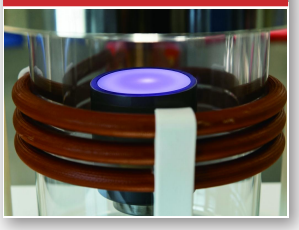
化合物半导体

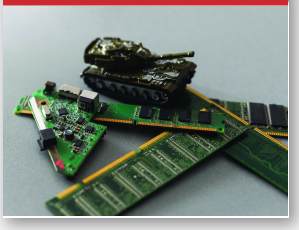
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2026年8/9月

有效激发助力n型AlN



我们电子芯片之下的静默战争



双向开关的突破



AI加速功率设计



常州臻晶半导体有限公司

液相法碳化硅单晶生长装备



液相法碳化硅单晶炉　籽晶粘接炉

联系我们

地址：常州市武进国家高新技术产业开发区武宜南路377号19号厂房一层东

联系电话：19952805727

扫码联系我们

ISSN 2789-2735

www.compoundsemiconductorchina.net

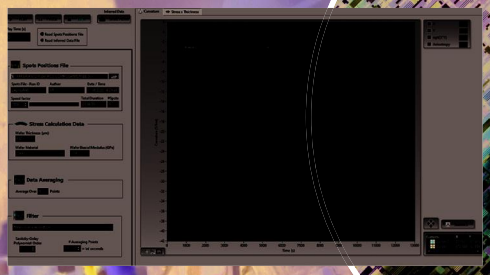
化合物半导体外延表面实时监测

原位实时曲线跟踪

RIBER
EZ-CURVE®

过程监控工具：良率增强

- 表面应力和曲率原位测量
- 实时探测
- 经典曲线对比



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

国际代理

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

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

目录

Contents

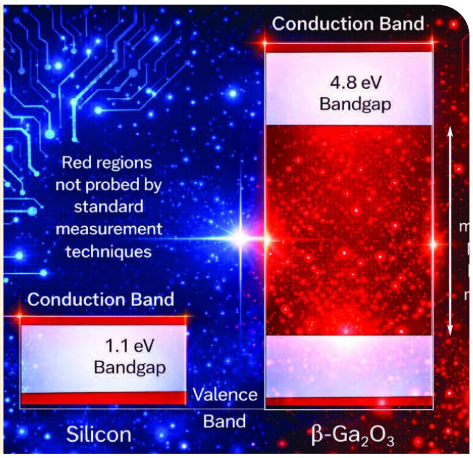
09 封面故事 Cover Story

氧化镓MOSFET：界面为何至关重要

Gallium oxide MOSFETs: Why interfaces matter

显而易见，当今的氧化镓MOSFET仍处于技术成熟度的早期阶段。阈值电压往往落在零的错误一侧（即常开耗尽型），亚阈值摆幅远高于热力学极限，而已发表的可靠性数据也十分匮乏。然而，这些现象中没有一个是根本性的"拦路虎"。相反，它们反映的是一项新兴的MOS技术：沟道材料研发的进度，超过了界面与栅堆叠工艺精细化的进度。

— 格拉斯哥大学　伊恩·塞恩



编者话 Editor's Note

04 **从"价格血战"到"AI抢滩"：2026年碳化硅行业生死转折**
From Price Bloodbath to AI Land Grab: Silicon Carbide's Do-or-Die Inflection Point in 2026
- 陆敏

业界动态 Industry

05 **欧盟批准向Element 3-5碳化硅工厂提供3.53亿欧元资助**
EU approves €353 million for Element 3-5 SiC facility

05 **Navitas首席执行官对专利诉讼作出强硬回应**
Navitas CEO makes robust response to patent lawsuits

06 **IVWorks的reGaN技术成就全球首款742 GHz GaN HEMT**
IVWorks reGaN tech enables World's first 742 GHz GaN HEMT

06 **35亿元 中微公司拟投建临港产业化基地二期项目**
AMEC to Invest RMB 3.5 Billion in Phase II of Lingang Industrial Base

07 **加码碳化硅！Clas-SiC拿下190万英镑政府资助，1200万英镑扩产加速**
Clas-SiC Wafer Fab gets £1.9m grant

08 **军用氮化镓重大进展！解决发热痛点，射频装备探测距离或将暴涨**
BAE moves to next phase of DARPA GaN project

08 **Aeluma获3000万美元《芯片法案》资金支持，推进面向AI数据中心的非磷化铟大尺寸衬底技术**
Aeluma to get $30m in CHIPS funding

关于雅时国际商讯 (ACT International)

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

关于《化合物半导体》

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

扫一扫
免费下载电子书

化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA
2026年 8/9月

目录

Contents

技术 Technology

11 有效激发助力n型AlN
Efficacious excitation aids n-type AlN
– Agnitron Technology公司 FIKADU ALEMA、WILLIAM BRAND、VITALISOUKHOVEEV、AARON FINE、ANDREI OSINSKY

16 我们电子芯片之下的静默战争
The quiet war beneath our electronic chips
- 谢菲尔德大学SC LENNY KOH、卡迪夫大学PETER SMOWTON，两人均来自UKRI COMPOUND SEMICONDUCTOR HUB

18 双向开关的突破
A breakthrough for the bidirectional switch
- 中国科学技术大学 YUAN QIN、西安电子科技大学 MING XIAO、苏州能讯高能半导体（Enkris Semiconductor）KAI CHENG、香港大学 YUHAO ZHANG

22 AI加速功率设计
AI accelerates power design
- 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 LI ZHENG、XINHONG CHENG及其同事

25 飞行时间二次离子质谱（TOF–SIMS）分析技术在半导体芯片材料/缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用（连载一）
Studies and Applications of Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry (TOF-SIMS) Analysis Technique in Semiconductor Chip Material/Defect Characterization and Process Optimization (Part 1 of a Series)
– 华佑南，朱雷，赵弁斐，李晓旻，胜科纳米（苏州）股份有限公司；郭茹，方浩原，李雯琪，高聚宁，北京艾飞拓科技有限公司

科技前沿 Research Review

29 蓝宝石基AlGaN HEMT的新标杆
A new benchmark for AlGaN-on-sapphire HEMTs

30 铽掺杂AlGaN瞄准microLED显示
Terbium-dopedAlGaN eyes microLED displays

31 前驱体调制量子阱提升UVA LED效率
Precursor-modulated wells boost the efficiency of UVA LEDs

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

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。

从"价格血战"到"AI抢滩"：2026年碳化硅行业生死转折

2026年的碳化硅行业，正经历一场从"全面过剩"到"结构性改善"的剧烈蜕变。上半年，价格触底反弹、8英寸接棒、AI需求爆发三箭齐发，将行业从2025年的惨烈价格战中硬生生拽出谷底；下半年，液相法产业化冲刺、超结技术商业化前夜、产能集中释放，又让这场拐点充满了不确定性与想象空间。如果用一句话概括2026年的碳化硅行业，那就是：旧秩序正在崩塌，新战场已经开启。

2025年的碳化硅市场，堪称一场没有赢家的价格战。6英寸导电型衬底均价从年初的4500元一片，一路狂泻至1500元的极端低价，全行业陷入"卖一片亏一片"的绝境。然而，惨烈的洗牌客观上加速了中小厂商退出——SK Siltron等玩家的离场，让头部企业迎来了集中度提升的关键窗口。

进入2026年，价格拐点如期而至。多渠道信息显示，6英寸衬底价格出现较大幅度反弹，8英寸产品止跌企稳并小幅上涨，部分衬底厂商已接到下游客户的新增订单。

2026年上半年，国际大厂的集体战略转向，标志着碳化硅行业从"新能源汽车单极驱动"迈入"AI+汽车"双轮时代。

Wolfspeed的动作最具标志性：提前一个月关闭达勒姆6英寸晶圆厂，产能重心完全转向莫霍克谷8英寸工厂。更关键的是，其AI数据中心相关营收在过去三个季度实现翻倍。英飞凌同样火力全开：马来西亚居林工厂三期模块进入满负荷爬坡，2026财年AI相关营收目标定在15亿欧元，并重申2030年拿下全球三成SiC市场的雄心。意法半导体则双线作战——卡塔尼亚衬底工厂计划年内投产，与三安光电在重庆的合资工厂进入量产冲刺，规划年产48万片8英寸晶圆。

这些巨头的共同逻辑清晰可辨：AI数据中心正从400V向800V高压架构快速演进，SiC器件在高频、高温、高效率方面的不可替代性，使其成为AI基础设施的"电力心脏"。

中国碳化硅产业在2026年呈现出鲜明的"K型分化"。但与此同时，行业"内卷"的重心正从6英寸转向8英寸——这意味着新一轮产能竞赛已经打响。残酷的现实是：只靠卖衬底的企业普遍亏损，而具备器件IDM能力或深度绑定车规、AI客户的企业则相对稳健。下半年中国厂商的8英寸产能集中释放，将进一步加剧供给侧的竞争烈度。

如果说价格和需求是2026年的"明线"，那么技术路线的密集突破就是决定未来五年格局的"暗线"。

最值得关注的是液相法。液相法的核心优势在于"零微管"、晶体质量高、成品率高，尤其在扩径和P型衬底领域具有PVT路线难以比拟的优势。设备端，臻晶半导体的液相法长晶设备年产能达到100台。如果液相法在成本与良率上跑通，它可能成为打破传统PVT路线垄断的"游戏规则改变者"。

器件端同样风起云涌。Yole预测超结SiC MOSFET将在2027至2028年间走向商业化，博世、罗姆、三菱电机、富士电机都在跟进。此外，12英寸衬底能否从"展品"走向"产品"，也是下半年值得密切观察的变量。

需求侧的三台发动机，正在重塑碳化硅的市场版图。

第一台发动机是AI数据中心——这也是下半年最大的看点。到2030年AI基础设施将贡献SiC市场近半数需求。下半年AI服务器800V架构进入放量期，这条主线只会不断强化。

第二台发动机是新能源汽车基本盘。800V高压平台已从高端车下沉到20万元级主流车型。Yole强调，800V车型的SiC采用率显著高于400V车型，是驱动市场增长的核心力量。

第三台发动机是光伏储能和工业电源。2026年光伏逆变器与储能变流器对SiC MOSFET的需求增速高达31%，已推动高规格衬底出现供应紧张。

展望下半年，行业主线清晰——"AI放量、8英寸上量、价格修复"。Yole给出的2030年百亿美元量级市场仍在射程之内，汽车仍占基本面，AI则是最强劲的增量引擎。

但风险同样不容忽视。一是新能源汽车增速若继续放缓，车企降价压力会向上游传导；二是产能集中释放可能让供需改善的节奏出现反复；三是地缘政治因素，出口管制仍在倒逼供应链重构，海外知识产权诉讼是国内企业出海必须跨越的关卡。



化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

社长 Publisher
麦协林 Adonis Mak

荣誉顾问 Honorary advisor
郝跃院士 Academician Hao Yue

主编 Editor in Chief
陆敏 Min Lu
MinL@actintl.com.hk

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

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

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

ACT INTERNATIONAL

ISSN 2789-2735
© 2026 版权所有 翻印必究

欧盟批准向 Element 3–5 碳化硅工厂提供 3.53 亿欧元资助

Element 3-5 通过德国国家援助获得四笔直接拨款之一，用于开发首创型半导体设施

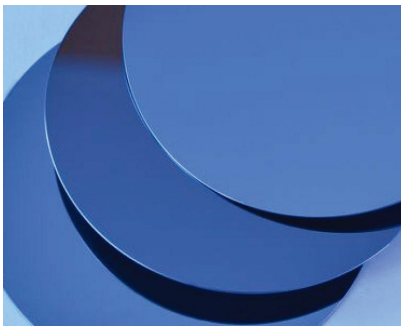
欧盟委员会（THE EUROPEAN COMMISSION）已批准通过德国国家援助提供 6.59 亿欧元直接拨款，用于建设四座首创型半导体设施。

其中 3.53 亿欧元将拨给化合物半导体公司 Element 3–5 GmbH，用于其在北莱茵－威斯特法伦州 Baesweiler 建设一座制造 SiC 外延片的工厂。

与标准 SiC 晶圆相比，Element 3–5 的 SiCnature 外延片在顶部增加了一层极薄的高质量外延层，从而改善了其性能。

这种新型晶圆预计将被用于汽车、工业、电信和能源等多个领域的终端应用。

该项目包含多项重大改进，尤其是在制造工艺方面。与传统的热壁化学气相沉积相比，它将提高能源效率、良率和制造效率。



其他拨款获得者包括：Vishay（2.14 亿欧元），用于在石勒苏益格－荷尔斯泰因州 Itzehoe 扩大产能，制造下一代功率 MOSFET；KLA（7440 万欧元），用于在黑森州 Weilburg 建设一座工厂，制造光学套刻与薄膜量测设备；以及 Ketek（1790 万欧元），用于建设两条特种硅芯片生产线——硅漂移探测器（SDD）芯片和石墨烯辐射入射窗芯片，这两种芯片是 Ketek 已在生产的 SDD 探测器的关键部件。

Navitas 首席执行官对专利诉讼作出强硬回应

首席执行官 Christopher Allexandre 称之为一场”骚扰与恐吓运动”。

针对 Wolfspeed 和 Navitas Semiconductor 在知识产权方面采取的行动，Navitas 首席执行官 Christopher Allexandre 作出了回应。

这场争议的最初举动包括：碳化硅专业厂商 Wolfspeed 就 GaN 和 SiC 芯片对 Navitas Semiconductor 提起专利诉讼；以及日本芯片厂商瑞萨（Renesas，持有 Wolfspeed 股份）指控 Navitas 通过挖角瑞萨员工窃取了 GaN 芯片的商业秘密。

在 7 月 27 日一场气氛乐观的第二季度财报电话会议上，Navitas 首席执行官 Christopher Allexandre（右图人物）首次就这些诉讼发表了评论，称 Wolfspeed 案是”一场骚扰与恐吓运动的最后一步”。

Wolfspeed 的诉讼声称，Navitas 基于 GaN 的 FET、GeneSiC MOSFET 和 SiCPAK 模块侵犯了 Wolfspeed 的多项专利。

瑞萨则指控 Allexandre 和 Navitas 高管 Feili Cheng 将瑞萨有关 GaN 芯片的机密信息转移给了 Navitas。

Allexandre 于 2025 年 9 月加入 Navitas。在此之前，他曾担任瑞萨电子（Renesas Electronics）功率事业部高级副总裁兼总经理，掌管该公司 25 亿美元的电源管理业务。

在为这两起案件提供背景说明时，Allexandre 表示：“Wolfspeed 早就起诉过我们，因为我们前段时间停止从他们那里采购晶圆了。然后他们又起诉了我们的两名员工，这两人过去曾在 Wolfspeed 工作，其中一人还是此前在 Wolfspeed 裁员行动中被’RIF’掉的（即因’人员精简’而失业），那是他们不久前的成本削减举措。”

他补充说，Wolfspeed 随后还曾试图发起诉讼，但以失败告终——当时第三方招聘人员正在给 Wolfspeed 的员工打电话，为他们介绍 Navitas 发布在网上的招聘职位。

关于瑞萨一案，他说：“根据公开记录，瑞萨将持有 Wolfspeed 多达 39% 的股份。那么，这一切都是巧合吗？就在财报电话会议的前一周？”（该受益所有权比例数据来自 2026 年 3 月 31 日的一份美国证交会文件。）

他还说：“如果你正在赢得市场份额、你的技术更胜一筹，你是不会发起这种诉讼的。”

Allexandre 总结道：“我们尊重知识产权和技术。事实上，我们公司本身就是数十年来 GaN 和 SiC 领域初创企业创新成果的产物。至于为什么 Wolfspeed 及其大股东现在不去市场上公平竞争，而是跑向法院，我们让大家自己得出结论。”



IVWorks 的 reGaN 技术成就全球首款 742 GHz GaN HEMT

2026 年 VLSI 研讨会上公布的结果表明，GaN 可用于未来的亚太赫兹和太赫兹电子系统

韩国公司 IVWorks 宣称，其专有的 reGaN 选择性再生长技术在全球首款最高振荡频率（fmax）超过 700 GHz 的 GaN 晶体管中发挥了关键作用。

这一成就是通过韩国庆北国立大学电子工程学院 Daehyun Kim 研究团队开发的一款 45 nm GaN HEMT 器件实现的，并于 6 月 18 日在 2026 年 VLSI 研讨会上发布。

研究团队制备了一款栅长 45 nm 的 GaN 晶体管，实现了 742 GHz 的 fmax，据称这为 GaN 晶体管技术的射频性能树立了新标杆。据称，该器件还取得了 497 GHz 的创纪录平均频率指标（favg），这是迄今为止所有 GaN 晶体管技术中报道过的最高值。

这些结果表明，GaN 半导体即使在超高频领域也具备足够的性能竞争力，可以作为未来亚太赫兹和太赫兹电子系统的可行平台。

长期以来，基于 InP 的晶体管凭借出色的电子输运特性一直主导着亚太赫兹频段，但其相对较低的击穿电压限制了输出功率和系统可扩展性。

相比之下，GaN 半导体兼具高击穿电场、高功率密度和出色的热稳定性，使其成为下一代高频高功率应用的热门候选。然而，用 GaN 实现超高频性能一直是一项重大挑战。为克服这些限制，研究团队采用了先进的 45 nm 栅工艺并优化了器件结构，以最大限度提升高频性能。

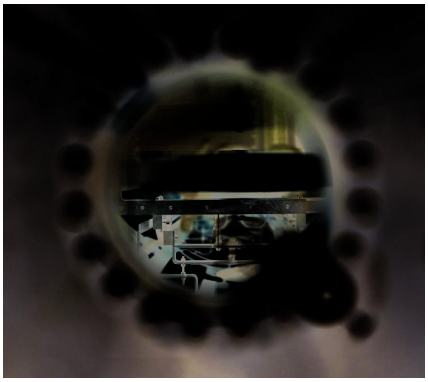
实现这一成就的关键使能技术是 IVWorks 专有的 reGaN 选择性再生长技术。reGaN 由 IVWorks 独家开发，可在源区和漏区选择性再生长重掺杂 n 型 GaN，从而显著降低接触电阻。

作为该研究的共同合作方，IVWorks 在整个 4 英寸晶圆上展示了出色的工艺均匀性，并实现了卓越的可重复性。此外，该公司将再生长界面电阻降至 0.027 Ω · mm，接近相应载流子浓度下可达到的理论极限。

图：IVWorks 用于专有 reGaN 选择性再生长工艺的混合分子束外延（Hybrid MBE）系统内部视图。低温、超高真空生长环境可最大限度减少再生长过程中的器件退化，并为先进 GaN HEMT 实现超低电阻 n+ GaN 源 / 漏的形成。

庆北国立大学的 Daehyun Kim 评论道：“这项研究将 GaN HEMT 的射频性能极限推向了新的高度，并通过全球首次展示 fmax 超过 700 GHz 的 GaN HEMT，证明了 GaN 半导体在超高频应用中的潜力。”

Kim 补充道：“这项研究作为产学研合作的成功范例尤其有意义，它将产业界先进的外延生长和再生长技术与高校在器件和电路研究方面的专长结合在了一起。”



基于这一成果，Kim 及其同事计划进一步加快下一代 GaN 电子器件的开发，瞄准面向 6G 通信和先进防务技术的太赫兹频率应用。

这一成就进一步凸显了 GaN 技术不断增长的潜力——它正从传统的射频和功率电子领域扩展到新兴的亚太赫兹和太赫兹应用领域，包括 6G 通信、先进雷达系统、卫星通信和下一代防务电子。

IVWorks 首席执行官 Young-kyun Noh 表示：“reGaN 是一项核心技术，已通过一家主要代工厂的质量认证并被用于批量生产。这一成就表明，我们基于混合 MBE 的 reGaN 平台不仅具备量产条件，而且还是下一代亚太赫兹和太赫兹 GaN 电子技术的关键使能技术。我们很自豪看到 IVWorks 的技术为世界领先的研究里程碑作出了贡献。”

35 亿元 中微公司拟投建临港产业化基地二期项目

8 月 19 日，中微公司公告称，公司全资子公司中微临港拟在临港新片区投资建设中微临港产业化基地（二期）项目，计划总投资 35 亿元，其中固定资产投资 17 亿元。

项目聚焦刻蚀设备、量检测设备、薄膜沉积设备等优势产品，达产后预计可实现年销售收入 30 亿元。

同日，中微公司发布 2026 年半年度报告，实现营业收入 66.91 亿元，同比增长 34.89%；归属于上市公司股东的净利润 28.25 亿元，同比增长 300.22%；扣非净利润 11.23 亿元，同比增长 108.36%。

研发方面，上半年公司研发投入 20.41 亿元，同比增长 36.89%，研发投入占营业收入比例约为 30.52%。

中微公司针对先进逻辑和存储器件制造中关键刻蚀工艺的高端产品新增付运量显著提升，在先进逻辑器件和先进存储器件中多种关键刻蚀工艺实现大规模量产。截至 2026 年 6 月底，中微公司已开发出 54 种高端半导体设备，累计超过 8000 个反应台在国内外 220 余条生产线实现量产。

加码碳化硅！ Clas–SiC 拿下 190 万英镑政府资助，1200 万英镑扩产加速

Clas–SiC 晶圆厂获得一笔 190 万英镑的政府资助，该笔资金是企业合计 1200 万英镑投资计划的一部分，旨在推动苏格兰关键技术超级产业集群发展。

这家碳化硅企业是苏格兰企业局全新资本资助计划的首批受助企业之一。该资助项目设立初衷，就是鼓励企业加大商业投资，提升产业生产效率。

这笔资助将用于 Clas–SiC 的技术与设备升级，以此匹配全球市场对碳化硅功率半导体日益增长的需求。其碳化硅产品主要应用于电动汽车与新能源系统。本次扩产项目同时还将为生产一线员工及学徒提供专项技能培训。

苏格兰经济大臣 Stephen Flynn 表示：“Clas–SiC 是本土创新企业的优秀代表，这家极具雄心的苏格兰企业，正在全球激烈的市场竞争中实现业务增长。

苏格兰拥有英国规模领先的半导体产业集群，Clas–SiC 是产业生态中的核心企业，也是苏格兰关键技术超级集群的重要组成部分。该超级集群每年可为当地带来 45 亿英镑的经济营收，吸纳就业人数超 11000 人。苏格兰政府正支持产业界的发展目标，计划到 2035 年，将集群营收提升至 100 亿英镑，新增 6600 个就业岗位。



苏格兰碳化硅晶圆厂拿到资金支持，助力企业扩大投资、提升产能效率

Clas–SiC 的扩产，将保障法伊夫地区高技能岗位稳定，强化本土出口实力，为绿色经济转型所依赖的核心技术提供有力支撑。”

苏格兰企业局首席执行官 Adrian Gillespie 谈到：“Clas–SiC 立足全球最重要的产业赛道，为长远发展大胆布局。本次投资将稳固法伊夫地区就业岗位，夯实苏格兰先进制造业基础，伴随企业开拓海外市场，进一步提升生产效率。

Clas–SiC 的碳化硅半导体技术，能够提升电动汽车、新能源设备等各类电力系统的运行效率。半导体是决定全球经济走向的关键技术，苏格兰完全有能力把握行业带来的发展机遇。”

Clas–SiC 董事兼首席执行官 Jen Walls 表示：“这笔资助意义重大，将加快我们下一代技术的研发迭代。新增产能将巩固我们的全球市场地位，增强我们承接高增长赛道市场需求的能力。资助扩充了企业资本开支，帮助我们持续立足于全球技术领先的供应链当中。”



evatec process systems

在能耗日增的世界
薄膜技术 降低能耗

从高效的动力总成管理，到车载显示与照明的能耗降低，Evatec薄膜设备与生产工艺积淀，助力汽车厂商降低能耗，为最新一代电动车延长电池寿命与续航里程 。

Evatec在宽禁带功率器件制造领域的工艺积淀降低损耗，而mini-LED与micro-LED使明亮高效的照明与显示技术在能耗日增的世界中进一步降低能耗 。

了解更多关于 Evatec 薄膜技术解决方案如何塑造我们的未来：
https://evatecnet.com/cn/关于我们/公司简介/

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

先进封装 | 半导体 | 光电子 | 光子学

军用氮化镓重大进展！解决发热痛点，射频装备探测距离或将暴涨

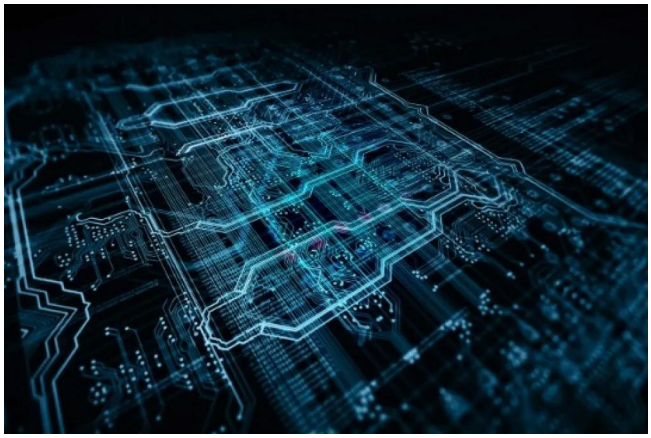
BAE 系统公司旗下负责研发与成果转化的 FAST 实验室，已顺利完成美国国防高级研究计划局（DARPA）的器件级电子散热技术（THREADS）项目第一阶段工作，并获得后续经费支持，正式启动项目第二阶段。

THREADS 项目旨在攻克氮化镓（GaN）射频器件的温度瓶颈。突破这一技术限制后，关键军用装备的输出功率与作用距离将得到大幅提升。

BAE 系统 FAST 实验室首席研究员艾萨克　怀尔德森表示：“第一阶段取得的进展，验证了我们在材料改良与工艺优化上的技术路线，让我们距离充分释放射频装备的全部性能、服务作战人员的目标又近一步。”

据该公司介绍，依托本项目研发出的高效热管理技术，可将射频系统作用距离提升近两倍，进一步保障军事人员的作业安全，拓展装备作战探测距离。

BAE 系统的 THREADS 项目研发工作，在位于新罕布什尔州纳舒厄的微电子中心（MEC）开展。该中心属于美国国防部 1A 类可信供应商，拥有成熟的氮化镓、砷化镓（GaAs）先进集成电路研发与制造能力。本项目联合多方机构共同参与，合作单位包括现代微系统公司、宾夕法尼亚州立大学、斯坦福大学、圣母大学以及得克萨斯大学达拉斯分校。



企业获得 THREADS 项目第二阶段资助，攻关射频氮化镓器件温度瓶颈。

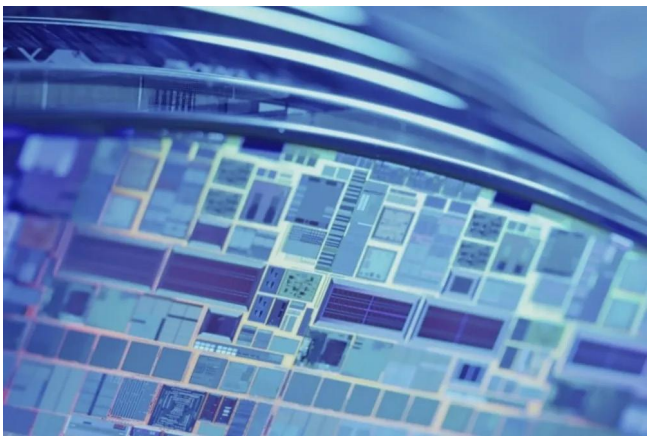
Aeluma 获 3000 万美元《芯片法案》资金支持，推进面向 AI 数据中心的非磷化铟大尺寸衬底技术

美国光子技术企业 Aeluma 已签署意向书，有望获得最高 3000 万美元资金支持，资金来源于美国商务部主导的《芯片与科学法案》（CHIPS and Science Act）。

这笔资助将用于研发 Aeluma 可规模化量产的非磷化铟（non-InP）光子半导体制造平台。该技术对美国经济与国家安全具备重要战略价值。公司方案能够在最大 300mm 异质大尺寸衬底上制备高性能光电器件，打通化合物半导体材料与主流微电子制造工艺之间的技术壁垒。

Aeluma 总裁兼首席执行官 Jonathan Klamkin 表示：“我们非常荣幸入选获得资助意向函，助力美国本土 AI 与先进计算产业生态建设。这笔资金将加速我们这套可规模化、高性能半导体平台的研发与商业化落地，项目依托公司位于加州戈莱塔的自有产线，以及美国本土合作基地推进。随着 AI 和先进算力基础设施对光子技术的需求持续攀升，Aeluma 创新技术方案有望在市场实现大规模应用。”

美国商务部半导体创新与投资执行总监 Bill Frauenhofer 谈到：“本次 CHIPS 研发激励资金，将推动面向算力与通信网络的光子器件制造实现技术突破。加速下一代本土光子器件衬底技术研发，能够让美国产业获得超高带宽与能效优势，支撑大规模复杂 AI 算力任务落地。”



这笔资助将推动企业面向 AI 数据中心光互联的非磷化铟大尺寸衬底技术实现迭代升级。

氧化镓 MOSFET：界面为何至关重要

氧化镓功率器件的开发者应当借鉴化合物半导体 MOSFET 先驱们的经验教训

作者：格拉斯哥大学　伊恩・塞恩

得益于其超宽禁带特性以及同质衬底的可获得性，β−Ga2O3 正稳步地从一种引人入胜的实验室材料，转变为下一代功率电子器件的重要候选者。对于致力于这一目标、横跨材料、器件与集成等领域开展工作的研究人员和技术专家而言，核心问题已不再是氧化镓沟道晶体管在科学上是否有趣，而是如何以及多快将其转化为一个稳健、可扩展、并符合实际应用与认证要求的器件平台。

显而易见，当今的氧化镓 MOSFET 仍处于技术成熟度的早期阶段。阈值电压往往落在零的错误一侧（即常开耗尽型），亚阈值摆幅远高于热力学极限，而已发表的可靠性数据也十分匮乏。然而，这些现象中没有一个是根本性的 " 拦路虎 "。相反，它们反映的是一项新兴的 MOS 技术：沟道材料研发的进度，超过了界面与栅堆叠工艺精细化的进度。

氧化镓当前面临的诸多挑战，既非史无前例，也非无解。正如常见的情形，深入研读往年的期刊文献可以加快研发进程。对于当今的 Ga2O3 MOSFET 开发者而言，重新审视其 GaAs" 同胞 " 的早期研究工作可以获得宝贵的启示——当年人们在界面控制、栅堆叠化学和电荷管理方面付出了持续的努力。GaAs MOSFET 先驱们的论文令人信服地证明，高性能 MOS 工作是可以实现的，尽管当时最终并未出现大规模应用所需的产业需求。

一个反复出现的挑战：MOS 界面

每当一种半导体材料被提议用作 MOSFET 沟道时，关注焦点很快就会从体材料特性转移到栅界面上。这很有道理。毕竟，界面至关重要——它是从晶体半导体向非晶介质过渡的地方，而这种转变几乎不可避免地有可能引入电子缺陷态，从而劣化静电控制、增大离散性，并使可靠性问题复杂化。只需回顾硅 MOSFET 的历史发展便可看出：控制这一界面的能力，往往决定着一个材料体系能否从演示验证走向实际部署。

氧化镓正处于这一拐点。许多已报道的 β−Ga2O3 MOSFET 表现出很大的亚阈值摆幅和阈值电压不稳定，这种行为与栅介质界面处或其附近发生的显著电荷俘获现象相符。尽管晶体生长、衬底供应和掺杂控制方面取得了令人瞩目的进展，但界面工程却并非如此——这一领域的进展较为缓慢，与早期化合物半导体发展周期中的情形如出一辙。

来自 GaAs MOSFET 研究的经验教训

在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初，GaAs MOSFET 曾因射频和逻辑应用而被深入研究。其背后的动机是 GaAs 具有出色的载流子输运特性。然而，这种二元化合物也存在众所周知的表面化学难题，历史上一直限制着 MOS 器件的工作。通过那个时代有针对性的研究，人们证明了这些难题并非根本性的。

那个时代的里程碑之一，是开发出化学相容的非晶栅堆叠。通过引入超薄的氧化镓基中间层，并精心选取具有相关化学特性的三元钆基高 k 介质，人们制造出了界面态密度低、亚阈值摆幅接近理想值、阈值电压为正的 GaAs MOSFET。至关重要的是，这些改进在真实的制造流程中得以保持，表明这些界面解决方案并非仅仅是实验室里的样品。

最终，采用这些高度工程化栅堆叠的 GaAs MOSFET 并未进入大规模生产。但这并非因为它们未能达到性能目标——而是因为其他器件技术与系统级需求以及当时的成本结构更为匹配。尽管如此，从中获得的技术经验——尤其是关于界面控制的经



验——与当今的超宽禁带器件依然直接相关。

对于目前从事氧化镓器件研究的人员来说，以往 GaAs MOSFET 开发中一个值得注意的发现是：经过适当选择、并以最优方式沉积在 Ga2O3 上的三元钆基高 k 材料具有很大潜力。不过，更普遍地说，其中有一个根本性的理念值得采纳——专门为实现与 Ga2O3 化学相容而设计的非晶介质，值得予以关注。遗憾的是，目前的许多工作都是渐进式的表面处理，随后沉积常规介质。这种策略虽然能带来可测量的改善，但可能无法提供实现稳定的增强型工作、低离散性以及偏压下可接受寿命所需的界面控制程度。

转向更从根本上进行工程化设计的栅堆叠，并结合适当的中间层，有望系统性地抑制界面陷阱的形成，而不是间接地减轻其影响。对于超宽禁带半导体而言，深陷阱表现出缓慢的动态特性和很长的恢复时间，因此从器件物理和认证的角度来看，这一区别尤为重要。

亚阈值摆幅：一个实用的判据

在氧化镓 MOSFET 中，亚阈值摆幅是评估界面质量的一个特别有用的指标。在宽禁带和超宽禁带材料中，许多电活性态位于禁带深处，使得它们难以用常规的电容类技术进行探测——这些技术最初是为筛查硅 MOS 器件的氧化物而开发的，如图 1 所示。相比之下，亚阈值摆幅反映的是这些态对沟道形成和静电控制的累积影响。

基于这种现状，随着氧化镓器件走向成熟，亚阈值摆幅向更低且更可重复的数值收敛，将成为界面相关挑战真正得到解决的关键标志。从应用的角度来看，该指标的改善与阈值电压稳定性、器件间一致性以及最终的可制造性密切相关。

器件架构方面的考量

除了栅材料之外，器件架构也发挥着重要作用。在 GaAs MOSFET 的开发过程中，人们采用异质结构沟道，使载流子在空间上与氧化物界面分隔开来。这减少了载流子与界面态的相互作用。类似的 " 薄间隔层 " 概念如今正在氧化镓中探索，其途径是采用含铝和含铟的氧化物合金。

虽然不应低估此类异质结构所带来的材料方面的挑战，但如果能够成功实现，它可以与栅堆叠设计的进步形成互补。反过来，这又可以放宽对界面的要求，并拓展氧化镓器件可用的设计空间。

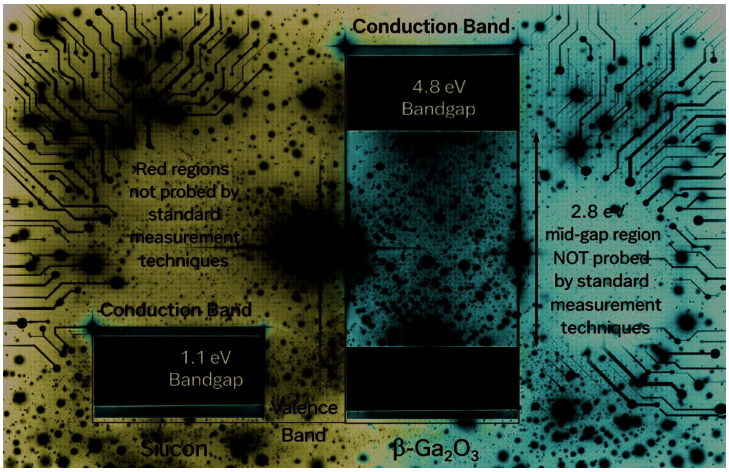


图 1：标准的栅介质筛查方法可探测硅基器件中能量几乎遍布整个禁带的缺陷 / 陷阱（左图）。相比之下，对于 Ga2O3 基器件（右图），位于禁带中央附近、能量范围很宽的陷阱 / 缺陷态则无法被探测到。其结果是，介质陷阱态密度将被低估。这就是为什么在 Ga2O3 MOSFET 中，晶体管亚阈值摆幅是筛查介质的更好指标。

迈向应用

从有前景的研究型器件到产业应用的功率晶体管，这条道路所取决于的，绝不仅仅是那些抢眼的性能指标。随着技术越来越接近应用，考虑离散性、偏压稳定性、应力耐受性以及整片晶圆上的可重复性等问题变得日益重要。而这些考量中的每一项，都与界面质量紧密相连。

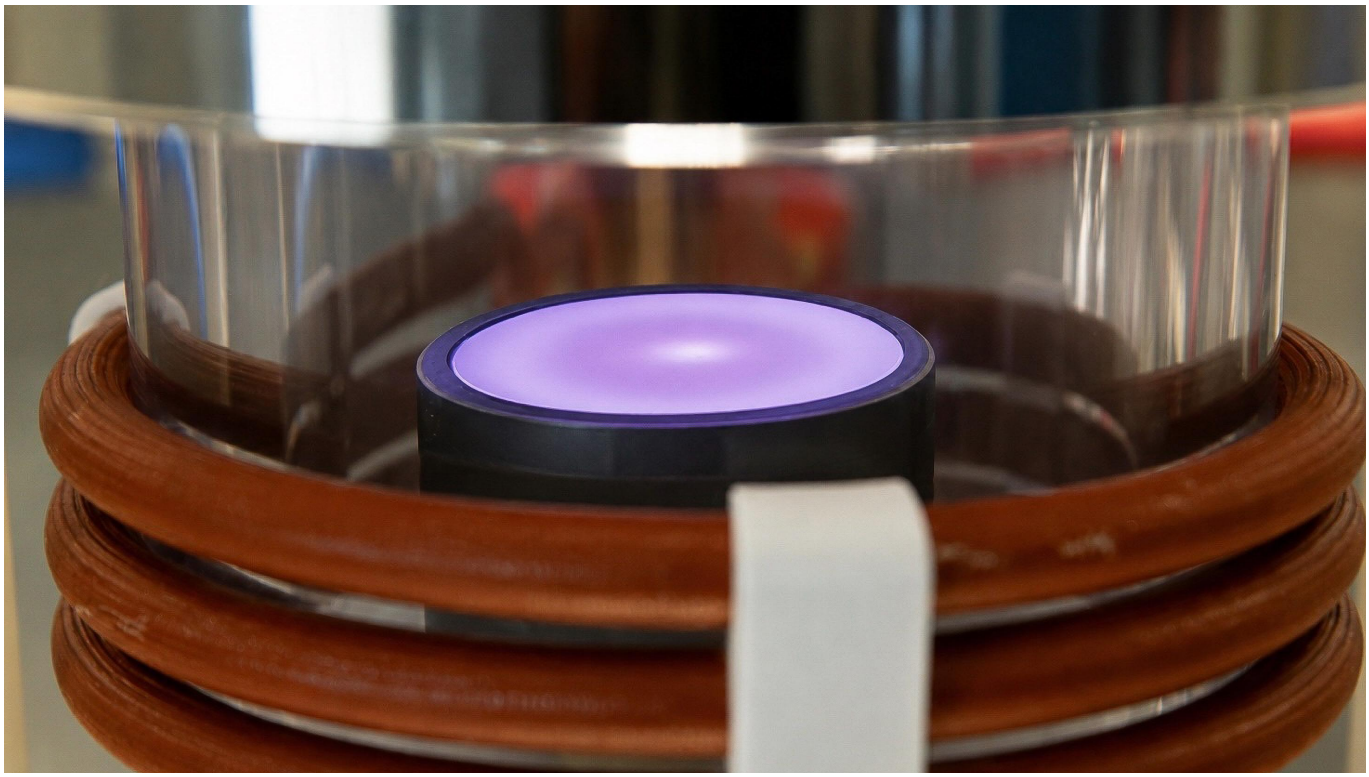
在近期内，如果氧化镓 MOSFET 要实现有意义的市场渗透，很可能将出现在电网级电力基础设施、固态保护、脉冲功率系统，以及专用工业或航空航天平台等领域。对于这些应用而言，扩大产量并不是突出的优先事项。同样重要的还有：建立对栅堆叠可靠性的充分信心、制定热管理策略，以及在真实工作条件下实现长期稳定性。在这些早期应用场景中取得成功，将是迈向规模应用的重要一步——它将确立氧化镓作为应对严苛电压场景的可靠超宽禁带方案的地位，并随着系统需求的演进，为更广泛的采用奠定基础。

GaAs MOSFET 的开发历程表明，通过整体性地解决化学、结构和工艺问题，在化合物半导体上制备高质量 MOS 界面是可能的。氧化镓 MOSFET 的优化或可受益于采用这些方法——既利用在 Ga2O3 上沉积钆基高 k 介质的相关知识，也审慎地运用异质界面。

改用从根本上经过工程设计的栅堆栈，并结合恰当的中间层，有望系统性地抑制界面陷阱的形成，而非仅仅间接地降低其影响

扩展阅读

M. Passlack et al. “Gallium oxide in field effect transistors – a perspective,” Journal of Vacuum Science & Technology A 44 038503 (2026)



有效激发助力 n 型 AlN

用深紫外光源照射 MOCVD 反应腔，可提高硅掺杂 AlN 的迁移率和自由电子浓度

作者：Agnitron Technology 公司 FIKADU ALEMA、WILLIAM BRAND、VITALI SOUKHOVEEV、AARON FINE、ANDREI OSINSKY

在超宽禁带半导体家族中，AlN 极具吸引力。它的优势包括：禁带宽度约 6.2 eV、临界击穿电场超过 15 MV/cm、热导率接近 340 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$。此外，AlN 同质衬底已可商业化获得，这使 AlN 得以实现低缺陷密度外延——并非每一种新兴宽禁带材料都有这条路可走。凭借所有这些特性，AlN 成为下一代功率电子和深紫外光电子领域极具吸引力的候选材料。

然而，存在一个关键问题：如何制备出兼具足够自由电子浓度和足够迁移率的导电 n 型 AlN 层。简单地注入更多硅——III 族氮化物中最常用的施主——并不是解决办法。虽然高浓度硅在 GaN 和富镓 AlGaN 中十分有效（在这些材料中硅表现为浅施主），但在 AlN 中硅的激活效率要低得多。掺入这种施主会产生大量缺陷，包括与硅相关的 DX 中心、铝空位、空位 – 硅复合体以及背景杂质——它们都会俘获或补偿电子。提高硅掺杂量最初会使自由电子浓度上升，但迁移率往往会崩溃，最终补偿作用会限制进一步的改善 [1–3]。

最近，我们 Agnitron 的团队改进了 MOCVD 工艺，从两个方向攻克这一问题。其一是化学势控制——利用生长压力、温度、V/III 比和前驱体输运来影响生长过程中点缺陷的形成。第二个方向是缺陷准费米能级控制，即利用超禁带能量光照来改变载流子布居，并在外延过程中抑制补偿性缺陷的形成 [4，5]。

在本刊此前的文章中，我们曾报道过这些策略在生长高质量硅掺杂 AlN 和富铝 AlGaN 方面展现出的巨大前景 [6，7]。现在，我们又增加了一个新的调控手段：在用 MOCVD 生长硅掺杂 AlN 的过程中引入氘气真空紫外（D_2–VUV）照射。

影响缺陷形成

在缺陷准费米能级控制中，我们借助紫外辅助外延来控制点缺陷的并入。具体做法是：利用超禁带能量光子源在生长表面附近产生载流子，使准费米能级移动，从而改变

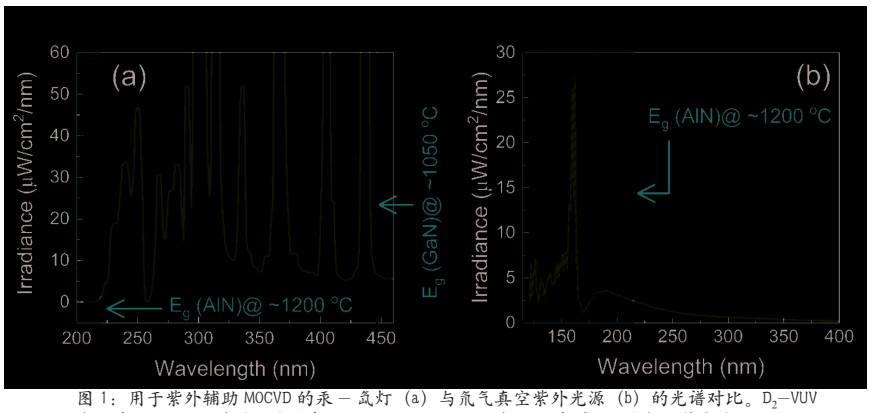


图 1：用于紫外辅助 MOCVD 的汞 – 氙灯（a）与氘气真空紫外光源（b）的光谱对比。D_2–VUV 光源在 160 nm 附近的短波发射更强，因而比汞 – 氙灯更适合对 AlN 进行超禁带激发。

带电点缺陷的形成能。在这些条件下，可以减少 AlN 中补偿性缺陷的并入，并提高贡献自由电子的硅施主所占的比例。

需要注意的是，这种方法具有很强的材料依赖性。对 GaN 效果良好的紫外光源，可能无法为 AlN 提供能量足够高的光子——AlN 的禁带宽度大得多，需要短得多的波长。因此，光谱匹配至关重要。对于 AlN 的生长，汞 – 氙灯并不理想——尽管它在许多紫外波段都有强发射，并已在 III 族氮化物生长研究中发挥作用，但其输出的很大一部分波长过长，无法在生长条件下有效激发 AlN。理想的是 D_2–VUV 光源，它在 160 nm 附近有很强的发射，能提供能量更高的光子，更有效地与正在生长的 AlN 表面相互作用（见图 1）。

最初，我们采用汞 – 氙光源评估紫外辅助生长。研究在一台配备远程注入喷淋头的 Agnitron Agilis 100 MOCVD 反应器中进行，外延生长在 Crystal IS 公司的 AlN 衬底上完成。三甲基铝、氨和硅烷分别提供铝、氮和硅前驱体。为分离出紫外照射的影响，我们在完全相同的工艺条件下成对生长硅掺杂 AlN 层。对于紫外辅助样品，我们仅在硅掺杂 AlN 层生长期间打开汞 – 氙灯。

对样品的测量表明，紫外照射会影响 AlN 的生长。不过，使用汞 – 氙光源时收益有限。采用这种紫外照射后，自由电子浓度从约 8×10^{14} cm^{-3} 增至 $1.5\times10^{15}cm^{-3}$，电子迁移率从约 107 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$ 降至约 90 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$，体电阻率从约 73 Ω · cm 降至约 49 Ω · cm。

二次离子质谱（SIMS）为这些变化提供了有价值的洞见。在汞 – 氙灯照射下，硅并入量从约 $6.5\times10^{17}cm^{-3}$ 增至 $7.7\times10^{17}cm^{-3}$——增幅约为 19%。与此同时，碳和氧的浓度基本保持不变。这些结果表明，施主激活效率略有提高，从无紫外照射时的约 0.15% 升至汞 – 氙灯照射下的约 0.20%。我们由此得出结论：汞 – 氙灯照射确实对硅掺杂 AlN 的生长产生了可测量的影响，主要表现为硅并入量和载流子浓度的增加，但施主激活方面的提升很小，这凸显了紫外光源与材料之间光谱匹配不足的问题。

由于这一局限，我们在 Agilis 100 MOCVD 反应器中集成了 D_2–VUV 光源。该光源在深紫外区有强发射，与 AlN 的光谱匹配更好，可确保生长过程中更有效的超禁带激发。

我们通过一个定制的远程注入喷淋头将 VUV 光引向生长表面，该喷淋头带有中央光学通道区。采用这种设计，我们紧凑的 D_2–VUV 光源直接安装在反应器上方，并与生长表面光学耦合。氨通过中央区域引入，金属有机前驱体则通过环绕光学通道的环形区域输送。

采用 D_2–VUV 照射后，硅并入量的增幅与汞 – 氙灯相近，但电学上的收益却大得多。据 SIMS 测量，硅浓度从约 $4.2\times10^{17}cm^{-3}$ 增至 D_2–VUV 照射下的约 $5.0\times10^{17}cm^{-3}$，增幅约为 19%（见图 2）。碳浓度保持在 SIMS 探测限附近，而氧含量沿薄膜厚度方向递减，且不随紫外照射而变化。

另一个重要发现是，用紫外光照射表面会降低生长速率。我们认为，紫外照射下硅浓度的增加可能部分与生长速率介导的表面动力学有关：AlN 沉积变慢会延长含硅物种在生长表面的有效停留时间，从而提高其并入的概率。

在 AlN/ 蓝宝石模板上进行更多的生长速率实验时，我们发现了一个引人注目的规律。在无紫外照射时，生长速率随定制喷淋头中 V/III 比的增大而提高。但在 D_2–VUV 照射下，这一关系发生反转：生长速率随 V/III 比增大而下降。这表明，不应把 VUV

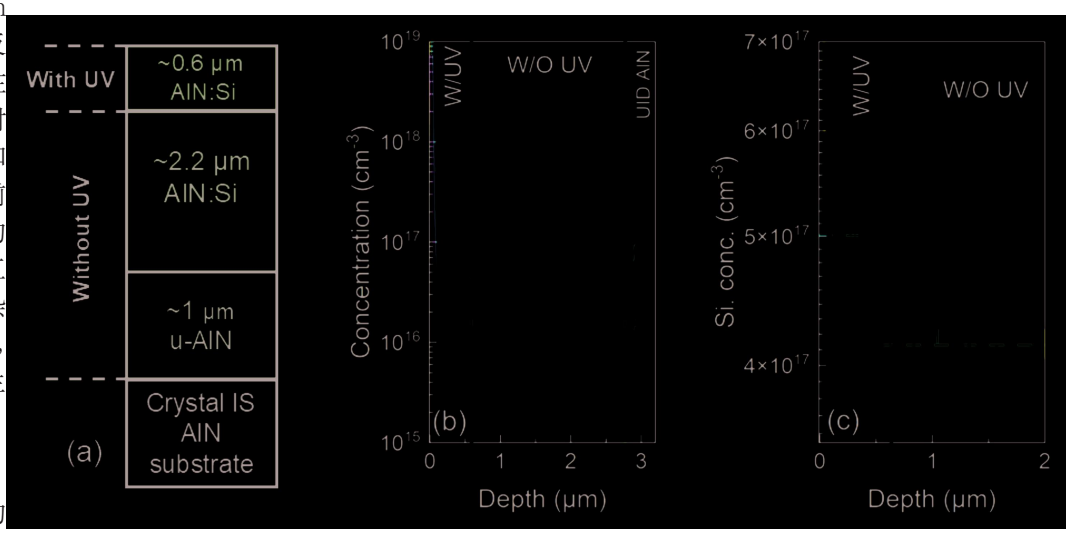


图 2：对在 Crystal IS AlN 衬底上生长、分别经 D_2–VUV 照射和未经照射的硅掺杂 AlN 进行的二次离子质谱（SIMS）分析。（a）SIMS 测试结构。（b）硅、氧、碳的深度分布。（c）线性坐标下的硅分布显示，D_2–VUV 照射下硅并入量约增加 19%。

照射看作是向原本不变的 MOCVD 工艺中简单加入被动的光——相反，D_2–VUV 照射是生长化学的一部分，它很可能改变了氨的光解离、气相前驱体反应、表面反应路径，或以上几种效应的某种组合。尽管详细机理还有待进一步研究，但可以明确的是：VUV 照射改变了 AlN 的生长方式。

打破性能折中

D_2–VUV 辅助生长的压倒性优势在于，它改善了硅掺杂 AlN 中迁移率与载流子浓度之间的折中关系。利用这项技术，AlN 如今可以获得足够高的载流子浓度以降低电阻，同时保持足够的迁移率，避免通常与重补偿相伴的严重输运性能损失。

测量表明，引入 D_2–VUV 照射后，电子迁移率从 20–110 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ 提高到 100–160 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$，自由电子浓度从 $6 \times 10^{15} cm^{-3}$ 攀升至 $1 \times 10^{16} cm^{-3}$（见图 3 左）。我们最好的结果之一——也是本次突破的亮点——是自由电子浓度约 $3 \times 10^{16} cm^{-3}$ 与电子迁移率约 80 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ 的组合。

另一个重要特性是电阻率。我们的多个 D_2–VUV 生长 AlN 样品的电阻率低于 10 Ω · cm，其中最好的薄膜体电阻率达到约 2.7 Ω · cm（见图 3 右）。该数值低于此前报道的 MOCVD 生长硅掺杂 AlN 的体电阻率，展示了 MOCVD 生长 AlN 导电性的显著提升 [2]。

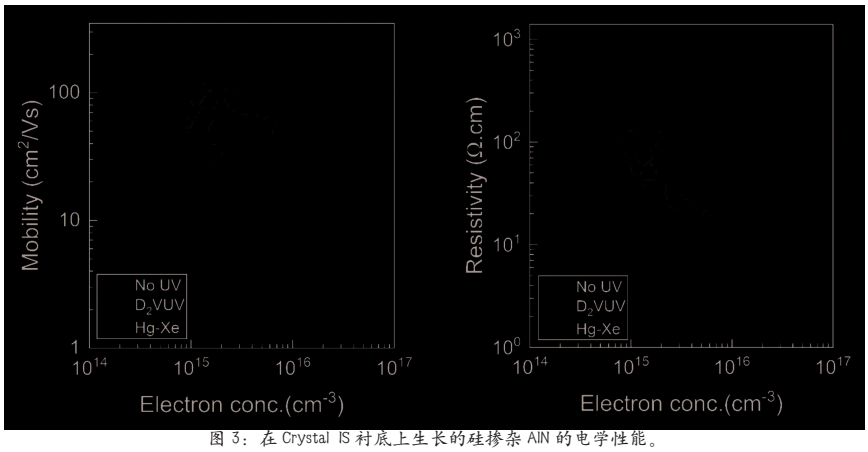


图 3：在 Crystal IS 衬底上生长的硅掺杂 AlN 的电学性能。

图中电子迁移率（左）和体电阻率（右）以霍尔测量的自由电子浓度为横轴作图。D_2–VUV 辅助生长将自由电子浓度扩展到无紫外范围之上，同时保持了可用的迁移率，并使薄膜进入更低电阻率的区间。最佳样品将 $3 \times 10^{16} cm^{-3}$ 的自由电子浓度与约 80 $cm^2 \cdot V^{-1} \cdot s^{-1}$ 的迁移率相结合，电阻率为 2.7 Ω · cm。

创纪录的激活效率

为估计我们导电性最好的 D_2–VUV 生长薄膜的施主激活效率，我们将霍尔测量的自由电子浓度与 SIMS 测量的硅浓度进行了比较。对于自由电子浓度约 $3 \times 10^{16} cm^{-3}$ 的样品，硅浓度约为 $1.3 \times 10^{17} cm^{-3}$，这意味着施主激活效率约为 22%。这是一个非常出色的数字——比汞 – 氙灯照射薄膜的估计值高出 100 倍以上，比 MOCVD 生长硅掺杂 AlN 文献中的典型值高出近两个数量级。

【文中专栏】氮缓冲 β –Ga_2O_3 FET 的规模化

在本刊今年第 III 期报道的 1 英寸 (010) β –Ga_2O_3 晶圆上氮掺杂 Ga_2O_3 缓冲层工作 [7] 的基础上，Agnitron 在与美国空军研究实验室（AFRL）合作的”直接进入第二阶段”（Direct–to–Phase II）项目中，将这种方法扩展到了 2 英寸 (010) β –Ga_2O_3 晶圆。其目标是确定氮缓冲 FET 结构能否在晶圆尺度上可重复地抑制寄生硅相关导电沟道——这种沟道往往形成于衬底 – 外延层界面处。

对于横向 β –Ga_2O_3 器件，界面硅积聚是一项重大挑战。它可能形成不想要的次级导电路径，增加反向偏置漏电，并导致 MOSFET 阈值电压的波动。虽然生长前的 HF 刻蚀可以降低这一硅峰，但它会引入额外的工艺复杂性，而且可能无法完全消除界面贡献。氮补偿是一种很有吸引力的替代方案，它提供了一种更直接的外延方法，在衬底界面与有源器件沟道之间设置氮掺杂缓冲层。

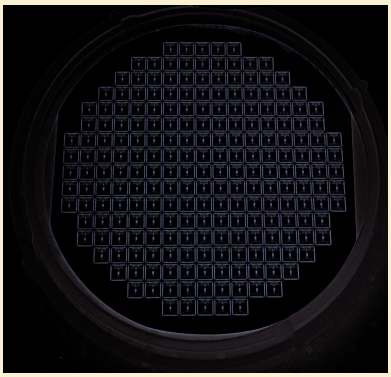


图 4：一片完整加工的 2 英寸 β –Ga_2O_3 FET 晶圆照片。该晶圆采用 Agilis 700 MOCVD 在 Synoptics (010) 铁掺杂 β –Ga_2O_3 衬底上生长，带有氮掺杂缓冲层。氮掺杂缓冲层在抑制寄生界面硅导电的同时，实现了均匀的晶圆级器件制备。

为评估可重复性，Agnitron 在三片 2 英寸 (010) β –Ga_2O_3 晶圆上生长了氮缓冲 FET 结构，并评估了片间一致性和批次间一致性（见图 4）。其中两片晶圆被共同装入 Agilis 700 反应器，以评估片间可重复性；第三片则采用相同工艺生长，以评估批次间可重复性。电容 – 电压测量显示，2 英寸晶圆之间的分布曲线一致。硅掺杂沟道的电荷在片与片之间相当，沟道浓度一般在约 1.5×10^{18} 至 $3.0 \times 10^{18} cm^{-3}$，在缓冲层区域降至约 $1 \times 10^{16} cm^{-3}$ 以下，表明氮掺杂层实现了有效补偿，寄生界面导电被强烈抑制（见图 5）。

仔细观察我们的 SIMS 结果，可以发现关于 D_2–VUV 照射机理的重要线索。由于碳和氧的并入量并未减少，导电性的大幅改善不太可能源于杂质含量的降低。相反，结果指向生长过程中施主激活的改善以及点缺陷补偿的减少。鉴于 VUV 照射改变了生长速率行为，我们推断整体改善最可能源于生长化学的改变与缺陷准费米能级控制的共同作用。

我们还研究了 D_2–VUV 辅助 MOCVD 是否有助于高铝含量 AlGaN 的生长。利用 D_2–VUV 照射，我们制备出了导电的 $Al_{0.87}Ga_{0.13}N$，其霍尔测量电子浓度达到 $3.1\times10^{19}cm^{-3}$。其比接触电阻率最低达 $7.5\times10^{-5}\Omega\cdot cm^2$，而未经 D_2–VUV 照射生长的同类层为 $1.7\times10^{-4}\Omega\cdot cm^2$，相当于比接触电阻率降低了约 57%。基于这些结果，D_2–VUV 照射的益处并不限于二元 AlN——它还支持高铝含量 AlGaN 导电性和接触行为的改善。

深紫外照射能力

我们近期紫外辅助 AlN 研究取得成功的关键角色之一，是我们应用最广泛的 OEM 研发型 MOCVD 平台 Agilis 100。这款灵活的反应器是高度可配置的研究工具，同时支持远程注入喷淋头和近距注入喷淋头两种工作模式——这使研究者可以选择最适合其材料体系和生长目标的反应器几何结构。凭借这种灵活性，我们的平台对宽禁带和超宽禁带材料研究尤为有用——在这类研究中，生长化学、前驱体输运、热环境和原位工艺控制往往需要随着科学的发展而调整。

对于本文介绍的紫外辅助 AlN 研究结果，我们采用了一种全新设计的喷淋头 / 气体分配法兰，将高功率 D_2–VUV 光源直接集成到反应器中。通过采用这种方式，VUV 照射被直接送达晶圆载盘和生长表面，而无需依赖外部灯源、观察窗耦合或长光导管。这一点很有价值，因为它使光子通量能够在最需要的地方与生长环境相互作用，同时对气体输运的干扰极小，从而确保高质量的 MOCVD 生长。

我们对集成式 D_2–VUV 硬件的开发反映了我们在反应器设计上的总体思路：MOCVD 平台不仅是生长工具，更是一个可用于测试新工艺物理的、可调节的实验环境。通过将紫外

晶圆级霍尔分布测绘进一步证实了在 2 英寸晶圆上生长的氮缓冲 FET 结构具有可重复的电学特性（见图 6）。平均迁移率值紧密聚集在 100 $cm^2\cdot V^{-1}\cdot s^{-1}$ 附近，迁移率不均匀性在 2.5% 至 8.1% 之间。平均自由载流子浓度在 9.1×10^{17} 至 $1.3\times10^{18}cm^{-3}$ 之间，接近约 1×10^{18} cm^{-3} 的目标硅掺杂沟道浓度。载流子浓度的不均匀性较高，在 10.5% 至 19.5% 之间，但总体掺杂水平在各晶圆上仍得到良好控制。所制备的器件表现出可用的常开型 β–Ga_2O_3FET 特性，栅压为 0 V 时的漏极电流在 2.1 mA/mm 至 5.1 mA/mm 之间，平均阈值电压在 7.4 V 至 4.4 V 之间。

尽管霍尔测量表明外延沟道具有接近目标掺杂水平的合适迁移率和载流子浓度，但实测漏极电流仍是一个令人担忧的问题——它比仅从沟道特性预期的要低。这一差异表明，器件电流主要并不受氮缓冲 FET 结构本身的限制，而是受到源 / 漏接入电阻和接触电阻的强烈影响。造成这一限制的一个重要原因可能是缺少欧姆接触再生长层，因为这会增大接触处的有效串联电阻。因此，实测漏极电流应被视为下限结果；通过优化再生长欧姆接触区，预期会有显著改善。

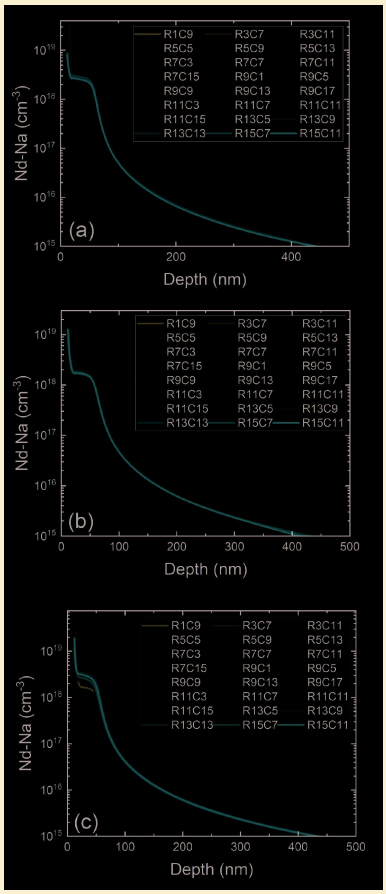


图 5：三片 2 英寸氮缓冲 β–Ga_2O_3FET 晶圆的 Nd Na 分布曲线。(a) 和 (b) 为共同装载的晶圆，用于评估片间可重复性；(c) 为重复生长，用于评估批次间可重复性。高度重合的分布曲线显示出可重复的硅掺杂沟道电荷，以及 Nd–Na 向氮掺杂缓冲层内的平滑下降，表明寄生界面导电得到有效抑制。

总体而言，2 英寸晶圆的结果表明，氮缓冲 β–Ga_2O_3 FET 结构

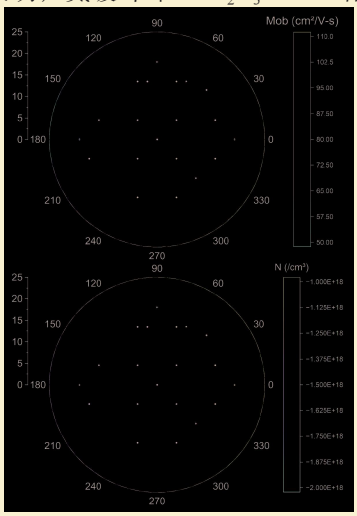


图 6：一片在氮掺杂缓冲层上生长的 2 英寸 β–Ga_2O_3FET 样品的代表性晶圆级分布图，上为迁移率，下为沟道电子浓度。

可以在晶圆尺度上可重复地生长，同时有效抑制寄生界面导电。常开型器件在各晶圆上的成功制备为进一步优化奠定了坚实基础。未来的工作将聚焦于源 / 漏接触工程，包括再生长欧姆接触区，这应能降低串联电阻，并提高漏极电流、均匀性和整体器件性能。

光源集成到喷淋头区域，我们为 AlN 等超宽禁带材料生长过程中的超禁带照射开辟了一条实用路径。

动态扫气调制

我们近期的另一项突破，是在我们更大规格的 Agilis 700 平台上展示了一种新的均匀性控制方法——这是我们用于开发 β –Ga_2O_3 相关材料等先进氧化物的最强 MOCVD 系统之一。在支持更大晶圆的平台上，在更大衬底范围内保持均匀性至关重要。在开发我们卧式 AgniGaN 400 反应器期间所做观察的基础上，我们开发了动态扫气调制（Dynamic Sweep Gas Modulation）技术。这项正在申请专利的技术（美国专利申请号 19/715,791）可在生长过程中主动调节前驱体通量的空间分布。

为实现这一点，我们在生长步骤中对选定的推动气体或注入区气流进行调制，而不是将其保持为固定值。调制可以通过配方参数来定义，例如基准流量、幅度、频率、相位、占空比和波形形状。通过选择固定的高流量和低流量条件，工艺工程师可以使沉积偏向晶圆或载盘的不同区域。通过在生长过程中动态扫动气流，我们的反应器对这些空间偏置进行时间平均，从而产生更均匀的薄膜。在我们的卧式反应器中采用这种方法，将 4 英寸蓝宝石上生长的 AlN 的 1 σ 厚度不均匀性从约 2.5% 降至约 0.5%。

我们使用 Agilis 700 的最新工作表明，同样的概念可以应用于立式反应器配置。在我们的一组实验中，我们比较了两种固定的烷基 / 金属有机区流量条件（1500 sccm 和 500 sccm）与第三种采用动态扫气调制的条件。固定流量条件产生了截然不同的空间沉积分布，而扫气调制条件显著改善了均匀性，在 4 英寸衬底上达到约 1% 的 1 σ 不均匀性（见图 7）。这些结果表明，动态扫气调制并不局限于水平流反应器——它还可以改善立式 MOCVD 平台，在这类平台中气体分配、晶圆旋转、前驱体利用率和晶圆级均匀性紧密耦合。这些均匀性方面的改进，连同深紫外光源硅掺杂技术的进步，巩固了我们作为高质量超宽禁带外延层先驱的地位。

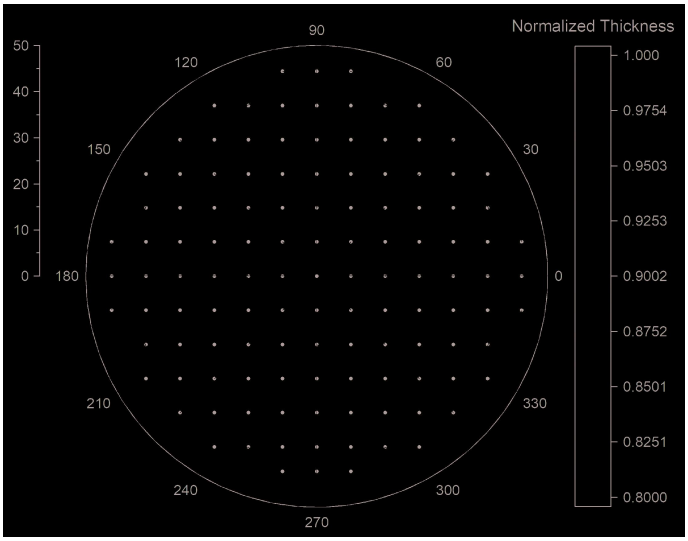


图 7：在 Agilis 700 中利用动态扫气调制在 4 英寸蓝宝石衬底上生长的 Ga_2O_3 薄膜的厚度均匀性分布图。扫气调制生长实现了约 1% 的 1 σ 厚度不均匀性。

资助说明：本工作得到美国国防高级研究计划局（DARPA）合同号 140D0424C0048（David Meyer 博士）和海军研究办公室（ONR）SBIR 第二阶段计划合同号 N6833520C0105（LJP 先生）的资助。Ga_2O_3 方面的工作由空军研究实验室（AFRL）通过”直接进入第二阶段”SBIR 项目资助，合同号 FA239423CB010（项目监督人 Adam Neal 博士）。文中所表达的观点、意见和 / 或发现均为作者观点，不应被解释为代表美国作战部或美国政府的官方观点或政策。Agnitron 还感谢亚利桑那州立大学 Houqing Fu 教授在 AlGaN 和 AlN 层电学表征方面的合作，感谢佛罗里达大学 Travis Anderson 教授提供确认电学数据的霍尔测量。

扩展阅读

- [1] S. T. B. Goennenwein et al. “Generation–recombination noise of DX centers in AlN:Si,” Appl. Phys. Lett. 79 2396 (2001)
- [2] P. Bagheri et al. “High electron mobility in AlN:Si by point and extended defect management,” J. Appl. Phys. 132 185703 (2022)
- [3] L. Gordon et al. “Hybrid functional calculations of DX centers in AlN and GaN,” Phys. Rev. B 89 085204 (2014)
- [4] P. Reddy et al. “Point defect reduction in wide bandgap semiconductors by defect quasi Fermi level control,” J. Appl. Phys. 120 185704 (2016)
- [5] Z. Bryan et al. “Fermi level control of compensating point defects during metalorganic chemical vapor deposition growth of Si-doped AlGaN,” Appl. Phys. Lett. 105 222101 (2014)
- [6] F. Alema et al. Driving ultra-wide-bandgap breakthroughs. Compound Semiconductor 31 (7) p.20 (2025)
- [7] F. Alema et al. Advancing AlN and aluminium-rich AlGaN. Compound Semiconductor 32 (3) p.20 (2026)

我们电子芯片之下的静默战争

出口管制与冲突正在将化合物半导体制造置于风险之中

作者：谢菲尔德大学 SC LENNY KOH、卡迪夫大学 PETER SMOWTON，两人均来自 UKRI COMPOUND SEMICONDUCTOR HUB

我们这个行业在 2023 年 7 月 3 日经历了一场深刻的变革。那一天，中国商务部和海关总署发布了一则例行公告，告知镓和锗——及其化合物——的出口商：今后发货前需要申请许可证。没有提前通知，没有过渡期，没有指明针对的目标。而管制措施已迫在眉睫，自 8 月 1 日起实施。

这一公告几乎立即产生了连锁反应。第一周之内，欧洲的镓价就飙升了近 20%。此后价格继续攀升。到 2023 年 8 月中旬，镓的现货价格已从 6 月的基线暴涨约 50%；而且这一趋势持续下去——鹿特丹的镓价从管制前到 2025 年 5 月上涨了近 150%。同样，到 2024 年底，欧洲锗价同比已飙升近 90%。

这就是供应链武器化的样子。它不是一场大张旗鼓宣布的禁运，而是一种逐步收紧的许可制度——从谨慎的信号，到出口禁令，再到域外管辖条款——直到整个技术门类的供应链在事实上被限制。

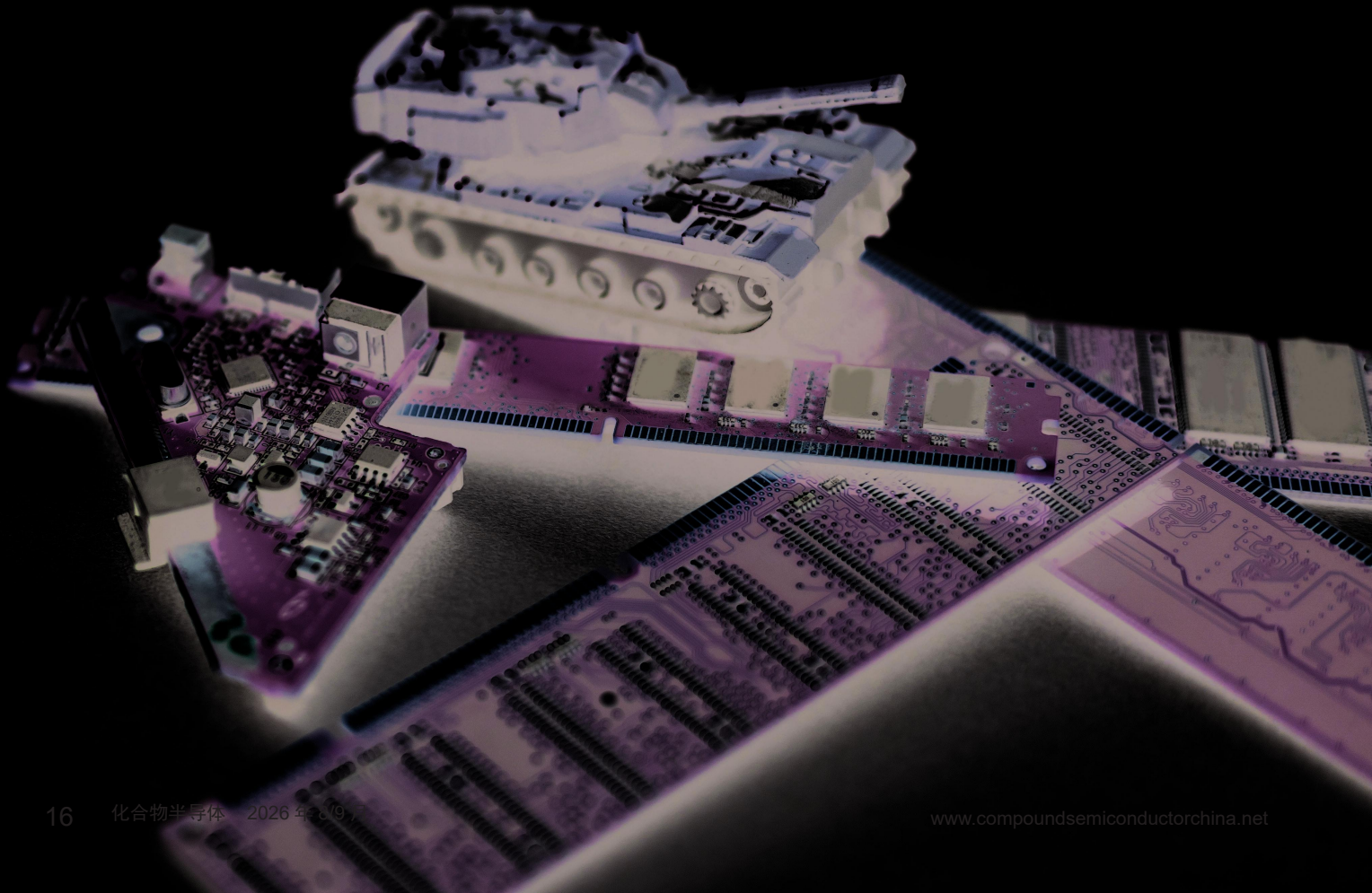
正如您肯定能够想到的那样，这些针对锗、镓及其化合物的限制——自 2025 年 2 月 4 日起，铟也被纳入其中——已经对所有化合物半导体器件产生了重大影响。鉴于这些器件所扮演的角色——5G 基站功率放大器、电动汽车牵引逆变器、军用雷达阵列，以及如今维系着正在重塑全球经济的 AI 数据中心基础设施的光互连——这种影响是广泛的。

一条不同于硅的供应链

化合物半导体供应链短、陡，且高度集中。硅芯片由地球上储量最丰富的元素之一制成，而化合物半导体则截然不同：它们由稀缺、地理分布集中、且在大多数情况下是完全不同的工业流程的副产物的二元、三元元素组合构成。由于稀缺性和获取难度，这些元素被定义为关键矿产，这凸显了它们的战略重要性。

镓的生产涉及从氧化铝冶炼残渣中回收。锗来自锌精炼和粉煤灰，铟则是锌生产的副产品。换言之，对我们行业最重要的三种金属都不存在原生矿山；因此，当价格上涨时，简单地多采矿并不是可行选项。还值得注意的是，中国生产了全球约 98% 的低纯度镓——并非因为它垄断了矿藏，而是因为它在三十年间建起了无与伦比的精炼基础设施，且基本上避开了西方产业政策的视线。

从原材料到成品器件，化合物半导体供应链贯穿四个层级：原材料和



工艺气体；衬底与外延生长；器件制造；以及终端应用行业。这种相互关联性的一个例证是三甲基镓——它是将镓带入 MOCVD 反应器、用于 GaN 和 GaAs 外延的有机金属前驱体。它由中国精炼的金属镓合成，并通过美国、中国、欧洲、日本、韩国和印度等关键地区供应。

扰动因素

化合物半导体供应链面临四大威胁：出口管制、战争与地缘政治冲突、能源供应危机，以及气候与水资源风险。

出口管制是最紧迫的近期威胁。2024 年 12 月，中国禁止向美国出口镓、锗和锑，这是对美国半导体出口限制的直接回应。对中国而言，关键矿产供应管制是一种战略杠杆。2025 年 11 月中美贸易休战后，这些管制以许可制度的形式暂停实施至 2026 年 11 月。然而，针对军事最终用途的禁令仍然完全有效，中国保留了在任何时候重新实施限制的完整法律架构。管制只是暂停了，而非解决了。与此同时，2024 年 12 月引入的域外管辖条款——将中国的法律管辖权延伸至第三国再出口商——并未撤销。经由德国、比利时和日本的转运路线在法律上依然被封锁，即便直接贸易已部分恢复。确保禁令有效的结构性依赖并未减少。中国还禁止从美国进口部分英伟达芯片，支持先进 AI 芯片的本土生产，以配合发展完整的端到端先进半导体供应链。

战争和地缘政治冲突带来了另一种风险图景：爆发更快，波及更无差别。2022 年俄罗斯乌克兰冲突立即扰乱了氖气和氪气的供应。冲突之前，乌克兰供应了全球约一半的半导体级氖——这是高端光刻设备使用的关键气体之一；虽然它主要用于硅行业，但已开始影响化合物半导体制造。

另一个潜在的扰动因素是能源供应危机。电力和天然气的限制威胁并直接影响衬底外延生长、晶圆生产和器件制造的可持续性。之所以如此，是因为这些工艺都是能源密集型的——我们的行业必须认真对待这种脆弱性。



气候与水资源风险是最不易察觉、但嵌入程度最深的结构性扰动因素。中国台湾地区反复出现的干旱状况已影响到化合物半导体晶圆厂的运营，只能靠紧急水车运水来应对。外延生长工艺的用水强度尤其高，这使水资源管理与地缘政治风险一道成为一个战略变量。

能做什么？

鉴于化合物半导体材料流通受限所带来的种种后果，显而易见的问题是：在各个环节上该做些什么？

对企业而言，当务之急是从被动式采购转向结构性韧性。芯片制造商应（在可能的情况下）为每一项关键投入认证至少两家地缘政治上分属不同区域的供应商——这一过程需要 12 到 24 个月，必须在危机爆发之前启动，而不是在危机之中。与此并行，还必须重新设计库存策略：90 天的镓缓冲库存在 2023 年底已被证明是不够的，对于不可替代的投入品，180 天的储备如今才是一条合理的基线。

投资可再生衬底、关键材料和稀土回收同样至关重要：产生含镓外延抛光废料的企业，正坐拥一个可同时降低成本敞口和地缘政治依赖的回收机遇，并能直接为循环经济作出贡献。

对政策制定者和国家而言，有四个重要机遇可供把握，它们是现代产业战略和国家安全的一部分。其一，是在本土战略性布局并扩大镓、铟、锗（以及锑）的精炼产能。其二，是强制披露半导体制造中关键矿产和稀土投入品的供应链：要求晶圆厂报告其一级和二级投入品的地理来源，这将彻底改变产业界和政府的可见度。第三个目标，是通过材料替代和将半导体制造迁回本土，形成一个稳定、可持续的生态系统，从而降低风险。最后但同样重要的是：光子学、电子学和半导体制造供应链需要在设计上保障安全性、韧性和循环性。

由于近期发生的一系列事件，半导体行业正在经历一场根本性的转变：从一个为全球效率而优化的模式，转变为一个必须以韧性和安全为优先的模式。要在这场变革中取得成功，有四个杠杆：战略储备、加工环节的地理多元化、回收投资，以及材料替代研发。相对于它们所应对的战略风险敞口而言，所有这些领域的投入都不足。美国《芯片法案》、欧盟芯片联合事业、欧盟／英国／美国地质调查局《关键原材料法案》、英国半导体战略以及盟国间供应协议，代表了一个真实但姗姗来迟的开端。

但步伐必须加快。到目前为止，我们行业对供应链冲击的应对都是被动反应式的，尽管长期韧性战略正在提速。然而，下一次冲击可能毫无预警。

我们生活在一个动荡的时代，全球秩序的结构性变化迅猛而剧烈。过去几年里，供应链变得越来越不确定，就像一场胜负难料的战场局势。化合物半导体行业能否认识到这一事实——并以形势所要求的紧迫感采取行动——将决定 2030 年代的技术安全格局。

双向开关的突破

新一代单片 GaN 双向开关在保持导通损耗和可靠性可控的同时，将阻断电压提升至 5 kV 以上，有望实现高效、更紧凑的中压交流功率变换

作者：中国科学技术大学 YUAN QIN、西安电子科技大学 MING XIAO、苏州能讯高能半导体（Enkris Semiconductor）KAI CHENG、香港大学 YUHAO ZHANG

在悄无声息之间，功率电子正在成为若干彼此交汇的转型浪潮的核心：交通与工业的电气化、可再生能源发电与储能的建设，以及高能耗数字基础设施的扩张。在所有这些场景中，更高的效率和更高的功率密度已不再是可选项——它们直接转化为更小的无源元件、更简化的热管理和更低的全生命周期成本。宽禁带半导体的引入已经改变了产业格局：GaN 的成功故事由单向 HEMT 书写，为 30 V 至 400 V 的紧凑型高频变换器提供了动力。

但 GaN 接下来的许多前沿应用天然面向交流，因此开关必须能够应对电流反向和双极性关断态电压。虽然用反串联器件来实现双向功能是可行的，但这种方案随电压升高而表现拙劣：芯片面积增大，寄生电容堆叠，栅驱动和版图复杂度成倍增加。

更好的办法是从根源上解决这一问题是采用单片双向开关。这种开关在单个器件内部共享高压区域，在简化电路的同时保持了效率。

将这些开关的性能推向新境界是大幅提升电压承受能力，这正是我们来自中国科学技术大学、西安电子科技大学、能讯半导体和香港大学的团队的工作目标。我们的突破有望为这类器件在中压交流应用中的部署打开大门。

我们开展这项工作的动机来自三个问题：为什么双向开关在实际变换器中如此重要？为什么单片实现方案具有如此强大的优势？以及，如何用双向开关实现高电压？

为什么是双向？

最需要双向开关的应用，是那些变换器必须高效地接通和断开交流节点的场合。矩阵变换器和电流源逆变器是经典例子。在这些电路中，由于负载电流与瞬时线电压的方向未必一致，开关必须能够双向导通电流。此外，随着开关状态在线电压周期内变化，同一器件往往还必须承受正向和反向的阻断电压。

双向开关在固态变压器中也很有价值——它是英伟达面向 AI 数据中心的下一代 800 V 供电架构中的关键组件；它同样适用于中压电机驱动，以及新兴的交流配电与保护方案——在这些场合，快速、可控的双向元件可以取代笨重的无源元件。在所有这些例子背后，往往有一个共同的经济驱动力：如果能用更少的器件实现双向功能，整个系统就能做得更小、更快、更高效。

在中压领域，双向开关部署的重大机遇在于数据中心、轨道交通牵引和工业电源所用的 AC–DC 前端。在这些场合，设计工程师正在采用三相有源整流器和固态变压器级，越来越多地瞄准更高开关频率并缩小磁性元件体积。

在这些系统中，双向功能通常由反串联器件对来实现——这是一种折中方案，会增加有源器件数量，并使寄生电容和存储电荷堆叠。采用这种方法，每一次换流都伴随更高的换流能量代价，使得在不牺牲效率的前提下提高开关频率变得更加困难。

双向开关潜在部署的更多例子还包括中压电机驱动和变速压缩机。在这些场合，引入双向开关使矩阵变换器和电流源拓扑成为可能，从而取消笨重的直流母线电解电容。取消或缩小直流母线电容可提升寿命和功率密度。然而，要确保成功，双向开关必须在快速开关、高温和快速变化电压的条件下，安全且反复地阻断双极性电压。

单片方案的优势

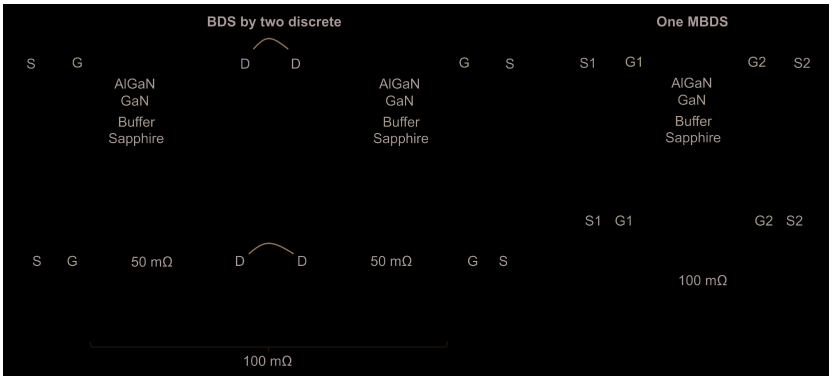
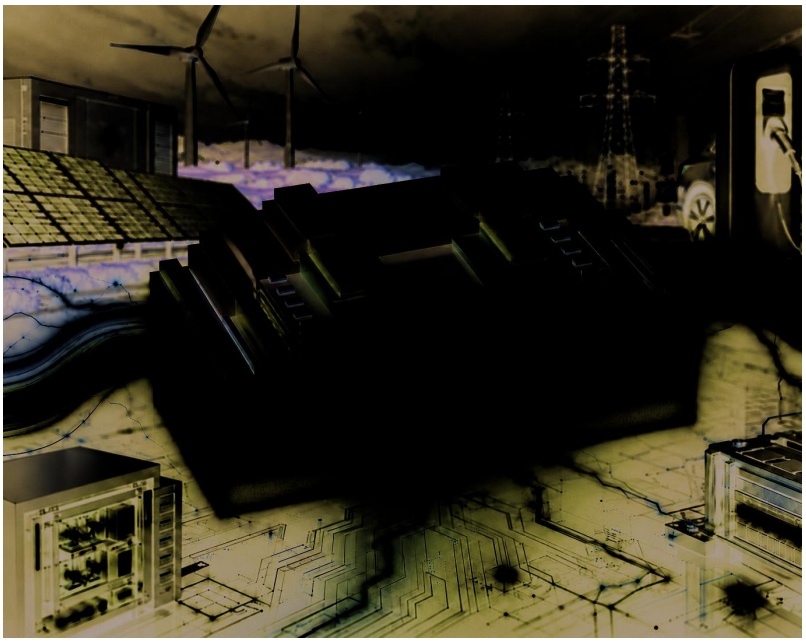


图 1：用两个分立的 GaN 晶体管反串联实现的双向开关，与共享一个漂移区的单个单片双向开关之间的概念对比。



当采用简单粗暴的反串联架构时，有源器件数量会翻倍。这不是一个优雅的方案——由于每个器件约贡献总导通电阻的一半，要实现与单个单向晶体管相同的导通损耗，芯片面积可能需要翻两番。在系统层面，代价甚至更严重：额外的器件引入了额外电容，每个开关周期都必须对其进行充放电。

引入单片双向开关可将两个受栅控的沟道置于同一个共享漂移区之上，从而避免了高压区的重复占用，降低了上述开销（见图 1）。在较低电压下，单片 GaN 双向开关已经以工程样品的形式出现在产业界，指明了一条被采用的路径。

一个切题的问题是：当电压定额提高到千伏级时，这些单片优势是否还能保持？在这一领域，电场管理、缓冲层击穿和可靠性都可能成为限制因素。

驯服电场

在双向器件中，高压应力并不像单向器件那样固定地落在某一个漏极边缘。相反，峰值电场会根据被阻断电压的极性而移动，并可能与多个栅堆叠耦合。正因如此，边缘终端和电场整形成为核心设计问题。

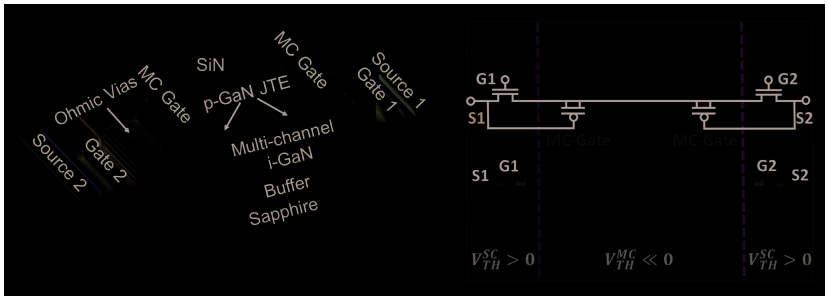


图 2：在 IEDM 2025 上展示的多沟道 GaN 单片双向开关的器件示意图与等效电路模型。

我们最近制备出一款 3.3 kV 增强型单片双向开关，展示了应对这一挑战的一种方法。我们在成熟的蓝宝石基 p–GaN 栅平台上开展工作，成功的关键在于双结终端延伸结构——它直接在标准栅堆叠的 p–GaN 层中实现，无需外延再生长。我们的器件在两个极性下都实现了超过 3.3 kV 的击穿电压，阈值电压约 0.6 V，比导通电阻为 5.6 mΩ · cm ，同时在两个方向上保持了对称的导通特性。

在引人注目的数字之外，结终端延伸这一概念本身也值得深思。这种改进提供了一种不完全依赖长场板的电场整形手段。它通过平衡栅边缘与终端边缘的电场峰值，使平均横向电场得以超越带场板的横向 GaN 器件的典型水平，同时在双极性阻断下保持低漏电流。

多沟道跃升

我们的 3.3 kV 器件奠定了高压基础。但这只是起点，因为中压功率变换往往需要更高的电压和更大的电流。理想情况下，这应当在毫无折损的前提下实现，但在横向 GaN 中这并不容易——为提高电压所做的努力往往会驱使漂移区变得更长、比导通电阻变得更高，除非能够降低沟道电阻和接入电阻。解决办法之一是转向多沟道 AlGaN/GaN 材料体系，因为多个并联沟道可以将大电流能力与低方块电阻结合起来。

去年年底，在国际电子器件会议（IEDM）上，我们发布了首款多沟道 GaN 单片双向开关。这是一款五沟道器件，制备在由能讯半导体生长的 150 mm 蓝宝石基 GaN 晶圆上（见图 2）。

该开关的优点包括：在两个极性下对称阻断高达 5 kV 的电压、约 20 mΩ · cm 的比导通电阻、约 0.8 V 的阈值电压（见图 3）。据我们所知，5 kV 是迄今报道的单片双向开关的最高击穿电压（见图 4）。

我们的器件架构结合了两个重要理念（见图 2）。其一，采用与两个高压栅相连的双结终端延伸结构，在中央多沟道区域提供有效的电场管理。其二，利用单片双级联架构实现增强型工作。通过在多沟道双向区两侧各集成一个低压单沟道增强型 HEMT，整个开关对外表现为增强型器件，而高压多沟道部分则保持其天然的耗尽型特性。

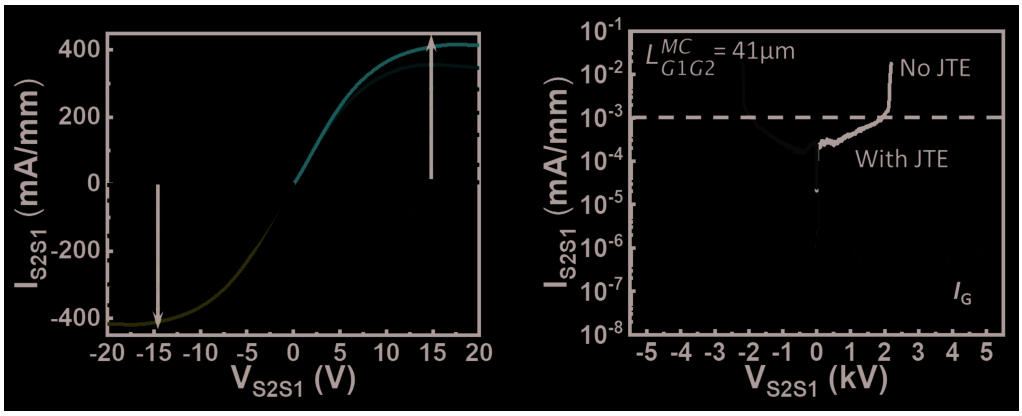


图 3：多沟道 GaN 单片双向开关的双向正向导通与阻断特性

优化终端长度在双向器件中尤为重要（见图 5）。对于单向高压 GaN 开关，设计者可以采用较长的 p–GaN 降表面电场（RESURF）区来助力电压提升。但在双向结构中，两个终端彼此相对，高压侧的长终端未必能以有利的方式被耗尽——相反，存在既无法有效利用所占面积、又会使电场在两个终端之间的间隔区中拥挤聚集的风险。

基于暗示存在可平衡这些效应的最优终端长度的仿真结果，我们实现了支持 5 kV 双极性阻断的终端长度。在我们的测量顺从限值之内，未记录到破坏性击穿。

聚焦可靠性

高电压只是故事的一半。可靠性同样重要，必须认真对待。在双向器件中，应力情形与传统晶体管不同，因为正常工作中被阻断的极性会交替变化，而且第二个栅可能相对于衬底处于不可忽略的电位。这些因素对动态导通电阻、阈值稳定性以及用于鉴定考核的应力方案提出了实际问题。

我们的多沟道双向开关在可靠性方面展现出令人鼓舞的迹象。在我们 IEDM 2025 的论文中，我们比较了多沟道 5 kV 器件与采用类似终端概念的单沟道双向器件。在 150 ° C 的高温反偏应力下，我们的多沟道器件在 1.7 kV 应力作用 1000 秒后，导通电阻的漂移小于 5%。相比之下，单沟道器件在相当应力条件下表现出大得多的导通电阻漂移（见图 6）。

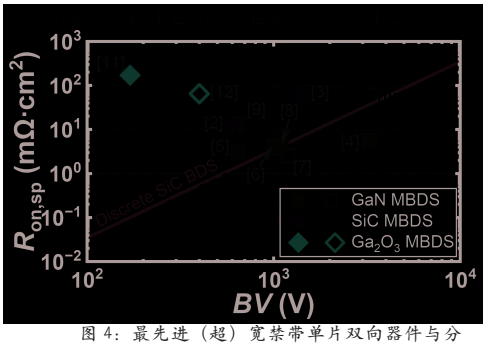


图 4：最先进（超）宽禁带单片双向器件与分立反串联实现方案实际性能极限的基准对比。

同样令系统设计师鼓舞的是，我们发现多沟道器件在我们的测试范围内对衬底偏置相对不敏感。众所周知，衬底偏置管理是实际电路中硅基 GaN 双向器件面临的一个挑战，因为衬底和缓冲层会与开关节点耦合。通过改用绝缘的蓝宝石衬底并利用多沟道堆叠，我们的器件提供了经证实的抗衬底偏置稳健性，这对真实变换器环境很有吸引力。

为解释我们观察到的稳定性，我们提出了

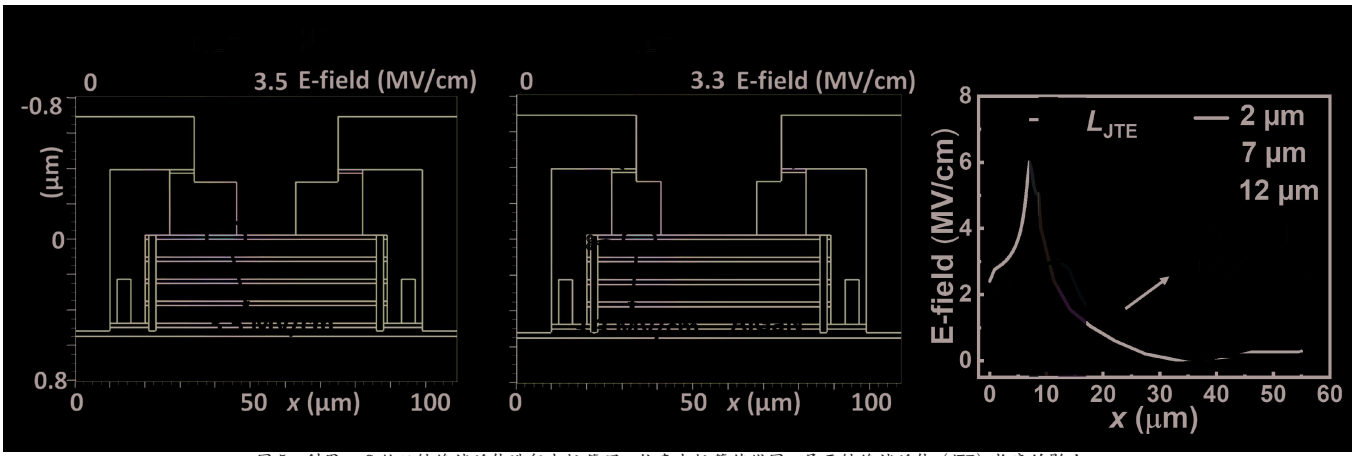


图 5：利用 p–GaN 双结终端延伸进行电场管理：仿真电场等值线图，展示结终端延伸（JTE）长度的影响，以及终端过长时电场在间隔区域拥挤聚集的风险。

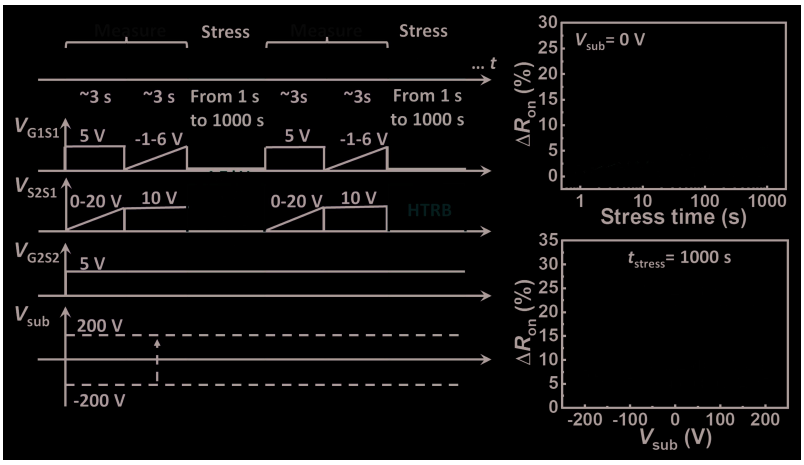


图 6：器件可靠性：高温反偏应力序列，以及单沟道器件与多沟道器件导通电阻漂移的演变。

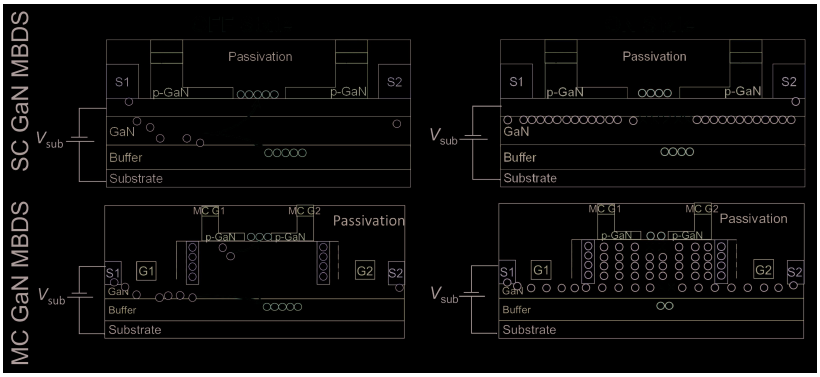


图 7：器件物理示意图：界面陷阱和缓冲层陷阱对中间沟道的影响被顶部和底部沟道屏蔽，从而减小了多沟道 GaN 单片双向开关的动态导通电阻漂移。

一个物理图景：多个沟道提供了内在的屏蔽效应。我们认为，在单沟道器件中，陷阱在表面或缓冲层中俘获的电荷直接调制唯一的导电沟道，导致更大的动态和应力诱发电阻漂移。而在多沟道结构中，顶部沟道屏蔽了表面陷阱的影响，底部沟道屏蔽了缓冲层陷阱的影响，从而使中间沟道受到更小的扰动。最终结果是应力后导通电阻的变化更小（见图 7）。

下一步走向何方？

凭借 5 kV 双极性阻断、增强型控制与改善的动态稳定性的结合，我们的单片 GaN 双向开关是中压交流功率变换极具吸引力的候选者。在这一领域，它们现有的对手是硅或 SiC 方案。

在器件层面，下一步工作很明确：通过版图和材料优化进一步降低比导通电阻；改进终端设计，在保持漏电可控的同时提升阻断电压；以及拓宽可靠性评估范围，从静态应力扩展到与电路相关的动态和开关测试。在实践中，这意味着要在真实的温度条件下表征动态导通电阻、开关能量以及栅 / 终端偏置敏感性，同时考虑电压和电流对时间的导数。此外，这些测量还必须与长时应力相关联，以分离并揭示占主导地位的电荷俘获与退化机理。

一旦建立了这种器件级和电路级的理解，工作重心就可以转向系统层面——重新思考那些受成本及反串联器件对寄生参数束缚的拓扑。真正紧凑的单片双向开关有望简化栅驱动、减少寄生电容中存储的能量，并在不付出同等损耗代价的情况下提高开关频率。如果这些益处能够规模化实现，它们将转化为更小的无源元件、更高的功率密度，以及支撑电气化交通、可再生能源并网和工业自动化的中压变换器效率的提升。

虽然双向开关在功率电子中并非新的功能需求，但随着系统向更高开关频率和更严格的体积约束演进，这一需求正变得愈发迫切。鉴于 GaN 单片双向开关从 650 V 到 5 kV 的巨大进步，以及人们对其独特可靠性物理日益深入的理解，我们有充分理由相信，这项技术正在从学术上的新奇事物转变为将切实重塑中压变换器设计的平台。

扩展阅读

- Y. Guo et al. “Enhancement-mode GaN Monolithic Bidirectional Switch with Breakdown Voltage over 3.3 kV,” IEEE
- Electron Dev. Lett. 46 556 (2025) Y. Qin et al., “5 kV, 20 mΩ·cm2 EnhancementMode Multi-Channel GaN Monolithic Bidirectional Switch,” 2025 IEDM, pp. 1-4, 2025.

AI 加速功率设计

一种全新的物理信息图神经网络将宽禁带器件电热仿真所需时间缩短为原来的五千分之一以上，为快速结构优化和 SPICE 参数提取开辟了道路

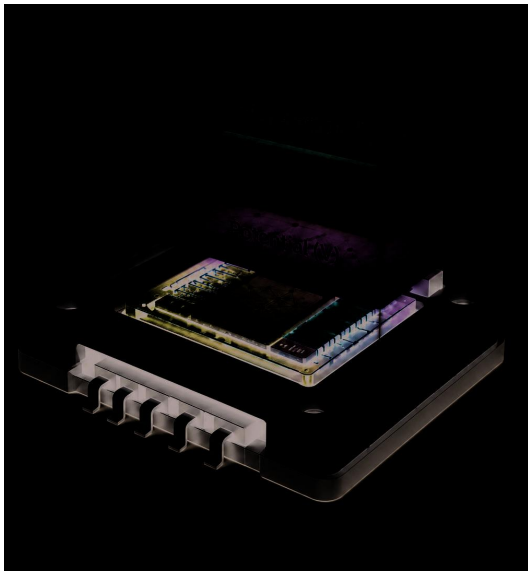
作者：中国科学院上海微系统与信息技术研究所 LI ZHENG、XINHONG CHENG 及其同事

在现代电子领域，不遗余力地追求更高功率密度有着充分的理由。前端获得的增益可以节省空间（得益于更小的面积），还可能减轻重量。更重要的是，它带来了产品小型化、更快充电速率和更低运营成本的机会。

实现更高功率密度的关键在于宽禁带半导体，尤其是 GaN 和 SiC。用这些器件取代既有的硅器件可以显著提升效率。然而，这同时伴随着与热管理相关的严峻挑战。

当器件在短路等严酷工况下失效时，其根本弱点往往与热现象有关。正因如此，精确的电热分析对于可靠性而言不容妥协。

遗憾的是，传统仿真方法慢得令人痛苦，成为设计周期中的瓶颈。每一次迭代都可能耗费数天的计算时间。这种延迟严重阻碍了进步：它扼杀创新，迫使设计者依赖近似估算，并限制了对最优器件结构和精确系统级模型的探索。鉴于这些问题，我们迫切需要一个范式转变，让设计工程师既能保持高保真物理，又不必承受沉重的计算开销。



建模难题

传统电热分析（通常采用有限元方法，FEM）的弱点之一，是它难以应对多尺度复杂性。因此，对一个包含数千个并联元胞的完整功率芯片进行仿真的代价高到令人却步。于是，工程师们往往只能退而求其次，采用简化但精度较差的模型。

可以毫不夸张地说，精细器件物理与系统级电路仿真之间的这道鸿沟是一个重大障碍。还应指出的是，在设计关键结构（如高压器件的场限环）时，必须采用迭代的试错过程，耗费大量的工程时间和资源。显而易见的是，对一个统一、快速、可扩展的建模框架的需求从未如此迫切。

克服这一挑战，对于追求更高效率和功率密度的应用至关重要。例如，在电动汽车牵引逆变器和数据中心电源中，功率模块布局紧凑，热相互作用极其复杂。当传统仿真工具被用来处理”系统级”电热耦合问题时，它们远不能满足要求——要么精度不足，要么需要长达数周的计算时间，而这种时间尺度与敏捷开发周期完全无法兼容。正是由于这些严重的局限，学术界和产业界的许多人有着共同的目标：开发一种能够深入器件微观结构、同时快速推断整个芯片乃至模块宏观热行为的方法。

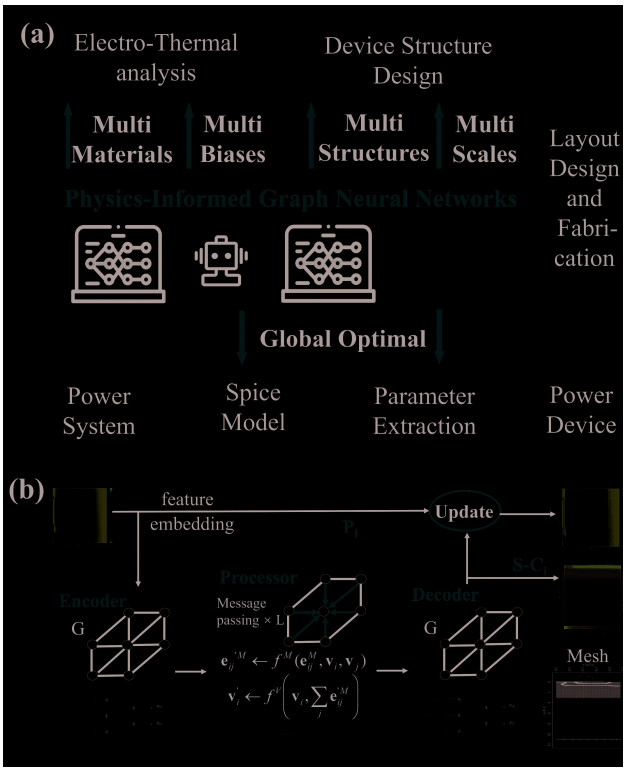


图 1：（a）通用 PIGNN 建模框架，作为用于电热（E–T）分析、功率器件结构参数自动设计和 SPICE 参数全局最优提取的 AI 加速模型。（b）PIGNN 模型采用有监督的”编码器–处理器–解码器”框架：编码器将网格数据转换为图，处理器通过 L 层消息传递更新节点/边嵌入，解码器提取节点特征。

AI 解决方案

我们团队提供了一个强大的解决方案，将深度学习与基础物理融为一体：物理信息图神经网络（PIGNN）。该框架将器件的网格——即用于仿真的数字网格——表示为一张图：点是节点，点之间的连接是边。

我们方法的创新之处在于训练该网络的方式。它不仅从传统仿真器（如 Sentaurus）生成的数据中学习，还通过将支配性物理方程直接纳入学习过程来学习。因此，我们的网络运用了泊松方程以及载流子连续性、漂移 – 扩散和热传导方程。通过纳入物理信息的方法，我们的模型尊重自然基本规律，即使对训练期间未曾明确见过的工况也能作出稳健的预测。

PIGNN 的核心优势在于其”图结构”的灵活性与”物理信息”约束的结合。图结构天然适合表示不规则网格和非均匀材料分布，这一优势使其能够无缝处理从纳米级沟道到毫米级衬底的多尺度几何结构。得益于物理方程的嵌入，其预测并非基于单纯的数据拟合，而是源于物理上一致的推理。凭借这一设计，当模型在一种器件结构和一系列工况上完成训练后，便可通过其”直推式学习”能力推广到新的几何结构和偏置电压——无需重新训练即可实现，大大拓展了应用范围。

速度与精度

我们的性能提升是变革性的。基准测试表明，PIGNN 框架预测静态和瞬态电热响应的速度是传统 Sentaurus FEM 仿真的 5000 倍以上。至关重要的是，这种速度并未以牺牲精度为代价。在预测短路热瞬态时，我们的模型误差保持在 1.5% 以下。

这种速度与精度的结合彻底重新定义了设计探索的边界。以往，受时间所限，工程师或许只能评估几十个设计变体。如今，借助 PIGNN 的快速推理能力，他们可以在数小时内筛选和优化数千种结构参数组合，发现被传统方法忽略的最优”甜点”。这一转变不仅推动了最终产品的性能极限，还显著增强了设计过程的前瞻性和可靠性。

用 AI 做设计

这款加速模型的真正威力体现在它对实际设计问题的应用中。我们通过为一款 GaN 垂直功率器件自动设计场限环（FLR）展示了这一优势。在 PIGNN 框架内，环间距和环宽成为可学习的参数。我们定制了模型的损失函数，通过优化电场均匀性来最大化击穿电压。

经过训练，我们基于 AI 的方法提出了一种优化后的 FLR 结构，击穿电压达 2000 V。随后在 Sentaurus 中的验证高度吻合，证明了该框架作为强大设计加速器、能够收敛于可靠高性能解决方案的能力。

这一过程模仿并大幅加速了一位资深工程师的决策过程。我们的 AI 模型不是盲目地在每次迭代中尝试改动，而是基于物理定律（通过偏微分方程损失）的反馈和性能目标（通过自定义损失）的指引，智能地调整结构参数。



图 2：PIGNN 对 SiC 短路工况的多尺度建模。（a）不同偏置下元胞级温度随时间的变化。（b）元胞级电场分量。（c）（d）整个芯片上的温度、电场分布。（e）封装器件的温度特性。

该模型”理解”改变某一个环的宽度会如何影响整个耗尽区的电场分布，并基于这些变化寻求全局最优。

借助这种方法还可以开展更多样化的设计任务，例如终端结构优化、为减少热耦合而探索最佳元胞布局，乃至探索新型耐压结构。

通用参数提取

除了支持结构设计之外，我们的框架还弥合了通往电路仿真的鸿沟。我们能够对 SiC MOSFET 和 GaN HEMT 进行 SPICE 模型参数提取的全局优化。通过将器件端子视为一张图，并将温度作为全局节点纳入，PIGNN 可以学习到一套统一的 SPICE 参数，在 −40°C 至 125°C 的宽温范围内均有效。

采用这一方法的结果显示：对关键电容曲线实现了出色的非分段拟合，对直流输出特性实现了高度精确的复现。这表明我们因而能够为电路设计者提供直接源于物理的精确模型。

要充分体会这一成功的程度，须知传统的参数提取方法往往依赖对特定工作点的分段拟合，其参数缺乏物理关联。这一弱点导致模型在外推时或在极端条件下出现失准。

我们的框架则有着根本性的不同。它通过图模型将器件内部物理与其外部端子特性统一起来。通过单次全局优化提取的参数集天然反映器件的内在物理机理。因此，所得 SPICE 模型不仅在训练数据范围内精确，在预测从未直接测试过的复杂开关瞬态或热耦合效应时也具有更高的可信度。

稳定且可扩展

对任何优化系统而言，一个关键关切是稳定性：系统能否可靠地收敛到好的解？我们对 PIGNN 框架的稳健性进行了严格测试，分别针对 FLR 设计和 SPICE 提取任务，从 25 组不同的初始参数出发进行评估。令人鼓舞的是，我们的框架每一次都展现出稳健的收敛性，证明其适用于自动化

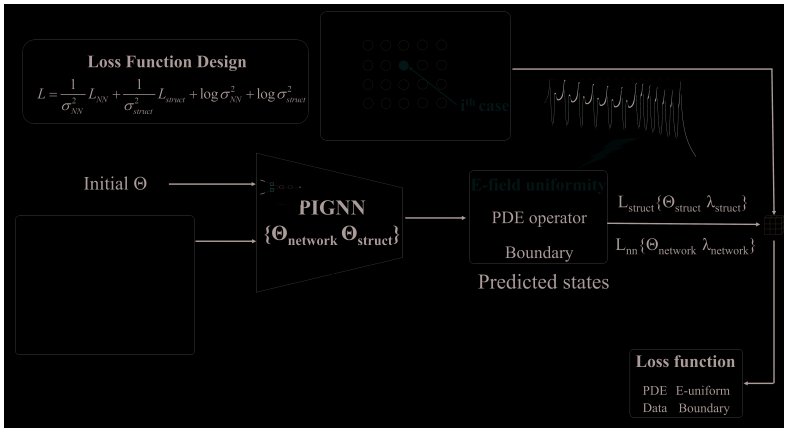


图 3：基于 PIGNN 的器件设计示意图：结构参数被作为可学习变量纳入，并将环的电场均匀性加入损失函数以进行全局优化。

设计流程。更重要的是，传统 FEM 仿真时间随问题规模线性增长，而我们训练好的 PIGNN 模型无论规模大小，推理时间都保持在秒级，使完整芯片级热分析成为可能——这项任务此前被认为不切实际。这种稳定性和可扩展性为构建”数字孪生”和实现”实时健康管理”铺平了道路。可以想象这样一个未来：一个关键功率模块拥有与其物理实体同步更新的、基于 PIGNN 的虚拟模型，系统控制器可以基于实际运行条件，利用这个超快模型实时预测内部热点和应力分布。这种洞察力为前瞻性调节控制策略打开了大门，可延长寿命或预防失效。这标志着可靠性设计从事后验证向实时预测性维护的一次飞跃。

由此开启的未来

我们的工作并不仅仅是展示一个快得惊人的仿真器，它更为功率器件工程提供了一种新方法论。通过将多尺度物理与图神经网络的自适应学习能力相结合，我们创造了一个能大幅加速开发中两个最耗时阶段——器件结构优化与紧凑模型生成——的工具。我们的 AI 加速框架有望缩短设计周期、催生更具创新性的器件架构，并通过使高保真电热分析成为迭代设计过程中切实可行的一环，提高下一代功率电子的可靠性。

展望未来，这一框架的潜力远不止于硅基和宽禁带功率器件。其核心理念——物理方程与图神经网络的融合——可迁移到光子器件、MEMS 传感器乃至生物芯片等多物理耦合系统的设计与建模中。随着芯片集成度持续提高、异质集成技术不断进步，设计复杂度正呈指数级增长。以物理为指引、以 AI 为加速引擎的协同设计范式，正成为应对这一挑战、释放下一代半导体技术全部潜力的关键。我们的工作正是朝着那个未来迈出的坚实一步。

扩展阅读

- Zhang et al. “A Physics-Based Fast Electro-Thermal Coupling Model for Wide-Temperature-Range Junction Temperature Assessment in SiC MOSFETs” ISPSD 513 (2025)
- T. Yu et al. “Resolving the Transient Current of SiC MOSFETs: A Sparse Representation Framework for Disentangling Oxide and Bulk Traps” IEEE Trans. Power Electron. 41 12709 (2026)
- Y. Tian et al. “Monolithic Integration of p-GaN HEMT With Antiparallel Lateral Rectifier to Reduce the Negative Resistance Effect” IEEE Trans. Power Electron. 40 6860 (2025)
- Y. Quan et al. “Online Junction Temperature Monitoring Method for SiC MOSFETs Based on Turn-Off Miller Plateau Voltage” IEEE Trans. Power Electron. 39 15800 (2024)
- T. Liu et al. “A Drain Current Extraction Technique Using Source Parasitic Resistance and Inductance in SiC Power MOSFETs” IEEE Trans. Power Electron. 39 4674 (2024)
- X. Zhou et al. “A Design Method of Partially Interleaved Winding Structure With Low Leakage Inductance for Planar Transformer Application” IEEE Trans. Power Electron. 38 6366 (2023)
- X. Zhou et al. “A High-Speed Dynamic Gate Driver with Low Oscillation for GaN HEMTs” WiPDA Asia 1-5 (2025)
- Z. Mo et al. “An Accurate Leakage Inductance Model for Magnetic Integrated Planar Transformers in LLC Resonant Converters” WiPDA Asia 1-6 (2025)
- J. Feng et al. “Comprehensive Trade-Off Strategy for SiC MOSFETs Using Buried-MOS Configuration” Chip 4 100119 (2024)
- W. Feng et al. “Dynamic Performance Analysis of p-GaN HEMTs With Floating Substrates by Substrate Capacitance Coupling Model” IEEE Trans. Electron Devices 72 2201 (2025)
- D. Wang et al. “Substrate Biasing Effect in a High-Voltage Monolithically-Integrated GaN-on-SOI Half Bridge With Partial Recessed-Gate HEMTs” IEEE Trans. Electron Devices 70 2975 (2023)

飞行时间二次离子质谱（TOF–SIMS）分析技术在半导体芯片材料／缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用　（连载一）

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

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

摘要

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

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

一、引言

近年来，飞行时间二次离子质谱（Time–of–Flight Secondary Ion Mass Spectrometry，TOF–SIMS）分析技术在半导体集成电路芯片材料／缺陷表征及工艺制程优化中得到了广泛的应用 [1–3]。这是因为飞行时间二次离子质谱拥有较高的灵敏度，分析检测下限可以达到百万分之一（ppm）水准及以下，而且可以进行多元素同时检测芯片表面的无机和有机污染物成分 [4]。

TOF–SIMS 技术通过一次离子束轰击样品表面，激发出二次离子，利用飞行时间质量分析器测定二次离子的质荷比，从而获得样品表面元素和分子信息。与传统表面分析技术相比，TOF–SIMS 具有检测深度浅（仅 1–3 个原子层）、可检测包括氢在内的所有元素及同位素、可同时进行质谱、成像和深度剖析分析等独特优势 [5]。

在本文中，详细讨论了 IONTOF M6 型仪器的核心特点、技术指标和标准化分析流程，深入探讨飞行时间二次离子质谱分析技术在半导体集成电路芯片制造中的应用，特别是在材料表征、缺陷分析和芯片制程清洗工艺的优化方面。本文将分享多个典型应用案例：

1. 应用 TOF–SIMS 离子彩色成像技术研究和表征集成电路芯片铝制程中使用的铝合金；

2. 在应用 XPS 分析铝焊盘上“花状”缺陷时发现了一个氟腐蚀导致的未知化合物，应用 TOF–SIMS 分析技术成功表征该未知化合物（$[AlF_6]^{3-}$）；

3. 应用 TOF–SIMS 离子彩色成像技术对芯片清洗工艺进行优化；

4. 应用 PDMS 进行污染分析；

5. 应用 Orbitrap™–SIMS 超高质量分辨技术对 EUV 光刻胶中光致产酸剂（PAG）的分解行为进行研究；

6. 应用 TOF–SIMS 结合 Orbitrap™ 高分辨质谱分析技术，克服了 SF–SIMS 概念中团簇离子的质量干扰问题，实现了对纳米鳍式结构中掺杂剂与杂质的精确无干扰定量表征。

二、TOF–SIMS 分析仪器、分析技术和应用介绍

2.1 仪器概述

TOF–SIMS 系统是目前最前沿的超高分辨率表 / 界面分析仪器之一，德国 IONTOF 公司推出的 M6 型 TOF–SIMS 系统是当前国际上最先进的高性能飞行时间二次离子质谱分析平台之一，新的突破性离子束和质量分析器技术使 M6 成为 SIMS 仪器中的标杆、工业和学术研究的理想工具。本文中我们以德国 IONTOF M6 TOF–SIMS 仪器为例，进行介绍和讨论。通过对一次离子束轰击样品表面产生的二次离子进行质量分析，并行探测所有元素和化合物，基于一次离子束和溅射离子束的配合，TOF–SIMS 还可以各种材料中不同组分的三维空间特征（图 1）。

该设备应用领域极为广泛，涵盖半导体、微电子、薄膜、纳米材料、化学、医药、生物、冶金、汽车等众多行业。搭载 Orbitrap 分析器的 M6 Hybrid SIMS 系统，充分发挥了超高质量分辨率（> 240000）与 TOF–SIMS 高空间分辨率（50 nm）的双重优势，在生物大分子分析、有机杂质精确检出以及新型半导体器件纳米结构表征等方面发挥着不可替代的关键作用。

胜科纳米（苏州）和胜科纳米（新加坡）配备了 IONTOF TOF.SIMS 5 型，在苏州实验室配备了 4 台 IONTOF TOF–SIMS M6 和 1 台 Hybrid SIMS，形成了覆盖东南亚及中国区的完整分析能力（图 2）。

2.2 IONTOF M6 系统的核心优势包括

1. **超高的表面灵敏度：**检测样品表面信息深度仅为样品最表面的 1–3 个原子层（< 1nm），可获取样品最表层的信息，特别适合分析表面污染物和界面问题 [6]。

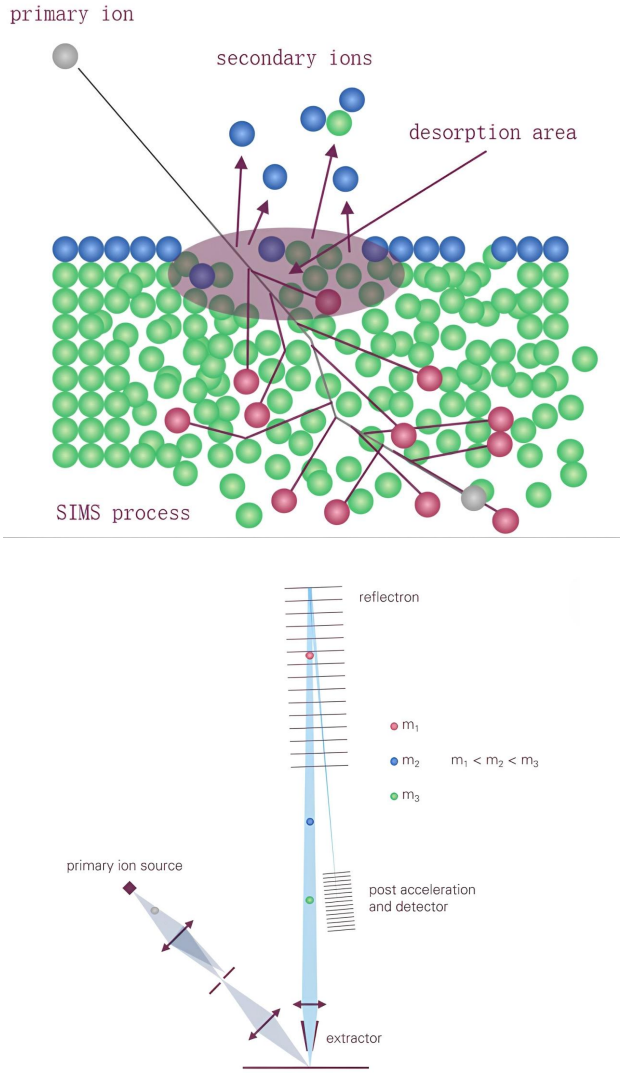


图 1. 上图为二次离子原理示意图，下图为飞行时间二次离子质谱仪原理示意图。



图 2. 左图为 TOF–SIMS M6，右图为 M6 Hybrid SIMS

2.**ppm-ppb 级别的检测限**：对多种元素的检测限可达 ppm 甚至 ppb 级别，特别适合痕量污染物的检测。M6 系统通过提取光学系统和检测系统的革新性设计使传输率提高了三倍，对 B 在 Si 中的检测限可达 1E15 atoms/cm^3。

3.**高质量分辨率**：在低质量区（29u）可达 17,000 以上（FWHM），在高质量区（>200u）可达 26,000 以上（FWHM），能够有效区分质量极为接近的离子峰（如 $^{29}Si+$ 和 $^{28}SiH+$ 等），避免谱峰重叠带来的误判。

4.**宽质量范围（1-12000 amu）**：可检测从氢到有机大分子的全部离子，兼顾无机元素分析和有机污染物鉴定。M6 的 TOF 质量分析器具有线性质量标度，可提供优于 10 ppm 的卓越质量精度。

5.**优异空间分辨能力**：M6 具有小于 50 nm 的最佳横向分辨率。低能量、高束流密度、小束斑的溅射源配合全新的一次离子源 Nanoprobe 50，可以达到＜ 1nm 的深度分辨能力。延迟提取模式可以在确保小于90 nm横向空间分辨能力的同时，大幅提高质量分辨能力高于 10,000。

6.**同时获取谱图、成像和深度信息**：同时获得样品的质谱信息、元素 / 分子分布图像和深度剖析曲线。且可以实现样品成分的三维结构可视化分析。

7.**Hybrid 优势**：与 Q ExactiveTM HF 独特的超精准的鉴定性能相结合，可提供最高的质量分辨率（>240,000），最高的质量准确度（<1 ppm），并同时保留了 M6 的横向 50nm、纵向 1nm 的空间分辨率。具备高端 MS/MS 功能，能够对分子结构进行深度确证，从而为高分辨率分子信息 SIMS 应用开拓了更多的应用场景（图 3）。

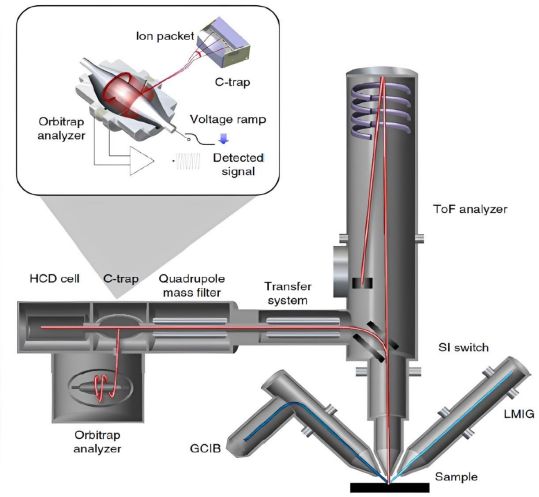


图 3. IONTOF M6 Hybrid SIMS 示意图。

2.3 TOF-SIMS M6 主要功能与应用

1. 表面质谱分析

TOF-SIMS 的表面分析模式是一种对材料最外层表面极为灵敏的检测技术。实现对样品表面最外层 1~3 个单原子层（＜ 1nm 深度）进行真正意义上的无损或近乎无损的表面分析。在信息获取方面，它可同步检出 12000u 范围内的包括有机碎片、无机元素、同位素、分子离子乃至完整的大分子团簇在内的全谱信息，特别适合对未知成分的定性筛查。其高质量分辨率（>26,000 m/Δm）可有效区分质量数极为接近的干扰峰（如 P- 与 30SiH-），确保谱图归属的准确性。能够实现 50kHZ 的全模式扫描，效率高。该模式广泛应用于：

- 半导体晶圆表面无机和有机污染物鉴定（图 4.）
- 芯片焊盘表面污染物的成分分析

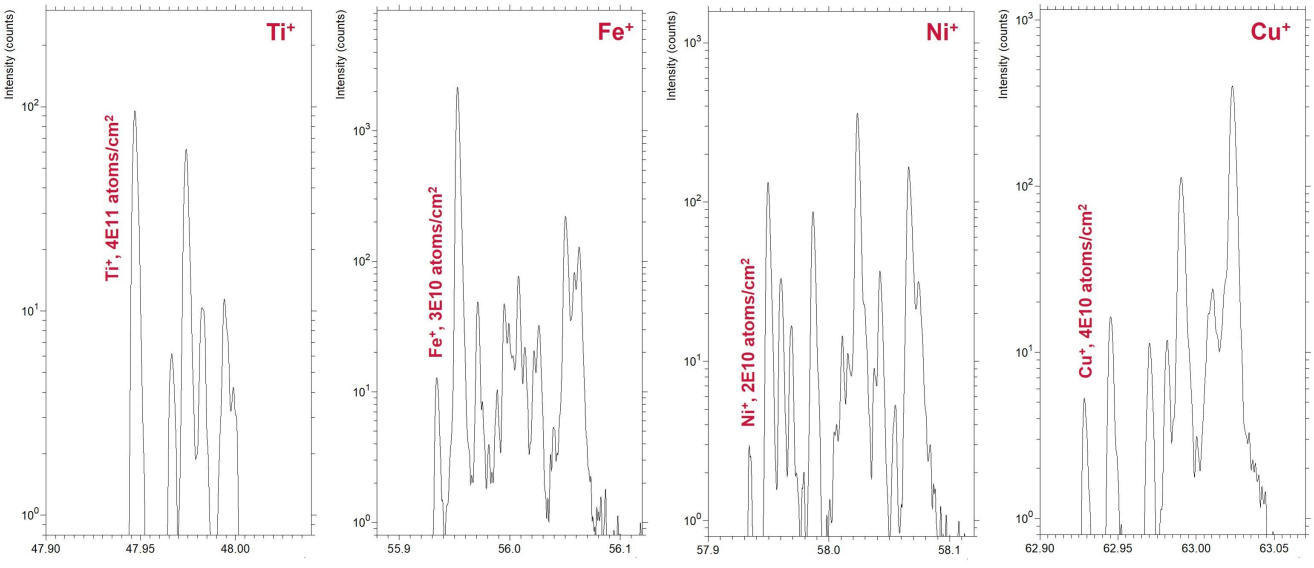


图 4. 半导体表面痕量金属分析。

- 薄膜材料表面化学态和元素组成表征
- 材料表面痕量杂质的定性与半定量分析
- 墨迹交叉分析与纸张表面处理分析
- 镍表面变色区域的成分分析

2．深度三维分析

深度剖析模式采用双束工作模式，即分析离子束（通常为 Bi 源）与溅射离子束（有 Cs+、O2+ 或 Arn+ 气体团簇离子源多种可选）在样品表面同一区域进行时序交错轰击。在信息获取维度上，该模式能够连续记录全元素和所有分子离子强度随溅射时间（即对应深度）的变化曲线，形成深度剖面图，并进行三维重构得到纵向分布和立体分布。低能量、小束斑、大束流的溅射源可以实现快速高效且高精度的剥离，深度分辨率可优于 1 nm，即在理想层状样品中，可清晰分辨厚度仅为数个原子层的界面陡峭度变化。搭配 EDR 功能可以实现低浓度离子掺杂的检测，提高检测限能力。深度 3D 分析主要应用于：

- 半导体掺杂元素的深度分布表征（如离子注入深度剖析）
- 多层薄膜材料各层内和界面成分分析
- 表面污染物的纵向分布和污染层厚度评估
- 有机多层材料（如 OLED 器件）各功能层的成分分布表征（图 5–6）
- 光学器件失效分析
- 生物组织样品或生物材料中有机物的分布

3．化学成像分析

离子成像模式是 TOF–SIMS 将质谱分析能力与高分辨成像相结合的核心功能模块。该模式通过在样品表面进行扫描，将一次离子束聚焦为纳米级束斑，在预设的二维区域内按逐行逐列的方式依次轰击每个像素点系统同步记录该点产生的全部二次离子质谱信息。横向空间分辨率可稳定达到好于 50 nm。延迟提取模式在保证 90nm 以下的横向分辨率的同时，能保证大于 10,000 的质量分辨。

在信息获取维度上，该模式最显著的优势在于一次扫描即可同时生成成百上千张不同化学物种的独立分布图。由于 TOF–SIMS 在全质量范围内同步记录所有离子信号，操作者无需事先指定目标元素，即可在后续数据分析中任意提取任意质荷比（m/z）的离子图像。为失效分析、材料均一性评估和生物组织病理研究提供了多维度的化学空间信息。大面积成像功能通过样品台的步进采集模式，可对最大 9×9 cm^2 的样品进行自动连续成像并拼接，实现宏观样品的高分辨率化学成像，特别适用于整片晶圆表面污染分布、失效定位和均匀性评估。主要应用包括：

- 半导体器件表面缺陷的化学成分定位与表征
- 芯片焊盘表面污染物的分布分析 （图 7.）
- 生物组织切片中特定分子的空间分布成像（如药物胞内分布与毒性研究）
- 聚合物添加物分布分析 （图 8.）
- 汽车油漆缺陷成像分析
- 纳米颗粒在复合材料中的分布状态

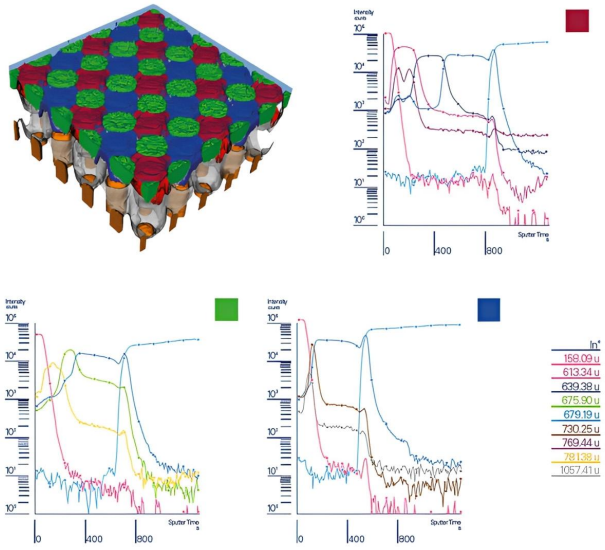


图 5． OLED 器件有机层结构中单个像素点的 TOF–SIMS 深度剖面图。

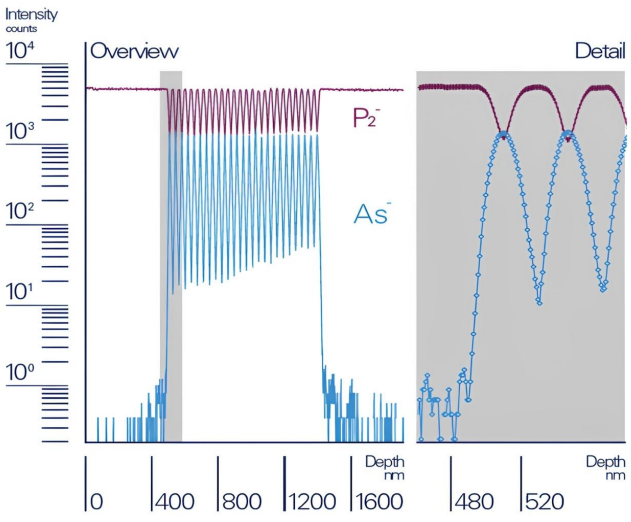


图 6． 埋入式多层结构的深度剖面图。

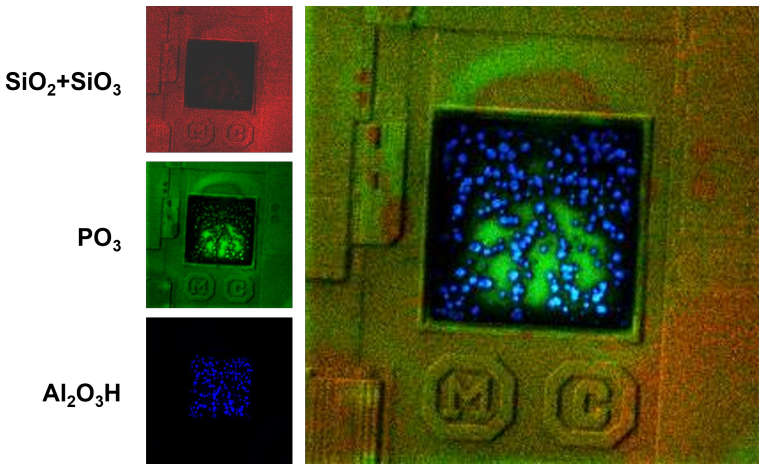


图 7. 芯片上的 TOF–SIMS 污染物分析

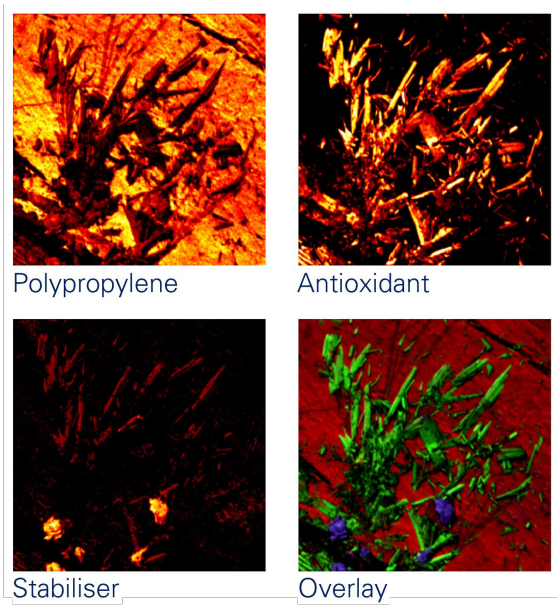


图 8. 树脂中添加剂的不均匀分布 TOF–SIMS 分析。

4. TOF–SIMS 定量分析

TOF–SIMS 由于受到基体效应（即样品中不同成分对二次离子产额的影响）的制约，定量分析相对困难。在实际应用中，通常采用半定量的方式对表面污染和元素含量进行估算。常用的方法是使用与待测样品基体成分相匹配的标准样品进行半定量测试：通过分析已知浓度的标准样品，建立特定元素或分子离子信号强度与浓度之间的相对灵敏度因子（RSF），再将其应用于待测样品的相同分析条件下，从而估算待测成分的相对含量，尤其适用于薄层和微区范围内的定量分析。需要指出的是，半定量结果的准确性依赖于标准样品与待测样品基体的一致性，对于多层结构或复杂基体样品，需结合其他分析手段（如 XPS、AES 等）进行交叉验证。图 9 显示了 B 和 P 元素的定量分析。

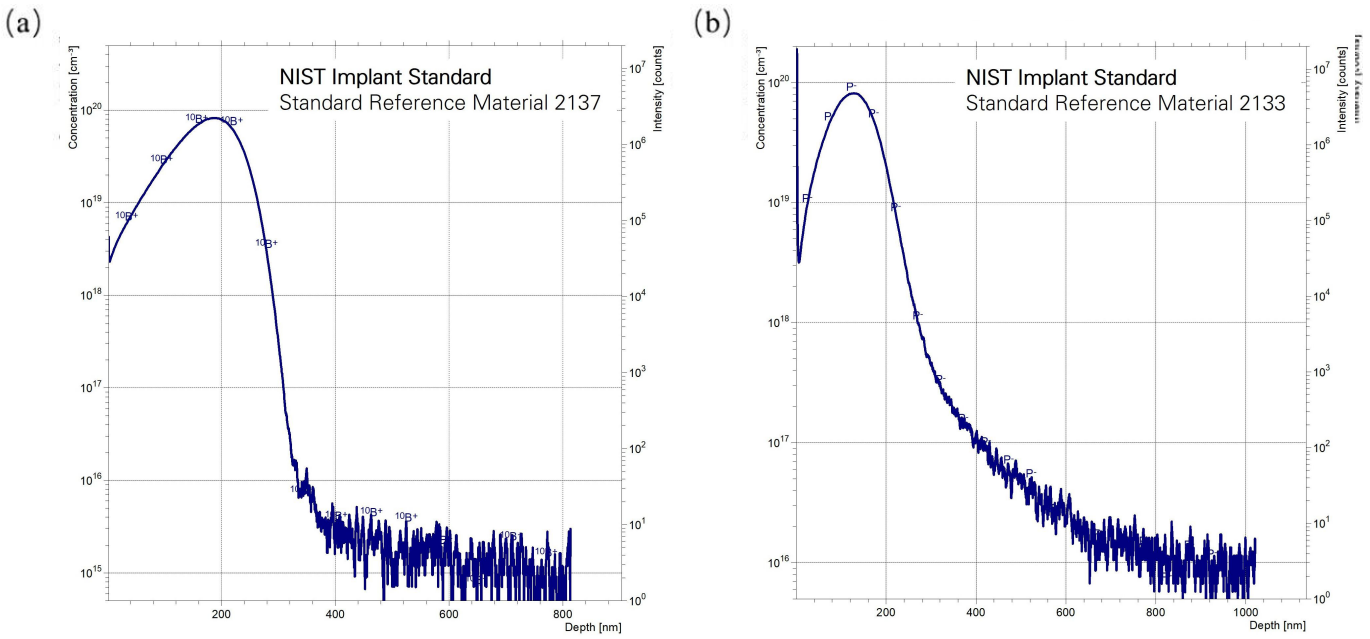


图 9. B 和 P 的 TOF–SIMS 定量分析。

致读者：全文未完，这是第一部分，主要介绍了德国 IONTOF 公司的 TOF-SIMS M6 飞行时间二次离子质谱系统和功能，我们将在第二部分继续介绍该仪器在半导体材料 / 缺陷表征及工艺制程优化中的研究与应用。请看《化合物半导体》10/11 月刊，29–33 页。

蓝宝石基 AlGaN HEMT 的新标杆

电场工程使蓝宝石基 AlGaN HEMT 的关键品质因数提升了三倍

威斯康星大学麦迪逊分校的工程师们宣称，他们制备出了钝化型蓝宝石基 AlGaN HEMT，兼具令人印象深刻的击穿电场和创纪录的巴利加品质因数。

据该团队介绍，他们带场板的 $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$ HEMT 可承受高达 2.33 kV 的电压，巴利加品质因数达 654 MW/cm 。这后一指标由击穿电压的平方除以导通电阻计算得出，是此前蓝宝石基 AlGaN HEMT 最佳值的三倍以上。

工程师们指出，这批最新 HEMT 的性能甚至超过了他们此前在体材料 AlN 上制备的器件。他们将成功归因于精心的电场工程。

在讨论 HEMT 不同衬底方案的利弊时，团队发言人 Khush Gohel 表示："体材料 AlN 衬底可以提供更好的热导率和更高质量的外延结构，但缺乏大直径衬底——6 英寸和 8 英寸——使 AlN 在近期内不适合用于该技术的规模化。在功率半导体这个对成本高度敏感的行业，衬底成本是一个尤其强大的驱动因素，因此就目前而言，AlN 带来的收益还不能抵偿其成本。"

Gohel 及其同事制备器件的过程是：将蓝宝石基 AlN 衬底装入 MOCVD 反应器，沉积带有 n 型掺杂 $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$ 势垒层的 AlGaN 异质结构——该势垒层用于提高二维电子气沟道中的电子浓度（外延结构细节见图）。

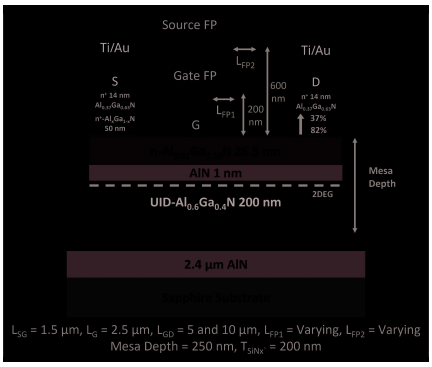
HEMT 的制备包括金属沉积、刻蚀、钝化和场板添加。这些晶体管的栅长为 2 μm，源－栅间距为 1.5 μm，器件宽度为 100 μm。栅－漏间距在 5.5 μm 至 10.3 μm 之间变化，第一块场板的长度在 0.5 μm 至 2.0 μm 之间变化，源场板的尺寸在 1.0 μm 至 2.5 μm 之间变化。

据 Gohel 介绍，该团队 HEMT 的导通态特性正在逼近 GaN 基晶体管的性能，但尚未完全达到——这主要是因为 AlGaN 中电子迁移率较低，以及难以在栅－漏接入区获得较高的平均电场。

对于击穿电压超过 2 kV 的器件，其导通电阻为 8.3 mΩ·cm 。谈到后者时，Gohel 表示："我相信，通过降低沟道方块电阻和改善电场扩展，这一数值还能显著改善——这将使我们能够以更小的栅－漏间距阻断相同的电压。"

在测量击穿电压时，该团队将 HEMT 浸入 Fluorinert FC-40 液体中，以抑制空气过早击穿。更高的击穿电场源于两块场板的加入，据称它们能在栅－漏接入区中扩展电场。

一块带有 1 μm 栅场板和 2.5 μm 源场板的 HEMT 取得了最令人印象深刻的结果——2334 V 的击穿电压和 2.26 MV/cm 的平均击穿电场。



图注：创纪录的蓝宝石基 AlGaN HEMT 采用 SiN 钝化以及源场板和栅场板。

Gohel 表示，由于 $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$ 的临界电场超过 10 MV/cm，栅－漏接入区的电场扩展"显然还有改进空间"。

"至于钝化，我们仍在研究它的作用，以及材料质量和工艺因素的影响，因为除了场板设计之外，可能还有几个因素限制着击穿电场，我们还不完全清楚它们各自的贡献。"

该团队的计划包括进一步降低导通电阻，同时优化栅－漏接入区的电场。

"我们还希望将关注点转向器件的动态性能，而不仅仅是其静态／直流特性。"

参考文献：K. Gohel et al. Appl. Phys. Express 19 066502 (2026)

铽掺杂 AlGaN 瞄准 microLED 显示

利用铽掺杂 AlGaN LED 超稳定的电致发光，有望实现 microLED 全彩单片显示

大阪大学和立命馆大学的研究人员宣称，他们首次展示了铽掺杂 AlGaN 基 LED 的电致发光。

大阪大学的 Shuhei Ichikawa 表示，这一突破可能有助于面向显示应用的单片 microLED 的开发。

Ichikawa 指出，由于传统 microLED 依赖带间跃迁，其发光颜色在外延生长完成后就已固定——而要制造全彩显示屏，要么堆叠多个发光层，要么横向排列子像素。

"这种铽掺杂 AlGaN 发光二极管的一个主要优势是，它能够仅通过铽离子发光产生四种颜色，从而无需传统 microLED 所特有的复杂集成结构。"

该团队的器件制备始于在太阳日酸（Taiyo Nippon Sanso）SR-200 MOCVD 反应器中生长蓝宝石基 AlGaN 异质结构。所制备器件的铽掺杂层分别采用 $Al_{0.36}Ga_{0.64}N$、$Al_{0.53}Ga_{0.47}N$、$Al_{0.59}Ga_{0.41}N$ 和 $Al_{0.62}Ga_{0.38}N$ 四种 AlGaN 组分。

据称，这些器件的大批量生产不会比传统 LED 更具挑战性。"铽金属有机前驱体的熔点在 40–80° C 之间；通过控制源瓶温度，它可以保持液态，并以与传统前驱体相同的方式进行鼓泡输运，" Ichikawa 解释道。

根据二次离子质谱测量，随着铝含量增加，有源区中的铽浓从 2.0×10^{19} cm^{-3} 略微下降至 $1.5\times10^{19}cm^{-3}$。

这些新型发光体的外量子效率（EQE）随铝浓度的增加而提高——$Al_{0.62}Ga_{0.38}$ 的 EQE 比 $Al_{0.36}Ga_{0.64}N$ 高出 10 倍有余。虽然提高铝浓度会劣化电学

特性，但 Tb^{3+} 的发光却强得多，这是因为从合金基质到掺杂离子的能量传递得到了增强。

这些LED由于 $^5D_4{}^7F_J$（J = 3，4，5，6）跃迁，在约 620 nm、580 nm、550 nm 和 490 nm 处产生了极其稳定的电致发光峰。

要实现铽掺杂 LED 的单色发光 – 这是制造全彩显示屏的关键要求 – 一种方案是在器件上加装带通滤波器。然而，这被认为不切实际，因为它会限制 EQE。Ichikawa 认为，理想的解决方案是控制分支比：“幸运的是，所有四种可见光颜色的发射都受铽离子同一激发态——$^5D_4$ 态——弛豫过程的支配。”

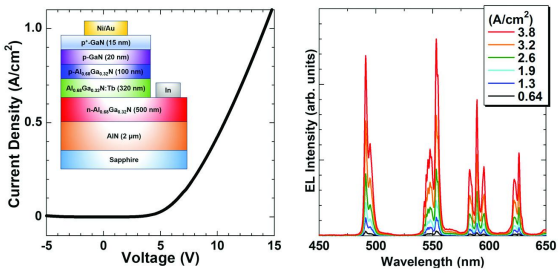
Ichikawa 论证道，通过缩短辐射寿命，完全有可能让某一种发光颜色占据主导。这可以通过将特定发射波长与涉及等离激元共振或谐振腔的架构相耦合来实现。“已知在铽掺杂玻璃这类材料中，绿色发光会成为主导成分。”

此外，还必须努力提高 EQE。目前这批最新器件的 EQE 值低于 0.01%。

“我们团队已经用铕掺杂 GaN 红光 LED 实现了接近 10% 的峰值 EQE；同样，我们预计通过优化晶体生长条件，铽掺杂 AlGaN 的 EQE 也会显著提升，”Ichikawa 说。

他指出，在铕掺杂 GaN 的研究中，突破来自与氧原子的共掺杂。“我相信，开发使用不同杂质的共掺杂技术，对铽掺杂 AlGaN 而言同样将是至关重要的因素。

参考文献：S. Yamazaki et al. Appl. Phys. Lett. 128 261112 (2026)



图注：加入铽掺杂剂后，AlGaN LED 在约 620 nm、580 nm、550 nm 和 490 nm 附近产生尖锐的电致发光峰。

前驱体调制量子阱提升 UVA LED 效率

380 nm 发光的 LED 兼具低效率下垂与超过 40% 的效率

加州大学圣塔芭芭拉分校（UCSB）的研究人员通过生长前驱体调制量子阱，提升了 UVA LED 的性能。

该团队的低效率下垂器件发光波长为 380 nm，效率超过 40%，可支持多个应用领域的固态光源开发，包括 i 线光刻、工业固化和量子技术。LED 为现有的紫外发光光源汞灯提供了一个极具吸引力的替代方案，因为 LED 体积更小、能效更高、工作寿命更长。

在 UVA 波段（即 315 nm 至 400 nm 的光谱范围）发光的 LED 有一个弱点：其能带结构中 InGaN 量子阱的铟组分相对较低，通常为 5%。因此，其导带与价带之间的带阶比蓝光 LED 更小，导致载流子限制能力较差。令这一问题雪上加霜的是，UVA LED 比其蓝光”表亲”对界面质量更为敏感。

为同时解决这两个问题，UCSB 团队借鉴了此前在 AlGaN LED 方面的工作。“我们发现，量子阱生长升温过程中的生长停顿会显著影响器件性能，尽管当时我们还没有完全理解其背后的机理，”团队发言人 Yifan Yao 说。“这促使我们更加系统地研究前驱体调制在 UVA LED 中的作用。”

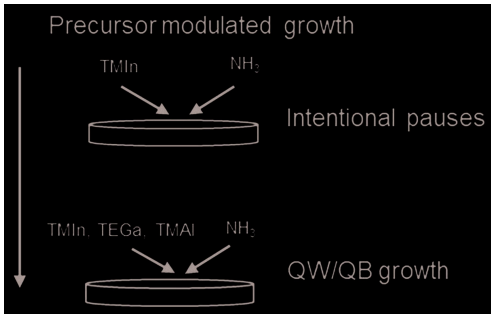
Yao 及其同事制备器件的过程是：将图形化蓝宝石基 GaN 衬底装入 MOCVD 反应腔，生长的外延结构包括：3 μm 厚的 n 型 GaN 缓冲层、200 nm 厚的 n 型 $Al_{0.06}Ga_{0.94}N$ 层、包含两个量子阱的有源区、15 nm 厚的 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 电子阻挡层、300 nm 厚的 p 型 $Al_{0.06}Ga_{0.94}$ 层，以及 15 nm 厚的 p 型接触层。

当采用传统方法生长有源区时，各层是连续沉积的，中间没有长时间的停顿。但在这项工作中，研究人员刻意设置了生长停顿。在量子阱与势垒的生长之间，插入一段 8 分钟的停顿，期间处于氮气氛围下，仅通入氨气和少量铟源。

“这一时间是针对最佳器件性能和可重复性优化出来的，”Yao 说。“我们也尝试过更短的停顿，比如 30 秒或 1 分钟，但这对器件性能的影响不那么明显。”

在片上电致发光测量中，采用前驱体调制生长有源区的 UVA LED，其输出功率是传统生长参考器件的三倍。这款功率更强的器件还抑制了宽带的缺陷发光，并且由于载流子限制的改善，发射线宽也更窄。

为研究有源区内的组分起伏，该团队采用了扫描透射电子显微镜结合能量色散 X 射线谱。结果发现在量子阱 – 势垒过渡处形成了一层富铝的界面层，厚度约 2 nm。



图注：对有源区的生长进行调制可改善 UVA LED 的性能。

该团队还制备了边长从 300 μm 到 20 μm 不等的顶发射 LED。侧壁采用介质层钝化。

这些器件表现出随尺寸变化的效率下垂，尺寸越小，下垂越轻，这是因为局部发热和电流聚集都减少了。

根据占空比为 1% 的脉冲测量，封装后的 40 μm 器件实现了超过 41% 的峰值外量子效率，并在高达 200 A/cm 的电流密度下仍保持 40% 的效率。

Yao 表示，这些器件的效率和光功率已经足以满足许多应用的典型需求，包括光刻、固化和光催化。

最近，该团队已将其前驱体调制技术应用于激光二极管的生长。这项工作即将发表。

参考文献：Y. Yao et al. Appl. Phys. Lett. 128 261109 (2026)Y

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
Riber		www.riber.com	IFC
Evatec AG		evatecnet.com/cn	5
AIXTRON		www.aixtron.com	BC

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

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

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

Chief Operating Officer
Sukhi Bhadal
sukhi bhadal@angelbc.com

销售人员 Sales Offices

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

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

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

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

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

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

Europe（欧洲）
Shehzad Munshi, sm@angelbcl.co.uk
Tel: +44 (0)1923 690215

Jackie Cannon
Jackie.cannon@angelbc.com
Tel: +44 (0) 1923 690205



全球知名权威杂志
Compound Semiconductor的中国版

化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

《化合物半导体》

双月刊，每期发行覆盖30，000名专业读者，并在全国重点产业活动赠阅。

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

化合物半导体先进技术及应用大会

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



www.compoundsemiconductorchina.net

ACT INTERNATIONAL

AIXTRON

THE G10 SERIES



G10-SiC

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

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

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