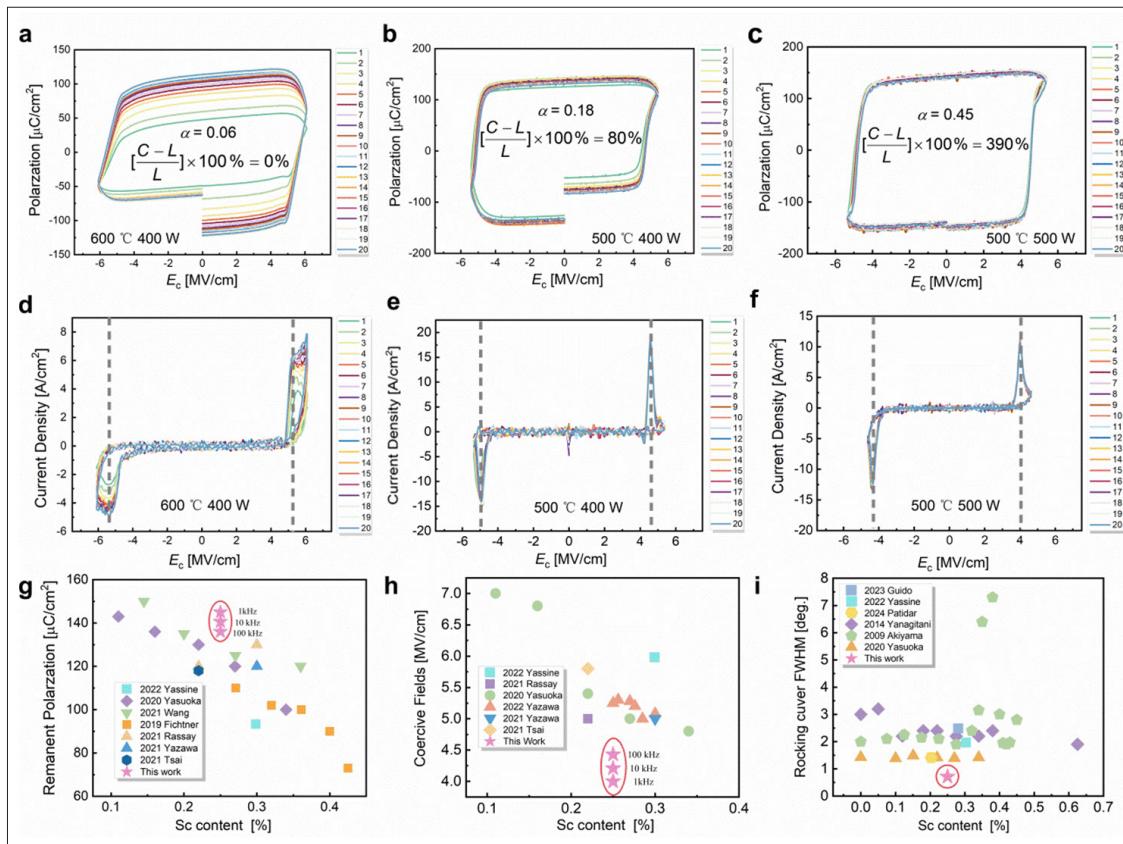


图4: AlScN的铁电特性。a)、d)在单一Al极性条件下(600°C, 400 W)的P-E和J-E循环; b)、e)在混合少量N极性条件下(500°C, 400 W)的循环;c)、f)在混合极性穿透整个薄膜条件下(500°C, 500 W)的循环。比较了g) Pr、h) Ec 和 i) (002) XRC 的FWHM。为了更好地将Ec和Pr与文献数据进行对比, 铁电性在1 kHz至100 kHz的不同频率下进行了测量; 这些结果表明, 本研究中的AlScN薄膜相比以往报道的材料, 保持了较高的铁电性能。

纵向运动发生。

为进一步探究这一现象背后的物理机制, 研究团队通过第一性原理计算模拟了畴壁的横向和纵向运动过程。金属极性的原子结构用绿色标出, N极性的原子结构用黄色标出。绿色与黄色之间的边界即为畴壁。当畴壁沿c轴横向移动时, 畴壁处呈现4-8环规则结构, 具有较低的能量势垒(0.0018 eV/f.u.)。相反, 当畴壁沿c轴纵向移动时, 畴壁处的原子排列更加无序, 畴壁纵向移动涉及到大量化学键的扭曲、断裂及重构, 具有较高的能量势垒(0.092 eV/f.u.)。由于畴壁纵向运动的能量势垒相比于横向运动提高了98%, 因此在纤锌矿铁电体中畴壁的横向运动总是优先于纵向运动。这一现象颠覆了传统Kolmogoro-Avrami-Ishibashi (KAI)模型中“先纵向生长后横向扩张”的认知, 建立了纤锌矿铁电体特有的畴运动框架。

基于此, 研究团队提出通过调控薄膜沉积初期的氮化过程增加薄膜的畴壁密度, 形成贯穿于整个薄膜的混合极性畴, 促进畴壁的横向运动, 抑制纵向运动, 以此降低畴壁运动的整体能量成

本, 从而实现对宏观铁电性质(如Ec和唤醒行为)的调控。具体实验中, 通过湿法蚀刻后的SEM测试以及半定量畴壁密度统计得到降低生长温度以及增加溅射功率能够使初始状态下可横向移动的畴壁密度从0%增加到390%。与此同时, 宏观的介电测量结果显示, 代表不可逆畴壁迁移导致的畴壁密度和/或迁移率变化的α值, 在降低温度以及增加溅射功率的调控下从0.06增加到0.45, 进一步证实了混合极性的显著增加。

铁电测试结果表明, 这一新策略在保持AlScN薄膜高剩余极化强度的前提下, 不仅彻底消除了唤醒行为, 更成功将矫顽场(Ec)降低25% ($\Delta E_c=1.3$ MV/cm), 最终实现了6英寸晶圆级无唤醒行为、性能均匀稳定的高质量薄膜制备, 晶体质量及铁电性能均处于国际领先地位。

综上所述, 该研究加深了对纤锌矿铁电体畴动力学机制和调控规律的理解, 建立了微观畴壁运动与宏观铁电性能的跨尺度关联, 为低场调节畴壁运动提供了一种可行的策略, 对促进低能耗、高稳定性、性能均匀的铁电器件在大规模CMOS架构中的应用具有重要意义。CS_C

Wolfspeed：重组焕发生机？

在通过将贷款转换为股份并申请第 11 章破产保护来解决其巨额债务之后，Wolfspeed 是否已经迈出了复兴的第一步？

作者：Richard Stevenson，《化合物半导体》杂志

Wolfspeed，以及其前身 Cree，数十年来一直处于我们行业的前沿。凭借其在碳化硅 (SiC) 方面的最初专长，这家从北卡罗来纳州立大学分拆出来的公司自 20 世纪 80 年代末成立以来，一直引领着 SiC 衬底、高亮度 LED 以及功率和射频 (RF) 领域的发展。

近些年，在 Wolfspeed 前首席执行官 Gregg Lowe 的愿景推动下，该公司精简了业务，先是剥离了其 LED 部门，然后在 2024 年 12 月将其 RF 业务出售给 Macom。尽管这些举措——将业务重心转向 SiC 衬底、外延晶圆和功率器件——很有意义，因为目前的产品组合与未来几年必将增长的电动汽车市场保持一致，但这并未阻止 Wolfspeed 陷入一场特别凶猛的风暴。由于试图通过大量借贷来充分利用 SiC 市场的增长，同时又面临来自中国 SiC 衬底制造商的激烈竞争，这些制造商通过降价来赢得销售，而该领域本身已经受到产能过剩的困扰，Wolfspeed 陷入了危险之中。

现在，Wolfspeed 正试图通过将来自博格华纳 (BorgWarner)、采埃孚 (ZF) 和瑞萨 (Renesas) 的数十亿美元现金注入转化为股份，在 2024 年 6 月底申请第 11 章破产保护，并通过裁员 20% 来削减工资支出，从而摆脱这种危险的处境。但这是否足够呢？即使 Wolfspeed 挺过来了，它是否已经遭受了不可修复的损害？

就这些问题以及更多内容提供见解的，包括关于 Wolfspeed 陷入如此困境的关键细节，是 Yole 集团的化合物半导体首席技术与市场分析师 Poshun Chiu，他与《化合物半导体》杂志分享了他的观点。

据 Chiu 称，Wolfspeed 的问题因其在产能扩张方面的极具侵略性的投资而加剧，这种投资是

基于以设计导入 (design-ins) 而非设计中标 (design wins) 为基础的乐观预测所推动的。“他们的目标市场规模比 Yole 的数字高得多，” Chiu 说。

受这些热情洋溢的预测推动，Wolfspeed 已经花费了数十亿美元来扩大其产能。在北卡罗来纳州——其材料和外延晶圆业务的所在地，Wolfspeed 最近在其设施中增加了约翰·帕默制造中心。该中心于 2024 年 3 月封顶，旨在生产 200 毫米 SiC 晶圆，耗资 50 亿美元。

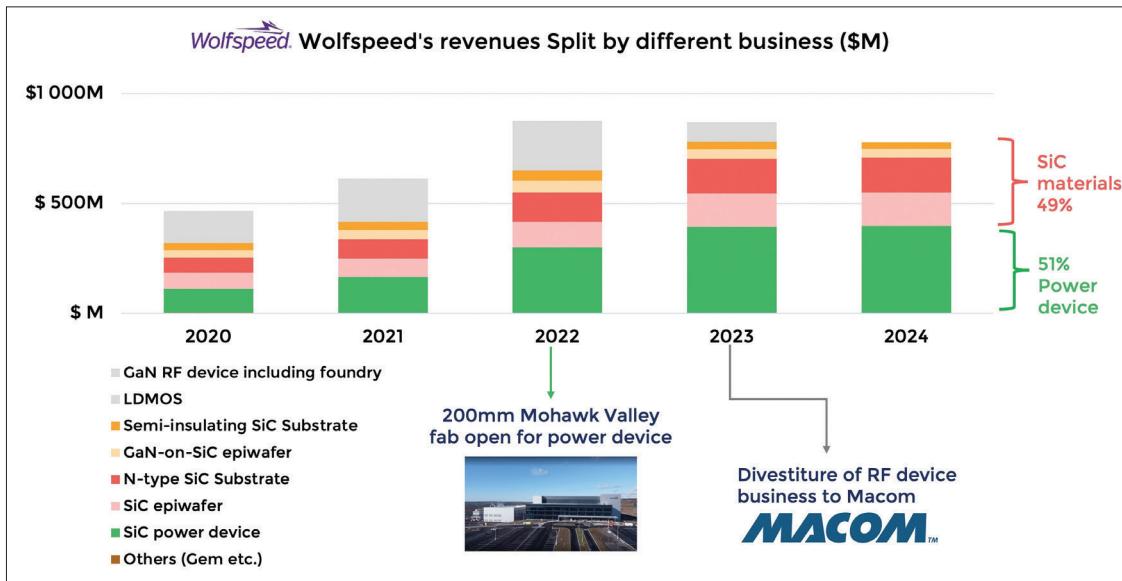
一些器件生产也在北卡罗来纳州进行，使用 6 英寸材料，但这一过程正在逐步淘汰。“在未来几个季度，他们希望在莫霍克谷 (Mohawk Valley) 实现 100% 的器件制造，” Chiu 解释说，计划是在 2022 年作为世界上第一个 200 毫米 SiC 晶圆厂开放的这个设施中增加设备。

强调 Wolfspeed 打算多么快速地发展其业务，该公司还计划在莫霍克谷建造第二个 200 毫米晶圆厂，以及在德国再建一个，后者得到了德国经济事务和能源部的支持。

目前还不清楚采埃孚和博格华纳——另一个财务支持者——将如何收回其巨额投资。但 Wolfspeed 刚刚宣布与瑞萨达成了一项协议，后者在 2023 年 7 月向 Wolfspeed 贷款了 20 亿美元，并同意了一份为期 10 年的晶圆供应合同。现在，这笔贷款已经转换为 Wolfspeed 的股份，将于 2031 年 6 月到期。鉴于缺乏其他选择，Chiu 预计采埃孚和博格华纳也会有类似的结局。

从衬底到器件

在 Wolfspeed 目前的 SiC 衬底、外延晶圆和器件产品组合中，过去几年的重心已经转向了功率电子器件的生产。据 Yole 集团估计，2020 年，SiC 功率器件的销售额约为 1 亿美元——约占公



司收入的五分之一——到 2024 年，这一数字已攀升至接近 4 亿美元，使 Wolfspeed 成为此类器件的第四大供应商。值得注意的是，这种惊人的增长并非线性的，从 2023 年到 2024 年，Wolfspeed 的 SiC 功率器件销售额停滞不前。

该公司在过去五年中在 SiC 功率器件方面的增长对其长期前景至关重要，因为 Wolfspeed 在衬底市场的主导地位正在迅速减弱。除了用于内部生产外，该公司多年来一直向许多领先的功率电子器件生产商出售衬底，但其在这一市场的份额正在下降，现在已经不到 30%，而 2021 年时约为 50%，根据 Yole 集团的说法。

“中国公司的质量有了很大的提高，与国际参与者相比，价格要低得多，” Chiu 说，他解释说，中国 SiC 衬底制造商提供的额外产能导致了 2024 年的产能过剩和价格下降 30%。

Chiu 表示，中国公司正努力通过牺牲毛利率来赢得市场份额。一些新进入者甚至以低于成本的价格出售衬底。尽管采取了这种激进的方法，但预计价格在未来不会下降得那么快——Chiu 预计每年将有大约 10% 的降幅——因为目前所有 SiC 市场的参与者都在谨慎管理现金流。

对 Wolfspeed 有利的是其衬底的高质量，尤其是在为汽车行业生产 MOSFET 时特别受重视。中国材料的质量并不高，据说更适合用于要求较低的肖特基势垒二极管生产。然而，中国厂商的衬底质量正在变得越来越好，这得益于中国供应商之间的竞争，这些晶圆的直径也在变大。在 2025 年的中国半导体展上，许多国内 SiC 晶锭生产商展示了 300 毫米晶圆。这种尺寸可能为使用

SiC 作为 AR 眼镜的背板提供机会，这一应用有望将销量推向新的高度。

作为器件制造商，Wolfspeed 专注于最具挑战性的应用——电动汽车，并为逆变器提供 MOSFET。在这里，Chiu 认为 Wolfspeed 具有竞争力，拥有 10% 的 SiC 功率电子器件市场份额。

“Wolfspeed 所取得的成就是相当可观的，但这还不足以维持或支持他们的雄心壮志，比如在美国建造一个大型晶圆厂，以及在德国再建一个晶圆厂，” Chiu 说。“他们已经达到了一定的收入水平，但与投资水平相比，似乎还不够。”

现在负责 Wolfspeed 的人将希望保留现有客户并寻找新客户，同时重组资本以确保提供可持续的现金流。

对 Wolfspeed 有利的是，在芯片制造方面，它仍然是 200 毫米生产线器件生产的市场领导者。凭借这一优势，Chiu 认为，如果 Wolfspeed 能够度过这段艰难时期，它可能会在未来几年内增加收入，或者至少增加出货量。

虽然与过去的大胆计划相比，这样的成功可能微不足道，但它可能使公司翻开新的一页，最终为投资者带来一些好消息。近年来，投资者遭受了损失，看到股价从 2021 年底的超过 140 美元暴跌至低于 1 美元，反映了公司运势的严重下滑。尽管最近的第 11 章申请得到了市场的欢迎，帮助股价大幅上涨，但现有股权持有人的股份将被取消，并获得 3% 到 5% 的新股权。他们希望 Wolfspeed 能够存活下来——而且在其新的基础上，他们有充分的理由保持乐观——但该公司是否能够再次蓬勃发展则难以判断。OSc

图：Wolfspeed 在过去五年的战略转型。来源：Yole 集团的《2025 年 SiC 市场与应用报告》。

用于 Ga_2O_3 晶体管的硅基氮化镓

氮化镓缓冲层支撑高电压、常类型 Ga_2O_3 晶体管

来自阿卜杜拉国王科技大学的工程师声称，他们首次在基于硅基氮化镓上生长出了 Ga_2O_3 晶体管。

该团队声称，这种特定的异质集成方式允许 Ga_2O_3 晶体管保留其优势，包括非常高的击穿场强，使其成为功率电子学中非常有前景的器件，同时可能解决其弱点——它受到低热导率和低效的 p 型掺杂的限制。此外，这种材料组合可能会为大规模制造打开大门。

当考虑用于支撑 Ga_2O_3 晶体管的各种材料选项时，该团队排除了碳化硅。尽管这种衬底具有高热导率，但它成本高昂且与硅工艺技术不兼容，阻碍了单片集成。

来自沙特阿拉伯的团队认为，他们的 Ga_2O_3 晶体管、GaN 缓冲层和硅衬底的组合是一个有吸引力的选择，因为它更具可扩展性、更具成本效益，并且不会损害性能。

采用这种方法制造的器件受益于 GaN 的优势，包括其高热导率。此外，据团队发言人李晓航称，p 型 GaN 可能能够解决 Ga_2O_3 中的低效 p 型掺杂问题。

这种组合的另一个优势是，它可能会创造出具有高速控制电路的单片集成电路 (IC)，利用 GaN 的高迁移率，以及由 Ga_2O_3 制成的高功率器件。

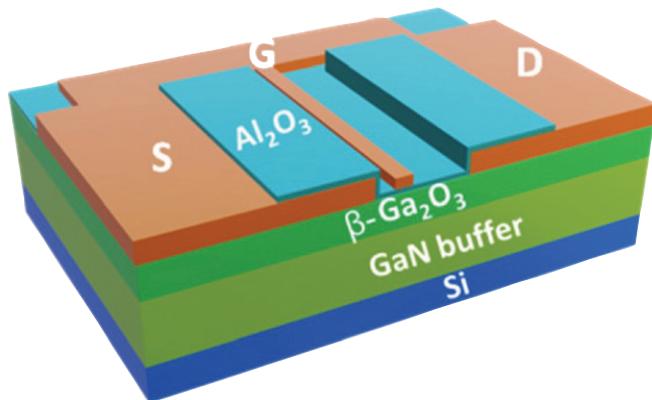
为了制造他们的器件，李及其同事首先使用脉冲激光沉积 (PLD) 在 4.7 微米厚的 GaN 半绝缘缓冲层上生长出大约 50 纳米厚的硅掺杂 Ga_2O_3 薄膜。

在解释这种生长技术选择时，李 (Li) 表示：“脉冲激光沉积 (PLD) 已被证明是一种可行的工具，用于生长高质量的外延 Ga_2O_3 。金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 可能提供质量稍好的材料，但 MOCVD 与硅 CMOS 工艺不兼容，而 PLD 则兼容。”

电气测量结果表明， Ga_2O_3 薄膜的电子浓度约为 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，迁移率仅为 $2.1 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。低迁移率归因于 Ga_2O_3 层的多晶性质以及由晶格失配引起的缺陷。

据称，通过采用先进的生长技术，如 MOCVD，并应用后生长高温退火，可以提高迁移率，这增强了结晶度并降低了缺陷密度。

为了制造器件，李及其同事在他们的外延结构上添加了源极和漏极 Ti/Au 电极，然后通过原子层沉积沉积了 25 纳米厚的 Al_2O_3 作为栅极介质，添加了栅极金属，最后使用反应离子刻蚀打开源极和漏极垫。通过这种工艺制造的晶体管具有 4 微



来自阿卜杜拉国王科技大学的团队声称，他们的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET 在硅衬底上实现了此类器件的最高击穿电压记录。

米的栅极长度、3 微米的源栅间距和 18 微米的栅漏距离。

对这些器件进行的电气测量使团队能够计算出 Ga_2O_3 和 Al_2O_3 之间界面的亚阈值摆幅为 167 mV/dec，这一数值表明了二者之间高质量的界面，并且测得开关比约为 10^6 。在门源电压为 8V 时，关断态门漏电流约为 $10^7 \text{ mA} \cdot \text{mm}^{-2}$ ，而在漏源电压为 5V 时，阈值电压为 3V，能够实现安全失效操作。

该团队声称，其 Ga_2O_3 MOSFET 在硅衬底上实现了此类器件的最高击穿电压记录。在门源电压为 0V 时测量的击穿电压，最高值约为 540V。据该团队称，这是硅衬底上 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET 的最高值。

该团队的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET 在硅基氮化镓上的替代品是今年早些时候由台湾国立清华大学领导的研究团队报告的在硅基氮化铝上生产的变体。

“这是一项非常出色的工作，”李说。然而，他认为在硅基氮化铝上的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ MOSFET 存在一些问题，包括表面形貌粗糙、耗尽型运行以及较低的击穿电压。

“此外，硅基氮化铝容易出现裂纹，而且作为平台，它不如硅基氮化镓成熟，”李补充道。然而，他认为，随着进一步的发展，硅基氮化铝有可能成为一个好的平台。

李表示，该团队的下一个目标是通过使用 GaN 和 p-GaN 集成，开发与硅基 Ga_2O_3 相关的各种功率技术。

参考文献

M. Kumar et al. Appl. Phys. Lett. 126 193505 (2025)

用全包围金刚石冷却的射频氮化镓高电子迁移率晶体管

低温金刚石生长和门极优先方法生产出具有最小化自热潜力的器件

来自斯坦福大学的工程师声称，他们首次实现了 GaN HEMT 的后处理金刚石集成。据称，这种将 150 毫米 N 极性 GaN MIS - HEMT 包裹在金刚石中的方法，为使用金刚石散热的 X 波段 GaN HEMT 提供了一个宝贵的热管理平台。

该团队的工作是多年来为解决 GaN HEMT 中的自热问题而开发的众多方法之一，自热问题影响了该器件的性能和可靠性。

许多减少自热的尝试涉及通过 HEMT 通道的背面集成散热器来降低热边界电阻。之前的尝试包括在金刚石衬底上生长 GaN HEMT 堆叠、从蓝宝石衬底转移到铜衬底以及添加铜填充的通孔。

所有背面集成形式的一个缺点是，通道中产生的热量必须通过缓冲层或成核层，这些层通常具有较高的热阻。

为解决这一缺点，斯坦福团队在器件的活性区的顶部和侧壁上集成金刚石，使热量提取绕过高阻缓冲层或成核层。

该团队的最新方法是其先前技术的推进，这些技术被描述为“金刚石优先”和“门极优先”过程。

该团队的发言人乔杜里表示，金刚石优先和门极优先工艺与其他方法相比具有优势，并且各自适用于不同的集成场景。

乔杜里指出：“在金刚石优先工艺中，门极和其他器件区域的光刻必须直接在金刚石表面上进行，这可能具有挑战性——特别是在亚微米尺度上。”她补充说，相比之下，门极优先工艺涉及在预先定义的门极结构上沉积金刚石，消除了在金刚石上进行门极光刻的需要。由于这一点，门极优先工艺从制造角度来看是更易于管理的方法。

“然而，门极优先方法的成功取决于在足够低的温度下生长金刚石的能力，以避免降解底层门极堆叠的电学性能，”乔杜里说。“当满足这一条件时，金刚石在门极上的集成变得可行，并且可以实现。”

该团队的工艺如图所示，从通过 MOCVD 形成 SiC 上 GaN 外延堆叠开始，随后添加源极、门极和漏极接触，沉积金刚石，局部蚀刻，以及添加接地 - 信号 - 接地 (GSG) 焊盘。

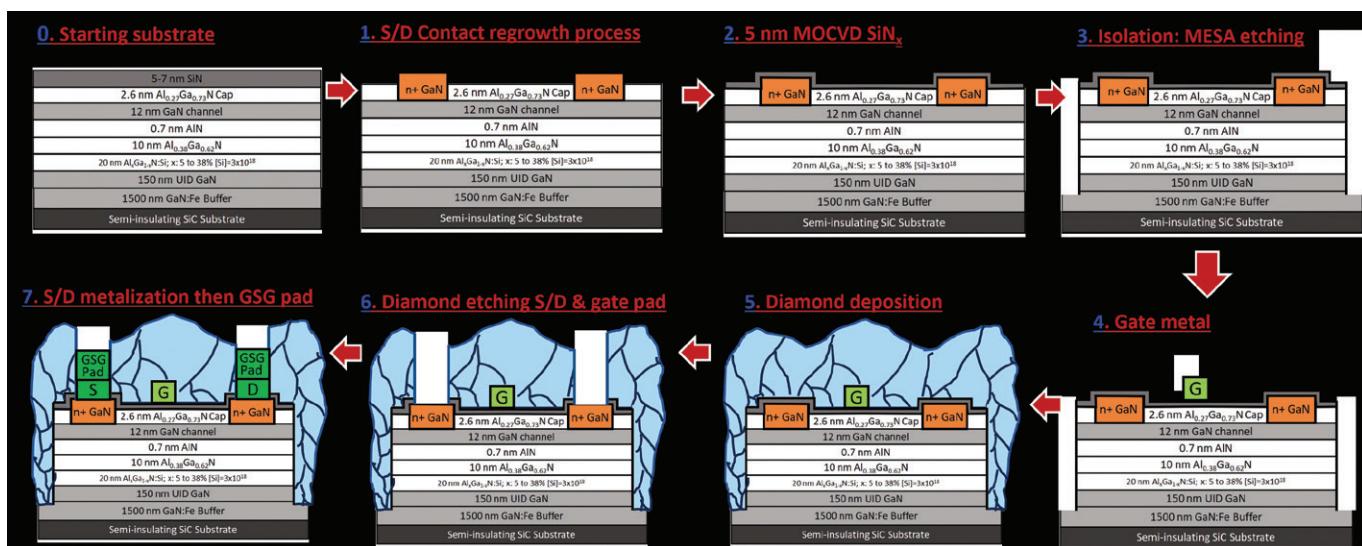
乔杜里及其同事生产了两种形式的全包围门极 HEMT，金刚石沉积温度分别为 500°C 和 700°C。“700°C 的生长更容易、更直接，”乔杜里解释说，她指出这一温度超过了门极堆叠的热预算。“相比之下，500°C 或更低温度的生长过程可以安全地实现集成，而不会出现此类问题。”

使用 700°C 金刚石沉积生产的器件没有门极调制，这是由于高金刚石生长温度导致的高门极漏电。与此同时，对使用 500°C 金刚石沉积生产的器件进行测量，结果显示阈值电压为 -8V，开关比为 10⁵，峰值跨导为 190mS mm⁻¹，漏极饱和电流为 0.96mA。

“未来的研究将集中在将这种集成扩展到更大的器件阵列，并研究在高功率运行下的长期可靠性，”乔杜里说，她的计划还包括探索与替代门极架构和封装方案的集成，以进一步改进热和电学的协同优化。“最终，我们的目标是开发一种可扩展、可制造的热集成策略，使高功率密度、热可靠的 X 波段和更高频率的 GaN 器件得以实现。”

参考文献

R. Soman et al. Appl. Phys. Express 18 046503 (2025)



斯坦福大学的最新方法通过制造全包围金刚石的 N 极性 GaN HEMT，实现了对通道自热的最小化。

武大、西电联合攻关在跨材料、跨功能的宽禁带半导体异构集成领域取得突破性进展

近日，由武大与西电开展联合攻关，在高质量氮化物异构集成领域取得突破性进展，相关成果2025年7月6日以“Van der Waals integration of 4-inch single-crystalline III-nitride semiconductors”为题在线发表于国际顶尖期刊《Advanced Materials》，该研究由武汉大学何军教授团队与西安电子科技大学郝跃院士团队张进成教授、宁静教授与合作完成，武汉大学文耀副研究员与西安电子科技大学宁静教授与为论文共同第一作者，何军教授、张进成教授为论文共同通讯作者。

面向新一代高性能氮化物宽禁带半导体器件与异构集成电路发展的需要，通过二维材料异质外延III氮化物半导体，借助范德华界面能够实现应变弛豫、位错密度降低和无损异质集成，传统方法在二维材料上外延III族氮化物时，二维材料的有限润湿性和弱界面相互作用使得在晶圆尺度上实现III族氮化物半导体的有序晶体取向构成了重大挑战。本研究创新性地提出了一种范德华极化工程异质集成方法（polarization-engineered vdW integration strategy），通过精准调控外延衬底的电子极化特性，通过二维材料的缺陷和通孔将促进准范德华外延生长形成可以与外延产物结合的不饱和悬挂键，清晰的阐述了在二维材料上范德华外延III族氮化物半导体的关键核心机理，实现了III族氮化物半导体和衬底之间的电荷转移。

在二维材料上实现了4英寸可剥离的单晶GaN层异质外延，并且当外延层厚度减小到400 nm时，位错密度低至 $3.49 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，基于该技术制备的GaN高电子迁移率晶体管（HEMT）展示出 $2080.7 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的超高迁移率，高电子迁移率晶体管（HEMT）展示出790 mA/mm的高饱和电

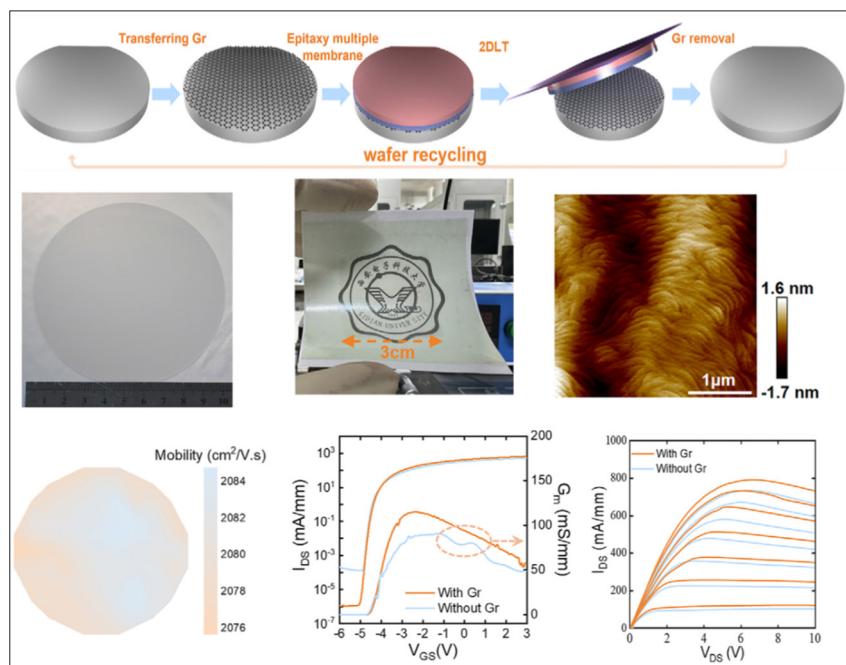


图2：范德华外延与传统异质外延氮化物外延材料与HEMT器件比较

流密度和 $1.11 \times 10^6 \text{ mA/mm}$ 的低截止电流。该突破性成果为氮化物半导体的范德华异质集成提供了全新的理论认知，解决了氮化物宽禁带半导体范德华外延的关键难题，实现了高质量超薄氮化物异质结构材料，为高性能宽禁带半导体器件的跨材料、跨功能的大面积异构集成扫清了关键障碍。

参考文献

Yao Wen, Jing Ning, Haidi Wu, Haoran Zhang, Ruiqing Cheng, Lei Yin, Hao Wang, Xiaolin Zhang, Yong Liu, Dong Wang, Yue Hao, Jincheng Zhang*, Jun He*, Van der Waals integration of 4-inch single-crystalline III-nitride semiconductors, *Adv. Mater.* 2025, 2501916, <https://doi.org/10.1002/adma.202501916>

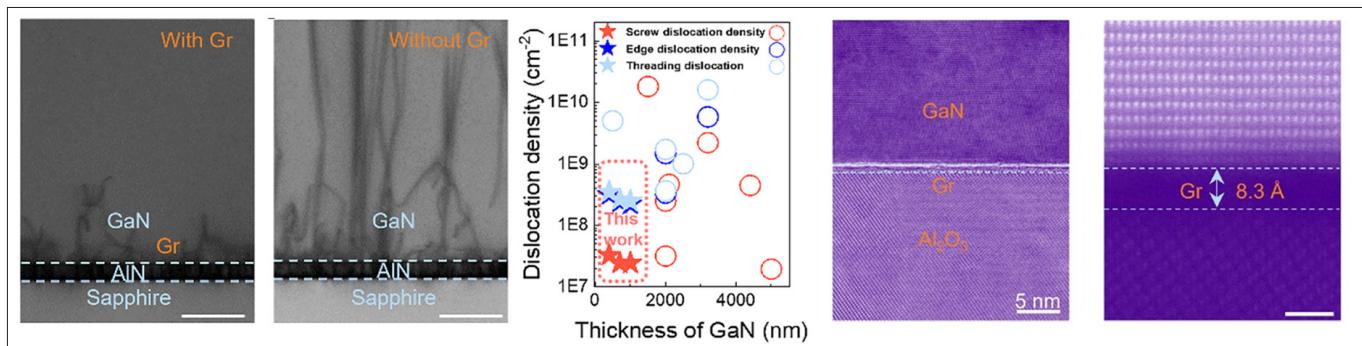


图1：基于石墨烯插层的范德华外延氮化镓外延材料

湾芯展 WESEMIBAY

芯启未来 智创生态

2025.10.15 → 10.17
深圳会展中心(福田)



60000m² 展览面积 600+ 参展企业 60000+ 专业观众

指导单位: 深圳市人民政府

中国国际工程咨询有限公司

主办单位: 深圳市半导体与集成电路产业联盟 SICA

承办单位: 深圳市重大产业投资集团有限公司、深圳市芯盟会展有限公司

支持单位: 中芯国际集成电路制造(深圳)有限公司、华润微电子有限公司、深圳方正微电子有限公司、深圳市鹏芯微集成电路制造有限公司、深圳市昇维旭技术有限公司、深圳市鹏新旭技术有限公司、深圳市重投天科半导体有限公司、深圳市经纬开物仪器有限公司、国家第三代半导体技术创新中心深圳综合平台、广东省大湾区集成电路与系统应用研究院、中国集成电路零部件创新联盟.....

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AIXTRON SE		www.aixtron.com	BC
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
Evatec AG		vatecnet.com/cn	5
FERMI	费勉仪器科技(上海)有限公司	www.fermi.com	2
RABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	13
Riber		www.ribert.com	IFC
Park Systems		parksystems.cn/nx-wafer	1
湾区半导体产业生态博览会(深圳)		www.semibay.cn	31

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房设施。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

Asia (亚洲)
Floyd Chun (秦泽峰), floyd@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

China (中国)
Mini Xu (徐若男), minix@actintl.com.hk
Tel: 86 187 7196 7314
Ron Wang (汪毓翀), ronw@actintl.com.hk
Tel: 86 186 9404 8156

Mandy Wu (吴漫), mandyw@actintl.com.hk
Tel: 86 156 2304 9536
Grace Zhu (朱婉婷), gracez@actintl.com.hk
Tel: 86 159 1532 6267
Cecily Bian (边团芳), cecilyb@actintl.com.hk
Tel: 86-135 5262 1310

Taiwan, Singapore, Malaysia
(台湾, 新加坡, 马来西亚)
Floyd Chun (秦泽峰), floyd@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

Korea (韩国)

Lucky Kim, semieri@semieri.co.kr
Tel: 82-2-574-2466

US (美国)

Janice Jenkins, jjenkins@brunmedia.com
Tel: 724-929-3550
Tom Brun, tbrun@brunmedia.com
Tel: 724-539-2404

Europe (欧洲)

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



2025 常州

化合物半导体先进技术及应用大会

2025年11月4-5日

常州·新城希尔顿酒店

论坛主题 Forum Topics



1、GaN功率电子的收入增长

AI数据中心及车规OBC应用的崛起，GaN晶体管的销售额预计将在整个十年及以后实现巨大增长。但利用这一机遇的最佳策略是什么？

2、Micro LED：如何获得市场牵引力

Micro LED的潜力毋庸置疑。但需要什么来确保这种微型奇迹开始产生可观的销售额？AR眼镜亦或其他。

3、SiC产业第二增长曲线

随着功率应用利润率缩水，SiC行业不能固步自封。需要在生产工艺、晶圆厂运营和新应用场景方面，确保成功的关键创新是什么？AR光学应用亦或先进封装的中介层。

4、推进表面发射光电子技术

需要做什么来增加VCSEL的光谱范围和速度，从而使其能够瞄准新的应用？PCSEL和UV LED的性能如何提升，以推动其商业成功？

5、释放超宽禁带材料的潜力

超宽禁带材料具有一些卓越的特性，正蓄势待发。但哪一种将产生最大影响？是AlN？还是金刚石？抑或是某种氧化物？



逆全球化
破局机会



全产业链
深度协同



精准触达
核心客群



产业集群
地域优势

双向赋能产业生态价值，助力企业/听众在国际技术封锁下找到突围路径

AIXTRON

THE G10 SERIES



G10-SiC

SiC power epi production
platform with 150/200 mm
wafer size flexibility

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

