化合物半导体

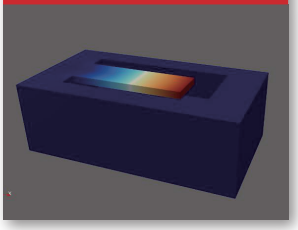
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2026年 4/5月

坩埚下降法 4 英寸大厚度氧化镓晶体生长



适用于MEMS研究级原型高效验证的微区工艺技术研究



迈向太空晶体生长



工程衬底增强高压氮化镓功率电子





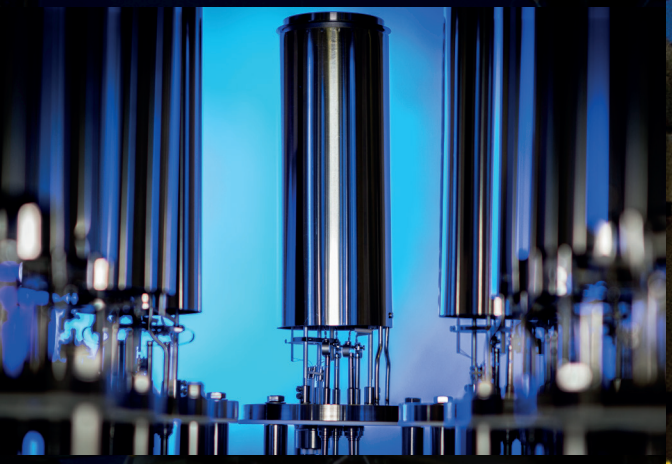
冰山尖下的氮化物

ACT INTERNATIONAL

ISSN 2789-2735

www.compoundsemiconductorchina.net

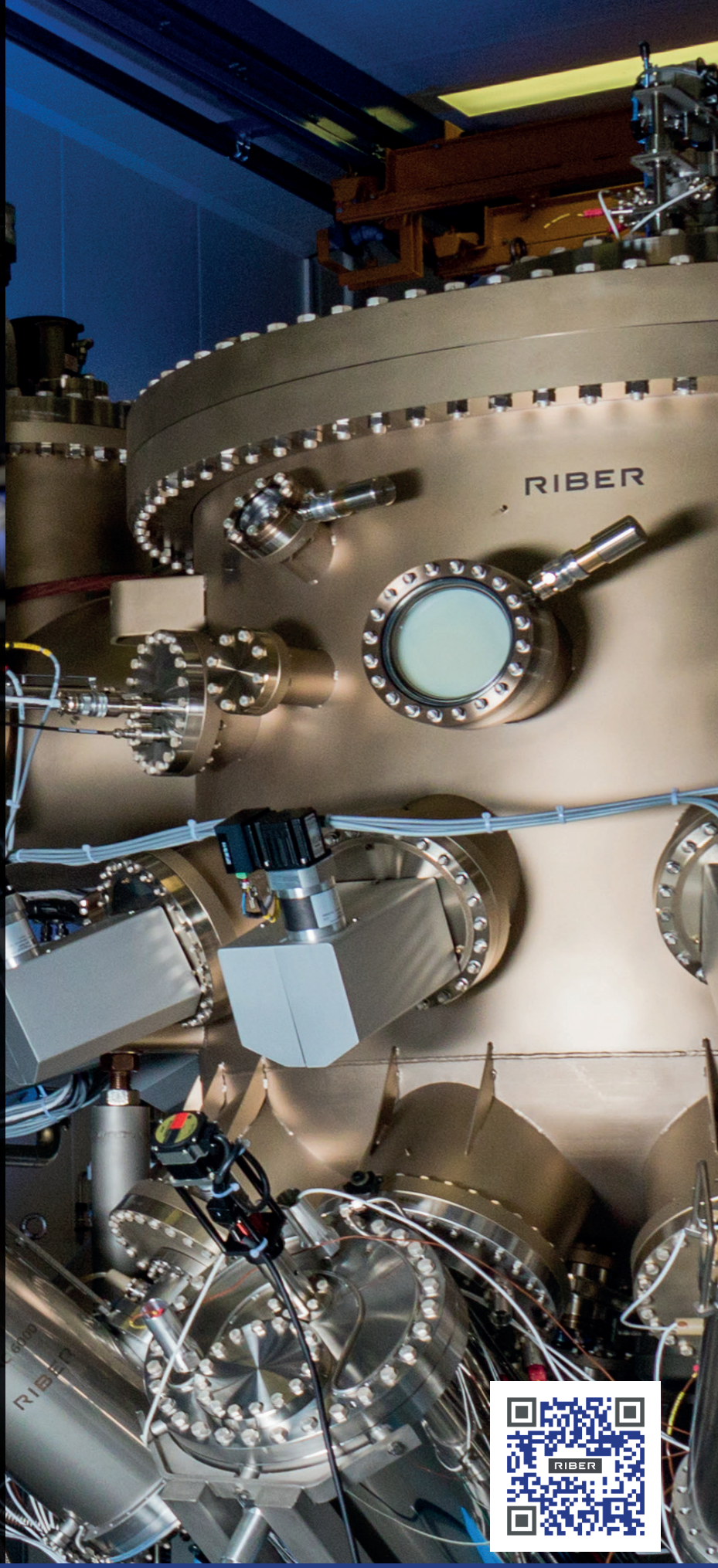
RIBER's
MBE 6000



引领MBE
大规模生产

- 低真空背景
- 低原子能量
- 低外延温度
- 低晶体缺陷





RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

ACT INTERNATIONAL

国际知名媒体授权
报道全球高新科技信息



免费索阅

服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体
半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的专业读者及与会者

品牌会议

VisionCon 视觉系统设计技术会议

SSOTC

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

AI 工业技术及应用研讨会

LaserFocusCon 激光聚会

CSCON CHINA

CHIP China 晶芯研讨会

CleanRooms China

国际代理

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

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

目录

Contents

10 封面故事 Cover Story

冰山尖下的氮化物

Nitrides below the tip of the iceberg

到如今，您可能已经听说过AlScN（氮化铝钪）。如果没有，那值得留意：它是一种铁电氮化物，已成为化合物半导体研究中的一个突出课题。然而，如果有人请该领域概述氮化物半导体，大多数人会立即指向GaN（氮化镓）——这种彻底改变了LED并正在改变电信和国防的材料。然而，无论焦点是继续集中在GaN还是扩展到包括AlScN，讨论可能仍然局限于氮化物冰山的尖端。新氮化物材料的发现正在扩展半导体领域，超越氮化镓家族。

- 落基山国家实验室的 Andriy Zakutayev



编者话 Editor's Note

04 **5000亿市场AR眼镜 —— 液相法才是破局钥匙**

RMB 500B AR Glasses Market — Solution Growth Technology as the Key to Breaking the Deadlock

- 陆敏

业界动态 Industry

05 **从器件回归材料：旭化成宣布聚焦氮化铝单晶衬底业务**

From Devices Back to Materials: Asahi Kasei Announces Focus on Aluminum Nitride Single-Crystal Substrate Business

05 **全球外延晶片龙头，成功赴港IPO**

Global Epitaxial Wafer Leader Successfully Lists on Hong Kong Stock Exchange

05 **英特尔宣布加入Terafab先进晶圆厂计划**

Intel Announces Joining Terafab Advanced Wafer Fab Initiative

06 **英国一项耗资1040万英镑的项目将用于开发下一代材料**

£10.4m UK project will grow next-gen materials

06 **英伟达将与Qnity Electronics合作研发半导体先进材料**

NVIDIA to Collaborate with Qnity Electronics on Research and Development of Advanced Semiconductor Materials

07 **圆满落幕！ 8英寸碳化硅的“晶”界难题，被液相法解决了？这场会议聊透了！**

Successfully Concluded! Has the "Crystal" Boundary Challenge of 8-inch Silicon Carbide Been Solved by the Solution Growth Method? This Conference Covered It All!

08 **15.76亿！中微公司宣布收购杭州众硅**

1.576 Billion! AMEC Announces Acquisition of Hangzhou Zhonggui

关于雅时国际商讯 (ACT International)

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

关于《化合物半导体》

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

扫一扫
免费下载电子书

化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA
2026年 4/5月

目录

Contents

技术 Technology

12 坩埚下降法4英寸大厚度氧化镓晶体生长
Growth of 4-inch diameter and thick β-Ga_2O_3 single crystals using the vertical Bridgman method
- 金永强、黄浩天、贾宁*、齐红基*
（中国科学院上海光学精密机械研究所，上海市宽禁带与超宽禁带半导体材料重点实验室，杭州光学精密机械研究所，杭州富加镓业科技有限公司）

15 面向自主创新的半导体芯片系统性分析方法论研究
Research on the Systematic Analysis Methodology of Semiconductor Chips
- 胡轩宇，杨淑雯，程鑫鑫，樊雨佳，宋笠，王瑜璞，麦志洪；湖北九峰山实验室

19 迈向太空晶体生长
Towards in-space crystal growth
- Space Forge 的 Alastair McGibbon 和 Neil Monteiro

22 工程衬底增强高压氮化镓功率电子
Engineered substrates enhance high-voltage GaN power electronics
- IMEC 的 Karen Geens 和 Benoit Bakeroot

科技前沿 Research Review

25 HF 处理助力 Ga_2O_3 MOSFET
HF treatment aids Ga_2O_3 MOSFETs

26 InP 激光器：突破 10 W 大关
InP lasers: Breaking the 10 W barrier

27 极小化氧化提升了 SiC MOSFET 的迁移率
Minimal oxidation boosts mobility of SiC MOSFETs

28 广告索引 Advertisement Index

《化合物半导体》编委会 （排名不分先后）

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

全球知名权威杂志
Compound Semiconductor的中国版

化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA



双月刊，每期发行覆盖30,000名专业读者，并在全国重点产业活动赠阅。

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

免费索阅



CS CHINA CON 化合物半导体
先进技术及应用大会

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

5000亿市场AR眼镜——液相法才是破局钥匙

当新能源汽车的碳化硅功率器件还在被资本市场热捧时，另一块更庞大的市场正在悄然崛起——AR 眼镜的光波导镜片。到 2035 年，仅 AR 眼镜对 8 寸碳化硅晶圆的需求就将达到 400 万片，材料市场规模约 100 亿元人民币。而这仅仅是开始。当 AI 眼镜的出货量达到与智能手机同等的 10 亿部量级时，碳化硅材料的市场天花板将飙升至每年 5000 亿元，远超车载应用的市场规模。

这是一个比新能源汽车更诱人的赛道，但也是一条充满技术荆棘的突围之路。一副售价 3000 元的 AR 眼镜，碳化硅原材料成本占比约 17%，即镜片约 500 元 / 副，一个 8 寸晶圆（可生产 5 副眼镜）的成本需要控制在 2500 元以内，市场才能接受。然而现实是，目前一个 8 寸碳化硅晶圆的价格约 1 万元。从一万降到两千五，需要降本四倍，这在短期内几乎不可能实现。

破局的关键在于 " 薄片化 "——将镜片厚度从常规的 500 微米减薄至 250 微米。这样一片晶圆可以切成两片使用，成本目标瞬间从 2500 元放宽到 5000 元，难度系数直接减半。碳化硅的高强度特性使其在 250 微米厚度下仍能保持足够的机械性能，足以支撑日常佩戴需求。薄片化带来了新的挑战：面型控制难度陡增，应力管理更加棘手。即便成本降至 5000 元，距离市场接受的 2500 元仍有最后一倍的差距。这道 " 最后一公里 " 的难题，需要更根本的技术突破。

业界谈及碳化硅在 AR 眼镜中的应用，往往聚焦于其优势：高折射率（约 2.6）带来更大的视场角（FOV），高热导率解决散热痛点，低密度实现轻量化，高硬度提供抗划伤保护。特别是其高折射率能够有效消除传统玻璃波导的 " 彩虹纹 " 现象，这是困扰行业多年的视觉顽疾。

但碳化硅也有那些不被常谈的劣势。首先是加工难度，碳化硅的高硬度（仅次于金刚石）和高杨氏模量，使其在表面浮雕光栅的刻蚀工艺中极其 " 难啃 "。越硬越难刻，越难控制平面度。这意味着更高的加工成本和更低的良率。其次是光学损耗，相比成熟的玻璃镜片，碳化硅的体吸收和体散射仍然偏高。这直接导致两个致命问题：一是透过率下降，用户看真实世界时视野变暗；二是波导损耗增加，尤其是散射会提升暗场亮度，严重削弱 AR 显示的对比度，让虚拟画面显得 " 发灰 "。最大的隐患是内应力。当前主流碳化硅材料的内应力较大，而应力直接决定折射率及其均匀性。在光波导设计中，光栅周期与折射率严格匹配，一旦折射率不均匀，光学设计将完全失配，最终成像质量大幅下降，清晰度受损。晶圆偏角，碳化硅在 0 度方向具有规整的晶格排列，这一特性使其在激光切片过程中能够实现更光滑的断裂面，减少减薄去除量，从而大幅提升切片良率、出片率并降低后续抛光的成本。相反，一旦引入 4 度偏角直接推高了单片镜片的制造成本。

面对成本与性能的双重挑战，将希望寄托于正在兴起的 " 液相法 " 技术。与传统 PVT（物理气相传输）法相比，液相法是一种近平衡生长技术，具有三大核心优势：第一，缺陷控制。液相法可以大幅减少点缺陷、线缺陷和面缺陷（位错、层错等）。缺陷减少直接降低体吸收和体散射，提升波导效率和对比度。第二，低应力生长。液相法的温度较低，温度梯度小，生长出的晶圆接近平截面，内应力显著降低。这解决了折射率均匀性的核心难题，为高质量光学设计奠定基础。第三，成本潜力。随着技术成熟，液相法有望在保持高性能的同时，实现规模化降本，最终触及那道 2500 元 / 片的成本红线。

AR 眼镜的终极形态，是一副与普通眼镜无异、却能叠加数字世界的智能设备。这个愿景的实现，高度依赖底层材料的突破。碳化硅凭借其光学特性，已经成为 AR 光波导的最优候选材料，但它距离 " 完美材料 " 还有最后一公里的距离。AR 眼镜的竞争，表面上是整机厂商的博弈，本质上是材料科学的较量。谁能率先解决碳化硅的应力、损耗和成本难题，谁就能在 5000 亿市场的爆发中占据先机。而液相法，或许正是打开这扇大门的那把钥匙。



化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

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

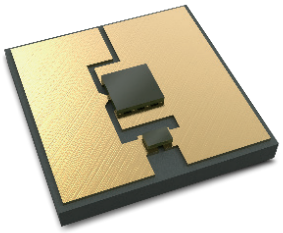
北京 Beijing
Tel/Fax: 86 10 64187252
上海 Shanghai
Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030
深圳 Shenzhen
Tel: 86 755 25988573
Fax: 86 755 25988567
武汉 Wuhan
Tel: 86 27 82201291

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

ACT INTERNATIONAL

ISSN 2789-2735
© 2026 版权所有 翻印必究

从器件回归材料：旭化成宣布聚焦氮化铝单晶衬底业务





3 月 26 日，旭化成（asahi-kasei）宣布，将停止子公司 Crystal IS 的 UVC LED 器件业务，专注于已建立技术优势的氮化铝（AlN）单晶衬底业务。这项决议的背后其实基于对两个不同市场的潜力判断。

旭化成表示，氮化铝是高性能 UVC LED 的关键平台材料，但在高性能射频（RF）和功率半导体应用领域快速增长背景下，随着消毒杀菌市场竞争日趋激烈，该项目对整体业绩的贡献已显鸡肋，甚至可能会变成负担。

作为单晶氮化铝先驱的 Crystal IS 一直在该领域进行技术开发，目前已成功制造出与现有半导体制造工艺兼容的 100 毫米（4 英寸）单晶氮化铝衬底，为半导体应用评估奠定了基础。随着 5G/6G 通信、电动汽车、数据中心及电网智能化的发展，市场对能在高频、高压、高温环境下稳定工作的下一代半导体材料需求迫切。氮化铝作为超宽禁带半导体材料，在这些领域具有巨大的战略价值和商业潜力。旭化成判断，将资源集中于后者，能更好地把握未来增长机遇。

旭化成此项决议意味着氮化铝衬底的应用方向从“终端器件制造”转向“高端核心材料供应”，意味着对氮化铝单晶衬底在射频、半导体市场应用前景的看好。

全球外延晶片龙头，成功赴港 IPO

3 月 30，瀚天天成电子科技（厦门）股份有限公司（以下简称“瀚天天成”）成功登入港交所 IPO。

瀚天天成成立于 2011 年，在全球率先实现 8 英寸碳化硅外延晶片大批量外供，也是国内首家实现商业化 3 英寸、4 英寸和 6 英寸碳化硅外延晶片批量供应的生产商。瀚天天成在招股书中表示，IPO 募集所得资金净额将主要用于以严谨且审慎的方式扩大碳化硅外延晶片产能，以满足不断增长的市场需求；碳化硅外延晶片研发，以提升技术能力并巩固技术优势；以及用作营运资金及一般公司用途。

公开资料显示，碳化硅外延晶片制备的功率器件在高温、大功率应用中性能表现优异，正在加速进入电动汽车（EV）、超快充电桩、储能（ESS）、能源供应、数据中心等领域。此外，碳化硅功率器件还在下一代家电、高速轨道交通、电动船舶及低空飞行应用等领域展现出巨大的应用潜力。

TrendForce 集邦咨询表示，对于碳化硅外延片环节，过去市场长期由 Resonac、Wolfspeed 等国际大厂主导，中国厂商瀚天天成与天域半导体历经 10 余年积累，终随新能源浪潮迎来业务高速增长期，近年来全球市场份额得以迅速上升。

根据 TrendForce 集邦咨询分析，中国碳化硅外延片产业自 2022 年进入快速成长期，2023 年整体市场规模已达到约 2.25 亿美元，至 2026 年有望上升至 14.82 亿美元。

在下游需求刺激下，中国碳化硅外延片生产商均掷出了数倍的扩产计划，同时新进入者不断，这也带来了旺盛的设备安装需求。根据 TrendForce 集邦咨询分析，2023 年中国碳化硅外延设备市场规模约 1.81 亿美元，预计到 2028 年将攀升至 4.24 亿美元。

英特尔宣布加入 Terafab 先进晶圆厂计划

据外媒报道，当地时间 4 月 7 日，英特尔宣布将协同特斯拉、SpaceX、xAI，共同加入马斯克的巨型晶圆厂 Terafab 计划。

英特尔在社交媒体平台发文称：“我们设计、生产、封装超高效能芯片的能力，将加速 Terafab 实现每年 1 太瓦算力产出的目标，为 AI 与机器人领域的未来突破提供算力支撑。”

Terafab 工厂落户美国德州奥斯汀，定位为全球规模最大的 2nm 先进芯片工厂，实现逻辑芯片、存储芯片与先进封装全链条一体化布局，年芯片产能目标锁定 1000 亿至 2000 亿颗。其核心产出分为两大方向：一类是服务特斯拉 FSD 自动驾驶、Optimus 人形机器人的边缘推理芯片，另一类则是为太空场景量身定制的专用芯片。

英特尔 CEO 陈立武公开表态称，Terafab 将带来硅逻辑、存储与封装制造领域的范式变革，Intel 很骄傲能成为合作伙伴，与马斯克深度推进这一极具战略意义的项目。

英国一项耗资 1040 万英镑的项目将用于开发下一代材料

一项英国重大新研究计划旨在加强英国在半导体材料领域的实力，为电子行业的未来发展奠定基础。

由华威大学和南安普顿大学牵头，英国工程与物理科学研究委员会 (EPSRC) 资助的五年期 EXPRESS 项目，旨在支持下一代晶体管和光电器件的研发。该项目总投资 1040 万英镑。



该项目将探索结合新型前驱体化学的新型电化学方法，用来生长过渡一种先进的层状半导体材料，即金属二硫化物 (TMDC)，在超低功耗电子器件、神经形态计算、光子电路和量子技术等领域具有潜在的应用价值。

华威大学化学系负责人 Julie Macpherson 表示：“过渡金属二硫化物（TMDCs）在未来的晶体管和光电器件领域具有巨大的应用潜力，但如何可靠、大规模地生产出具有高结晶度的 TMDCs 仍然是一项重大挑战。

“本项目汇集了化学、物理和电子学领域的专家，旨在探索控制这些材料形成的新方法，从而推动其在下一代器件中的应用。”

该团队将研究一种基于电沉积技术的新方法，该方法利用特制分子引导材料组装和生长。这种方法能够使过渡金属二硫化物（TMDC）直接在三维电子结构中生长，避免复杂的转移步骤，从而更可靠地测试其性能。

南安普顿大学负责人 Gill Reid 表示：“层状二维半导体在制造世界所需的速度更快、能效更高的器件方面具有巨大潜力。我们正在探索一种基于电沉积的新方法，从而可以精确控制这些层状材料的生长，简化半导体芯片的生产。”

“我们希望这个简单的想法能将巨大的挑战转化为未来科技发展的重要机遇。EXPRESS 团队的专业知识是该项目得以实现的关键，我们对此感到无比振奋。”

除了推进半导体技术的发展，该项目还将支持和培养青年研究人员，助力英国在先进材料和电子领域提升实力。

英伟达将与 Qnity Electronics 合作研发半导体先进材料

近日，英伟达官宣和半导体材料巨头 Qnity Electronics 达成深度合作，双方将携手研发半导体先进材料，以及面向 AI 与高性能计算的先进封装技术。目标旨在彻底解决 AI 芯片“发烧”问题，让算力再上一个新台阶！

Qnity Electronics 是一家半导体与电子材料技术解决方案商，2025 年 10 月从杜邦电子业务分拆独立上市。核心技术覆盖芯片制造、先进封装、热管理三大板块。其 2025 年财报显示，已有 15% 的销售额锁定在 AI 数据中心市场。

合作将依托英伟达开源的 Nemotron 3 Nano、ALCHEMI BMD NIM、LAMMPS Kokkos 及 CUDA-X 加速版 Abaqus 建模与仿真技术，推进材料研发，以支撑下一代 AI 芯片与超算的更高性能、热管理、信号完整性与可靠性。

Qnity 首席执行官 Jon Kemp 表示：“随着人工智能工作负载的规模和复杂性不断扩大，整个行业对能提供更高性能、质量和可靠性的先进材料的需求与日俱增。下一轮发展浪潮将取决于整个生态系统的大胆创新与紧密协作。”

该举措体现了 Qnity 持续致力于推动整个半导体生态系统的材料创新，涵盖芯片制造、先进封装、高速互连到系统级集成，同时帮助客户应对人工智能与高性能计算带来的散热需求和高能耗问题。

“开放式创新意味着保持领先地位，在行业需求成为硬性要求之前就预判其需求，而我们研发部门的职责就是洞察未来。” Qnity 首席技术与可持续发展官 Randy King 表示，“借助加速建模技术，我们能够压缩开发周期，更快地将面向前沿应用的创新成果推向市场，同时优化信号完整性、可靠性和可制造性等性能指标。数十年来，我们的客户一直信赖我们能提供可快速规模化以满足其需求的高质量创新。”

圆满落幕！ 8 英寸碳化硅的“晶”界难题，被液相法解决了？ 这场会议聊透了！



碳化硅作为第三代半导体核心材料，正迎来新能源汽车、AI 数据中心、AR 眼镜和特高压电网等领域的爆发式需求。然而，传统 PVT 法生长效率低、缺陷控制难、成本居高不下，已成为制约产业规模化发展的 " 卡脖子 " 瓶颈。液相法生长技术以其近平衡态生长、低缺陷密度、低成本等独特优势，被视为突破 8 英寸碳化硅衬底量产难题的“优选方案”。

为此，2026 年 3 月 13 日《化合物半导体》隆重发起了“液相法突围：碳化硅 8 英寸时代的“晶”界革命”线上会议。本次会议聚焦液相法碳化硅晶体生长的产业化进程与关键技术突破，汇聚产业链核心力量：从烁科与臻晶的战略协同，探索大尺寸零度高品质籽晶的优化替代路径；到安徽大学超导磁场技术的创新应用，揭示外加磁场对液相法碳化硅晶体质量的调控机理；再到南昌大学基于第一性原理计算模拟的前沿研究，构建液相法碳化硅晶体的新物性研究。产学研用深度融合，共谋技术破局之道。

在直播中，来自行业的专家精英们各自为大家分享了其专业的行业见解与知识，吸引了大量来自行业内的听众积极在线参与。

来自常州臻晶半导体有限公司 董事长 / 总经理 陆敏博士，为我们分享的内容是《液相法生长碳化硅晶体的产业化》。会议上，陆敏博士指出，臻晶半导体已突破 6 英寸 p 型低阻碳化硅晶体关键技术，自主开发 6-12 英寸核心设备与长晶工艺包。碳化硅在 AR 光波导领域潜力突出，高折射率可扩大视场角，高热导率解决散热难题，但需攻克光学损耗与内应力等挑战。其公司计划 2026 年推出 8 英寸籽晶、p 型衬底及 AR 镜片，瞄准 2030 年百亿级 AR 光学市场。

山西烁科晶体有限公司 市场技术 刘晓星，为我们分享的内容是《PVT 碳化硅的产业化现状及未来发展趋势》。刘总在会议中分析了碳化硅衬底市场的发展现状与趋势，指出其在新能源、光储充、消费电子、AR 眼镜等领域的广泛应用前景。随着技术进步和成本下降，SiC 行业正从高端走向普及。强调行业正从“技术驱动”转向“资本与组织能力驱动”。

南昌大学国际材料创新研究院 副院长 吴建博士，为我们分享的内容是《不同金属元素掺杂对 SiC 单晶的电子结构、光学和磁性的影响》。吴建博士在此次本次报告中表示，SiC 单晶掺杂技术是制备高性能 SiC 器件的核心，掺杂元素种类与浓度直接影响其电学性能、晶体质量及多型体结构。同时，石墨坩埚、SiC 原料助溶剂等生长辅料易引入杂质污染，进一步降低单晶品质。因此，阐明掺杂与杂质对 SiC 单晶电子结构、光学及磁性的作用规律，对提升材料质量至关重要。然而，传统实验难以直接观测掺杂原子的占位、电子结构及原子间相互作用，所得电子结构多为宏观平均信息，难以区分掺杂贡献，且多元素、多浓度掺杂的实验成本高、周期长。









第一性原理计算可在原子尺度精准解析微观机制，定量分析掺杂对电子结构的调控作用，并高效筛选多掺杂体系，为 SiC 单晶生长中的掺杂调控提供理论支撑，推动高质量 SiC 单晶的研发与应用。

安徽大学强光磁科学中心教授 / 副主任 陈学刚教授，为我们分享的内容是《安徽大学强光磁试验装置简介一超导对碳化硅晶体生长展望》。陈学刚教授在此次本次报告中主要介绍了省属高校第一个大科学装置 - 安徽大学强光磁试验装置。在安徽省教育厅、财政厅专项支持下，安徽大学于 2022 年 4 月 30 日启动建设“强光磁试验装置”，下设光源部、实验部两个主要建设部门，光源部包括总体组、直线加速器组、自由电子激光与光传输线组、支撑系统组、控制系统与联锁保护组等机构，实验部包括时间、空间和能量分辨的六个科学研究实验站。同时，强光磁科学中心拟利用专有超导技术开展磁控半导体材料的生长研究工作。

15.76 亿！中微公司宣布收购杭州众硅

3 月 30 日，中微公司发布公告称，拟通过发行股份及支付现金的方式购买杭州众芯硅、宁容海川、临安众芯硅、临安众硅、杭州芯匠、杭州众诚芯等 41 名交易对方合计持有的杭州众硅 64.69% 股权，此次交易对价约 15.76 亿元。同时，中微公司募集配套资金不超 15 亿元，用于高端半导体设备产业化项目、高端半导体设备研发中心项目、支付现金对价及中介机构费用、补充流动资金。

公告显示，杭州众硅的主营业务为化学机械平坦化抛光（CMP）设备的研发、生产及销售，属于湿法工艺核心设备，并为客户提供 CMP 设备的整体解决方案，是国内少数掌握 12 英寸高端 CMP 设备核心技术并实现量产的企业。

通过本次交易，中微公司将成为具备“刻蚀 + 薄膜沉积 + 量检测 + 湿法”四大前道核心工艺能力的厂商，成功实现从“干法”向“干法 + 湿法”整体解决方案的关键跨越。这一整合不仅填补了上市公司在湿法设备领域的空白，更显著提升了公司在先进制程中为客户提供系统级整体解决方案的能力。面对先进晶圆厂和先进存储厂对工艺协同性、产线稳定性与整体效率日益严苛的要求，上市公司可为客户提供高度协同的成套设备解决方案，大幅缩短工艺调试和验证周期，从而增强客户黏性，加速上市公司在主流产线的规模化渗透。

据了解，中微公司主营业务为高端半导体设备的研发、生产和销售，向下游集成电路、LED 外延片、先进封装、MEMS 等半导体产品的制造公司销售刻蚀设备、薄膜设备和 MOCVD 设备、提供配件及服务，在等离子体刻蚀与薄膜沉积等干法设备领域已具备国际领先的技术实力。上市公司核心产品覆盖高能 / 低能等离子体刻蚀（CCP、ICP）、MOCVD、LPCVD、ALD 及 EPI 等关键工艺设备。

semi™ | SEMICON® CHINA

Co-located with FPDCHINA

国际半导体专业展

March 24-26, 2027
Shanghai, China

TRANSFORM TOMORROW
跨界全球 · 心芯相联

SEMICON CHINA

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”

SEMICON China 小程序带您高效观展！

- 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





冰山尖下的氮化物

新氮化物材料的发现正在扩展半导体领域，超越氮化镓家族

作者：落基山国家实验室的 Andriy Zakutayev

到如今，您可能已经听说过 AlScN（氮化铝钪）。如果没有，那值得留意：它是一种铁电氮化物，已成为化合物半导体研究中的一个突出课题。然而，如果有人请该领域概述氮化物半导体，大多数人会立即指向 GaN（氮化镓）——这种彻底改变了 LED 并正在改变电信和国防的材料。

然而，无论焦点是继续集中在 GaN 还是扩展到包括 AlScN，讨论可能仍然局限于氮化物冰山的尖端。这是我的观点——也是我希望随着对新兴氮化物材料兴趣增长而与其他研究者产生共鸣的观点。以下是更广泛且仍在发展的新型氮化物半导体领域概述。

几十年来，GaN 及其半导体合金一直主导着氮化物器件研究。2014 年，InGaN（氮化铟镓）因其在 LED 开发中的作用而获得诺贝尔物理学奖，帮助推动了节能照明革命。此后，AlGaN（氮化铝镓）HEMT（高电子迁移率晶体管）在国防和电信行业中发挥了关键作用，并正在扩展到其他应用。然而，尽管这些基于 GaN 的材料持续进步，但人们越来越认识到它们仅代表更广泛的氮化物半导体材料的一小部分。

最近，AlScN 在半导体研究中崭露头角。这种极性氮化物中的铁电开关几年前在德国被报道，此后吸引了全世界的广泛关注。器件工程师现在正在探索其作为 HEMT 中介质势垒层以增加沟道电荷密度的潜力，以及在用于非易失性存储器应用的可开关铁电场效应晶体管中的潜力。

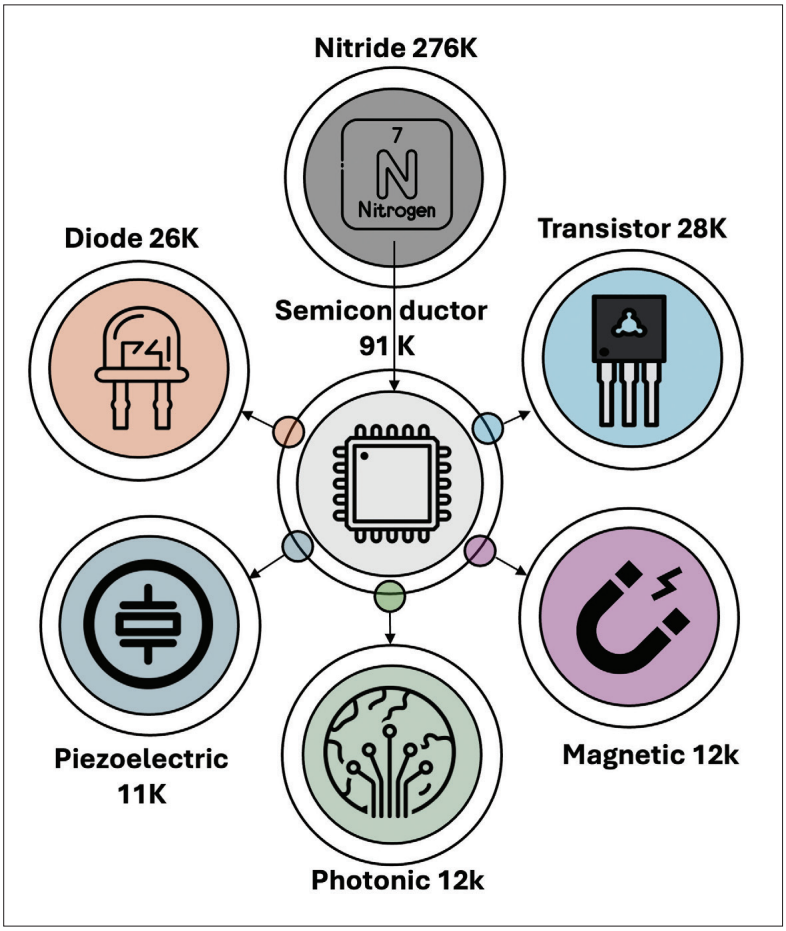
值得注意的是，尽管 AlScN 被认为是半导体器件中相对较新的铁电氮化物，但它在电信行业的可调谐射频滤波器应用中作为压电材料已使用了十多年。尽管有这种长期的压电历史和最近的铁电突破，AlScN 不太可能代表氮化物半导体材料的最终阶段。

不太明显但同样重要的是基础材料化学方面的进展，这些进展正在为广泛的氮化物新发现奠定基础。该领域的研究人员预测并合成了许多新型氮化物成分和结构，其中一些表现出高度可调谐的电子甚至量子特性。这提出了一个重要问题：在氮化物冰山的 GaN 尖端之下，还有什么？

冰山尖之下

与普遍认知相反，氮化物半导体并不局限于 III-N 成分，如 GaN。例如，$ZnGeN_2$（氮化锌锗），属于 II-IV-N_2 家族，提供了通过固定晶格常数下的阳离子有序化实现带隙可调性的潜力。这种方法可能为解决 InGaN 在绿光和琥珀光 LED 中遇到的混溶隙挑战提供途径。

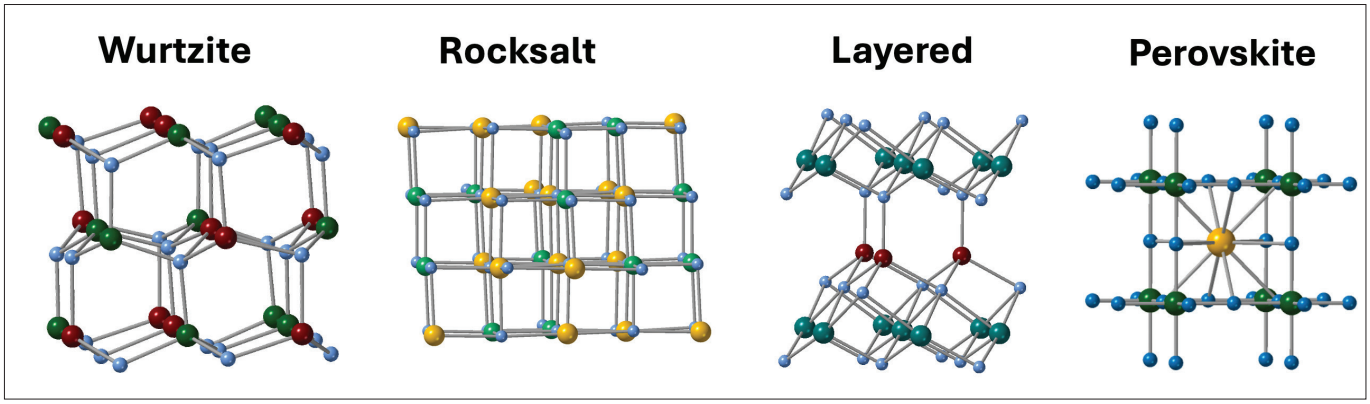
II-IV-N_2 家族扩展到包括 $ZnGeN_2$ 之外的化合物，如 $MgSiN_2$（氮化镁硅）、$ZnTiN_2$（氮化锌钛）、Mg_2SbN_3（氮化镁锑）、Zn_2NbN_3（氮化锌铌）和 Zn_3MoN_4（氮化锌钼），所有这些都显示出可调谐光学性能的潜力，而没有相同程度的晶格匹配约束。



氮化物研究已经扩展到二极管和晶体管之外，包括其压电、磁性和光子应用。每个图标旁边的数字对应于标题/摘要/关键词中包含"氮化物"一词和相应应用关键词的研究文章数量。例如，276,000（276K）是提及"氮化物"一词的论文数量，中间的91K是谈论氮化物半导体的论文数量，关于氮化物二极管或LED的论文数量是26K，以此类推。

虽然氮化物半导体通常与纤锌矿结构相关联，但这并不是它们唯一的晶体学形式。最近，岩盐氮化物如 $MgZrN_2$（氮化镁锆）和 Mg_2NbN_3（氮化镁铌）已作为宽禁带半导体出现。尽管与纤锌矿氮化物不同，它们具有间接带隙和非极性结构，但这些材料可能在异质结器件中作为势垒层发挥作用。

下转第 14 页



除了众所周知的AlGaN或InGaN的纤锌矿衍生结构外，氮化物半导体还具有其他正在研究中的晶体结构，包括岩盐衍生结构、层状结构（如wurtsalt、nickeline），以及最近的钙钛矿结构。这些结构中的每一种都包含两个不同的金属原子，用橙色或红色标记表示不同的电荷，以及一个用蓝色标记的氮原子。

坩埚下降法 4 英寸大厚度氧化镓晶体生长

作者：金永强、黄浩天、贾宁*、齐红基*
（中国科学院上海光学精密机械研究所，上海市宽禁带与超宽禁带半导体材料重点实验室，杭州光学精密机械研究所，杭州富加镓业科技有限公司）

半导体是人类信息产业的基石。自上世纪五十年代以来，半导体经历了三次变革，极大地影响了社会发展进程。第一代半导体以硅（Si）和锗（Ge）为代表，将集成电路、计算机带入人们的日常生活；第二代半导体以砷化镓（GaAs）、磷化铟（InP）为代表，开辟了光电和微波应用，带来信息高速公路。第三代半导体是以碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）等宽禁带半导体为代表，在 5G 通信、新能源汽车等高科技产业具有重要应用。

氧化镓（β-Ga_2O_3）是一种新兴的超宽禁带半导体，被誉为第四代半导体，具有禁带宽度更大（4.9 eV）、击穿场强高（8 MV/cm）、可低成本熔体法生长等优势；适合制作低损耗、高压大功率电力电子器件，在数据中心、新能源汽车、智能电网等领域前景广阔，受到国内外政府和产业界的强烈关注，正成为全球半导体产业战略竞争的新高地。图 1 所示，2026 年 3 月 12 日，中国“十五五”规划纲要（草案）中，“新产业新赛道培育发展”专栏明确提出“加快宽禁带半导体产业提质升级，推动 β-Ga_2O_3 等超宽禁带半导体产业化发展”。这一战略部署，表明 β-Ga_2O_3 已成为我国科技自立自强、新质生产力培育的重要方向，为第四代半导体材料的发展注入了强劲动力。

β-Ga_2O_3 产业链包括单晶衬底、外延薄膜、器件制作等环节。其中，单晶衬底是核心关键基础，占成本约 50%。实现大尺寸、低缺陷密度的 β-Ga_2O_3 单晶是本行业追求的目标，为当前国际学术界和产业界的研究热点。坩埚下降法（VB 法）因具备低成本、无“铱金”化生长等特点，是 β-Ga_2O_3 晶体衬底产业化制备最具有竞争力的技术路线之一。然而，当晶体尺寸增大时，其单斜结构固有的热学各向异性极易导致热应力集中、界面失稳和缺陷失控，使生长高质量大厚度 β-Ga_2O_3 晶体变得异常困难。

专栏 3　新产业新赛道培育发展

01　集成电路

做精做细成熟制程，提高先进制程制造能力，加快发展关键装备、材料和零部件，发展高性能处理器和高密度存储器。加快宽禁带半导体产业提质升级，推动氧化镓、金刚石等超宽禁带半导体产业化发展。推进存算一体、三维集成、光电融合等技术突破应用。

图 1：中国国民经济和社会发展第十五个五年规划纲要关于 β-Ga_2O_3 材料的重点部署

近日，中国科学院上海光学精密机械研究所（以下简称上海光机所）联合杭州光学精密机械研究所，在第四代半导体 β-Ga_2O_3 晶体衬底生长领域取得最新进展。富加镓业董事长齐红基研究员带领的富加镓业团队，与上海光机所贾宁副研究员的团队紧密合作，采用 VB 法结合热场仿真模拟技术，系统优化温度场分布及界面推进模式，重点对使用 VB 法制备的直径 4 英寸、厚度超过 30 mm 的（100）晶向 β-Ga_2O_3 晶体性能进行系统表征。晶圆的 X 射线衍射（HRXRD）半高宽（FWHM）测试结果显示为 49.6-64.8 arcsec；表明晶体具有良好的结晶质量和结构均匀性，为大尺寸 β-Ga_2O_3 晶体规模化制备提供了技术支撑。基于上述工作，该团队在国际上率先制备了 8 英寸 β-Ga_2O_3 晶体，如图 2 所示。

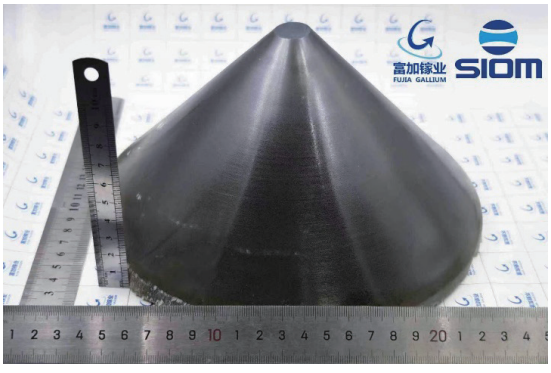


图 2：8 英寸 VB 法 β-Ga_2O_3 晶体

用模拟仿真解决挑战

针对 β-Ga_2O_3 单斜晶系带来的热学各向异性与生长动力学不对称性，团队建立了“界面稳定窗口”调控策略，通过优化轴向与径向温度梯度匹配关系，实现界面形态可控演化，有效抑制裂纹萌生、位错扩展及孪晶形成，突破了尺寸放大过程中结构完整性难以维持的瓶颈。

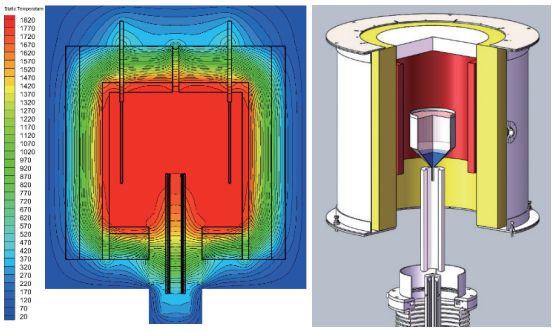


图3：VB 法生长 β-Ga_2O_3 晶体的数值模拟模型和热场结构示意图

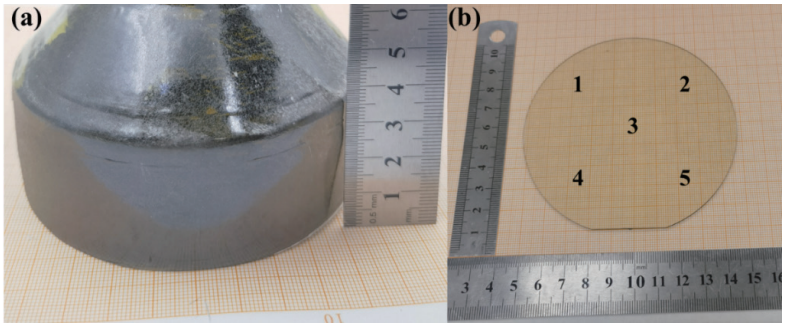


图4：(a) VB 法生长的 β-Ga_2O_3 晶体和 (b) 沿 (100) 面制备的4英寸晶圆

晶体退火处理策略

团队构建了分阶段降温与高温退火相结合的应力释放工艺，将冷却速率控制在 5-10 °C · h^{-1}，并在 800-1100 °C 范围内实施 10-16 小时退火处理，显著降低晶体内部热应力积累，实现 4 英寸厚晶无开裂制备（图 4），大幅提高了材料成品率与工艺可重复性。晶圆的 X 射线衍射（HRXRD）测试显示（图 5），摇摆曲线半高宽（FWHM）为 49.6-64.8 arcsec，表明晶体具有良好的结晶质量和结构均匀性，为大尺寸晶体规模化制备提供了技术支撑。

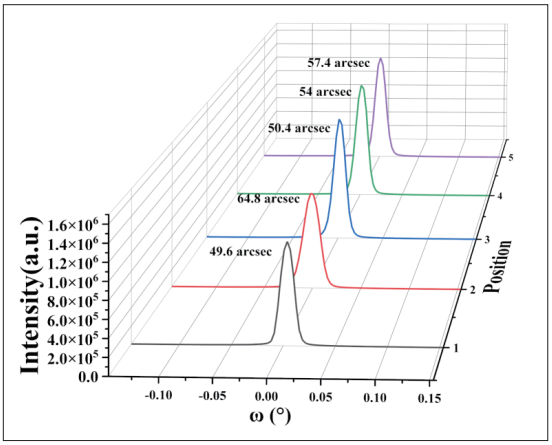


图5：采用五点取样法测量的 β-Ga_2O_3 晶圆衬底的 HRXRD 图谱

电学测试结果表明（图 6），所制备晶体整体

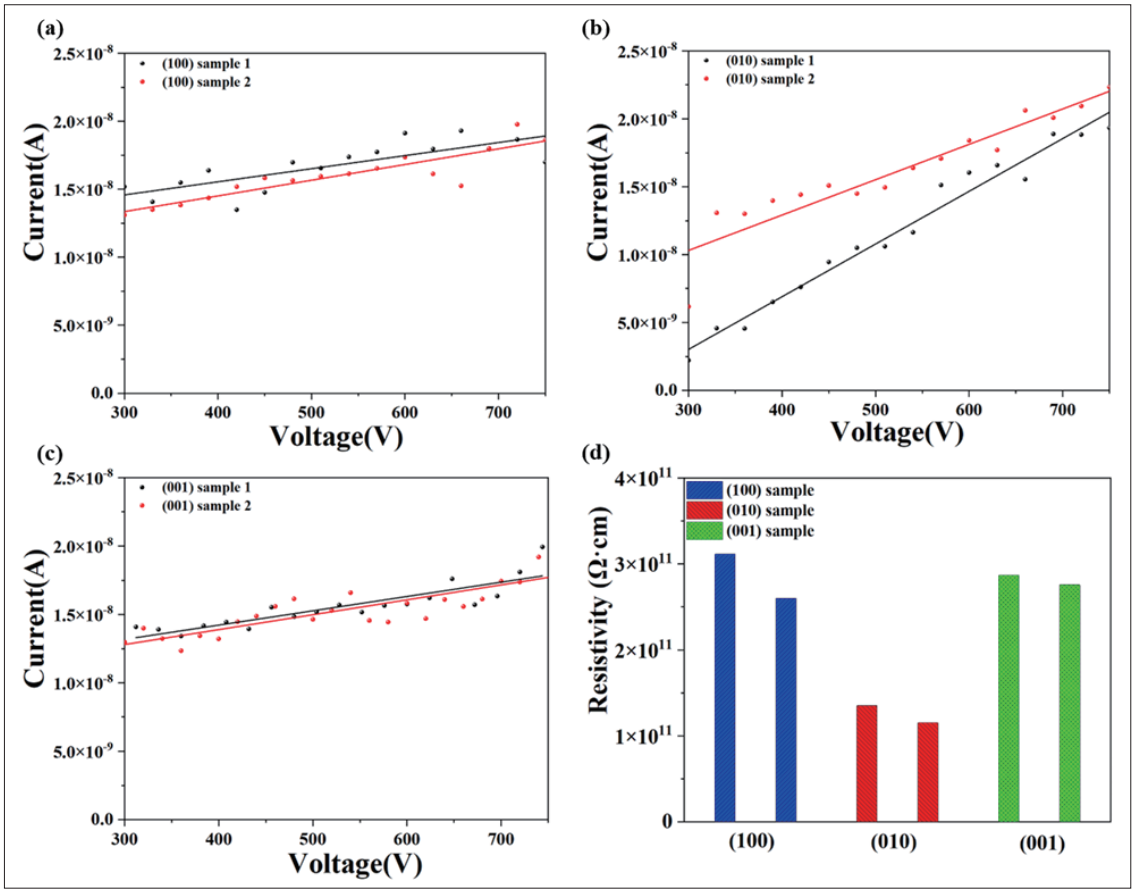


图6：(a) - (c) 分别为平行于 (100)、(010) 和 (001) 平面测得的 I-V 曲线；(d) 所测样品集电阻率分布的直方图。

呈现高电阻特性。机理分析显示，熔体生长过程中引入的微量 Rh 元素可能在禁带中形成深能级中心，其作用机制与 Fe 掺杂 β-Ga_2O_3 的深受主补偿行为相似，有助于构建高阻衬底环境。该补偿机制有利于抑制漏电通道形成、提升击穿稳定性，对功率器件衬底材料具有重要工程价值。

迈向产业化的重要里程碑

本研究实现了 4 英寸大厚度（>30mm）β-Ga_2O_3 晶体的稳定制备，完善了从热场设计、界面调控到应力释放的全过程技术体系，为 β-Ga_2O_3 晶体衬底由科研探索向产业化应用转化奠定了基础。

团队将持续优化温场结构与应力调控路径，推动更大尺寸单晶的稳定生长。依托上海市第四代半导体未来产业集聚区、上海市宽禁带与超宽禁带半导体材料重点实验室、杭州富加镓业科技有限公司等一体化布局，加快第四代半导体 β-Ga_2O_3 晶体工程化与产业化进程。

此外，团队将联合下游用户加快开展器件端对材料端的应用验证，持续迭代 β-Ga_2O_3 材料及器件性能，助力“双碳”目标下电力的高效转换与管理。CS

扩展阅读

- N. Jia et al. “Realization of 4-inch diameter and thick β-Ga2O3 single crystals using the vertical Bridgman method” CrystEngComm，2026, DOI: 10.1039/D5CE01023C)
- https://mp.weixin.qq.com/s/Wo11YjCB2bjQvAQm88XavQ
- 贾宁等，“垂直布里奇曼法生长氧化镓单晶及其性能表征”，人工晶体学报，2025, 54(2): 190-196.

上接第 11 页

量子器件，包括约瑟夫森结量子比特。尽管岩盐氮化物历史上与超导性相关联，如 NbN（氮化铌）中，但新的半导体变体正在拓宽未来器件设计和应用的范围。

在纤锌矿和岩盐之间的结构空间中架起桥梁的是层状氮化物。这些材料包括 $ZnZrN_2$（氮化锌锆），有时称为“wurtsalt”，由交替的纤锌矿和岩盐层组成，预计表现出非常低的空穴有效质量。

尽管 wurtsalt 结构仍然具有合成挑战性，但相关的层状“rockseline”结构（结合岩盐和镍砷矿图案），以 $MgMoN_2$（氮化镁钼）为例，最近已在薄膜形式中实现。人们谨慎乐观地认为，rockseline 材料的外延生长，连同其预测的拓扑特性，可能有助于开发下一代基于氮化物的量子器件。

另一个新兴领域涉及具有非化学计量金属氮比的氮化物半导体，如具有通式 ABN_3 的氮化物钙钛矿。继十年前的理论预测之后，最近的合成进展使得无氧氮化物钙钛矿的发展成为可能。例子包括表现出高压电系数的 $LaWN_3$（氮化镧钨）和展示可开关铁电性的 $CeTaN_3$（氮化铈钽）。诚然，与卤化物钙钛矿相比，氮化物变体的进展更为渐进。然而，这些材料可能显著影响电子器件的未来发展方向。

综合来看，这些研究进展表明，氮化物半导体领域远远超出 GaN 及其近亲。材料化学的进步正在揭示多样化的氮化物材料系统家族，范围从可调带隙纤锌矿和新兴岩盐半导体，到层状氮化物和氮化物钙钛矿。可以设想，这些成分中的一种可能遵循类似于 AlScN 的轨迹，由于其独特的功能特性而迅速获得突出地位。

从材料科学家的角度来看，在我看来，电子器件的持续演进呈现出机遇。

将材料调色板扩展到包括更广泛的氮化物家族，可能实现从 GaN 尖端之下挖掘出的新功能和器件概念。CS

扩展阅读

- S. Fichtner et al. “AlScN: A III-V semiconductor based ferroelectric.” J. Appl. Phys. 125 114103 (2019)
- A. Zakutayev et al. “Experimental synthesis of theoretically predicted multivalent ternary nitride materials.” Chem. Mater. 34 1418 (2022)
- S. Choi et al. “A single-phase epitaxially grown ferroelectric perovskite nitride.” Sci. Adv. 11 eadu6698 (2025)

适用于 MEMS 研究级原型高效验证的微区工艺技术研究

作者：胡轩宇，杨淑雯，程鑫鑫，樊雨佳，宋笠，王瑜璞，麦志洪；
湖北九峰山实验室

MEMS 作为融合微型机械与电子技术的核心器件，是支撑人工智能、物联网、新能源汽车等战略新兴产业的“感知神经”[1]。据法国市场研究机构 Yole Development 报告显示，2024 年全球 MEMS 市场规模约为 154 亿美元，预计到 2030 年将增长至 192 亿美元[2]，中国 MEMS 市场 2024-2030 年复合年增长率约为 3.6%，而本土产能仅占全球约 2%，凸显了产业升级与技术创新转化的迫切性[3]。

然而，产业快速发展的背后，科研创新与产业化之间的“最后一公里”鸿沟仍未打通。其核心矛盾之一在于，面向小批量、多品种、快速迭代的科研验证需求，缺乏一种兼具低成本与高工艺兼容性的原型制造方案。当前，国内 MEMS 技术方案主要由三类主体提供，但均存在明显的适用局限性。首先是以赛微电子、华虹宏力为代表的专业代工平台，它们虽然具备完善的工艺体系和稳定的产能，能够支撑大批量量产需求，但其“整晶圆、标准化”的代工模式导致研发阶段的小批量定制需求需要承担高昂的掩膜与流片成本，单次定制流片费用超过 50 万元，周期长达 3-6 个月，完全无法匹配科研快速迭代的节奏[4][5]。其次是以中国科学院微电子所、上海微技术工业研究院为代表的科研院所公共服务平台。这些平台通过推出标准工艺模块，将复杂工艺拆解为可组合的单元，显著降低了定制化工艺的研发周期与成本。然而，其标准化模块主要针对成熟产品的快速量产优化，对于科研阶段的新型材料（如 AlScN 压电薄膜）、非常规结构（如 3D 堆叠微执行器）的适配性有限，难以支撑前沿创新的验证需求。第三类是以清华大学、北京大学微米 / 纳米加工技术国家级重点实验室为代表的高校研发平台。这类平台拥有自主开发的加工工艺与仪器设备，能够支撑基础研究与原型开发，但受限于产能规模与产业化经验，其原型制作往往依赖手工操作或小试设备，存在精度与一致性不足的问题，且无法提供与量产线兼容的工艺参数，导致验证结果难以直接指导产业化设计[6]。

这些技术方案的共同局限催生了对于新型验证方案的迫切需求。针对这一核心痛点，我们团队基于 MEMS“科研原型结构尺寸较大、堆叠层数少”的特点，开发了实验室微区工艺技术，本研究旨在系统阐述该技术的实现路径，并重点分析其如何通过工艺重构与关键技术创新，在实验室环境下实现研究级原型的快速制造与性能验证，为科研成果的产业化可行性评估搭建关键桥梁。

技术挑战与需求分析

深入分析 MEMS 研究级原型验证的技术需求，可以发现其面临着来自产业化与实验室能力的双重挑战。在产业化方面，传统半导体量产线的“整晶圆、标准化、大批量”生产模式与科研验证的“小批量、多品种、快速迭代”需求存在根本性矛盾[7]。以中芯国际[8]、华润微电子[9]等主流代工厂的流程为例，即使仅验证单个原型，也需要承担整片晶圆的材料与加工费用，且 Fab 排期通常需要 1-2 个月，这种模式完全无法匹配科研项目的节奏。

与此同时，实验室手工制作环节存在的技术瓶颈同样不容忽视。根据我们的实测数据，手工切割导致的边缘崩边普遍超过 50μm，涂胶曝光对准误差超过 20%，这些误差会直接导致 MEMS 关键参数波动超过 20%，使得性能评估失去参考价值。更重要的是，手工操作难以完成深硅刻蚀、金属化布线等精密工艺，无法实现“空腔 - 电极 - 压电层”的多层集成结构，大大限制了原型的功能完整性。

除了制造环节的挑战，MEMS 技术本身的

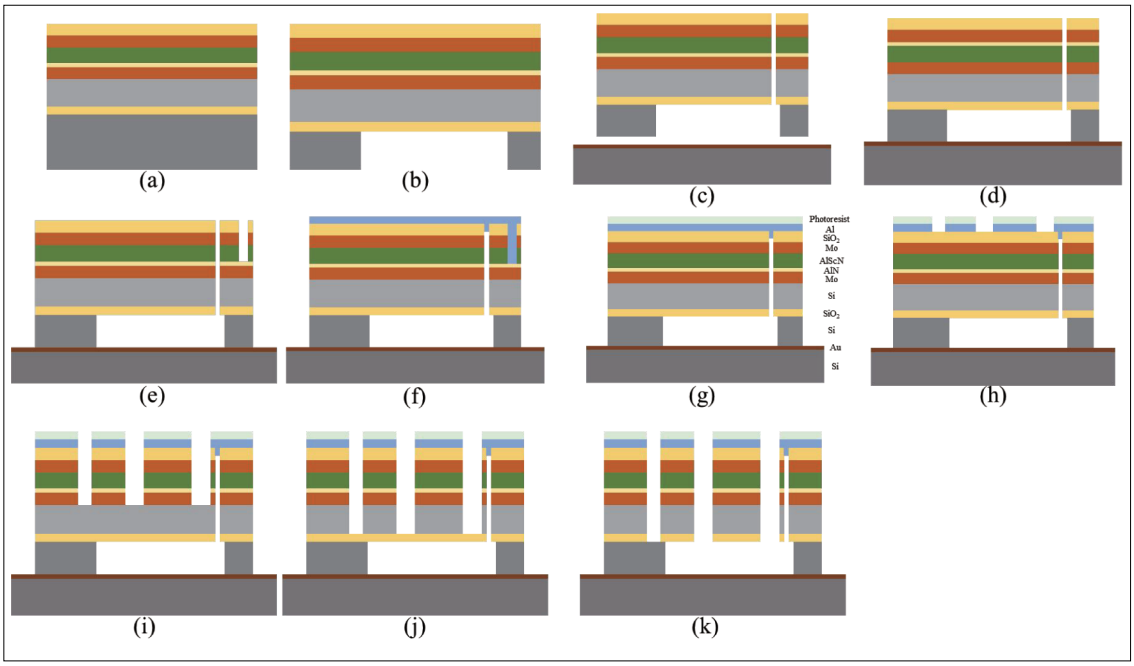


图1：MEMS研究级原型的微区工艺流程图

多样性也带来了额外的验证难度。MEMS 产品覆盖从硅基、柔性 PI 薄膜到玻璃等多种衬底材料，涉及压电、磁性、柔性聚合物等功能材料体系，包含 2D 平面、3D 堆叠、可动微结构等复杂形态[10]。这种多样性要求验证平台必须具备“多材料兼容、多结构集成”的能力，而当前量产线的标准化工艺仅支持有限材料体系，实验室又缺乏专用设备，形成验证能力的空白区域。

基于以上分析，本研究将微区工艺技术的核心需求定位为四个维度：成本与周期可控、加工精度可靠、多材料 / 结构兼容、以及功能 - 性能一体化验证。MEMS 自身的特点为技术突破提供了契机：多数 MEMS 研究级原型结构尺寸较大（关键结构 > 1μm）、堆叠层数少（≤5 层），无需纳米级精度[11]，这为在实验室环境下，采用“晶圆裂片 + 局部微加工”的替代性技术路径提供了可行性。通过用实验室常规设备（如 FIB、RIE、电子束蒸发）替代量产线专用工艺，在保证原型性能的前提下压缩成本与周期 —— 这正是本研究所述微区工艺技术的核心逻辑。

MEMS 研究级原型的微区工艺开发与验证

微区工艺技术的核心在于将传统整晶圆加工模式重构为“晶圆裂片 + 局部微加工”的灵活适配型制造体系，并对关键环节进行了针对性优化。本工艺基于预制功能层的 SOI（Silicon-On-Insulator）晶圆，其埋氧层（BOX）作为完美的刻蚀停止层，是实现高精度空腔的关键。预制功能层可以包括但不限于 Pt/Ti 底电极、AlScN 压电层、Au/Cr 顶电极及 SiO_2 保护层，这些材料的选择确保了与后端微加工工艺的兼容性，属于 Fab 的标准制程产品，成本仅为定制流片的十分之一。通过优化的精密晶圆裂片技术，将整片晶圆分割为小型芯片，使单样品材料成本降低 90% 以上，奠定了低成本迭代的物料基础。

在微加工环节，我们建立并优化了一套完整的实验室级工艺链条，整个流程如图 1 所示。首先将样品正面固定于特制的承载硅片，通过自动研磨机将背面精确减薄至目标厚度（200-300μm），这个厚度范围经过优化设计，能够很好地适配大多数 MEMS 器件的力学性能需求。随后利用电子束蒸发沉积金属层，结合经过设计优化的可重复使用小型金属掩膜板与离子铣削技术，形成深硅刻蚀所需的硬掩模。这一创新方案将掩膜成本降至传统方法的 1%，制备周期从 2 周缩短至 2 天。

在关键的空腔制备环节，我们充分发挥了 SOI 晶圆的结构优势。利用其埋氧层作为天然的刻蚀停止层，通过实验室级反应离子刻蚀系统实现了深度误差小于 5% 的高精度空腔加工。为了突破正背面图形对准的技术瓶颈，本研究开发并应用了基于聚焦离子束的“L”型通孔标记技术，通过在空腔四周制作精密的对准标记，成功替代了量产线昂贵的光刻机对准系统，实现了亚微米级的套刻精度。

工艺的最后阶段聚焦于器件功能的完整实现。通过采用金硅共晶键合实现器件结构层的转

移与集成，键合温度控制在 400℃ 以下，以避免高温对已成型功能材料（如 AlScN）性能的劣化。在确保样品背面的结构稳定性后，去除正面承载硅片并进行表面清洗。利用聚焦离子束刻蚀通孔至底电极，通过电子束蒸发沉积铝金属层，再结合专用金属掩膜完成电极图案化，最终通过反应离子刻蚀（RIE）释放可动结构，完成整个 MEMS 研究级原型的制作。

这种工艺方案之所以能够成功，很大程度上得益于 MEMS 器件自身的技术特点。大多数科研阶段的 MEMS 原型对纳米级精度需求不高，而实验室设备的加工能力（如 FIB 的 10nm 分辨率、RIE 的 50nm 刻蚀精度）完全能够满足要求。同时，小芯片模式支持同一批次加工 10-20 种不同尺寸、结构的原型，使研究人员能够快速对比不同参数对性能的影响，大大提升了科研效率。图 2 展示了我们通过微区工艺的方案制作的 MEMS 应力表征结构实物图。

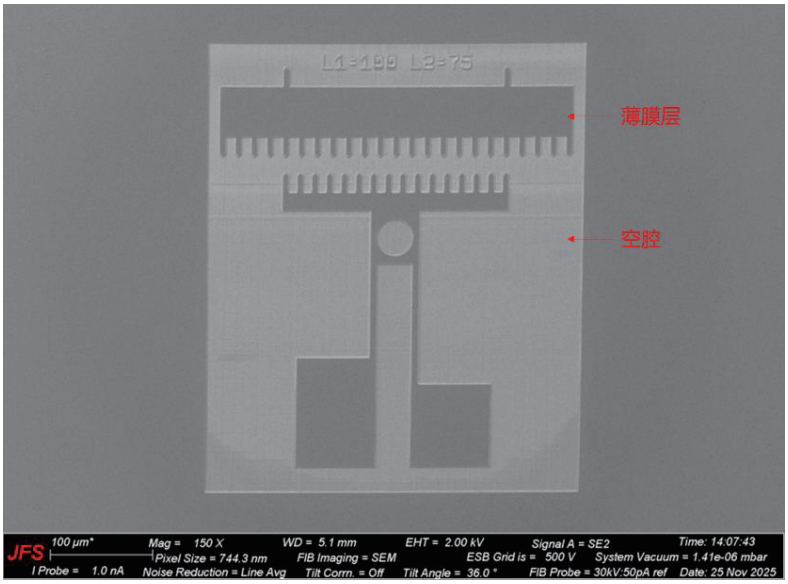


图2：MEMS 应力表征结构实物图

配套外接电路的微区定制化工艺开发与验证

完整的 MEMS 原型验证需要配套的信号调理电路支持，但传统定制 ASIC 芯片的开发模式存在明显短板。常规 ASIC 开发需要 3-6 个月周期，成本超过 20 万元，这种节奏完全无法与快速迭代的原型验证相匹配 [12]。为此，本研究拓展开发了基于商用芯片二次加工的微区定制化工艺，通过精准的局部电路修改，快速实现 MEMS 原型验证所需的特定信号处理功能。

该工艺的核心思路是“功能块复用 + 局部精细化修改”。首先根据 MEMS 信号的特定需求（如压电传感器的 nA 级电流、mV 级电压输出特性），选择性能匹配的商用芯片作为基础平台。通过专业的版图分析工具精确定位芯片内部的目标功能模块（如输入级运放、反馈电阻网络等），并规划出最优的修改路径。这种方法的优势在于充分利用了商用芯片经过验证的成熟设计，确保了基础性能的可靠性。

在具体实施层面，我们建立了一套精细化的电路修改流程。首先使用等离子体增强化学气相沉积系统在芯片表面生长高质量的绝缘层，然后通过聚焦离子束刻蚀出精密的金属布线沟槽。接着利用电子束蒸发系统沉积铜 / 金金属层完成沟槽填充，通过大马士革工艺实现表面平坦化，最后沉积氮化硅钝化层提供可靠的电路保护。整个流程在实验室环境下即可完成，无需依赖专业的芯片制造产线，如图 3 所示就是我们 65nm 电路微区工艺展示。

微区工艺方案的核心优势与适配场景

经过多个项目的实践验证，微区工艺方案在多个维度展现出显著优势。在经济性方面，通过晶圆裂片和可重复掩膜技术的结合，将单原型验证成本控制在数万元级别，仅为传统量产线试错成本的 1%-5%。在时间效率上，完整的验证流程从传统需要的 3-6 个月压缩至 2-4 周，并且完全不受 Fab 排期限制，为科研工作提供了充分的灵活性。

在技术性能层面，该方案同样表现出色。通过实验室精密设备的组合使用，实现了关键结

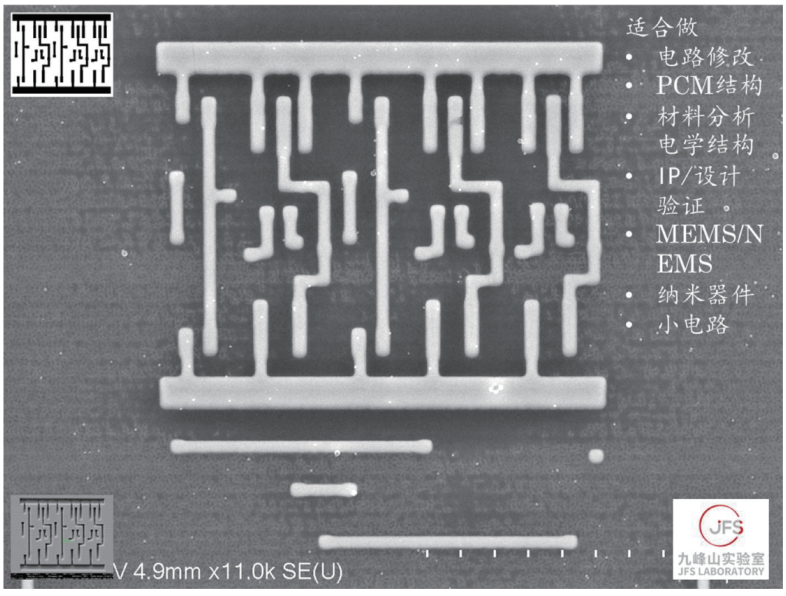


图3：65nm 电路微区工艺展示

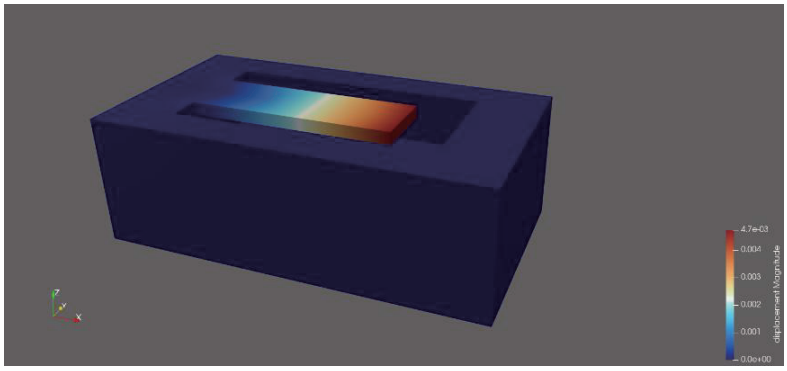


图4：压电 MEMS 悬臂梁多物理场 FEM 仿真

构参数误差 ≤20% 的加工精度，性能波动控制在 20% 以内，确保了验证结果能够准确反映量产产品的性能趋势。在兼容性方面，方案支持硅基、柔性衬底、压电材料等多种材料体系，能够实现从简单 2D 结构到复杂 3D 堆叠的各种器件构型，满足了绝大多数科研创新的验证需求。

为了确保验证结果的可靠性，我们配套开发了完善的支撑体系。通过多物理场仿真软件建立了工艺参数与器件性能的关联模型，实现了工艺-设计的协同优化，如图 4 所示。同时整合原子力显微镜、激光多普勒测振仪、阻抗分析仪等先进表征设备，构建了完整的测试分析平台，为性能评估提供了全方位的数据支持。

从应用场景的角度来看，该方案特别适合三类科研需求。首先是原理样机的功能性验证，帮助研究人员快速验证新型 MEMS 器件（如加速度计、麦克风等）的设计可行性；其次是新材料与新结构的探索研究，为 AlScN、柔性 PI 等新兴材料提供可靠的工艺兼容性测试平台；最后是科研项目的结题与成果演示，能够快速制作出具有完整功能的表现原型，直观地展示研究成果。

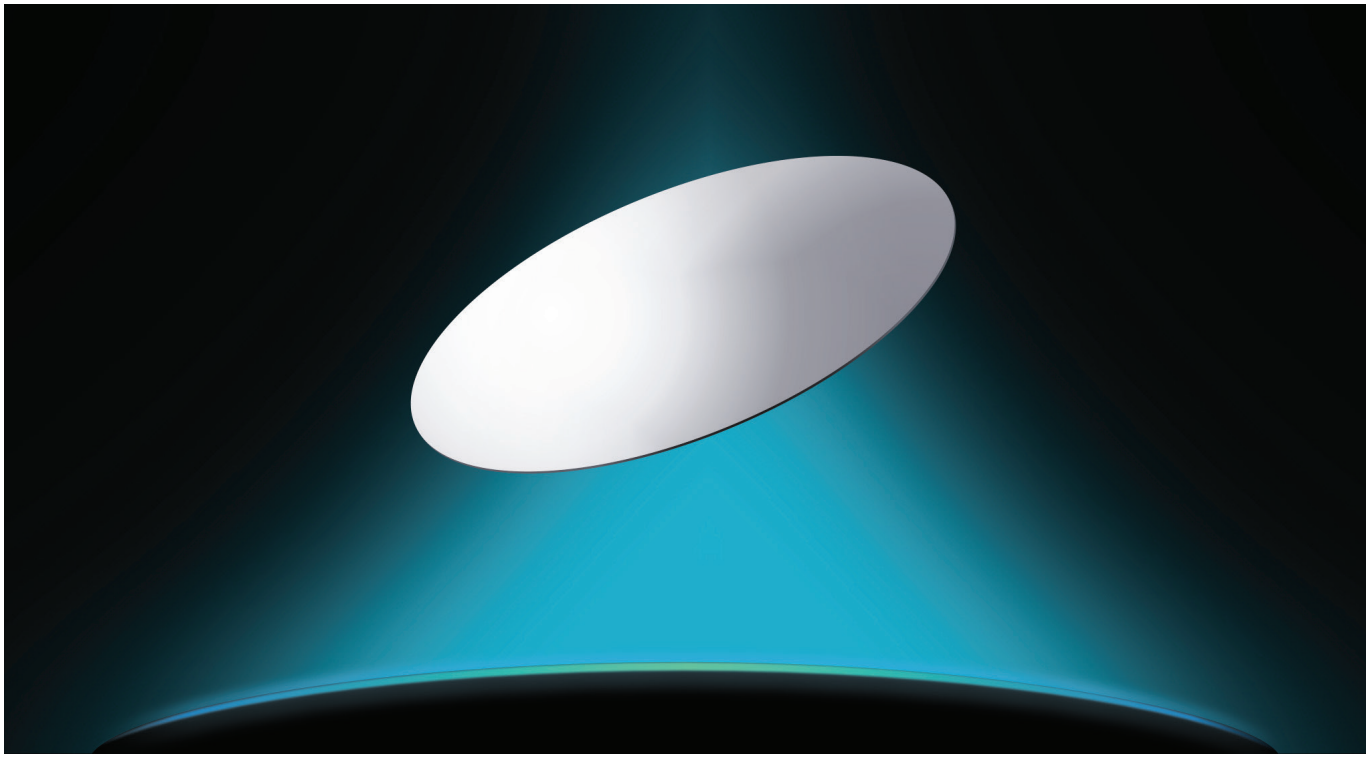
MEMS 技术从实验室走向产业化的过程中，最大的障碍在于科研创新与工程化验证之间的协同断层。本研究阐述的微区工艺技术，通过构建实验室级的微加工体系，创新性地采用 " 局部加工替代整晶圆制造 " 的技术路径，为这一断层提供了高效的解决方案。该技术使研究人员能够在投入量产线之前，完成充分的功能 - 性能 - 设计可行性评估，显著降低了科研成果转化的技术风险和资金门槛。目前，该技术方案已经在多个 MEMS 研发项目中得到成功应用。 在某高校的 PMUT 阵列研发项目中，研究团队通过微区工艺在 3 周内完成了 5 种不同尺寸、排列振膜的的验证工作，为后续的量产线设计提供了关键的技术数据。

面向未来，本研究涉及的微区工艺技术将从三个维度持续推进优化升级。在材料适配性方面，重点开发柔性衬底（PI、PDMS）和宽禁带半导体（GaN）等新兴材料的微区加工技术，拓展方案的适用范围。在工艺能力方面，通过引入双束 FIB-SEM 等先进设备，实现亚微米级别的三维结构加工，提升技术方案的精度上限。在系统集成方面，着力开发实验室级的真空封装和引线键合工艺，最终形成“制造 - 封装 - 测试”的全流程闭环能力。

我们坚信，微区工艺技术将成为加速 MEMS 创新成果转化的重要推动力。通过为高校和科研院所提供高效、经济的验证平台，帮助更多优质技术突破实验室的局限，快速走向产业化应用，从而推动整个 MEMS 产业向创新驱动的高质量发展阶段迈进。CSC

扩展阅读

- [1]. QYResearch. 2025 年全球 MEMS 传感器行业总体规模、主要企业国内外市场占有率及排名 [R]. 北京 : QYResearch, 2025.
- [2]. Yole Group. Greater China MEMS Industry 2025[R]. Lyon, France: Yole Développement, 2025.
- [3]. Yole Group. Status of the MEMS Industry 2025[R]. Lyon, France: Yole Développement, 2025.
- [4]. 北京赛微电子股份有限公司 . 北京赛微电子股份有限公司 2025 年半年度报告 [R]. 北京 : 赛微电子 , 2025.
- [5]. 华虹半导体有限公司 . 华虹半导体有限公司 2024 年年度报告 [R]. 上海 : 华虹宏力 , 2024.
- [6]. 刘宇，唐洁颖，张伟，等 . 基于图像识别的硅 MEMS 谐振器件自动皮秒激光调频系统 [J]. IEEE 半导体制造汇刊 , 2023, 36(3): 334-341.
- [7]. LAWS R A. Manufacturing costs for microsystems/MEMS using high aspect ratio microfabrication techniques[J]. Microsystem Technologies, 2007, 13(1): 85-95.
- [8]. 中芯国际集成电路制造有限公司 . 中芯国际集成电路制造有限公司 2024 年年度报告 [R]. 上海 : 中芯国际 , 2025.
- [9]. 华润微电子有限公司 . 华润微电子有限公司 2024 年年度报告 [R]. 无锡 : 华润微电子 , 2025.
- [10]. PATTAIK P, OJHA M. Review on challenges in MEMS technology[C]//International Virtual Conference on Sustainable Materials. Materials Today: Proceedings, 2023, 81: 224-226.
- [11]. MA Y F, LU Y, DENG N, et al. A PZT MEMS loudspeaker with a quasi-closed diaphragm[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2023, 358: 114454.
- [12]. QYResearch. 2024-2030 全球与中国 ASIC 设计服务市场现状及未来发展趋势 [R]. 北京 : QYResearch, 2024.



迈向太空晶体生长

下一代可靠、高质量的半导体晶体的生产之道是否可能存在于太空中?

作者：Space Forge 的 Alastair McGibbon 和 Neil Monteiro

化合物半导体已成功在市场中确立地位，在那些其优越性能明显优于硅的应用领域中占据了一席之地。然而，对于宽禁带和超宽禁带半导体等材料类别，体缺陷密度可能限制系统的性能和可靠性，进而可能减缓或限制其在市场中的采用。

这类材料的例子可见于宽禁带和超宽禁带半导体氮化镓（GaN）、碳化硅（SiC）、氮化铝（AlN）和金刚石。在这些材料中，高水平的体缺陷严重威胁到功率性能，以及晶体的质量——而这对高相干性量子应用至关重要。碳化硅和氮化镓显然正在功率射频和功率电子市场中产生影响，但晶体质量、可靠性和良率方面的持续挑战仍然存在，特别是对于非常高功率密度和电压的应用。

进展仍在继续，晶体质量正在缓慢改善，特别是在外延层和二维材料开发方面。但仍然无法可靠地生长出体缺陷密度与硅相当的晶锭。这为市场设置了障碍。

Space Forge 的方法

在 Space Forge，我们正在采取一种全新的方法来寻找可靠、高质量的半导体晶体，提出这样一个问题：如果存在一种方法，能够生产出质量比目前可获得的材料好两到三个数量级的化学气相沉积（CVD）衬底，会怎样?

这个问题的一个有希望的答案存在于一个广泛但分散的证据体系中，该证据表明在低地球轨道（LEO）及更远空间中发现的条件对晶体生长质量具有可靠的积极影响。广义上讲，这些条件是：微重力、极低温度和高质量真空。在这三者



Space Forge 团队与 ForgeStar-1 卫星的合影，展示“THE FORGE AWAKENS”标语

中，微重力是一个驱动因素——已证明它能大大减少对流，从而减少轨道中气相结晶的成核点。此外，LEO 中发现的高质量真空也有助于无机晶体生长，确保极低的氮含量。在典型的 LEO 高度，N_2 粒子的密度小于 1×10^{12} m^{-3}，在卫星背风面甚至更低，如尾流屏蔽设施的外延演示所示。

我们的使命是确定在优化生长工具的设计和操作以充分利用这些条件优势时，能在 LEO 中生产出何种质量的材料。

在太空中进行 CVD 生长的概念带来了一系列复杂的工程、制造和成本挑战——因此，对于概念验证和早期规模化，专注于相对简单的策略非常重要。基于这些考虑，我们将半导体生长的太空元素优先定位为尽可能保守。我们的座右铭是：只在太空中做只有太空才能做的事。因此，我们的重点是能在 LEO 中生长的晶体质量，而不是规模。一旦完成这一点，精力将只集中在传统的地面半导体规模化上，利用返回的高质量太空籽晶。

遵循这一方法，我们已经将一个先导半导体生长工具送入太空，目前正在一个自由飞行卫星中绕地球运行。我们的 ForgeStar-1 于去年 6 月发射，目前正在有效载荷中进行先导等离子体增强 CVD 系统的初始可行性测试。虽然我们的工具规模很小，设计仅生长几毫米的材料，但这是在太空中的重要第一步，证明我们有能力在轨道中使用我们的半导体生长工具。一旦完成这一阶段，我们将开展一系列任务，涉及扩大我们的工具规模，并开始充分理解无机晶体成核和生长在微重力中的物理机制。

下一步

太空晶体生长和返回的挑战是相当大的——尤其需要优化有效载荷内的尺寸、重量和功率，以便能够实际可靠且可重复地在太空中生长无机晶体。大多数类型太空制造的能量需求是 " 房间里的大象 "，为开展此类 ventures 设置了障碍。直面这个问题，我们正在开发市场上能量密度最高的卫星之一，以实现轨道籽晶的生长。我们下一代航天器将具备通常保留给电信卫星的发电量级，同时具备从轨道速度返回的能力——这在载人航天之外很少见。

在朝着这些目标努力的同时，我们将优化等离子体增强 CVD 工具的尺寸、重量和功率。我们在这方面的改进已经带来了能源效率方面的重大创新，甚至可能影响纯地面应用。

我们正在开发一种灵活的工具能力，它不必安装在我们的卫星上才能工作——它可以托管在未来的系统中，并适应其他研究人员或制造商的材料或实验需求。

太空设计

在航天工业中，国际空间站（ISS）为开发太空制造提供了主要平台。不幸的是，作为生长化合物半导体的场所，它存在很大问题，而且它正在退役。这意味着工业正在转向私人模式，涉及商业 LEO 目的地，预计将取代 ISS 的大部分功能。因此，我们正在与多个合作伙伴合作，将我们的系统托管在他们的平台上——这是一种互惠互利的安排，因为商业平台需要可行的商业路线才能运作，只要它们具备能够这样做的功率密度能力。

在 LEO 中生长我们的籽晶后，我们必须将它们返回地球。由于太空运输的高度竞争性，这未必像最初看起来那么具有挑战性。最近，一些公司已经涌现，如美国的 Varda Space Industries 和德国的 Atmos Space Cargo。两者都在单独开发将卫星返回地球的方法——尽管对于这些公司来说，重点是用于药物晶体生长的低功率密度。目前，我们正在与我们自己的卫星合作开发一种集成方法，部署一个热屏蔽，作为通过地球大气层返回的气动稳定手段，具备预测和跟踪低冲击着陆的能力。

随着太空制造障碍的克服，轨道环境的益处——以及利用它所需的技术发展——有望帮助解决地面无机晶体生长中的挑战。

规模化

我们主张的核心——以及任何无机晶体太空制造的主张——是我们的晶体质量足够高，当返回地球时，可以作为籽晶用于显著的高质量规模化，进入晶圆库存。这种库存需要多好？嗯，好到足以取代地面籽晶材料在市场中的地位。

基于这些因素，我们正在参与一系列与太空计量和生长控制相关的"推动针尖"活动，调查一些我们已经可以预见的关键问题。这些问题是：需要什么技术和数据来理解原位和太空测量与优化？如何在没有实时干预的情况下实现可控和可重复的制造？如何建模太空微重力生长，以降低开发成本并提高可靠性？所有这些问题都正在调查中。

在地面，我们正在应对每个化合物半导体供应商都必须满足的所有技术和商业挑战。在 LEO 中生产高质量籽晶是没有意义的，除非随后有一个地面生长过程，尽可能长时间地保持初始晶体质量。我们目前正在斯旺西集成半导体材料中心（CISM）孵化，以开发这种能力。此外，我们正在将努力导向后处理生长材料，这提供了工程衬底的核心，具备适当的表面处理，使其在市场中具有竞争力。

鉴于在地球上生长宽禁带和超宽禁带材料的挑战，这是我们的初始目标。类似于化合物半导体行业中所有材料供应商——过去和未来——面临的挑战，成功并不像仅仅提供具有颠覆性理论性能的高质量解决方案那么简单。要产生显著销售，需要的是我们的材料在供应链中的采用，使其最终成为共同设计的终端用户系统的一部分，以证明所涉及的成本和努力是合理的。为此，我们已经作为传统材料供应商积极参与功率、射频、光子和量子应用。

展望未来

如果我们对太空制造的方法成功，接下来会怎样？很可能我们的注意力将转向开发由高质量宽禁带和超宽禁带材料实现的新市场和应用。

例如，一旦我们在初始目标市场——协助封装级热管理和集成的材料——中确立地位，我们可以逐步转向生产用于晶圆厂级有源器件的材料。或者，我们可以开始探索我们的材料如何支持量子计算。



Space Forge 正在使用斯旺西集成半导体材料中心的洁净室

我们还可能将活动多样化到其他生长过程和材料，同时保持我们对体晶体质量驱动最终性能系统的关注。这方面的努力已经处于初期阶段，因为我们正在参与关于轨道中非线性光学晶体生长可行性的早期讨论。同样，虽然碲化镉（CdTe）的替代品正在作为太阳能电池材料部署，但关于该材料在轨道中良好生长的数据已经存在，一旦太空制造能力到位，可能会扩大。

然而未来发展路径如何展开，有一点是明确的：随着太空制造障碍的克服，轨道环境的益处——以及利用它所需的技术发展——有望帮助解决地面无机晶体生长中的挑战。CSC



来自 ForgeStar-1 星载摄像机的低地球轨道视角

工程衬底增强高压氮化镓功率电子

具有陶瓷氮化铝核心和硅顶表面的衬底为生产高压、快速开关的氮化镓器件和集成电路提供了一个有前景的平台

作者：IMEC 的 Karen Geens 和 Benoit Bakeroot

想到碳化硅功率电子的应用，您可能会想到电动汽车（EV）。毕竟，正是电池驱动的汽车推动了碳化硅 MOSFET 销售的增长，这一趋势预计将在本十年及以后持续。这些晶体管用于牵引逆变器，倾向于在 400V 系统中运行——但更高的电压，特别是 800V，将在未来几年引入，这一转变正朝着碳化硅的最佳点迈进。与这类晶体管相关的商业产品跨越几百伏到几千伏，成熟的 1.2kV MOSFET 为采用 800V 电源系统的电动汽车提供了理想的裕量。

然而，碳化硅并不是唯一具有在电动汽车中部署所需属性的宽禁带半导体。还有氮化镓，今天许多人在这个应用中忽视了它。这种有吸引力的替代品已经在较低电压下取得了巨大成功，现在是快速充电器中的关键组件。将阻断电压提高到 1kV 或更高仍然是在大面积衬底上制造器件的挑战。一条可能的成功途径是转向工程衬底，这是我们在欧洲微电子研究中心 IMEC 开创的方法。存在诸如体氮化镓之类的替代方案，尽管它们的晶圆直径较小且成本显著更高。

氮化镓 HEMT（高电子迁移率晶体管）有许多优势，包括高临界电场和高电子迁移率，后者与其他 III 族氮化物（如氮化铝镓）的异质界面处产生的二维电子气（2DEG）相结合，实现了非常高的密度。近年来，这种器件的主要形式有了显著改进，包括增强模式（E-mode）横向 p 型氮化镓栅极 HEMT 和级联耗尽模式（D-mode）器件。

为了在级联配置的 D-mode 器件中实现高功率水平，工程师倾向于致力于降低 2DEG 沟道电阻和提高电子沟道迁移率，这些步骤导致非常低的导通电阻。

相比之下，E-mode p 型氮化镓栅极 HEMT 具有更高的 2DEG 沟道薄层电阻，因此具有更高的导通电阻。然而，这一弱点必须与允许更高水平单片集成的器件架构相权衡，这得益于 E-mode 晶体管确保安全的独立运行和许多应用中更简单的栅极驱动电路。



晶圆测试设备正在对氮化镓器件进行探针测试

除了这些优势外，p 型氮化镓栅极 HEMT 以其成熟度和性能脱颖而出。这就是为什么我们为 1200V 氮化镓开关的第一个演示器选择了这种特定的器件架构，同时探索垂直氮化镓结构用于未来高压应用的潜力。

工程基础

要生产在如此高电压下运行的开关，需要更厚的外延层，这在制造中带来了挑战。这就是 Qromis 衬底技术（通常简称为 QST）发挥作用的地方。

Qromis 商业可获得的工程衬底具有陶瓷氮化铝核心，结合了高机械强度和与氮化镓及氮化铝镓层热膨胀系数的紧密匹配。除了这些特性外，用于氮化镓和铝（镓）氮层外延生长的籽晶层仍然是众所周知的硅，具有（111）晶面取向。

这种工程平台为生长厚且无裂纹的氮化镓堆叠提供了极好的基础，显著降低了晶圆破裂的风险，这是使用硅衬底生长针对 1200V 的较厚堆叠时的常见问题，特别是在较大直径（如200mm）时。

使用这些专有衬底，我们制造了具有 9μm 厚氮化铝镓缓冲堆叠的横向氮化镓功率 HEMT，提

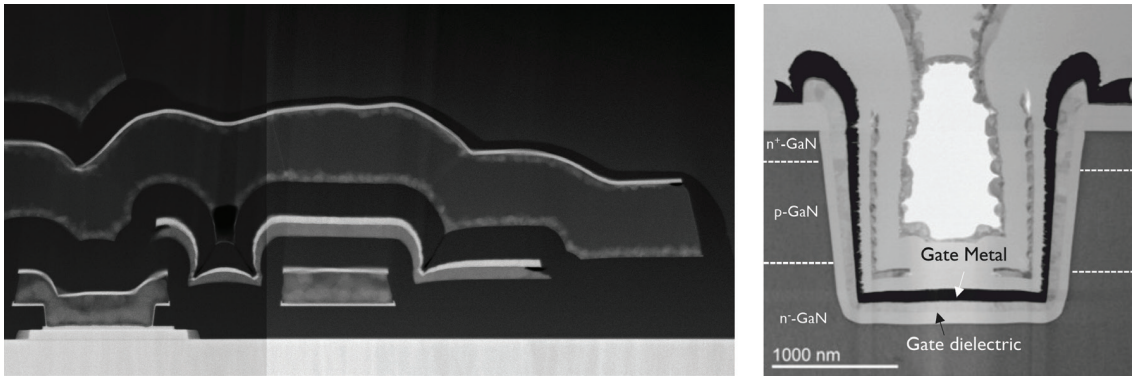


图1：(a) 用于横向器件的p型氮化镓栅极架构和(b) 用于垂直器件的沟槽栅MOS架构的截面STEM图像

供了优异的电学性能。这些器件具有超过1800V的硬击穿电压和仅约5.8mΩ · cm² 的比导通电阻。

QST的另一个优势是其可扩展性。适用于300mm晶圆，这项技术是经济高效、大批量生产的重要进步。迁移到更大的晶圆允许每批次更多的器件，有助于降低制造成本并加速氮化镓在高压应用中的采用。

垂直还是横向?

在追求更高电压（如1200V或更高）时，一个关键问题是：哪种架构，垂直还是横向，将提供更优越的性能？对于横向氮化镓器件，所有连接——即栅极、源极和漏极——都在正面制作。采用这种几何结构，随着电压目标上升，栅极到漏极的距离必须增加以保持安全运行。此外，延长场板至关重要——它们用于在关断状态下分布高压，使用源极连接的场板来优化电场分布（见图1(a)）。由于这些要求，引入更高的阻断电压需要更大的占位面积，并导致更高的比导通电阻和更大的电容，限制了效率和开关速度。

为了应对这些问题，包括我们自己在内的许多研究人员正在研究垂直氮化镓架构。与横向器件不同，垂直结构在整个外延堆叠的厚度上分布高关态电压，而不是在其表面上。由于这一点，无论电压等级如何，器件占位面积保持紧凑——这是高压应用的一个显著优势。

与垂直氮化镓器件开发相关的一个关键挑战是在外延层中实现低缺陷密度。在基于氮化镓的外延堆叠中生长在异质衬底上——包括用于所有商业可获得的氮化镓器件的硅——最常见的缺陷是垂直于表面的一维（1D）位错线。在横向器件中，这些位错线似乎对器件操作和可靠性没有显著影响。然而，对于垂直器件情况并非如此，其中电流流动本质上是自下而上的，1D缺陷干扰垂直电流流动。由于这一限制，最好使用在氮化镓衬底上的同质外延生长来生产垂直器件。但氮化镓衬底昂贵且尺寸有限，限制了商业可扩展性。一条可能的研究途径涉及调查以充分理解这些1D缺陷对垂直氮化镓器件操作的全部影响，以及确定关于器件性能和可靠性的可接受1D缺陷水平。

使用QST衬底进行垂直器件开发，我们在200mm晶圆上生长了厚的高质量n型氮化镓漂移层，为可制造的垂直氮化镓器件铺平了道路。

我们在这种工程基础上生产了厚度超过11μm的外延堆叠，实现了稳健的器件性能。

我们已将这些外延片加工成半垂直沟槽栅MOSFET。当这些器件处于导通状态时，在p型氮化镓层中存在电子反型沟道，类似于传统MOSFET，尽管是在沟槽MOS栅极的侧壁上。在器件操作期间，电子从源极 n^+- 氮化镓层通过电子反型沟道流向更深的漂移层，然后被传输到结构底部的埋入 n^+ 层。我们使用从正面朝向埋入 n^+- 氮化镓层的漏极金属接触来收集这些电子。

垂直氮化镓器件正在成为未来高压功率电子的一个有前景的方向，吸引了全世界的重大研究兴趣。尽管仍处于探索阶段，这项技术有望克服

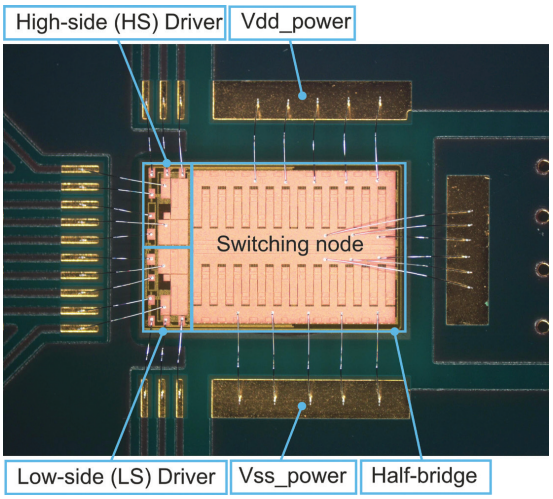


图2：650V QST上氮化镓单片集成电路示例，描绘了具有集成驱动器和电平转换器的对称140mm半桥

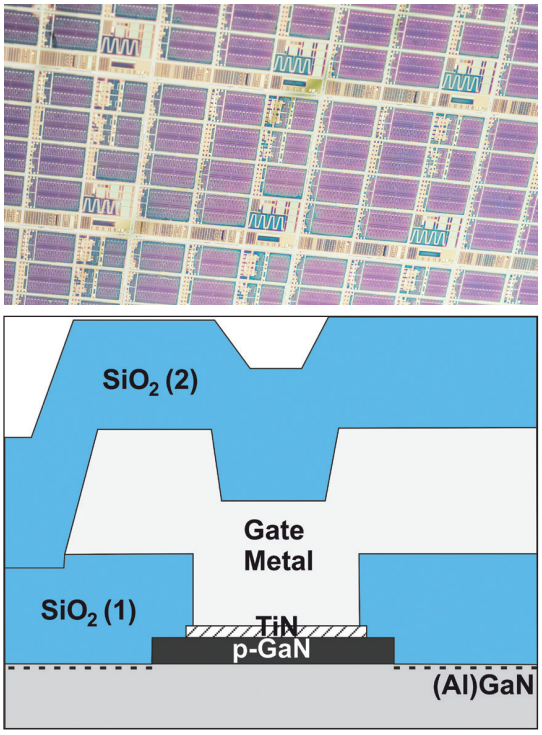


图3：200mm QST 上制造的氮化镓集成电路及测试结构的图像

传统横向器件的关键限制。

芯片上的氮化镓集成电路

今天，大多数基于氮化镓的功率系统由多个分立芯片构建，组装在印刷电路板上。虽然这种模块化方法是有效的，但它引入了寄生电感——这些是不想要的电学效应，可能降低性能，特别是在快速开关应用中。

真正利用氮化镓的速度和效率的一条有前景的途径是单片集成——即将多个功率器件和控制电路集成在单个芯片上。氮化镓功率集成电路已经在电源、电机驱动器和转换器中找到应用，提供紧凑、高性能的解决方案。

通过将多个氮化镓功率 HEMT 和配套控制电路集成在芯片上形成氮化镓集成电路的一个关键优势是寄生电感的显著减少。这使得更快、更高效的开关成为可能。这些集成电路的核心是作为核心开关元件的横向 p 型氮化镓 HEMT 功率阵列。

为了进一步增强性能和可靠性，我们将氮化镓上 SOI（绝缘体上硅）技术与沟槽隔离相结合，以确保同一芯片上开关之间的电流隔离。这种设计有助于防止电干扰并实现高压下的稳定运行。

我们的关键创新之一是使用局部深接触到 SOI 衬底中的顶层硅，该接触在芯片上与源极连接（短路）。这防止了背栅效应——一种可能破坏开关性能的状况，特别是在集成半桥配置中，否则高压侧开关可能会受到影响。

值得注意的是，QST 衬底在结构和绝缘方面与 SOI 具有相似性，也支持这一技术平台。我们已成功在 SOI 和 QST 衬底上展示了单片集成的氮化镓集成电路，电压等级高达 650V。

这些集成电路不仅限于功率开关，还可以包括栅极驱动器、控制和保护逻辑，甚至传感功能，如温度监测——全部在同一芯片上。这种集成水平为更智能、更紧凑、更高效的功率系统铺平了道路，适用于从消费电子到工业应用的各个领域。CS

资助声明：关于在 SOI 和 QST 上制造氮化镓集成电路的工作获得了 ECSEL 联合企业（JU）HiEFFICIENT 项目的资助，资助协议号为 101007281。该联合企业获得欧盟 "地平线 2020" 研究和创新计划以及奥地利、西班牙、比利时、德国、斯洛伐克、意大利、荷兰和斯洛文尼亚的支持。这项工作还获得了 ALL2GaN 项目的资助，用于开发 QST 上用于 1200V 的横向 HEMT 器件（资助协议号 101111890），并得到了芯片联合企业及其成员的支持，包括奥地利、比利时、捷克共和国、丹麦、德国、希腊、荷兰、挪威、斯洛伐克、西班牙、瑞典和瑞士的追加资助。然而，所表达的观点和意见仅属于作者，不一定反映欧盟或国家资助机构的观点。欧盟或国家资助机构不对这些观点负责。

扩展阅读

- A. Vohra et al. “Epitaxial buffer structures grown on 200 mm engineering substrates for 1200 V E-mode HEMT application”, Appl. Phys. Lett. 120 261902 (2022)
- S. Kumar et al. “1.2 kV Enhancement-Mode p-GaN Gate HEMTs on 200 mm Engineered Substrates,” in IEEE Electron Dev. Lett. 45 657 (2024)
- G. Baratella et al. “1200-V Dual-Gate p-GaN Bidirectional Switches on 200-mm Engineered Substrates,” IEEE Trans. Electron Devices 72 6574 (2025)
- K. Geens et al. “Route Toward Commercially Manufacturable Vertical GaN Devices,” IEEE Trans. Electron Devices 71 1488 (2024)
- U. Chatterjee et al. “A fully integrated half-bridge driver circuit in All-GaN GAN-IC technology”, Solid-State Electronics 207 108707 (2023)

HF 处理助力 Ga_2O_3 MOSFET

当 U 型槽的侧壁用氢氟酸（HF）处理后，氧化镓（Ga_2O_3）场效应晶体管（MOSFET）兼具了高阻断电压与改善的正向导通性能。

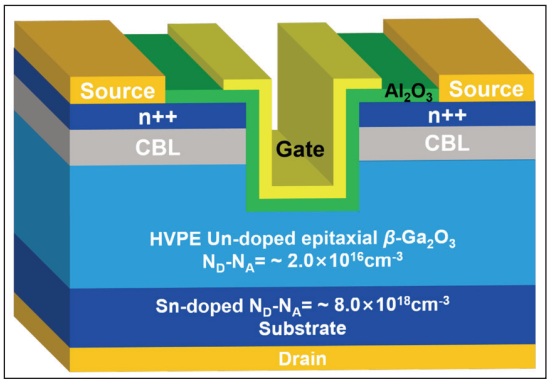
氟化处理据称显著改善了带有电流阻挡层的垂直型 Ga_2O_3 槽栅场效应晶体管（UMOSFET）中的沟道输运特性。

来自中国的一个研究团队声称，他们率先利用 HF 处理来增强具有 U 型槽结构的 Ga_2O_3 MOSFET 的导通特性。这种特定的场效应晶体管（FET）架构被称为 UMOSFET，具有诸多优势：得益于其垂直几何结构，工程师可以通过增加漂移层厚度来按比例提高阻断电压，这种方法避免了占用空间（器件面积）的增加；此外，还有机会引入电流阻挡层（CBL），该增设为改善这些器件的正向电压特性提供了途径。

然而，UMOSFET 的性能往往受限于槽侧壁的深能级缺陷——这些缺陷会俘获自由电子。克服这一缺陷的方法是由该中国合作团队开创的 HF 处理，该团队是由中国科学技术大学、苏州纳米技术与纳米仿生研究所，以及江西纳米技术研究所的研究人员组成的合作伙伴。根据团队发言人张晓东（他同时隶属于中国科学技术大学和苏州纳米技术与纳米仿生研究所）的说法，他们的工作表明，一种简单、低成本的基于 HF 的侧壁处理，可以在保持千伏级阻断能力的同时，显著改善带有电流阻挡层的垂直型 Ga_2O_3 UMOSFET 的沟道输运特性。

该团队并不是第一个用 HF 酸修饰 Ga_2O_3 表面的人。先前的研究已经表明，引入氟会产生浅施主，和 / 或钝化与氧空位相关的缺陷，从而提高平面和横向 Ga_2O_3 器件的电导率。

针对这一点，张晓东评论道：“这些研究阐明了氟在调节氧化镓近表面电子特性方面的基本作用，并激发了我们去探索是否可以将类似的概念推广到垂直型功率器件中。”他指出，他团队的工作与其他团队工作的一个关键区别在于使用的是 HF 处理，而不是基于等离子体的氟掺杂。“HF 处理提供了选择性氟引入、缺陷钝化以及沿槽侧壁轻微表面抛光的独特结合，”张晓东解释道。“这对于 UMOSFET 尤为关键，因为其沟道电导率强烈受到离子注入诱导的深受主态和刻蚀相关侧壁损伤的影响。”



据声称，氟化处理显著改善了带有电流阻挡层的垂直型β-Ga_2O_3 UMOSFET 中的沟道输运特性。

该团队通过加工具有 10 μm 厚 n 型 Ga_2O_3 层的外延片来制造他们的 UMOSFET。器件制造始于在 650 nm 深度处注入氮离子，呈盒状分布轮廓，峰值浓度为 $2\times10^{19}cm^{-3}$，随后进行退火，这激活了掺杂剂并形成了电流阻挡层。为了制造欧姆接触层，随后进行了硅注入和退火，接着进行刻蚀，以定义宽度为 100 μm、长度为 2 μm 的沟槽。为了减轻刻蚀诱导的损伤，张和同事们将他们的器件放在 85% 的磷酸中处理，然后放在 40% 的 HF 酸中处理——这一步骤并未应用于对照组。原子层沉积添加了 40 nm 厚的 Al_2O_3 层以提供栅介质，随后在 UMOSFET 的背面添加源极和漏极接触，并通过沉积 Ni/Au 叠层形成栅极接触。

电学测量测得特定导通电阻为 6.0 $m\Omega cm^2$，最大场效应迁移率为 19.1 $cm^2\ V^{-1}s^{-1}$，击穿电压为 1132 V，这些功率器件的品质因数（FOM）为 0.214 GW cm^{-2}（定义为击穿电压的平方除以导通电阻）。根据张晓东的说法，该值是基于 β-Ga_2O_3 的功率晶体管中最高的值之一。

该团队的下一个目标是：定量化并优化氟的近表面分布轮廓；将表面和侧壁工程与先进的电场管理技术（包括场板和终端结构）相集成；并开发出将千伏级阻断电压与安培级工作相结合的 UMOSFET。

参考文献：

A. Luo et al. Appl. Phys. Let. 128 022107 (2026)

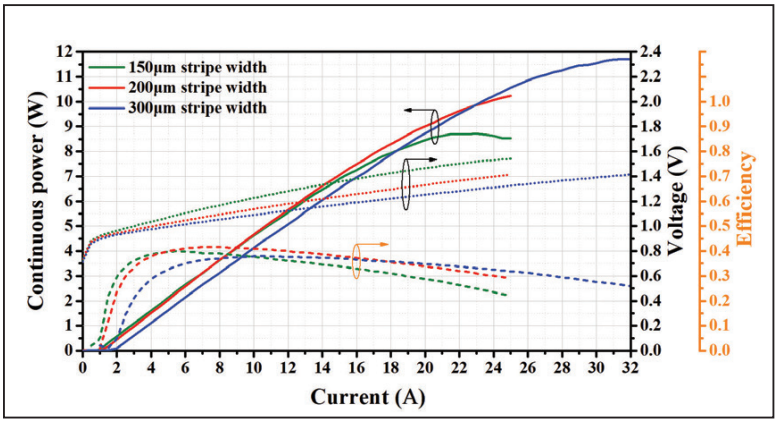
InP 激光器：突破 10 W 大关

高效率的载流子注入和低损耗的光学谐振腔，将 1470 nm 激光二极管的输出功率推向了 10 W 以上。

来自中国的研究人员声称，他们已将 InP 激光器的输出功率标准提升到了 10 W 以上。该团队（长春光机所、中国科学院大学和吉光半导体科技有限公司的研究人员之间的合作）制造的 1470 nm 激光器将有助于满足对能够提供几百瓦连续波（CW）输出功率、低成本、紧凑型 InP 基激光模块的需求。人们对这些模块在以下领域抱有浓厚的兴趣：焊接、封边、材料加工，以及与美容和外科手术相关的医疗应用。

根据团队发言人王丽杰（她同时隶属于长春光机所和吉光公司）的说法，他们的 1470 nm 激光器具有系统优化的外延结构，该结构结合了高效率载流子注入与低损耗大光学腔设计。“通过优化电子阻挡层的位置并采用极端的非对称波导结构，实现了减少的电子泄漏和斜率效率的高特征温度，”王丽杰声称。她表示，该团队已经生长了数百片晶圆，器件表现出极佳的一致性和稳定性，并具备满足实际应用所需性能的潜力。

该团队 1470 nm 光源的开发（它削减了俄歇 - 迈特纳复合带来的载流子损失）始于模拟，模拟计算了量子阱的增益谱、电能带图和光场模式分布。基于这些见解，王和同事们决定采用一个有源区，该有源区包含一对 7 nm 厚、具有超过 1.2% 压应变的 InAlGaAs 量子阱，周围包裹着具有 0.5% 张应变的势垒层。据称，这种应变平衡设计改善了材料质量和量子效率。



对于条宽在 200 um 及以上的器件，1470 nm 发射波长激光器的峰值输出功率超过了 10 W。

高功率激光器的制造始于将 n 型 InP 衬底装入 Aixtron MOCVD 设备中，并生长包括有源区、InAlAs 电子阻挡层和 p 型 InGaAs 接触层的 InP 基外延结构。在化学刻蚀前，光刻掩模定义了 150μm、200 μm 和 300 μm 的条宽，刻蚀定义了深度为 1 μm 的脊型波导。

为了完成器件制造，该团队：在相邻的发光单元之间刻蚀了深度为 5.5 μm 的沟槽，以抑制横向光学共振；沉积了 200 nm 厚的 SiO_2 电绝缘层；通过湿法刻蚀打开了接触窗口；添加了 Ti/Pt/Au p 型电极和 Ni/Au/AuGe/Au n 型电极；减薄了衬底；并使用解理形成了长度为 3mm 的谐振腔。对前、后解理面进行镀膜分别提供了 1% 和 98% 的反射率。

这些激光器的特性测试（p 面朝下键合到热沉上以尽量减少器件发热）显示，200 μm 宽的变体产生了超过 10.2 W 的最大输出功率，并具有 42% 的峰值效率。工程师们在 8 A 的驱动电流下运行该器件超过 1000 小时后，没有观察到退化。条宽 300 μm 的“同胞器件”甚至提供了更高的输出功率，超过了 11.7 W，其效率在 26% 以上。

远场测量确定，在发生热饱和（thermal roll-over）之前，95% 的光功率落在垂直和横向发散角分别为 60° 和 10° 的范围内。“虽然其光束质量不如光纤激光器，但它与 GaAs 基激光二极管相当，”王丽杰评论道，并补充说：“光纤耦合问题并不显著。”

该团队的下一个目标包括：进一步优化激光器外延结构中的载流子限制，以提高其输出功率和电光转换效率；以及开发在各种波长下工作的高功率 InP 基激光器。努力还将指向扩大对输出功率超过 10 W 且具有更大条宽的激光器的可靠性测试。“此外，我们将实施先进的横向模式控制技术，以改善光束质量和亮度，”王丽杰说。

参考文献：

R. Zhao. et al. Apply. Phys. Express 19 012001 (2026)

极小化氧化提升了 SiC MOSFET 的迁移率

硅烷（Silane）为 SiC MOSFET 的沟道迁移率带来了大幅度的提升。

优化硅烷的流量，可以大幅提升 SiC MOSFET 的迁移率。

SiC MOSFET 最大的弱点之一就是其极低的沟道迁移率。对于商业化器件，它通常仅为体材料 SiC 的 5% 左右。由于这一弊端，人们致力于提高沟道迁移率，并从各种新颖方法中取得了成功，例如使用升华法生长的外延层。但这些方法并不总是与大批量生产相契合——而这一批评不能加诸于普渡大学（Purdue University）刚刚制造的 SiC MOSFET 身上。它们展现出了相较于商业器件提升了达 4.5 倍的迁移率。

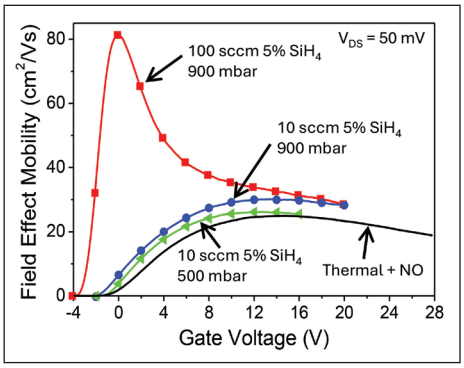
根据团队发言人 Koushik Ramadoss 的说法，获得高沟道迁移率的关键在于硅烷处理。“虽然目前还没有被完全理解，但我们认为，在氢气退火期间加入硅烷阻止了表面硅元素的过度流失，否则这可能会导致氧化层 /SiC 界面处产生与碳相关的缺陷。”

该团队器件的制造涉及了离子注入，这是一种在 SiC 器件工业中被广泛用于选择性引入掺杂剂的技术。“由于 SiC 功率 MOSFET 通常使用注入的沟道区域，因此将这一点包含在我们的实验中以确保结果可以在生产中复制，是非常重要的，”Ramadoss 评论道。

平面长沟道 MOSFET 是在掺杂浓度为 $9\times10^{15}cm^{-3}$ 的 n 型 4H-SiC 外延层上形成的。通过表面浓度为 $1.6\times10^{16}cm^{-3}$ 的铝离子注入创建了 p 型基区（body region），而源极和漏极区域则由大剂量氮离子注入定义。

栅氧化层的形成始于对表面的化学清洗，随后在 Epigress VP-508 热壁 CVD 反应炉中，在 1300℃ 下利用 500 mbar 至 900 mbar 之间的压力以及 10 slm 的流量，进行 3 分钟的氢气刻蚀。刻蚀结束前，加入了在氢气中稀释的 5% 硅烷，处理 3 分钟，流量范围从 10-100 sccm。

接下来的步骤涉及将样品转移到低压 CVD 炉中，在 580℃ 下沉积非晶硅，随后在 750℃ 下进行 24 小时的热氧化，并在 1175℃ 下进行 2 小时的一氧化氮（NO）退火。为了完成他们 MOSFET 的制造，Ramadoss 和同事们：添加了多晶硅栅极，其通过在 630℃ 下沉积形成，并通过来自磷旋转涂布掺杂剂的扩散进行掺杂；并在 800 摄氏度下退火镍硅化物欧姆接触 120 秒，铝被沉积为顶部金属。



优化硅烷流量可导致 SiC MOSFET 迁移率的大幅提升。

除了这些栅氧化层厚度约为 44 nm、沟道长度和宽度分别为 140 μm 和 110 μm 的器件之外，该团队还制造了对照器件，其栅氧化层通过 SiC 的热氧化生长并结合了工业标准的 NO 退火。“对照器件旨在复制从当前工业标准工艺中获得的性能，”Ramadoss 解释道。

转移特性曲线显示，经过 100 sccm 硅烷处理的器件表现出漏极电流的急剧增加和负的阈值电压。这些 MOSFET 带来了峰值场效应迁移率的巨大改善，达到了 $80cm^2V^{-1}s^{-1}$，是对照器件的三倍多。

为了理解这种迁移率大幅飙升背后的原因，该团队转向了电容 - 电压特性测试。测量揭示了总陷阱密度降低了约 2.5 倍，这种状态降低了强反型下的负界面电荷，减少了库仑散射，并在更低的阈值电压下提高了沟道迁移率。此外，降低的陷阱密度也可能是低阈值电压的原因。

该器件的一个缺点是相对较高的低电场漏电，这可能是由于氧化层中更高密度的体缺陷，或者这些缺陷较低的电离能所致。然而，该团队的高迁移率 MOSFET 的主要弱点是它们的负阈值电压。这在商业器件中是不可接受的。“我们正在致力于工艺改变，这将在保持迁移率改善的同时产生正的阈值电压，”Ramadoss 说。“此外，我们正在进行实验，以更好地理解硅烷在 SiC 表面处理工艺中的作用。”

参考文献：

K. Ramadoss et al. Appl. Phys. Express 19 011001 (2026)

广告索引 Advertisers & Web Index

化合物半导体 COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AIXTRON SE		www.aixtron.com	BC
Riber		www.riber.com	IFC
SEMICON China 2027		http://host.semiconchina.org/zh	9

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。



www.compoundsemiconductorchina.net

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

Editor in China (中国版编辑)
Min Lu (陆敏), minL@actintl.com.hk

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), amberl@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), floydc@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

2026 研讨会计划 Conference Schedule

CHIP China 晶芯研讨会

CS CHINA CON 2026 化合物半导体先进技术及应用大会

CSC Webinar

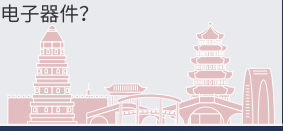
1/4/12月 · 线上

- 大数据与AI驱动的先进半导体智能量检测
- “内卷”与突围：如何破除SiC产能过剩？
- GaN下一个增长极
- Micro-LED：显示技术的下一个“风口”
- 超宽禁带器件：最终解决方案？
- PIC的新应用
- 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



芯界深研会

4月 · 武汉

主题：半导体先进封测技术

- 从互连材料到基板技术的挑战与解决方案
- 高精度贴片/键合设备的核心挑战
- AOI+AI深度学习在纳米级缺陷检测中的应用
- 工艺缺陷的检测与定位、类型分析及闭环优化



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

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：重构高能效器件技术格局



*以上主题暂定，请以会议举办议题为准

化合物半导体 COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

半导体芯科技 SILICON SEMICONDUCTOR CHINA

SiSC半导体芯科技

ACT化合物半导体

AIXTRON

THE G10 SERIES



G10-AsP

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

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

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