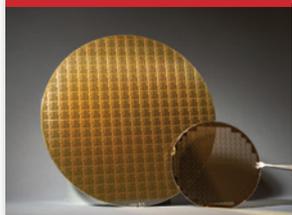


化合物半导体

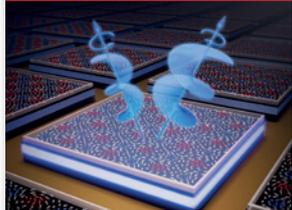
CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2025年 2/3月

迎接异质革命



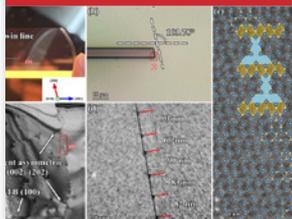
利用拓扑LED实现手性发射



人工智能推动数据中心能耗增加



氧化镓单晶与外延中的“准对称性”与“晶格巧合”



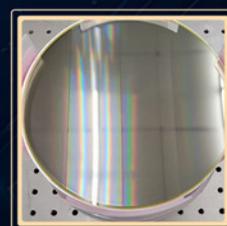
IPrecision 华卓精科

激光退火设备

Laser Anneal Equipment



8寸SiC 激光退火应用



北京华卓精科科技股份有限公司



地址：北京市北京经济技术开发区科创十街19号院
电话 / Tel: 010-62780929
网址 / Web: www.u-precision.com
邮箱 / E-mail: sales@u-precision.com

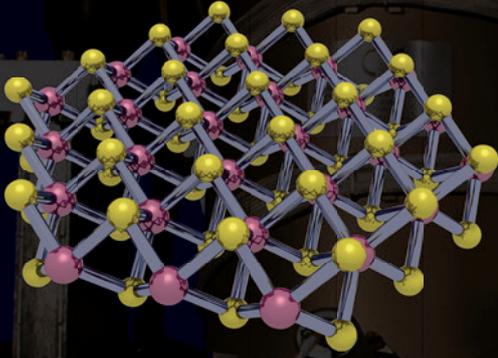
ACT INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

www.compoundsemiconductorchina.net

RIBER's COMPACT 21 SERIES



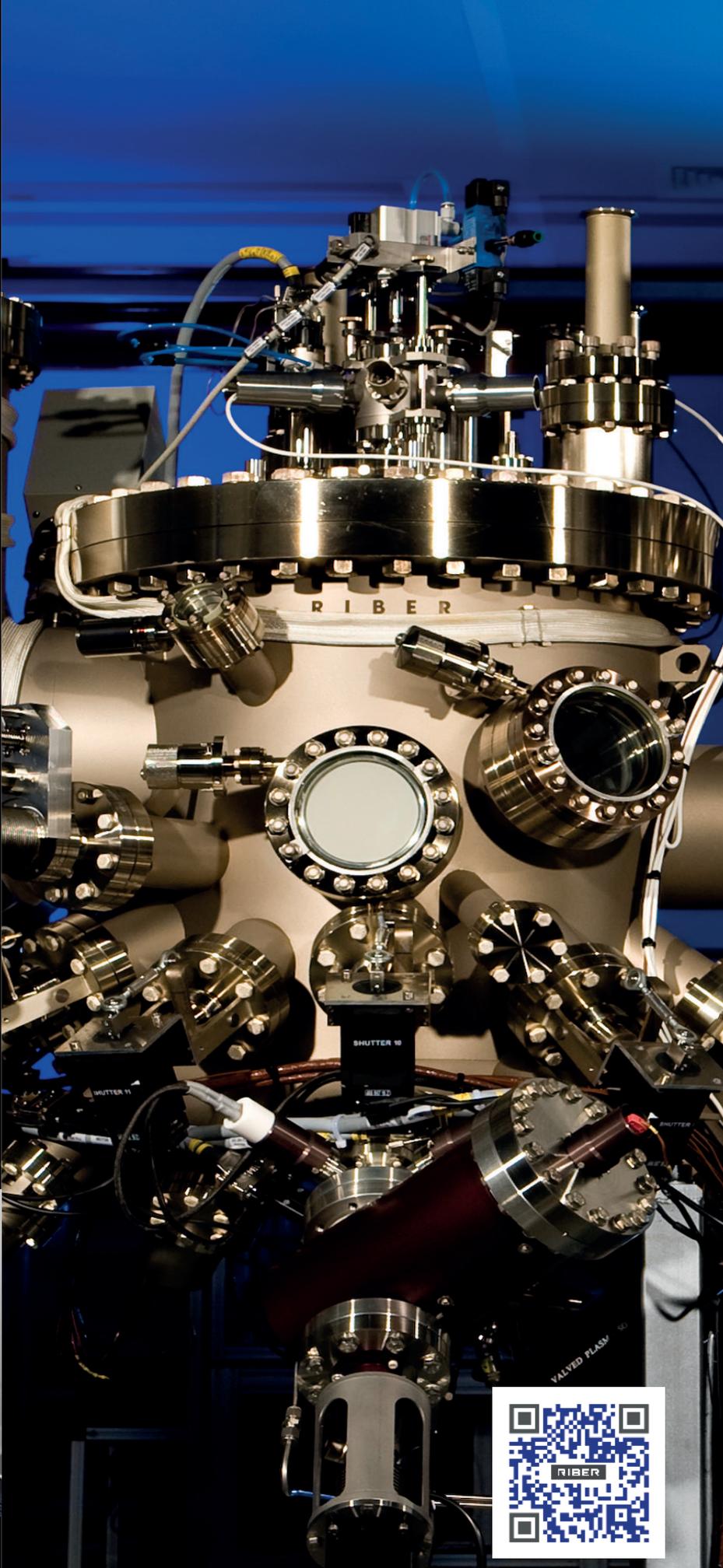
扩展您的研究 领域

小巧灵活

易于使用

高度集成

低使用成本



RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

业界引领的用于产线计量方案的 自动化原子力显微镜

展位号: E6馆 6455 



Park NX-Wafer

Park NX-Wafer是业界领先的半导体及相关制造业自动化AFM计量系统。
该系统能提供晶圆制造厂检查和分析、裸晶圆和衬底的自动缺陷检测以及CMP轮廓测量。

- 低噪声原子力轮廓仪,用于更精确的CMP轮廓测量
- 亚埃级表面粗糙度测量具有极高的精度和极长的探针使用寿命
- 用于缺陷成像和分析的全自动AFM解决方案
- 全自动系统,包括自动探针更换、机器人晶片搬运
- 4, 6, 8, 12寸全自动化测量



Watch the video

封面故事 Cover Story

33 迎接异质革命 Say hello to the heterogeneous revolution

自超大规模集成电路 (VLSI) 硅 CMOS 技术诞生以来, 其射频 (RF) 和毫米波性能在不断追求更小的栅极尺寸和更高器件密度的过程中一直处于次要地位。填补这一空白的是多种化合物半导体, 例如砷化镓 (GaAs)、氮化镓 (GaN) 和磷化铟 (InP), 它们在更高的频率下提供高增益和高输出功率。得益于这些器件, 人们得以构建固态相控阵雷达、5G/6G 基站和量子计算机。然而, 这些应用在生态系统中面临着诸多挑战, 许多人可能认为“异质”材料是一个问题, 它会减缓并限制其采用。与硅 CMOS 相比, 化合物半导体器件的制造时间通常要长一倍, 单位面积的成本要高出 5 到 10 倍, 因为它们缺乏高量产带来的基本经济优势。一个吸引人的解决方案是异质集成。

- Christopher Maxey, Justin Kim, Dave Hodge, Mark Soler, Bennett Coy, Dan Green, James Buckwalter 和 Florian Herrault 来自 PseudolithC 公司

编者话 Editor's Note

04 碳化硅衬底产业的淘汰赛中的创新之道: PVT与液相法的集成创新 The Path of Innovation in the Elimination Contest of the SiC Substrate Industry: Collaborative Innovation of PVT and Solution Growth Method

- 陆敏

业界动态 Industry

06 投资69亿港元 香港首座8英寸碳化硅晶圆厂签约 Investment of HK\$6.9 billion: Hong Kong's first 8-inch silicon carbide wafer plant signed a contract

06 Voyant 推出芯片级FMCW激光雷达传感器 Voyant launches FMCW LiDAR sensor on a chip

07 通过太空验证, 中国首款高压抗辐射碳化硅功率器件研制成功 China's first high-voltage, radiation-resistant silicon carbide (SiC) power device has been successfully developed and validated through space tests

47 士兰集宏SiC生产线项目预计Q1封顶 The SiC production line project of Silan Jihong is expected to be topped off in Q1

57 西班牙获得欧洲批准, 将向Diamond Foundry Europe新厂提供8100万欧元的补贴 Spain gains European approval for €81m subsidy for Diamond Foundry Europe's new fab

宽禁带半导体国家工程研究中心专栏 WBS Column

08 氧化镓功率器件辐射研究进展 Research Progress on Radiation of Gallium Oxide Power Devices

- 李园¹, 汤丹宁¹, 蒋伟博¹, 牛晨阳¹, 李心悦¹, 陆小力¹, 郑雪峰¹, 马晓华¹, 赵元², 郝跃¹

1宽禁带半导体国家工程研究中心, 西安电子科技大学集成电路学部, 西安, 710071

2中国航天科技集团第九研究院, 北京, 100094

高端访谈 Top interview

18 展望 2025 looking forward to 2025

关于雅时国际商讯 (ACT International)

ACT 雅时国际传媒集团成立于1998年, 在高增长的中国市场上为众多高科技领域提供服务。通过其产品系列, 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

技术 Technology

- 38 高功率激光器：量子阱还是量子点？
High-power lasers: wells or dots?
- Yongkun Sin, Aerospace Corporation
- 41 氧化镓单晶与外延中的“准对称性”与“晶格巧合”
Highly Coherent Grain Boundaries Induced by Local Pseudomirror Symmetry in β -Ga₂O₃
- 严宇超-博士研究生 (浙江大学), 金竹-科创百人研究员 (浙江大学杭州国际科创中心), 邓天琪-科创百人研究员 (浙江大学杭州国际科创中心,) 张辉 (浙江大学教授/杭州镓仁半导体有限公司董事长), 杨德仁-院士 (浙江大学)
- 44 利用拓扑LED实现手性发射
Realising chiral emission with topological LEDs
- 康俊勇, 厦门大学
- 48 人工智能推动数据中心能耗增加
AI drives data centre energy consumption increase
- 51 检视GaN MOS-HEMT中的陷阱
Scrutinising traps in GaN MOS-HEMTs
- Barry O'Sullivan, IMEC

科技前沿 Research Review

- 56 高场电子器件非侵入式、亚微米级精确电场检测
Non-invasive, Sub-micrometer-level precise electric field detection
- 58 实现基于ScAlMgO₄衬底的红色发光二极管
Realising red LEDs on ScAlMgO₄ substrates
- 59 SiC MOSFETs: 了解等离子体氮化带来的好处
SiC MOSFETs: Understanding the benefits of plasma nitridation
- 60 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, 台湾鹏正光电创始人, 佛山照明LED事业部创始人

专注于化合物半导体、硅材料、集成电路 (IC) 微机电系统 (MEMS) 等领域

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

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

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



全自动槽式湿法制程设备



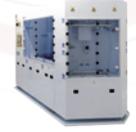
单片湿法制程设备



CDS化学品供给系统



全自动晶圆倒角机



钟罩清洗机



辅助设备



Marangoni干燥机

北京华林嘉业科技有限公司

Beijing CGB Technology Co., Ltd

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

(华东/海外区) 责任人: 139 1127 1076
(华南区) 责任人: 130 5158 6635
(西南/西北区) 责任人: 193 2206 6460
(华中区) 责任人: 180 1536 7016
(京津鲁) 责任人: 130 5158 6631
(大项目总部) 责任人: 139 1029 7918
MEMS事业部 责任人: 180 1239 7806
(技术支持) 郭生刚: 139 1127 9276



网站

公众号

碳化硅衬底产业的淘汰赛中的创新之道：PVT 与液相法的集成创新

2024 年 Wolfspeed 临阵换帅及世纪金光破产清算，给碳化硅衬底产业敲响了沉重而响亮的“警钟”。前者作为世界碳化硅衬底巨头因亏损难以扭转而选择更换 CEO 来进行战略调整，如选择了关闭工厂、挂牌出售、暂停建设新工厂与列出重组计划。后者作为曾经的国内碳化硅衬底龙头因资不抵债，法院裁定启动了破产程序，对公司资产进行清查、核实。截至目前，国内仍有近百家涉足碳化硅衬底制造的企业，设计乃至有效产能已远超市场需求，2024 年全球实际需求折合 6 英寸 150 万片，2024 年国内有效产能高达 255 万片，2024 年行业已进入击穿成本的低价竞争阶段，行业内卷的程度可见一斑。去年以来，碳化硅衬底产业面临了艰难挑战，产业竞争开始进入“淘汰赛”阶段，除了上述 2 家知名公司的案例外，还有很多企业宣告减产、出售、退出乃至破产。如 Qorvo 将碳化硅结型场效应晶体管 (SiC JFET) 技术业务及其子公司 United Silicon Carbide 卖给了安森美。2025 年 1 月 17 日，碳化硅大厂罗姆宣布了一项重大人事变动，公司高级常务执行官 Katsumi Higashi 将接替总裁 Isao Matsumoto 之职，以应对严峻的经营挑战，公司预计全年业绩将出现 60 亿日元的亏损，这是自 2012 年以来公司首次出现年度亏损。随着碳化硅衬底产能的增加，PVT 技术进步却较为缓慢，产品的竞争力仍显不足。缺乏成本品质优势或产品良率较低的企业，很难维持稳定的现金流。预计今年，碳化硅衬底领域将继续出现更多无法支撑的企业。这一领域是半导体制造扩张最为迅猛的赛道，调整势在必行。那么，碳化硅衬底产业如何应对这场即将到来的淘汰赛呢？如何通过技术创新实现差异化优势或高性价比产品而不下“牌桌”呢？这是摆在我们碳化硅衬底材料从业者面前的“生死之间”。

目前供需失衡，拓展需求及应用场景，即做大蛋糕是行业的必须。但是目前最大应用场景的电动汽车恰恰步伐放缓，尤其是特朗普宣布退出《巴黎协定》，主导美国大力发展传统燃油汽车和传统石油天然气工业，势必会进一步放缓电动汽车市场的容量增速，同时光伏风能储能充电应用场景也会一并放缓，这一联动效应也要引起我们足够的警惕。近期疯狂的 DeepSeek 与 GPT 之争引出了一个大家的共识—AI 将会是接下来一个长期的科技创新及战略竞争的一个方向，与之相应的 AI 数据中心必将是碳化硅又一个大体量应用场景，当然数据中心电压及功率等级范围较宽，有低压、中压和高压，碳化硅和氮化镓都会有用武之地。另外一个即将放量的应用场景，也不容我们忽视，就是白色家电，这也正是为什么格力要布局并进军碳化硅赛道的原因所在。从细分赛道来看，目前主要是 6 英寸产能严重过剩，8 英寸仍然供不应求，2025 年大部分时间仍会保持供不应求状态，估计 2-3 年后 8 英寸将会重演 6 英寸目前的“恶性内卷的价格战”。

需求提升只是给大家更多的想象空间，或者更长的发展成长生命周期，这对大家都一样，不是你的核心竞争力。因此你的核心竞争力还在于你的极致性价比能力，归根结底在于你的创新能力。近年来液相法技术发展迅速，已逐渐成为公认的新一代碳化硅长晶技术，其独特的低温近平衡态生长模式，使得晶体缺陷密度相对 PVT 大幅降低近一个数量级，不过目前生长速度及晶体厚度还不及 PVT，故品质优势明显，但成本稍有逊色。若液相法给 PVT 提供高品质籽晶，将大幅提升 PVT 晶体的品质，进而大幅提升 PVT 车规衬底的良率，从而大幅降低 PVT 衬底的成本。另外液相法也能生产 p 型导电衬底这一差异化产品，以拓展碳化硅在高压应用场景的增量市场，因此当下 PVT 与液相法联手的集成创新将是碳化硅衬底产业最佳应对之道，是在这场“生死淘汰赛”中绝处逢生的“创新之道”，也是在内卷危机中的“制胜之道”。



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

北京 Beijing
Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai
Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen
Tel: 86 755 25988573
Fax: 86 755 25988567

武汉 Wuhan
Tel: 86 27 82201291

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

ACT
INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

© 2025 版权所有 翻印必究

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



国际代理

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

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

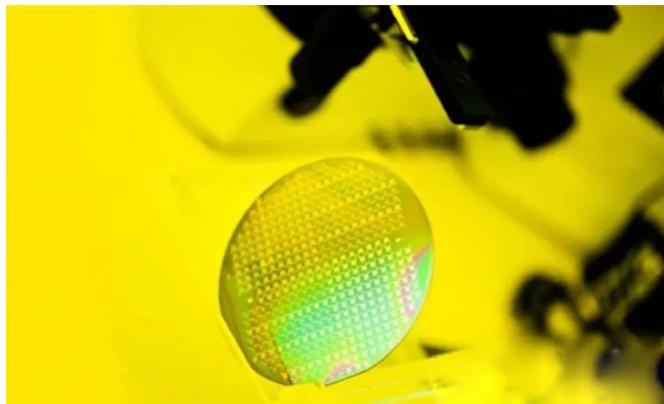
投资 69 亿港元 香港首座 8 英寸碳化硅晶圆厂签约

1月15日消息，1月13日，据杰平方半导体官微消息，杰立方半导体（香港）有限公司（以下简称：杰立方半导体）1月10日与香港工业总会（FHKI）正式签署了合作备忘录（MOU）。

双方将展开深入合作，携手促进产业、技术、贸易等领域的深度交流，为杰立方半导体在香港打造首座晶圆厂提供支持，共同推动项目快速落地和量产。

据介绍，杰立方半导体晶圆厂项目预计总投资约 69 亿港元（约 65 亿人民币），将建立香港首座第三代半导体碳化硅 8 英寸晶圆厂，计划于 2026 年正式投产。达产后年产 24 万片晶圆，将能满足 150 万辆新能源车的生产需求，预计年产值将超过 110 亿港元。

公开信息显示，杰立方半导体成立于 2023 年 10 月，是



杰平方半导体的全资子公司。杰平方半导体聚焦车载芯片研发设计，主要面向电能转换、通信等领域，提供高性能碳化硅芯片、车载以太网芯片等产品。CS。

Voyant 推出芯片级 FMCW 激光雷达传感器

位于美国纽约州长岛市的光探测与测距（LiDAR）解决方案供应商 Voyant Photonics 日前宣布推出 CARBON 调频连续波（FMCW）激光雷达传感器，据称这是首款真正有效且经济实惠的固态光束控制芯片级激光雷达。

这款低成本 4D 激光雷达传感器专为彻底改变工业、机器人和安全应用中的机器感知能力而开发，其高度集成的硅光子芯片只有指甲盖大小，具备高分辨率、毫米级精度、物体探测和静态 / 动态分割功能，最远可达 200 米，据称成本仅为现有一流激光雷达制造商的一小部分。

Voyant 表示，通过将多个光学元件集成到激光雷达光子集成电路（PIC）上，Voyant 实现了这种性能和经济性。

即时识别移动物体

与飞时测距（ToF）激光雷达不同，FMCW 激光雷达在测量传统的距离、反射率和强度的基础上，还能测量每一点的瞬时速度。这就提供了“4D”能力：以无与伦比的精确度提供高保真点云数据，为应用提供真正的实时环境视图，每秒可达 20 次。瞬时速度还能使车辆具备自我定位功能，这在没有全球定位系统的环境中极为高效，并有望取代高端惯性测量单元（IMU）。

全天候工作，不受反光物体的影响

据称，CARBON 在尘、雾、雨和雪环境下的工作性能

优于同类最佳 ToF 激光雷达，并且不受阳光的干扰——尤其是在日出和日落时分。该技术还不受高反射物体的影响，特别是反光物体（如路牌、交通锥和安全背心），而传统的 ToF 激光雷达会因光晕而受到蒙蔽。

CARBON 的尺寸紧凑，尽管其重量仅为 250 克，但它非常坚固耐用，具有 IP67 级防尘防水功能，并具有很强的抗冲击性和抗震性。此外，FMCW 激光技术所需的低功率可确保该技术对人眼无害。

高分辨率、广角和远距

CARBON 的分辨率较高，达到每帧 128 条线，可提供相机级分辨率，再加上即时速度测量功能，可对 200 米外的移动物体进行高精度探测和跟踪。视场垂直方向为 45°，水平方向为 90°。最大可探测径向速度为 63 米 / 秒（140 英里 / 小时）。该传感器的软件定义激光雷达（SDL）允许用户在传感器工作过程中修改帧率并调整视场，以便在需要的时间和地点聚焦于目标区域，同时使任何小型物体都能被探测和分类。

Voyant 在消费电子展（CES 2025）上展示了 CARBON，展位为 #3175，位于拉斯维加斯会展中心（LVCC）西厅车辆 - 技术和先进出行展区。

CARBON 激光雷达现已接受订购，单台售价为 1490 美元，批量定价已出，保修期为两年。CS。

通过太空验证，中国首款高压抗辐射碳化硅功率器件研制成功

被誉为电力电子系统“心脏”的功率器件，是实现电能变换和控制的核心，也是国计民生领域最为基础、应用最为广泛的元器件之一，其核心技术研发和创新发展备受关注。

来自中国科学院微电子研究所的最新消息说，该所刘新宇、汤益丹团队和中国科学院空间应用工程与技术中心刘彦民团队等开展合作，共同研制出首款国产高压抗辐射碳化硅(SiC)功率器件及其电源系统，已成功通过太空第一阶段验证并实现其在电源系统中的在轨应用。

刘新宇表示，合作团队共同开展的碳化硅载荷，已于2024年11月搭乘天舟八号货运飞船飞向太空，开启了中国空间站轨道的科学试验之旅。

通过1个多月的在轨加电试验，碳化硅载荷测试数据正常，高压400伏碳化硅功率器件在轨试验与应用验证顺利完成，在电源系统中静态、动态参数符合预期。

在汤益丹看来，碳化硅载荷本次搭载第一阶段任务目前已顺利完成，成功实现首款国产高压400伏抗辐射碳化硅功率器件空间环境适应性验证及其在电源系统中的在轨应用验

证，这标志着在以“克”为计量的空间载荷需求下，碳化硅功率器件将成为大幅度提升空间电源效率的优选方案，有望牵引空间电源系统实现升级换代。

刘新宇指出，中国自主研发成功首款国产高压400伏抗辐射碳化硅功率器件，并通过空间验证并实现其在电源系统中的在轨应用，这将为未来中国探月工程、载人登月、深空探测等领域提供可供选择的新一代功率器件，为中国建设世界空间科学强国提供有力支撑。

他认为，随着硅基功率器件的性能逼近极限，以碳化硅为代表的第三代半导体材料，以禁带宽度大、击穿场强高、饱和电子速度快等独特优势，可大幅提高空间电源的传输功率和能源转换效率，简化散热设备，降低发射成本或增加装载容量，功率—体积比提高近5倍，满足空间电源系统高效、小型化和轻量化需求，对新一代航天技术的发展有着重要战略意义。

因此，世界各国均将碳化硅作为下一代功率器件竞争的制高点，制定相应计划，大力发展。OSc



Large stock of Molybdenum and Tantalum

All parts made according to drawings in these materials

MICRO-MECHANICS ON STRATEGIC MATERIALS

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







RABOUTET SA

Avenue Louis Armand • B.P. 31 • 74301 Cluses Cedex FRANCE

T. +33 (0)4 50 98 15 18 • info@raboutet.fr

www.raboutet.fr

氧化镓功率器件辐射研究进展

作者：李园¹，汤丹宁¹，蒋伟博¹，牛晨阳¹，李心悦¹，陆小力¹，郑雪峰¹，马晓华¹，赵元富²，郝跃¹

1. 宽禁带半导体国家工程研究中心，西安电子科技大学集成电路学部，西安，710071，

2. 中国航天科技集团第九研究院，北京，100094

摘要：航空航天行业正处于重大技术进步的风口浪尖，因为它采用了新兴基于（超）宽禁带半导体器件的功率转换的解决方案，以满足宇航电力电子应用中效率提高、重量减轻和热性能不断升级的需求。一方面， $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 较大的禁带宽度和较快的材料器件发展速度使其在高效、高功率密度电力电子应用中崭露头角；另一方面，作为在极端宇航环境工作的器件，其可靠性评估和应用仍然面临着诸多未知和挑战。本论文依次对航天电力电子对（超）宽禁带半导体器件的迫切需求、氧化镓功率器件辐射效应国内外研究进展进行了总结，并针对氧化镓器件在航天电力电子应用中面临的挑战提出了研究建议。

一、航天电力电子对（超）宽禁带半导体器件的迫切需求

随着航天技术的飞速发展，对航天器电力电子系统的性能要求日益严苛^[1]。传统硅基功率器件在效率、功率密度、工作温度等方面已逐渐逼近其物理极限，难以满足未来航天任务的需求。（超）宽禁带半导体材料^[2]，如碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）和氧化镓（ Ga_2O_3 ），因其优异的材料特性，为航天电力电子技术的发展带来了新的机遇^[3]。

- **高效率、高功率密度：**航天器能源宝贵，电力电子系统的高效、高功率密度运行至关重要。一方面，（超）宽禁带半导体器件具有更低的导通电阻和开关损耗，能够实现更高频率的开关操作，有利于减小无源器件的体积和重量^[4]；另一方面，其较高的击穿电场强允许器件工作在更高电压下，以上优点可共同减小航天器电力电子系统的体积和重量、优化提高功率密度和动态响应速度^[5]，从而为有限载荷的系统提供更可靠、持久的续航。
- **高温工作能力：**太空环境温度变化剧烈，传统硅基器件在高温下性能急剧下降^[6]。（超）宽禁带半导体材料温度稳定性较硅材料更好^[7]，基于（超）宽禁带半导体材料

的器件有望能够在更广的温度范围下稳定工作，以提高宇航电力电子系统的可靠性和环境适应性。

- **抗辐射能力：**太空环境中存在大量的高能粒子和射线辐射，会对电子器件造成辐射损伤^[8]。理想的（超）宽禁带半导体材料本身具有较强的抗辐射能力^[9,10]，基于（超）宽禁带半导体材料的器件理论上具有较强的辐射效应鲁棒性，这对提高宇航电力电子系统的寿命和可靠性意义巨大。

目前，（超）宽禁带半导体器件已在一些航天任务中得到初步应用，并展现出显著优势。例如：

- **卫星电源系统：**采用 SiC MOSFET 的电源转换器，效率可达到 98% 以上^[11]，显著降低了卫星系统的能耗^[12]。
- **深空探测器：**采用 GaN HEMT 的射频功率放大器，能够实现更高的输出功率和效率，满足深空通信的需求^[13,14]。
- **电推进系统：**采用 SiC 功率器件的电推进系统，能够实现更高的推力和比冲^[15,16]，满足未来深空探测任务的需求。

二、氧化镓功率器件辐射效应国内外研究进展

氧化镓材料较大的禁带宽度在实现高功率密

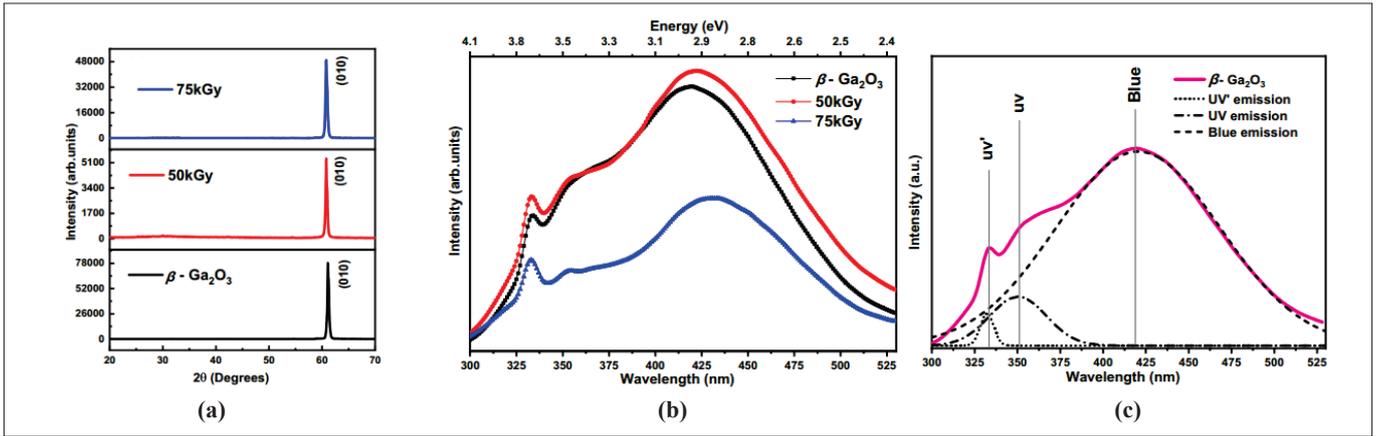


图1: 氧化镓UID单晶总剂量辐射前后材料特性 (a) XRD测试结果; (b) PL测试结果; (c) PL测试结果分峰。

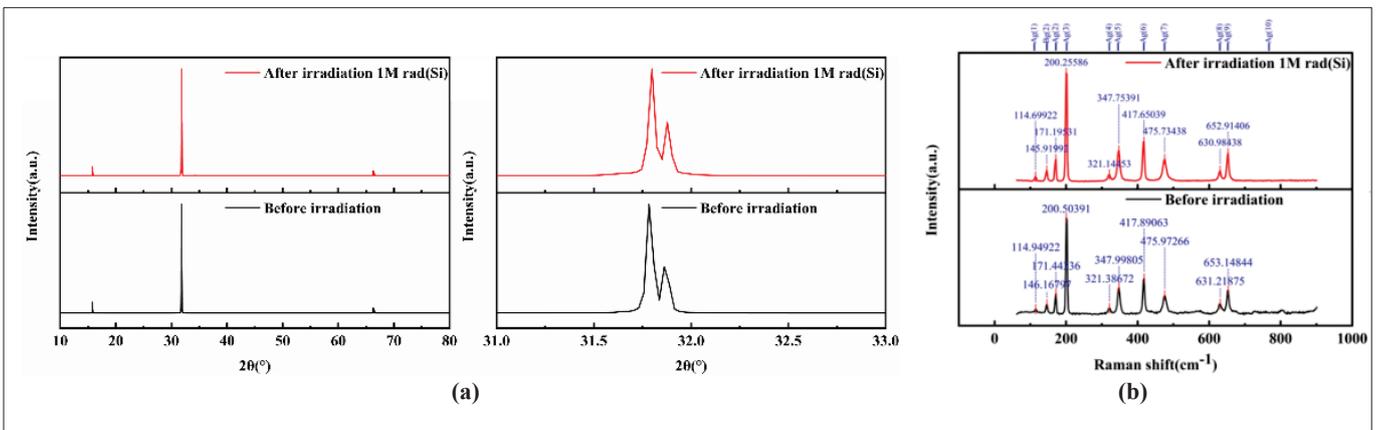


图2: HVPE生长的 β -Ga₂O₃材料总剂量辐射前后材料特性 (a) XRD测试结果; (b) Raman测试结果; (c) XPS测试结果。

度电力电子系统方面的优势显著；另一方面，其极端环境应用仍然面临着诸多未知和挑战。空间伽马射线和质子辐射所产生的电离效应和位移效应等，对化合物半导体的影响尤为显著。 β -Ga₂O₃ 材料及其器件的辐射效应和相关机制的知识，不仅可以构建辐射环境和器件退化定量关系的重要数据库，还可为化合物器件的正向辐射加固设计提供重要指导。

• 氧化镓功率器件总剂量辐射国内外研究进展

迄今为止，国内外关于总伽马射线辐射氧化镓材料及其器件总剂量效应机理深入分析的相关研究报道较为有限，主要集中于氧化镓材料、二极管和 MOSFET 在不同剂量下的材料特性和电学特性退化的实验研究。

1) 国内外氧化镓材料总剂量效应研究进展及现状

2023 年, Akshita 等人用 50kGy 和 75kGy 两种不同剂量的钴 -60 源辐射 UID 单晶氧化镓材料片, 分析辐射前后材料片的性能, 如图 1。伽马照射后, 可见光范围内的光吸收发生了改变。辐射样品的光学带隙降低到 4.04 eV。在光致发光过程中, 由于伽马射线引起的缺陷, 蓝色发射强度降低, 并转向可见光区域。该研究并未就辐射引起的具体缺陷展开讨论 [17]。

2024 年, 李园等人采用 ⁶⁰Co 源对 HVPE 生长的 β -Ga₂O₃ 材料进行了总剂量为 1M rad(Si) 的伽马射线辐射, 分析辐射

前后材料片的变化, 如图 2。伽马辐射后, β -Ga₂O₃ 材料的晶体结构、晶体质量、分子振动未发生明显变化, 但伽马射线电离效应诱导了 β -Ga₂O₃ 材料中 Ga⁺ 向 Ga³⁺ 的转变, 并在材料中产生了类氧空位缺陷能级 [18]。

2) 国内外氧化镓二极管总剂量效应研究进展及现状

2019 年, Yang 等人研究了光子能量分别为 1.33 和

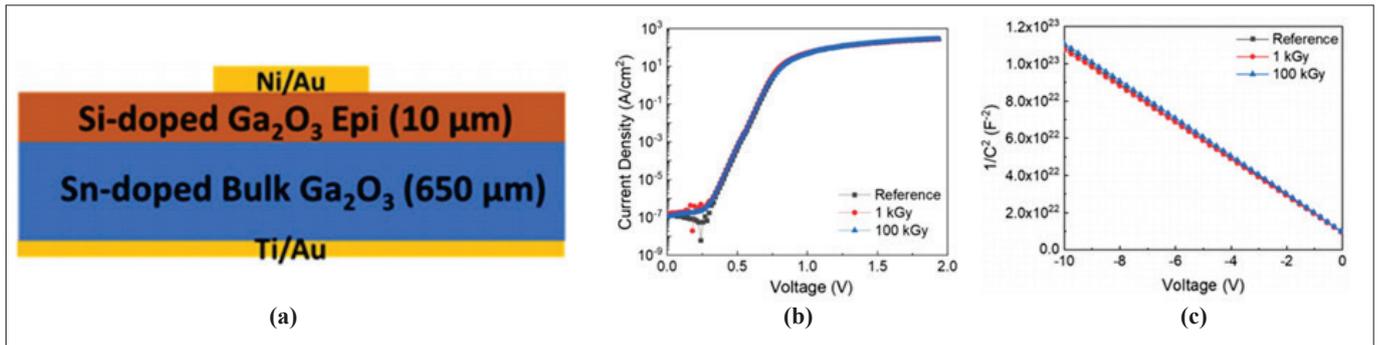


图3: (a) β -Ga₂O₃肖特基二极管器件结构; (b) β -Ga₂O₃肖特基二极管辐射前后正向IV特性曲线; (c) β -Ga₂O₃肖特基二极管载流子浓度计算曲线。

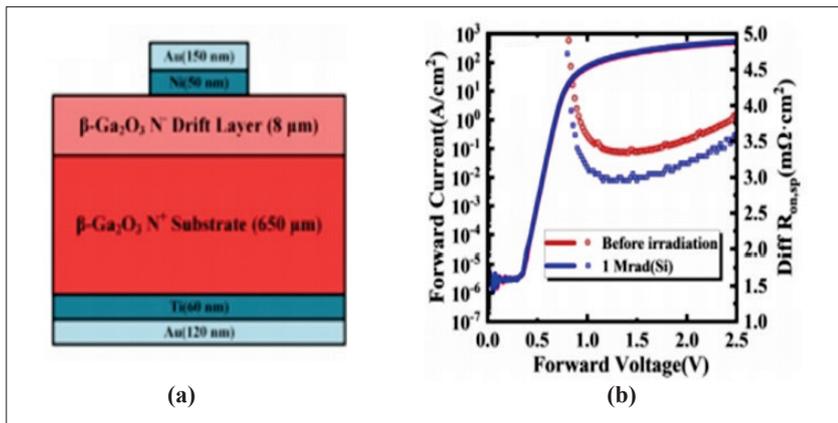


图4: (a) β -Ga₂O₃肖特基二极管器件结构; (b) β -Ga₂O₃肖特基二极管辐射前后正向IV特性曲线。

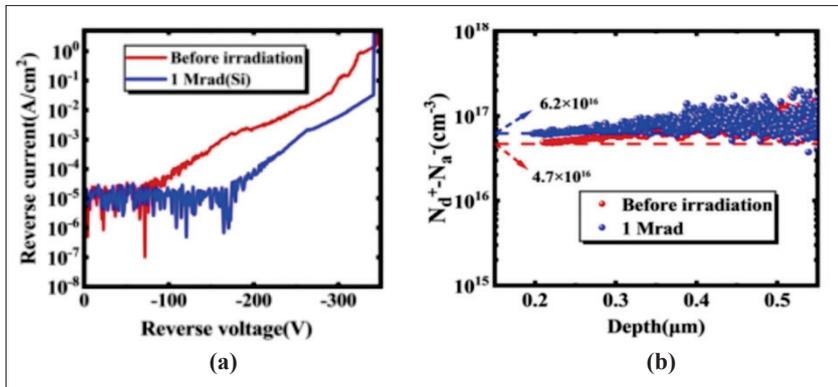


图5: (a) β -Ga₂O₃肖特基二极管辐射前后反向BV特性曲线; (b) β -Ga₂O₃肖特基二极管辐射前后载流子浓度计算结果。

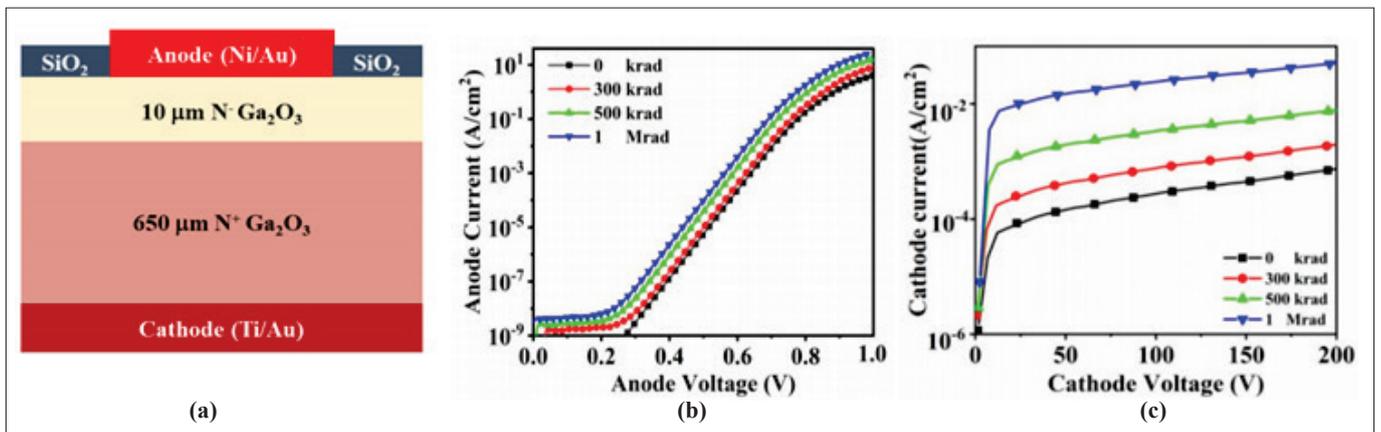


图6: (a) β -Ga₂O₃肖特基二极管器件结构; (b) β -Ga₂O₃肖特基二极管辐射前后正向IV特性曲线; (c) β -Ga₂O₃肖特基二极管辐射前后反向BV特性曲线。

1.17MeV 的 ⁶⁰Co 源对外延漂移区为 10 μ m 的 β -Ga₂O₃ 肖特基势垒二极管 (SBD) 器件性能的影响, 如图 3。结果表明, 总伽马射线辐射后二极管理想因子增加、肖特基势垒高度减小、导通电阻不变、载流子浓度减小、反向击穿电压影响较小^[19]。该研究并未就辐射引起的器件退化机理展开讨论。

2023 年, Liu 等人研究了 ⁶⁰Co 辐射源, 总剂量约 1 Mrad (Si) 对 Au/Ni/ β -Ga₂O₃ SBD 的辐射影响, 如图 4 和图 5。结果表明, 总剂量辐射后, 肖特基势垒高度从 1.08 增加到 1.12eV, 理想因子 n 从 1.07 下降到 1.02, 导通电阻 $R_{on, sp}$ 从 3.34 减少到 2.95m Ω ·cm²; 反向击穿电压不受伽马辐射的影响, 其值在照射前后几乎没有变化此外; CV 测试表明伽马射线辐射后器件载流子浓度略有增加^[20]。

2024 年, Fu 等人研究了伽马射线照射对 β -Ga₂O₃ 垂直肖特基势垒二极管的影响, 如图 6。随着辐射剂量的增加, 辐射损伤变得更加严重。通过直流、CV 和低频噪声 (L_{FN}) 的测试, 分析了总剂量辐射的退化行为和机理, 测试结果表明, 总剂量电离效应引入了界面缺陷。总剂量辐射后, 常温下理想因子从 1.172 减小到

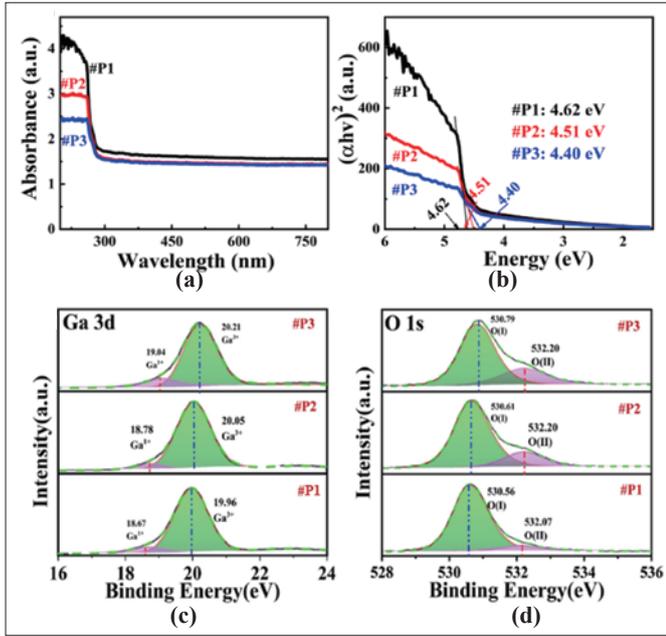


图10: (a) 80MeV辐射前后吸收光谱原始数据; (b) 80MeV辐射前后禁带宽度; (c) 辐射前后XPS Ga3d谱峰; (d) 辐射前后XPS O1s谱峰。

谱 (XPS) 和紫外光电子能谱 (UPS) 的测量结果表明: 质子辐射后, 镓空位略增加, 氧空位增加明显, 这导致 β - Ga_2O_3 的禁带宽度减小^[25]。

2024年, 李园等人开展了5MeV质子辐射对 β - Ga_2O_3 HVPE材料结构与缺陷位移效应的实验研究, 深入探讨了缺陷演变的微观机制, 如图11。研究结果表明, 5MeV质子辐射对氧化镓材料的晶相结构影响甚微, 但镓氧链分子的振动整体减弱, 这归因于Si-O、Ga-O键的氧原子离位, 产生大量氧空位。X射线光电子能谱(XPS)分析显示, 部分 Ga^{3+} 离子被还原为 Ga^+ 离子。同时, 材料的禁带宽度呈现明显减小趋势^[26]。

▼ 图12: (a) β - Ga_2O_3 在富Ga和富O条件下的缺陷形成能; (b) InGa_2O_3 在富Ga和富O条件下的缺陷形成能; (c) 用PBE和HSE06泛函计算 Ga_2O_3 的电子能带结构; (d) Ga_2O_3 的有效能带结构。

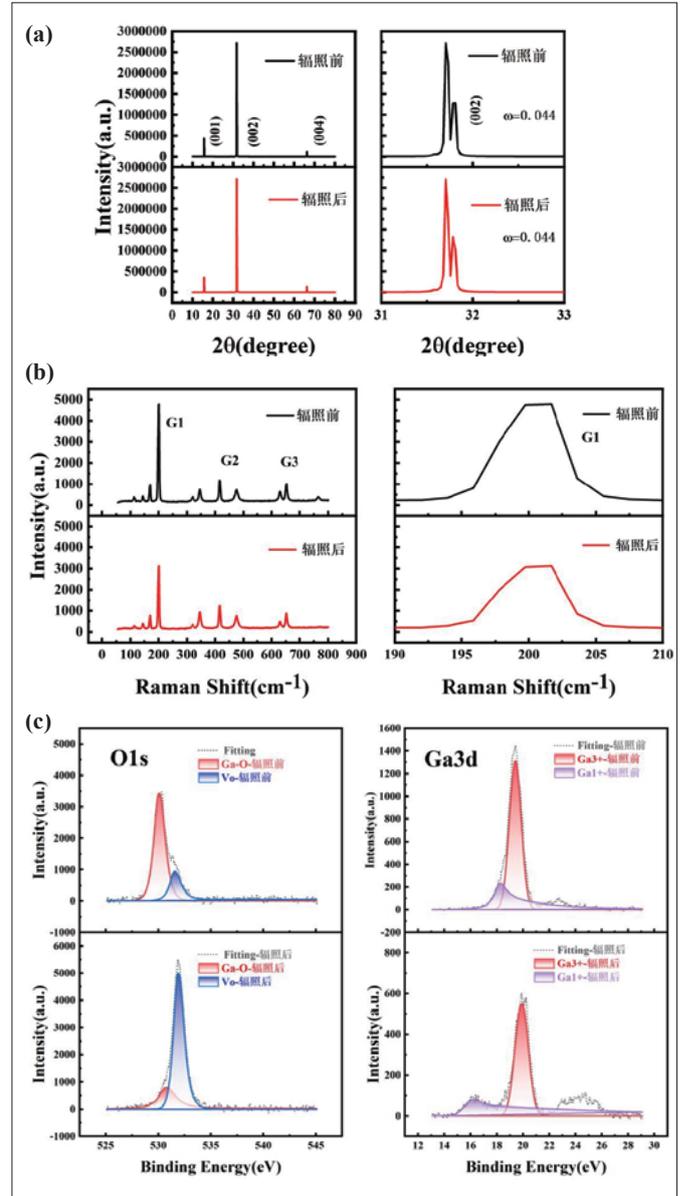
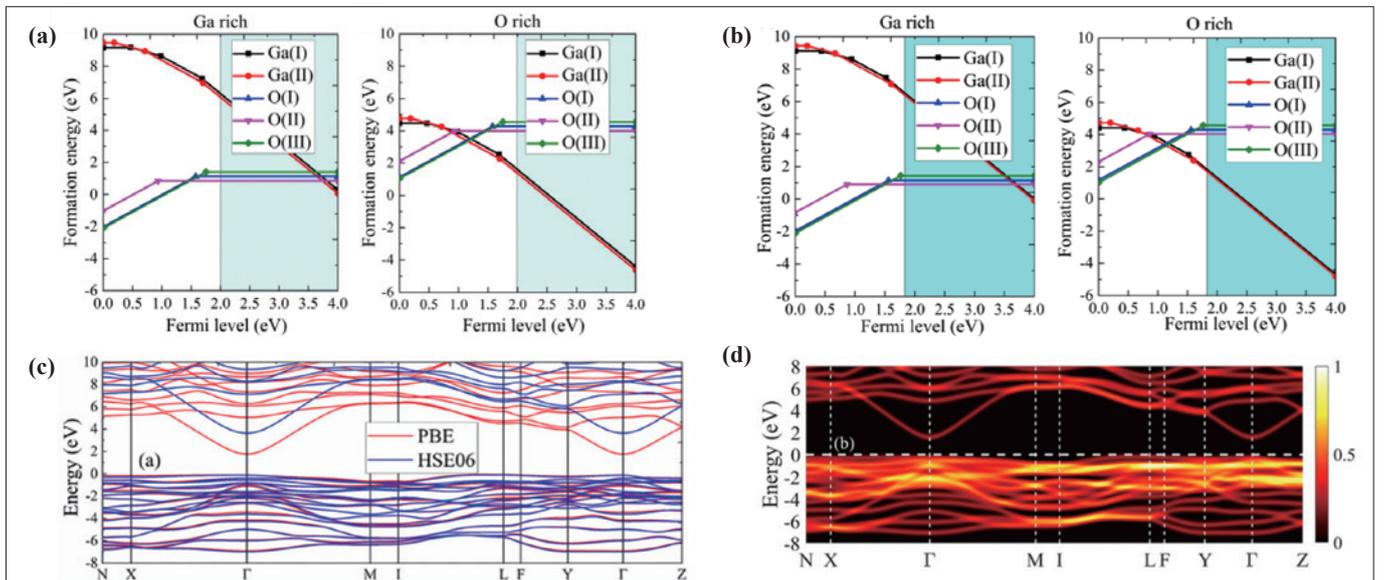


图11: HVPE生长的 β - Ga_2O_3 材料质子辐射前后材料特性 (a) XRD测试结果; (b) Raman测试结果; (c) XPS测试结果。



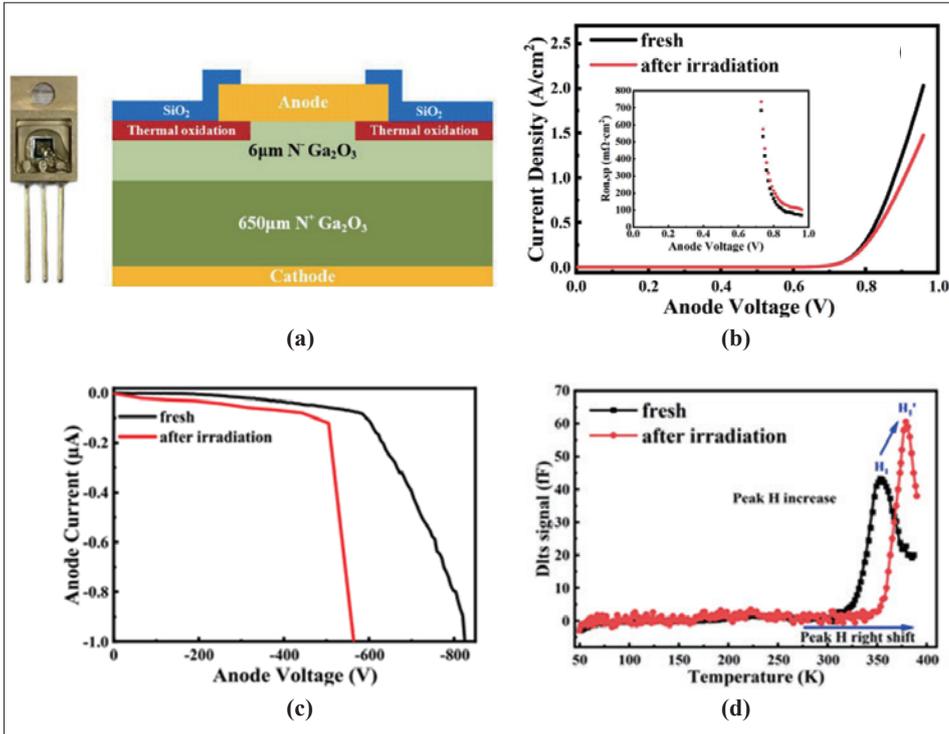


图13: (a) β -Ga₂O₃ SBD器件结构及实物图; (b) 辐射前后正向IV测试结果; (c) 辐射前后反向BV测试结果; (d) 辐射前后DLTS测试结果。

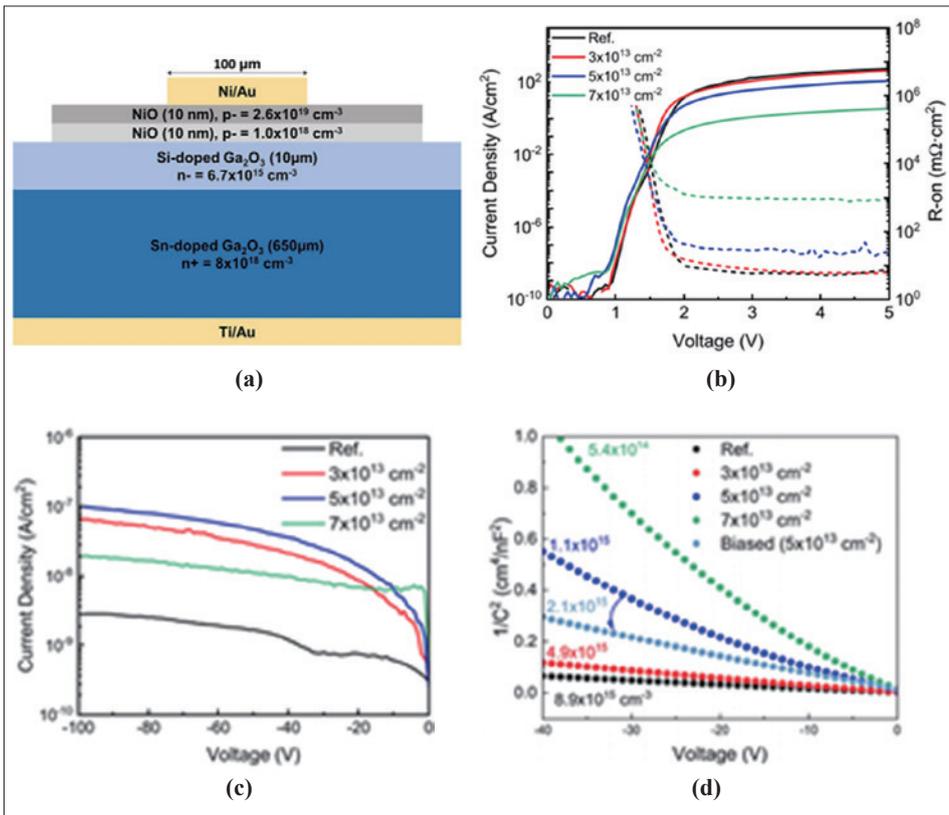


图14: (a) NiO/ β -Ga₂O₃异质结二极管器件结构图; (b) 辐射前后正向IV测试结果; (c) 辐射前后反向BV测试结果; (d) 辐射前后CV测试结果

2024年, Zhang等人从缺陷形成能的第一性原理计算角度讨论了 β -Ga₂O₃材料辐射耐受性, 如图12。研究表明, 对于理想氧化镓单晶, 镓空位为深层类p型缺陷, 氧空位为类n型缺陷; 当同时存在镓空位和氧空位时, 他们的补偿作用会导致表征缺陷的吸收峰减弱。此外, 该工作还研究了In掺杂对 β -Ga₂O₃缺陷形成能的影响, 相较于单晶 β -Ga₂O₃, In掺杂更易形成镓空位, 而非氧空位^[27]。

2) 国内外质子辐射氧化镓二极管位移损伤效应研究进展及现状

2024年, Li等人研究了300 MeV质子辐射对 β -Ga₂O₃ SBD电学性能的影响。在 1×10^{13} p/cm²的300 MeV的质子辐射条件下, SBD器件的正向电流密度和击穿电压显著降低, 如图13。通过C-V测试表明质子辐射后漂移层载流子浓度显著降低, 并利用DLTS发现质子辐射后产生的体缺陷为深能级(约1.345 eV)缺陷, 该工作将正向电流的变化归因于质子辐射引入的外延层体缺陷; 反向电流增加原因归因于辐射后复合电流的增加^[28]。该研究并未就辐射诱导的具体缺陷类型引起的器件退化机理展开讨论, 对质子抗辐射加固设计的借鉴有限。

2024年, Li等人采用17 MeV质子辐射垂直NiO/ β -Ga₂O₃异质结二极管。结果表明: 随着质子注量的增加, 二极管正向电流密度随之降低, 反向泄漏电流也随之增加; 质子的位移损伤降低了二极管漂移区的载流子浓度, Ga₂O₃层内载流子的去除率在120~150 cm⁻¹之间, 如图14^[29]。该研究并未就辐射诱导的具体缺陷类型引起的器件退化机理展开讨论, 对质子抗辐射加固设计的借鉴有限。

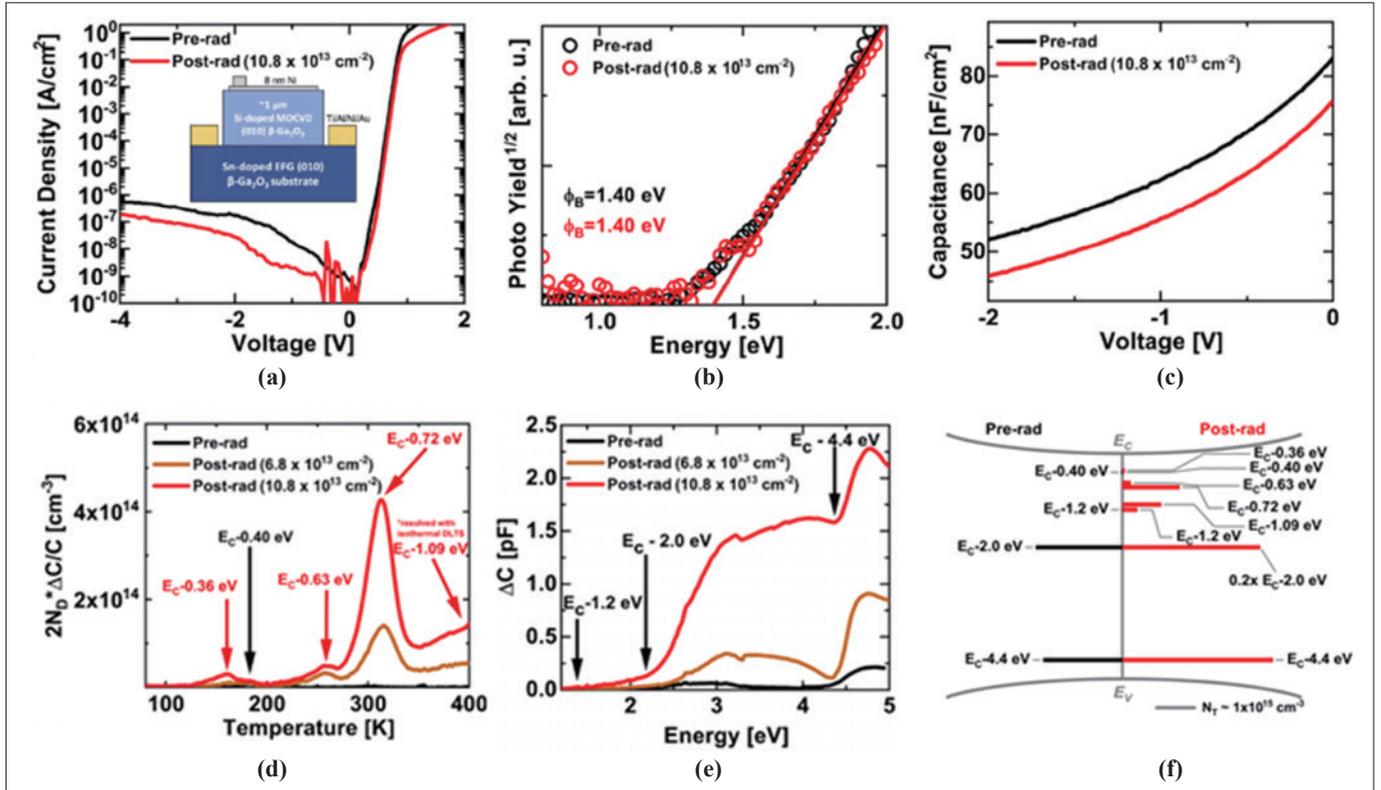


图15: (a) β -Ga₂O₃ SBD器件结构图及IV测试；(b) 辐射前后肖特基势垒结果；(c) 辐射前后CV测试结果；(d) 辐射前后DLTS测试结果；(e) 辐射前后SSPC测试结果；(f) 氧化镓缺陷示意图。

2024年, McGlone等人研究了1.8 MeV质子辐射对MOCVD生长(010) β -Ga₂O₃ SBD的影响,如图15,结果表明:经过 10.8×10^{13} p/cm²的辐射剂量后,器件正向电流密度下降,反向泄漏电流下降,载流子浓度呈现下降的趋势;通过DLTS和稳态光电容(SSPC)光谱测试表明了 E_C -0.72 eV以及 E_C -2.0 eV下的深能级 V_{Ga} 相关缺陷,导致质子辐射后载流子浓度的下降^[30]。该研究并未就辐射诱导的具体缺陷类型引起的器件退化机理展开讨论,对质子抗辐射加固设计的借鉴有限。

3) 国内外质子辐射氧化镓MOSFET位移损伤效应研究进展及现状

2017年, Yang等人研究了10MeV质子辐射对 β -Ga₂O₃纳米带背栅场效应管电学性能的影响,如图16和图17。随着辐射剂量从 1×10^{13} p/cm²增加至 2×10^{13} p/cm²,器件的输

出电流降低,阈值电压正漂,器件开关比无明显退化,场迁移率在质子辐射后下降了73%。实验表明在室温下,10MeV质子辐射引入的缺陷几乎无法修复,而在500°C下热退火后,器件的电性能测试表明,氧化镓MOSFET器件中的辐射诱导损伤得到了显著恢复^[31]。该研究仅进行了辐射前后的正向特性实验研究,氧化镓MOSFET位移损伤效应退化机理尚不清晰。

2022-2024年,西安电子科技大学郝跃院士团队系统开展了氧化镓材料的电离效应和位移效应辐射研究。研究工作以四维矩阵:氧化镓材料-器件;辐射电离效应-辐射位移效应为研究载体,通过:1)基于Heyd-Scuseria-Ermzerhof混合杂交泛函第一性原理计算的大型氧化镓超胞缺陷拟合建模的修正项技术;2)基于变电压扫描速率IV测试的氧空位表征分析技术;3)基于陷阱峰值谱法的氧化镓MOSFET缺

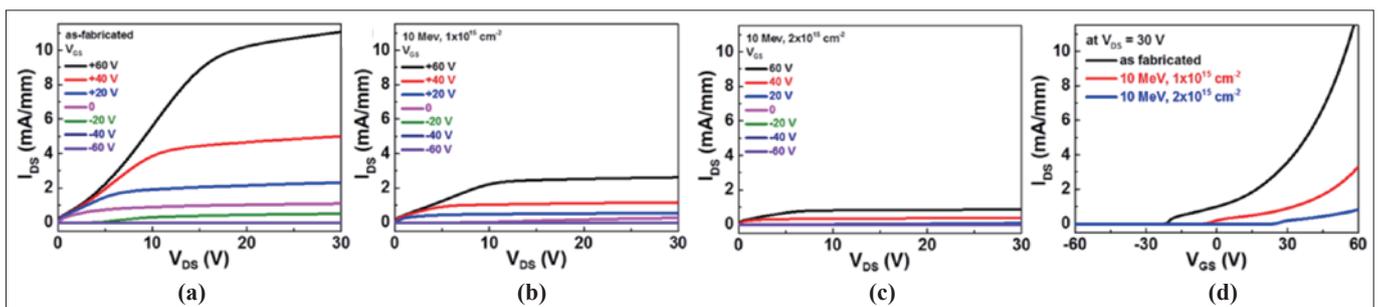


图16: 能量10MeV 剂量 1×10^{13} p/cm², 1×10^{13} p/cm²质子辐射氧化镓场效应管输出特性和转移特性; (a) 辐射前输出曲线; (b) 能量10MeV 剂量 1×10^{13} p/cm²输出曲线; (c) 能量10MeV 剂量 2×10^{13} p/cm²输出曲线; (d) 能量10MeV 剂量 1×10^{13} p/cm², 1×10^{13} p/cm²质子辐射前后转移特性。

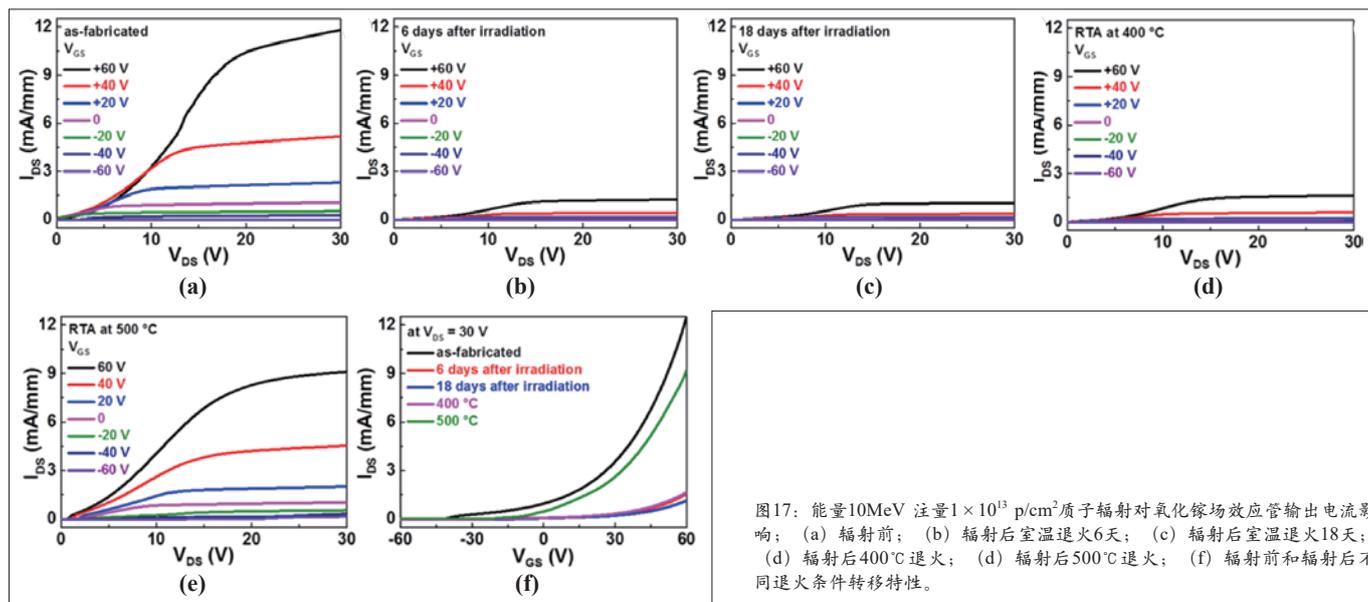


图17: 能量10MeV 剂量 1×10^{13} p/cm²质子辐射对氧化镓场效应管输出电流影响; (a) 辐射前; (b) 辐射后室温退火6天; (c) 辐射后室温退火18天; (d) 辐射后400 °C退火; (e) 辐射后500 °C退火; (f) 辐射前和辐射后不同退火条件转移特性。

陷表征分析技术; 4) 基于材料、器件电特性参数和热物性参数的热电协同氧化镓材料器件联合 TCAD 拟合建模技术四项关键技术的突破, 提出了全方位系统研究(超)宽禁带半导体材料-器件单元、器件单元-器件整体电热耦合应力下, 辐射研究的模拟实验方法。阐明了: 1) 伽马射线辐射诱导的 Ga⁺ 周围电子电离形成类氧空位缺陷能级的氧化镓器件电离损伤机理, 如图 18。2) 5MeV 质子辐射诱导的氧化镓材料载流子去除、氧空位缺陷增加、镓空位缺陷下降、MOS 氧化层电荷增加的位移损伤机理, 如图 19。为(超)宽禁带半导体材料及器件的宇航应用评估和正向加固设计提供重要参考。

三、氧化镓器件在航天电力电子应用中面临的挑战和未来展望

尽管(超)宽禁带半导体器件在航天电力电子应用中展

现出巨大潜力, 但其广泛应用仍面临严峻的共性挑战:

- **材料及工艺问题:** 氧化镓半导体材料的材料表征技术、生长与缺陷控制、界面与表面问题、模拟拟合与计算等关键问题仍面临诸多科学问题亟待解决。
- **可靠性问题:** 氧化镓器件及其系统在航天极端环境下的辐射机理、可靠性问题、加固方案仍需进一步验证和研究, 包括高温、低温、辐射、振动等耦合环境因素对器件性能的影响。
- **标准规范:** 针对氧化镓器件及其系统在航天领域的应用, 缺乏完善的标准和规范, 需要制定相应的标准体系, 确保器件及其系统在轨运行的可靠性和安全性。

总而言之, (超)宽禁带器件凭借其优异的材料特性, 为航天电力电子技术的发展带来了新的机遇。尽管目前仍面临一些挑战, 但随着技术的不断进步, (超)宽禁带器件必将在未来航天任务中发挥越来越重要的作用。

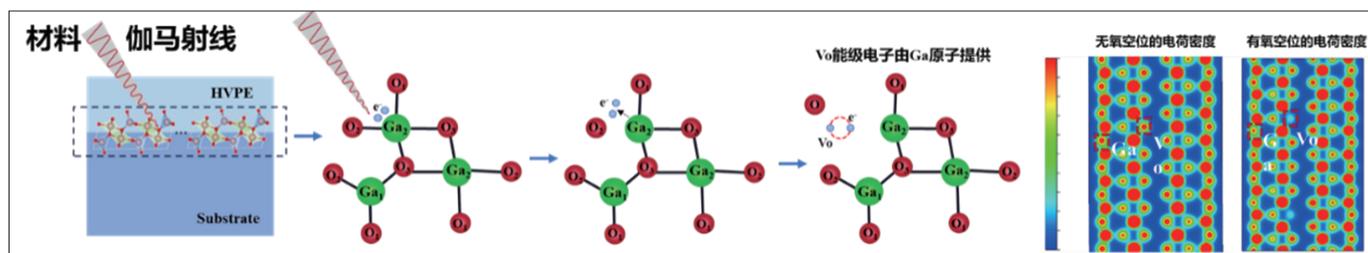


图18: 伽马射线辐射诱导的 Ga⁺ 周围电子电离形成类氧空位缺陷能级的氧化镓材料电离损伤机理。

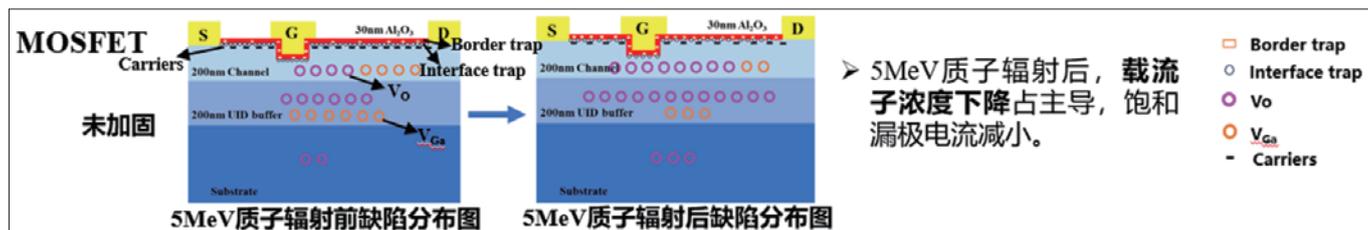


图19: 5MeV 质子辐射诱导的氧化镓MOSFET载流子去除、氧空位缺陷增加、镓空位缺陷下降、MOS氧化层电荷增加的位移损伤机理。

参考文献

- [1] Wang J. Wide bandgap-based power electronics for Aerospace Applications[J]. IEEE Power Electronics Magazine, 2022, 9(3): 16-25.
- [2] Muhammad Z, Wang Y, Zhang Y, et al. Radiation - Tolerant Electronic Devices Using Wide Bandgap Semiconductors[J]. Advanced Materials Technologies, 2023, 8(2): 2200539.
- [3] Pearton S J, Aitkaliyeva A, Xian M, et al. Radiation damage in wide and ultra-wide bandgap semiconductors[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2021, 10(5): 055008.
- [4] Kizilyalli I C, Xu Y A, Carlson E, et al. Current and future directions in power electronic devices and circuits based on wide band-gap semiconductors[C]//2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA). IEEE, 2017: 417-417.
- [5] Millan J, Godignon P, Perpiñà X, et al. A survey of wide bandgap power semiconductor devices[J]. IEEE transactions on Power Electronics, 2013, 29(5): 2155-2163.
- [6] Neudeck P G, Okojie R S, Chen L Y. High-temperature electronics-a role for wide bandgap semiconductors?[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 90(6): 1065-1076.
- [7] Zhang Y, Palacios T. (Ultra) wide-bandgap vertical power FinFETs[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2020, 67(10): 3960-3971.
- [8] Duzellier S. Radiation effects on electronic devices in space[J]. Aerospace science and technology, 2005, 9(1): 93-99.
- [9] Lauenstein J M, Casey M C, Ladbury R L, et al. Space radiation effects on SiC power device reliability[C]//2021 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS). IEEE, 2021: 1-8.
- [10] Kim J, Pearton S J, Fares C, et al. Radiation damage effects in Ga₂O₃ materials and devices[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 7(1): 10-24.
- [11] Wang S, Chen C, Wang R, et al. Application of the third-generation power devices in aerospace power supply[C]//Seventh Asia Pacific Conference on Optics Manufacture and 2021 International Forum of Young Scientists on Advanced Optical Manufacturing (APCOM and YSAOM 2021). SPIE, 2022, 12166: 2000-2009.
- [12] Ravindran R, Massoud A M. State-of-the-Art DC-DC Converters for Satellite Applications: A Comprehensive Review[J]. Aerospace, 2025, 12(2): 97.
- [13] Kobayashi Y, Tomiki A, Kawasaki S. Annual deep-space flight operation verification of X-band GaN SSPA[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 55(2): 930-938.
- [14] Kobayashi Y, Kawasaki S. X-band, 15-W-class, highly efficient deep-space GaN SSPA for PROCYON mission[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(3): 1340-1351.
- [15] Jie X, Qing K, Xuan Z, et al. Application prospect of SiC power semiconductor devices in spacecraft power systems[C]//2017 13th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). IEEE, 2017: 185-190.
- [16] Zhao X, Phukan R, Chang C W, et al. Design and Implementation of SiC-Based 200-kW High-Density High-Speed High-Altitude Electric Propulsion AC Drive System[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024.
- [17] Akshita K V, Dhanabalan D, Hariharan R, et al. Effect of gamma-irradiation on structural, morphological, and optical properties of β-Ga₂O₃ single crystals[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2023, 34(9): 841.
- [18] 李园, 蒋伟博, 赵元富. 伽马射线辐照对 HVPE 生长的 β-Ga₂O₃ 材料特性影响研究. 第六届全国辐射物理学术交流会, 2024.
- [19] Yang J, Koller G J, Fares C, et al. 60Co gamma ray damage in homoepitaxial β-Ga₂O₃ Schottky rectifiers[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2019, 8(7): Q3041.
- [20] Liu M, Hua M, Tian X, et al. Effect of gamma irradiation on β-Ga₂O₃ vertical Schottky barrier diode[J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(21).
- [21] Fu W, Ma T, Lei Z, et al. Temperature Dependence of Total Ionizing Dose Effects of β-Ga₂O₃ Schottky Barrier Diodes[J]. Electronics, 2024, 13(11): 2215.
- [22] Wong M H, Takeyama A, Makino T, et al. Radiation hardness of β-Ga₂O₃ metal-oxide-semiconductor field-effect transistors against gamma-ray irradiation[J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(2).
- [23] Manikanthababu N, Tak B R, Prajna K, et al. Radiation sustenance of HfO₂/β-Ga₂O₃ metal-oxide-semiconductor capacitors: gamma irradiation study[J]. Semiconductor Science and Technology, 2020, 35(5): 055024.
- [24] von Bardeleben H J, Zhou S, Gerstmann U, et al. Proton irradiation induced defects in β-Ga₂O₃: A combined EPR and theory study[J]. APL Materials, 2019, 7(2).
- [25] Wang K, Cao R, Mei B, et al. Influence of high-dose 80 MeV proton irradiation on the electronic structure and photoluminescence of β-Ga₂O₃[J]. Journal of Electronic Materials, 2023, 52(11): 7718-7727.
- [26] 李园, 汤丹宁, 王元刚, 吕元杰, 赵元富. 质子辐照对 HVPE 生长的 β-Ga₂O₃ 材料特性影响研究. 第六届全国辐射物理学术交流会, 2024.
- [27] Zhang X, Liang X, Li X, et al. Radiation damage effects on electronic and optical properties of β-Ga₂O₃ from first-principles[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 2024, 42(3).
- [28] Li X, Fu W, Yue S, et al. Effects of 300-MeV Proton Irradiation on Electrical Properties of β-Ga₂O₃ Schottky Barrier Diodes. IEEE Transactions on Electron Devices. 2024.
- [29] Li J S, Chiang C C, Wan H H, et al. Forward bias annealing of proton radiation damage in NiO/Ga₂O₃ rectifiers[J]. Physica Scripta, 2024, 99(7): 075312.
- [30] McGlone J F, Ghadi H, Cornuelle E, et al. Proton radiation effects on electronic defect states in MOCVD-grown (010) β-Ga₂O₃[J]. Journal of Applied Physics, 2023, 133(4).
- [31] Yang G, Jang S, Ren F, et al. Influence of high-energy proton irradiation on β-Ga₂O₃ nanobelt field-effect transistors[J]. ACS applied materials & interfaces, 2017, 9(46): 40471-40476.

当规模量产 至关重要时 您需要可信赖 的合作伙伴



在中国拥有40年晶圆厂设备和材料工程经验的应用材料公司是您的正确选择

- » 广泛的业界产品组合，包括协同优化和集成解决方案
- » 助力加速并推进您的技术路线图——新的材料工程方法用于解决严峻的挑战
- » 2024年在研发领域的投资达到32亿美元
- » 广泛的服务和支持网络

现在是投资于您需要的产品、帮助您在市场确立优胜地位的绝佳时机



官方公众号



官方视频号

针对150mm和200mm晶圆的SiC, GaN和GaAs制造工艺



Centura® Etch



Centura® RTP



Endura® PVD



Mirra® CMP



Applied™ Picosun™ Morpher™



Producer™ CVD



Raider™ Edge



Reveal® Review



VeritySEM™



VIISa® Implant

2025 展望未来

未来会有更多搭载碳化硅器件的光储产品、新能源车
型推向市场



崔崧
CTO

江苏宏微科技股份有限公司

CSC: 在 2025 年, 请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势? 在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新?

在新能源汽车领域, SiC 器件体积小易于集成到小空间中, 可以为整车节省更多的空间。高转换效率等优势也让更多车企选择碳化硅作为主驱器件。在充电桩领域, 不少企业在近两年陆续推出应用碳化硅器件的充电桩产品, 随着新能源汽车的渗透率及普及率增加, 未来几年碳化硅器件会越来越多应用在充电桩领域。碳化硅高效的转化效率得到了光储等应用领域的青睐, 随着耐高温封装材料和工艺进一步成熟, 未来会有更多搭载碳化硅器件的光储产品推向市场。

CSC: 过去的一年里, 在化合物半导体领域, 有哪些令您记忆犹新的时刻? 这些事件对行业产生了哪些影响?

碳化硅作为第三代半导体材料的代表, 在 2024 年多款搭载碳化硅器件的车型上市, 并得到市场的一致好评。据统计, 1-9 月国内新能源乘用车市场 800V 平台车型中, 搭载碳化硅器件的车型渗透率达到 74%, 并且该比例还处于持续上涨中。其中不乏多款上市就受到市场追捧的车型。1-9 月

搭载碳化硅的车型与 2023 年相比, 有一显著特点是碳化硅向低价位车型渗透。根据 NE 时代数据显示, 2024 年 1-9 月我国新能源上险乘用车碳化硅车型价位中有 2% 的车型价位段处于 10-18 万, 23 年普遍搭载碳化硅的车型还基本处于 18 万以上。同期, 国产品牌车型搭载碳化硅的占比快速提高, 23 年特斯拉车型在整个碳化硅车型占比中达到 63.3%, 截至 9 月特斯拉占比下降至 36.2%, 国产车型占比进一步提高, 其中吉利、比亚迪、蔚来碳化硅车型市场份额均突破 10%。随着碳化硅产品价格下降, 同时国内新能源汽车市场竞争加剧, 在 2025 年搭载碳化硅器件的车型占比可能会再次提高。

不断挖掘各方面潜力, 延伸新应用领域, 通力协作,
共同谱写新篇章



于国建
常务副总

广州南砂晶圆半导体技术有限公司

CSC: 供碳化硅、氮化镓在新能源汽车、数据中心和白色家电等新兴领域中表现出色, 国内碳化硅或氮化镓行业还有哪些亟待克服的堵点? 比如政策、技术、产业链协同、市场、资本等方面。

在过去的一年中, 碳化硅和氮化镓行业经历了很多的高

光时刻，也暴露出了很多的问题。下面将从几个角度分别进行阐述：

政策方面，随着国家窗口指导政策的进一步收严收紧，对行业的指导作用日渐凸显。已经开始出现企业退出或者重组的趋势，相信在未来的 2-3 年，优胜劣汰的进程将会持续进行。另一方面，对筛选出的优质企业，政策上仍需要加大扶持的力度，欧洲、美国、日韩等国政府对化合物半导体行业的支持政策持续推出，凸显了对化合物半导体行业的重视。我们从政策方面也应该加大扶持力度，以使优质企业尽快脱颖而出。

技术方面，过去的一年，国内的化合物半导体的技术取得了长足的进步，尤其是在材料端，已经出现全面超越国外竞品公司的趋势。例如，在碳化硅衬底材料方面，国内企业在螺位错（TSD）、基平面位错（BPD）等关键核心参数方面已经全面超越 Wolfspeed、Coherent 等长期占据碳化硅衬底市场主导地位的国外企业，中国衬底在全球的衬底市场占比也逐年提升。但是在芯片技术方面，跟国外企业还是存在一些差距的。国内大部分还是处于第一/二代平面结构或者第一代沟槽结构阶段，国外企业无论平面或者沟槽结构，大都已经进行了四至五代的迭代。芯片技术的差距，导致对材料端要求不断提高，材料企业承压严重，加剧了材料端的竞争。

产业链协同方面，上下游客户互动频度及深度不断增强，对行业的认识不断增加。这是非常可喜的一点，产业的发展就是需要这样不断的沟通和交流。在终端用户方面，随着价格的下跌，应用领域不断拓宽，国产化的普及率也不断增加。但是在一些核心的应用场景，比如电动汽车的主驱上，终端用户对产品可靠性的顾虑仍然很深，因此纯国产（材料和芯片均采用国产）器件/模组的渗透率还是很低。终端用户的顾虑不无道理，但是还是希望能给国产多一些的机会，这是下一步需要重点推进的方面。同时，产业上下游要统一认识，加强合作，建立中国标准。

市场方面，随着 22、23 年扩产企业的产能逐渐释放以及终端电动汽车应用的增速放缓，产能过剩的问题开始凸显，参数和价格大战正式打响，同时一批未通过指导的企业加入，加剧了混战的局面。另一方面，随着价格的下跌，一些传统硅器件的应用场景开始出现化合物半导体的替代，例如光伏、储能逆变器、数据中心电源和白色家电等方面。新的一年，市场混战的局面预计还将继续。在这个过程中，相关从业企业需要不断挖掘技术、供应链管理、生产管理等方面的潜力，在价格降低的同时提高产品品质，不断延伸新的应用领域，拓宽市场规模，以进入一个良性发展的阶段。

资本方面，即将过去的一年资本市场陷入低谷。但行业的发展离不开资本市场的支持，尤其是重资产、重研发投入的碳化硅企业。接下来，残酷的市场竞争会淘汰一批技术、

管理落后的企业，竞争格局也将趋于明朗，希望在国家政策的指引下，资本市场对重点企业可以加大关注，促进企业的快速发展。

可以预见，接下来的一年仍将会是波澜起伏的一年，希望在相关各方面的通力协作下，国内碳化硅或氮化镓行业以及企业都可以百尺竿头更进一步，谱写新的篇章。

紧跟化合物半导体发展新动向，推动关键设备研发和国产替代



沈健威
副总经理
东莞市晟鼎精密仪器有限公司

CSC：在 2025 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？

当前 AI 的发展对化合物半导体提出了更高的性能要求，随着数据处理量激增和算法复杂度提升，迫切需要化合物半导体在功耗、速度和集成度方面实现突破。特别是在 5G 通信、自动驾驶和边缘计算等热点领域，氮化镓（GaN）和碳化硅（SiC）等第三代半导体材料因其高电子迁移率、低功耗和耐高温特性，成为提升 AI 芯片性能的关键。

与此同时，半导体设备作为产业发展的重要基石，为了满足芯片的高性能需求，必须在晶圆制备、封装测试等方面实现技术创新，以提升整体产业链的效率和质量。晟鼎积极响应这一趋势，重点投入新型设备研发和技术攻关，成功自主研发并不断推出适用于化合物半导体的快速退火炉，兼容 12 寸及以下晶圆，加速国产替代，填补了国内市场空白。这一关键技术的研发和突破，不仅推动了设备国产化的进程，也为国产设备在全球市场的竞争中脱颖而出，提高市场占有率提供了强有力的支持。

CSC：化合物半导体国产设备一直在迭代追赶中，对比国际竞品在技术、可靠性、稳定性、价格和服务等方面我们还有哪些提升空间？

化合物半导体设备的发展必须与 AI、5G 技术同步，通过技术创新满足芯片对高性能、高可靠性的制造需求。例如，RTP 快速退火炉在处理晶圆时，需要更精确控制退火温度和时间，以确保晶体结构的完整性和电学性能的稳定性，从而满足对信号传输速度和效率的严格要求，并且需要减少整体处理时间，提高生产效率。

针对不断变化的市场需求，晟鼎推出了双腔全自动快速退火炉，可兼容 4-12 英寸晶圆，同时增加了晶圆机器人，

有效提高工作效率。采用了高精度的温度控制技术，能够在极短的时间内实现晶圆的快速加热与冷却，显著提升了退火工艺的均匀性和重复性。不仅满足了化合物半导体制造的高标准，也为客户提供了更高效、更可靠的生产解决方案。

携手共进，引领光电子封装行业的发展潮流



周利民 博士

总经理

迈锐斯自动化(深圳)有限公司

CSC: 请简单总结一下 2024 年全球半导体行业的发展情况，展望一下 2025 年全球半导体行业的发展前景？

2024 年，全球半导体行业展现出了令人瞩目的强劲复苏与蓬勃增长态势，成功地从 2023 年因多重不利因素而陷入的深度衰退中强劲反弹。此番增长的强大驱动力主要源自人工智能 (AI) 领域对算力前所未有的巨大需求，这一需求如同强劲的东风，推动了存储器市场和逻辑电路市场实现显著扩张。其中，存储器市场预计将迎来高达 81.0% 的惊人增长率，而逻辑电路市场也有望取得 16.9% 的显著增幅。台积电凭借其遥遥领先的先进制程技术和无与伦比的产能规模优势，成功实现了营业额的大幅跃升，预估的年增长率高达 30%，这一卓越表现再次巩固了其在半导体行业中的领军地位，并创下了历史新高。此外，根据世界半导体贸易统计组织 (WSTS) 最新发布的市场预测报告，2024 年全球半导体市场的规模预计将攀升至 6269 亿美元的新高峰，同比增长率高达 19%。这一振奋人心的数据无疑为全球半导体行业的未来发展注入了坚定的信心与无限期待。

展望 2025 年，AI 相关的应用与服务将继续作为全球半导体行业增长的首要驱动力，引领行业前行。毕马威会计师事务所与全球半导体联盟携手进行的第 20 届全球半导体行业年度调查结果显示，行业高管们对 2025 年的收入增长满怀信心。其中，高达 92% 的受访者预计行业收入将在来年实现增长，更有 36% 的高管乐观预测收入增长将超过 10%。根据 WSTS 的预测，2025 年全球半导体市场规模将跃上一个新台阶，达到 6971 亿美元，增速维持在稳健的 11%。而 Gartner 的预测则更为乐观，预计全球半导体收入将增长近 14%，达到前所未有的 7170 亿美元新高。这一显著增长主要归因于人工智能相关半导体需求的持续激增，以及电子生产的稳步复苏。在短期内，内存市场和图形处理单元 (GPU) 将成为推动全球半导体收入增长的两股关键力量。为了满足下一代 GPU/AI 加速器对内存提出的更高要求，行业内的领

先供应商正积极投资于先进制程晶圆生产和先进封装技术，以期在激烈的市场竞争中占据有利地位。此外，IDC 的报告也指出，全球对人工智能 (AI) 和高性能计算 (HPC) 的需求将持续攀升，预计至 2025 年将实现 15% 以上的增长。从云数据中心到特定行业领域的主要应用市场，预计将迎来一系列的技术升级与革新，预示着半导体行业即将步入一个新的繁荣期。尽管面临地缘政治风险、全球经济政策波动、终端市场需求变化以及新增产能带来的供需关系调整等多重挑战，但全球半导体产业预计仍将在 2025 年保持扩张态势。特别是美洲和亚太地区，预计将实现两位数的同比增长，充分展现出半导体行业持续发展的强大韧性与无限潜力。

CSC: 在全球经济动荡的大潮中，半导体行业始终处于变革和发展之中，供需和市场环境复杂多变。我们该如何加速突围，锻长补短、保链稳链？2024 年贵司主营业务，面临哪些压力？同时取得了哪些成绩？

半导体产业的供应链确实正遭遇到一系列严峻挑战，这些挑战涵盖了自然灾害的不可预测性、地缘政治的紧张态势、关键材料的供不应求，以及供应链内部可能发生的故障等。这些不确定因素如同暗流涌动，随时可能对半导体供应链的稳定性造成剧烈冲击。尤其值得关注的是，美国政府持续收紧的半导体产业出口管制政策，无疑对全球产业链与供应链的平稳运行构成了显著威胁。为有效应对这些复杂多变的挑战，加强全球半导体供应链的韧性已成为业界的共同心声。这要求我们采取更为灵活多元的供应链策略，不断深化技术研发与创新，构建更加紧密的合作伙伴网络，并积极争取政策层面的支持与国际间的合作，从而逐步增强供应链的抗风险能力，为半导体产业的持续繁荣与健康发展提供坚实有力的支撑。

回望 2024 年，MRSI Mycronic 作为光电子封装领域的佼佼者，其主营业务在 AI 高速光模块业务的强劲增长推动下取得了显著成绩。然而，在这一辉煌成就的背后，我们也面临着前所未有的压力与挑战。一方面，随着订单量的持续攀升，如何确保准时交付并助力客户产能的快速提升成为了一项艰巨的任务。另一方面，如何在产能迅速扩张的同时，依然保持产品品质的卓越性和技术服务的高标准，以及在保障高效交付的同时不断推进技术创新，成为了我们必须正视并解决的关键问题。

令人欣慰的是，在面对这些重重压力与挑战时，MRSI Mycronic 展现出了超凡的产品交付能力和卓越的服务品质。我们不仅成功满足了客户对于产能快速提升的迫切需求，更通过不断的产品创新和丰富产品线，为客户提供了更具竞争力和全面性的封装解决方案，赢得了市场的广泛赞誉。

CSC: 面对动荡的外部局势，2025 年贵司将如何应对这些挑战？

面对全球地缘政治波动带来的动荡局势，全球半导体封装测试领域正经历一场前所未有的深刻变革与重构。作为半导体封装细分领域中的国际品牌设备供应商，MRSI Mycronic 深刻洞察到中国业务所处的独特挑战与无限机遇。为此，我们早在三年前便以远见卓识，前瞻性地在中国市场布局，成立了迈锐斯自动化（深圳）有限公司，矢志在中国本土深耕研发创新，积极践行“*In China for China*”的本土化战略。过去三年间，得益于这一前瞻战略的精准实施，MRSI Mycronic 的全球业务版图实现了显著扩张，而中国业务更是以其蓬勃的发展态势，成为了推动公司整体增长的重要引擎。展望 2025 年，我们坚信所服务的客户与行业将持续保持强劲的增长动力。因此，我们将进一步深化并拓宽“*In China for China*”战略的内涵与外延，朝着“*In China for Global*”的宏伟愿景稳步迈进。未来，我们将矢志不渝地坚持创新驱动发展，通过持续不断的技术革新与产品优化，为客户提供超越期望的投资回报，同时推动公司实现更加稳健、高速的增长。面对外部局势的动荡与挑战，我们满怀信心与决心，相信能够精准把握机遇，勇敢迎接挑战，在半导体封装测试的广阔舞台上，书写属于 MRSI Mycronic 的更加辉煌灿烂的篇章。

CSC：2025 年，贵司有怎样的市场规划？

MRSI Mycronic 将矢志不渝地巩固并拓展我们在光通讯等核心市场的领航地位。步入 2025 年，我们的市场战略规划将精准聚焦于以下几个核心要点：首先，我们将不遗余力地优化并升级现有产品，持续提升技术服务的品质与水准，确保为客户带来最大化的价值体验。在已有的优势领域内，我们将进一步深耕细作，专注于提升现有产品线的设备精度与生产效能，旨在为客户提供性价比最优、投资回报最大化的解决方案。其次，我们将充分利用行业内的丰富资源，积极开拓并精心规划全新的有源耦合封装产品线。这一举措将使我们能够为光电子行业客户提供更为完善、更为全面的整体封装解决方案，精准满足其日益多元化的需求。此外，MRSI Mycronic 在设备精度方面的卓越优势将得到充分发扬，我们将进一步拓宽应用领域的广度与深度。特别是在硅光子集成和半导体先进封装这些前沿领域，我们将勇于探索并开发全新的工艺应用，以加速这些领域的蓬勃发展，并为客户创造更多的价值增长点。我们的终极目标是，通过为客户创造卓越价值来实现业务的迅猛增长。我们将始终坚守以客户为中心的理念，不断提升自身的综合实力与服务品质，以赢得客户的信赖与支持，携手共推光电子行业的繁荣发展。

CSC：2025 年，贵司将推出哪些新技术或产品？

步入 2025 年，MRSI Mycronic 将继续坚守持续创新的核心理念与发展传统，致力于推出更多创新产品，进一步丰富我们的产品线，并为全球客户带来更具竞争力的选择。在

固晶机产品线领域，我们即将推出业界领先的高速 1 微米精度固晶机，这款设备凭借其无与伦比的效率，将有力支撑高速 AI 收发模块的迅猛发展。与此同时，针对行业内普遍存在的技术痛点与共性工艺难题，MRSI Mycronic 也将精心打造一系列高效解决方案，以精准回应市场需求。此外，基于 2024 年成功面世的全自动光耦合机 MRSI-A-L 产品线所积累的经验与反馈，我们将继续深化与客户的紧密合作关系，细致入微地洞察其需求变化，以开发出功能更加多样化、性价比更高、市场竞争力更强的新产品，进一步丰富并拓展这一前沿产品线。我们坚信，通过不懈的创新与努力，MRSI Mycronic 将为客户带来更多惊喜与价值，共同推动行业的繁荣发展。

CSC：当前量子技术、AI 技术热度暴增，带动算力芯片、存储、光通信等上下游产业需求，将引领新一轮半导体周期。它们对半导体制造业提出了更多需求，贵司在相关领域采取了哪些策略？

MRSI Mycronic，作为光电子封装领域的佼佼者，始终致力于为光通信行业中的光模块生产商提供卓越的芯片封装解决方案。随着新一轮 AI 应用的迅猛崛起，生成式 AI 对算力的需求急剧攀升，进而带动了 AI 算力数据中心对高速光模块需求的激增。自 2023 年起，众多高速光模块制造商与合同生产商纷纷加大产能扩充力度，以应对更高速率光模块即将迎来的大规模量产。作为光模块行业的核心设备供应商，MRSI Mycronic 始终与客户保持着紧密的合作关系，针对各种技术方案的 AI 高速光模块封装需求，我们精心打造了量身定制的最优芯片封装解决方案。同时，我们还还为各类光模块的有源光耦合工艺研发出了极具竞争力的全自动耦合设备。这些持续不断的创新举措，不仅为客户提供了更为完善的整体解决方案，更赢得了客户的广泛信赖与深入合作，从而推动我们的业绩实现了跨越式的增长。展望未来，MRSI Mycronic 对持续创新及未来业务的拓展满怀信心与期待。我们将继续与我们的客户携手共进，引领光电子封装行业的发展潮流，为半导体制造业的转型升级贡献我们的智慧与力量。

不断突破与提升，为高性能电子产品制造提供更为坚实的技术保障与支持



母凤文 博士
创始人兼董事长
青禾晶元集团

CSC：在 2025 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展

趋势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？

随着半导体技术的持续演进，键合技术已成为半导体材料、器件构造及系统集成等多个维度上的重要发展趋势。

在半导体材料领域，键合技术作为不同材料间融合的关键桥梁，发挥着不可替代的作用；在器件构造层面，它推动了三维堆叠结构的实现，有效突破了光刻技术的瓶颈，超越了传统平面器件的物理限制；而在系统集成范畴，键合集成技术成功融合了“延续摩尔定律”与“超越摩尔定律”两大发展趋势，显著提升了微电子系统的综合性能与应用价值。

为满足日益增长的高性能与高可靠性需求，键合技术正不断向更高精度、更强稳定性、多功能化及高度集成化的方向演进。近年来，常温键合、混合键合及热压键合等多种先进键合技术快速发展，其相关设备也取得了显著进步，为实现半导体及相关产业中同质/异质材料集成与芯片同构/异构集成提供了有力支撑。

展望未来，随着新型半导体材料及先进制造工艺的不断涌现，晶圆及芯片键合技术将持续创新与发展。国产键合设备的不断突破与提升，将为高性能电子产品的制造提供更为坚实的技术保障与支持，进一步推动半导体产业的繁荣发展。

GaN 电源与电机驱动系统一定会在 2025 年给大家带来不一样的惊喜



孔令涛
CEO
南京芯干线科技有限公司

CSC: 在 2025 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？

随着 2024 年的技术发展，SiC 和 GaN 的可靠性都实现了完美的解决，GaN 更是在工业充电、车载电源、LED 照明、电动工具等各个行业实现了零的应用突破。相信随着技术的不断成熟，市场对高效、高功率密度电源产品的需求增加，GaN 电源与电机驱动系统一定会在 2025 年给大家带来不一样的惊喜。

CSC: 碳化硅、氮化镓在新能源汽车、数据中心和白色家电等新兴领域中表现出色，国内碳化硅或氮化镓行业还有哪些亟待克服的堵点？比如政策、技术、产业链协同、市场、资本等方面。

化合物半导体碳化硅和氮化镓根据材料特性不同，具有非常明显的性能差异。其中碳化硅耐高温、耐高压的优良特性注定会在高功率电源行业发挥特有的优势，同时在硬开关

的拓扑领域发挥不俗的表现。氮化镓由于开关损耗低、同等晶圆面积下内阻小的特点，注定会在高功率密度、小体积的电源应用拓扑中发挥自己的卓越性能。

随着 GaN 并联技术的不断成熟，低压（700V 以内）条件下的大功率、高功率密度电源一定会爆发出蓬勃的发展动力，也一定会在数据中心、新能源汽车充电、LED 照明、工业充电等行业占领越来越多的应用市场。

SiC 器件有望在高性能电子系统中实现全面渗透，成为下一代功率半导体的核心支柱



黄亚敏 博士
总监
上海汽车芯片工程中心有限公司

CSC: 当前，碳化硅现在所有器件结构几乎都是沿用硅的初期技术路线（如平面型，槽栅结构等），您认为碳化硅技术和应用未来在哪些方面可以所有创新或者发展？

碳化硅（SiC）作为第三代半导体材料，以其高击穿电场、高热导率和高饱和电子漂移速率的特性，正在迅速成为功率电子领域的关键材料未来，碳化硅技术和应用的发展需要在以下几个方面实现创新和突破：

(1) 器件结构的突破

未来可以开发新型器件结构，a) 垂直结构器件，通过垂直沟道 MOSFET 或垂直结型场效应晶体管(JFET)的设计，降低导通电阻 (Ron) 和栅极驱动损耗，从而提高器件效率和功率密度，特别是在高电压（如 >1200V）应用中表现尤为突出；b) 多沟道和纳米结构，结合先进的纳米制造技术，在 SiC 晶圆上设计多沟道结构以提升单位面积的电流密度，从而减小器件尺寸；c) 双极性器件的优化，如 SiC IGBT 和 PIN 二极管，这些器件在高电压、高功率应用中潜力巨大，但需要在开关速度和效率之间寻求最佳平衡。

(2) 表面处理和界面工程

碳化硅 MOSFET 的性能受限于其氧化层与 SiC 基体之间的界面状态。高界面态密度导致电子迁移率下降，限制了器件的开关性能和可靠性。未来的研究方向包括：a) 界面缺陷的消除：通过优化氧化工艺，减少界面缺陷态密度；b) 新型栅介质材料：探索其他高介电常数材料替代传统的 SiO₂，提升栅极驱动效率和界面稳定性；c) 表面修饰技术：利用离子注入或化学修饰技术改善表面载流子的迁移率和均匀性。

(3) 大尺寸晶圆与制造工艺

目前 SiC 晶圆的主流尺寸为 6 英寸，而硅基晶圆已达到 12 英寸。这一差距导致 SiC 器件的成本居高不下。未来的创新方向包括：a) 晶圆尺寸扩展，推动 8 英寸甚至更大尺寸 SiC 晶圆的商业化生产，提高生产效率并降低成本；b) 晶圆质量提升，通过优化生长工艺（如热物理气相传输法或化学气相沉积法），减少晶圆中的位错和微管缺陷，提升器件良率；c) 新型掺杂技术，引入离子注入后退火等工艺，实现更精确的掺杂控制，提高器件性能的稳定性和可靠性。

综上所述，碳化硅技术的未来创新将集中在器件结构优化、界面工程改进、制造工艺突破和应用领域拓展上。通过推动这些方向的发展，SiC 器件有望在高性能电子系统中实现全面渗透，成为下一代功率半导体的核心支柱。

化合物半导体在 2025 年有望在空间供能、远程传感器网络、植入式医疗设备等领域展开广泛应用



敖金平 教授
江南大学

CSC: 目前，硅基氮化镓 -HEMT 的微波射频技术近年来发展迅速。未来我们应该做好哪些工作推动市场发展？

化合物半导体近些年在微波无线供能技术方面发展迅速，凭借高频、高功率密度、高转换效率的集成优势，得益于材料、器件、电路、模块等方面的共同发力，在 2025 年有望在空间供能、远程传感器网络、植入式医疗设备等领域展开广泛应用。

化合物半导体行业在 2025 年的前景乐观，预计会出现技术和市场的双重增长



谭志明
创始人及总裁
中程半导体（深圳）有限公司

CSC: 在 2025 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？

化合物半导体设备的增长主要受到对更多数据需求、人工智能（AI）应用的增加以及电动车销量增长的驱动。这些半导体已成为电力电子、射频（RF）、光子学和微型 LED

显示器领域的重要参与者。SiC 和 GaN 器件在电力应用中占据主导地位，GaAs 和 GaN 器件则在射频应用中领先。通过在这些领域的广泛应用，化合物半导体正在不断巩固其与硅基半导体并驾齐驱的市场地位，为下一代技术提供支持。

2025 年化合物半导体行业的重大突破预计将集中在新材料及其应用上，如 GaN 和 SiC。这些材料已在电动车及可再生能源系统中展现出卓越的性能。For instance, Infineon Technologies 的 SiC 器件旨在提高电动车和可再生能源系统的效率。此外，随着 5G 基础设施的发展，Qorvo 公司的 GaN 技术也在不断提升，进一步推动了 5G 网络基础设施的进步。

化合物半导体行业中的生产技术正在向更复杂和高效的方向发展。预计在 2025 年，高度集成且具有更高连接密度的半导体封装技术将进一步成熟和广泛应用。这些技术的进步将有利于提升电子设备的小型化和性能。此外，用于微型 LED 显示器的直接外延生长技术也在推动高分辨率显示器的发展。

尽管面临增长的机遇，化合物半导体行业在 2025 年也面临多个挑战，包括成本下降和供应链稳定性。例如，市场对 200 毫米 SiC 和 GaN-on-silicon 衬底的需求将持续增长，而涉及这些技术的制造和供应链须保持稳定，以支持不断增加的市场需求。此外，供应链的任何波动都可能对不同领域的半导体供应造成影响，尤其是在传统记忆和消费电子产品领域。

人工智能和物联网（IoT）的普及对化合物半导体行业的影响也在扩大。AI 驱动的光子学应用正在推动数据中心中 GaAs VCSEL 的采用，这些发射器在 800G 以上的数据传输中发挥关键作用，随着 AI 技术的进步，这种趋势将愈加明显。

总体来看，化合物半导体行业在 2025 年的前景乐观，预计会出现技术和市场的双重增长。通过持续的材料创新与生产技术进步，这一领域将在未来几年内对现代科技发展产生深远影响。

CSC: 过去的一年里，在化合物半导体领域，有哪些令您记忆犹新的时刻？这些事件对行业产生了哪些影响？

过去一年化合物半导体的需求显著增长，主要受数据需求增加、人工智能应用扩展以及电动车销量增长的推动。这些半导体在电力电子、射频、光子学和微型 LED 显示器领域的应用日益普及。特别是在电力应用中，碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）设备占据主导地位，而在射频应用中，砷化镓（GaAs）和 GaN 器件表现突出。

化合物半导体行业伴随着基板技术的进步，尤其是在 200 毫米 SiC 和 GaN-on-silicon 晶圆方面的迁移。这些基板的扩展趋势导致了应用于汽车和消费市场的电力电子领域的显著增长。此外，在光子学和微型 LED 显示器市场中，也有越来越多的应用推动了 150 毫米 InP 和 200 毫米 GaAs 基板的应用。

随着 5G 基础设施的扩展，化合物半导体的应用领域不断扩大。GaN 技术在 5G 网络的基础设施中被广泛采用，推动了相关领域的快速发展。同时，因为特斯拉等公司的推动，SiC 在电动车中得到了广泛应用，显著影响了电动车市场的快速发展。

化合物半导体行业虽然增长迅猛，但也面临着挑战，包括降低成本和确保供应链的稳定性。这一市场对大规模生产 200 毫米 SiC 和 GaN-on-silicon 基板的需求不断增加，需要确保制造和供应链的稳定，以支持市场的持续扩张。

尽管存在挑战，化合物半导体行业依然显示出巨大的市场潜力。随着技术的持续进步和新材料的应用，这一领域将在未来几年继续对现代科技的发展产生深远影响。

CSC：碳化硅、氮化镓在新能源汽车、数据中心和白色家电等新兴领域中表现出色，国内碳化硅或氮化镓行业还有哪些亟待克服的堵点？比如政策、技术、产业链协同、市场、资本等方面。

在政策层面，国内 SiC 和 GaN 行业面临的一大挑战是支持和资金的不足。尽管政府在半导体行业中的总体支持有所增长，但针对特定的化合物半导体技术的具体政策和激励措施仍需要加强。此外，现有的法规环境可能不够灵活，未能充分应对快速变化的技术需求和市场动态，这可能制约企业参与技术创新和市场竞争的积极性。

技术上，SiC 和 GaN 生产所需的某些关键技术尚未得到充分发展。在碳化硅领域，衬底制备和外延生长是国内面临的首要技术难关。SiC 本身晶格能量高、硬度大、热导率高，使得大尺寸高质量晶圆的生长和后续加工非常困难，位错密度、表面缺陷和应力控制等环节对制备工艺提出了苛刻要求。此外，在器件制造环节，沟槽刻蚀、高温金属化、绝缘层沉积等工艺流程需要针对 SiC 材料特性进行特殊优化，现有硅基工艺无法简单移植，导致生产成本和良率仍处于较高水平。封装与可靠性验证也亟待完善，高温环境下 SiC 器件的热管理、端面钝化及模块集成技术需要更深入的研究及更多的长时应用数据，才能使 SiC 在新能源汽车、光伏逆变和工业驱动等领域的应用得到大规模推广。

氮化镓在高频、高功率密度和快速开关应用中表现突出，但目前在外延与器件制备方面仍有多处技术瓶颈。首先，GaN 外延通常需要在硅衬底或 SiC、蓝宝石等异质衬底上生长，高晶格失配和热膨胀系数差异会导致位错密度高、应力集中、夹杂缺陷等问题，进而影响器件性能和可靠性。其次，GaN HEMT 等功率器件对界面质量、阱层掺杂精度以及寄生效应的控制要求严格，需要深度开发精准的生长工艺和金属化技术。再者，GaN 器件的封装工艺也对散热和绝缘提出更高挑战，尤其在高功率、高频应用环境中，要兼顾可靠性和长期稳定性，需要结合先进封装材料、高效散热基板和系

统级热管理方案。只有在外延、器件设计与封装测试的全流程实现技术协同，才能真正发挥 GaN 在数据中心、电源转换、微波通信等新兴领域的潜力。

在产业链协同方面，尽管国内一些企业在材料生产和器件制造方面取得了一定进展，但整体行业协同不足的问题仍未解决。材料供应链的不稳定性，尤其是高质量原材料的限制，成为制约形成完整供应链的关键因素。此外，设备制造和应用领域之间的协作尚不足，难以形成强有力的产业联动效应。

尽管国内市场对 SiC 和 GaN 的需求在不断增长，但市场接受度和成熟度仍显不足。在一些传统行业中，对新材料的性能和长期益处的认知有限，导致其市场渗透速度较慢。此外，由于新材料器件在设计和测试方面需要较高的专业技术水平，许多企业在使用和集成这些技术时难以进行必要的创新。

资本的可用性也制约着 SiC 和 GaN 行业的发展。尽管市场潜力巨大，但高昂的生产和研发成本使得许多企业难以获得足够的投资来扩大生产规模。中小企业尤其难以在竞争激烈的市场中融资，因为券商和投资者往往更青睐于已经具有一定市场份额的大企业，这使得小企业难以与国际大公司竞争。

通过应对这些挑战，国内 SiC 和 GaN 行业将能够更好地抓住全球增长机遇，提升在新兴技术领域中的影响力。在实现技术突破和政策推动的同时，加强产业链协作和应对市场变化将是关键所在。

CSC：当前，碳化硅现在所有器件结构几乎都是沿用硅的初期技术路线（如平面型，槽栅结构等），您认为碳化硅技术和应用未来在哪些方面可以所有创新或者发展？

碳化硅（SiC）在器件设计和工艺上仍有丰富的创新潜力。首先，从器件结构的角度看，除了借鉴硅基器件的平面型、沟槽栅（Trench）等传统设计外，还可以探索如超结（Super-Junction）等新型结构，通过分区掺杂或梯度掺杂实现更低的导通损耗、更高的击穿电压以及更快的开关速度。其次，在外延生长技术上，如何降低碳化硅单晶衬底及外延层的位错密度和表面缺陷是提升器件可靠性和重复性的关键，可借助先进的外延生长装备、精准的生长温度 / 气氛控制以及多步退火工艺等手段来实现。再者，栅介质工程同样是一个突破口，目前常用的二氧化硅（SiO₂）与 SiC 界面存在较多界面态，易导致阈值漂移和导通电阻增加；通过采用新型介质（如 Al₂O₃、SiN_x、高 k 介质等）以及改进沉积工艺，可显著降低陷阱密度，提高器件的阈值稳定性。除了材料与器件层面的创新，封装与散热技术也至关重要，例如在高压大电流场合，采用低电感、多芯并联等新型封装结构，配合先进的金属化工艺及热管理方案，可进一步释放 SiC 的高温、高压潜

能。综上所述，要想充分发挥碳化硅在功率器件中的优势，需要从外延材料、晶圆工艺到封装散热系统进行协同攻关，不断完善和创新各项技术环节。

在应用层面，随着人工智能、物联网以及电动车等领域的蓬勃发展，SiC 器件在高效能、高可靠性电源电子和高频通信方面的优势开始得到更充分的体现。以数据中心为例，其面对着日益增大的算力需求与能耗压力，而高效率、低损耗的 SiC 功率器件能够有效降低整体能源消耗和散热负担；在 5G 网络及未来 6G 通信中，SiC 器件的高频特性有助于缩小器件体积并提高信号传输质量；对于电动车行业，SiC 不仅能显著提升主逆变器的转换效率，还能支持更高功率密度和更快的充电速度。这些应用场景共同催生了对 SiC 器件在性能、可靠性与成本等方面的持续迭代需求。在数据中心、5G 通信和电动车等新兴产业的应用中，SiC 器件并非只带来单一的效率提升，而是为系统集成和模块化设计提供了更多灵活性和创新空间。通过对 SiC 功率模块的不断优化，在高温或极端环境下依旧能够稳定运行，大幅减少额外的冷却系统和冗余设计。与此同时，SiC 在高频和高压应用中的性能潜力也为硬件架构的升级与功能拓展铺平了道路，例如在未来电动车的双向充电、V2G (Vehicle-to-Grid) 技术乃至分布式能源系统中，都可看到 SiC 为核心的电力电子方案逐渐成熟。随着这些新兴市场的规模与需求不断壮大，SiC 技术也将在促进行业革新的过程中扮演着不可或缺的关键角色。

CSC: 目前，硅基氮化镓 -HEMT 的微波射频技术近年来发展迅速。未来我们应该做好哪些工作推动市场发展？

硅基氮化镓 -HEMT 技术由于其优异的性能，如高功率密度和高效率，在微波射频领域被广泛应用。然而，为了在市场中获得更大占有率，需要在制造工艺上进行创新。具体来说，提升外延层质量和改进刻蚀工艺对提高器件性能和降低生产成本至关重要。此外，针对不同的应用场景研发高频和高效率的功率放大器模块，将有助于提升器件的市场竞争力。

推动硅基氮化镓 -HEMT 技术的市场发展，离不开产业链上下游的协同合作。关键在于原材料供应商、器件制造商和终端应用客户之间的紧密合作，以确保从材料开发到产品量产的每个环节都能顺利进行。这不仅能提升供应链的效率，还能加速新技术的市场化过程。因此，建立一个稳固的产业生态系统，并推动标准化进程，将有利于技术的发展和推广。

尽管硅基氮化镓 -HEMT 技术在上具有巨大的潜力，其广泛应用仍需要市场需求的推动。在通讯、国防、航空航天等领域，该技术能够为高频应用和高功率应用提供极具竞争力的解决方案。在这种情况下，针对这些领域开展市场教育，增强对新技术的认知，将有助于提高市场接受度并刺激需求增长。

硅基氮化镓 -HEMT 技术的进一步发展需要大量的资本投入。一方面，可以通过政策支持和激励措施吸引更多企业投资研发和生产；另一方面，推动科研机构与企业的合作，以实现技术和资本的互补。政府和私人投资者的支持将为中小型企业提供必要的资金，帮助其在市场上立足。

技术标准化是推动硅基氮化镓 -HEMT 技术普及的重要手段。通过制定统一的技术标准，可以确保产品的兼容性和可靠性，降低用户的使用门槛。此外，推动国际标准化工作也能提高国内产品的国际竞争力。在政策和行业的合力推动下，技术标准的建立将为产业的整体发展创造有利环境。

总之，要推动硅基氮化镓 -HEMT 微波射频技术的市场发展，关键在于技术创新、产业链协同、市场驱动、资本投资和标准化进程等方面的全面推进。通过各方共同努力，硅基氮化镓技术在未来微波射频市场中将更具竞争力和影响力。

CSC: 2025 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势？砷化镓 / 磷化铟一直是光电通信领域应用的主要半导体材料，接近传感、3D 传感等消费类电子市场及 6G 新兴市场、硅 PIC 或许是砷化镓 / 磷化铟的延伸应用场景，我们如何拓展这一新兴应用的技术优势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？

在光电通信领域，砷化镓 (GaAs) 和磷化铟 (InP) 因其直接带隙特性、高速调制能力以及优异的光电转换效率而被广泛应用。随着 3D 传感、6G 通信以及硅基光子集成 (Si PIC) 技术的崛起，要让 GaAs/InP 的材料优势延伸到更广泛的场景，需要在异质外延、器件设计、系统集成和先进封装等多个层面实现协同创新。例如，通过分子束外延 (MBE) 或金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 在硅衬底上实现异质集成，可克服晶格失配带来的技术障碍，同时将高速电光调制器、探测器与硅基波导相结合，构建高密度、大规模的光子集成电路 (PIC)。此外，3D 传感中对高功率、高光束质量激光器和灵敏探测器的需求，为 GaAs/InP 基垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 和近红外探测器提供了进一步的应用机遇。在满足消费级规模化生产与低成本要求的同时，利用先进封装与高效散热方案，也能保证器件性能与可靠性。综合来看，只有从材料、器件、系统到制造工艺多维度着力，才能充分挖掘 GaAs/InP 的潜力，让其在新兴市场中持续保持核心竞争力。

CSC: 化合物半导体国产设备一直在迭代追赶中，对比国际竞品在技术、可靠性、稳定性、价格和服务等方面我们还有哪些提升空间？（可以就某一类型设备具体陈述）

以 ICP 刻蚀设备为例。当前，国产 ICP 刻蚀设备在化合物半导体领域的追赶与提升主要集中于技术迭代、可靠性、成本结构及售后服务等方面。

技术迭代上来说，随着化合物半导体器件对高精度刻蚀

需求的持续提升，ICP 刻蚀设备在等离子源设计、工艺数据建模与数字孪生等领域需要投入更多技术研发。通过优化射频功率耦合方式可提高刻蚀速率并减少对器件的损伤；基于大数据和多物理场仿真技术，对气体流量、射频功率、温度和腔体压强等多重变量进行耦合建模，能够实现精细化的参数寻优与过程预判；引入数字孪生技术后，则可对设备进行虚拟调试与在线监测，在缩短研发周期的同时，显著提升工艺的一致性与可控性。

可靠性和稳定性是衡量 ICP 刻蚀设备在大规模量产中能否持续运行的关键指标。通过在核心部件（如真空腔体、RF 电源、射频天线等）上采用高品质合金和陶瓷材料，并进行更严格的疲劳测试和环境模拟，可增强设备对高温、高真空与等离子体环境的耐受性。同时，刻蚀过程中的自动补偿策略（如温度或气体流量的动态调控）可显著降低工艺偏差，提高批次间和同批次内的均匀度，满足高端化合物半导体器件对侧壁平整度和刻蚀均匀度的苛刻要求。其次，核心部件质量与过程自动补偿策略直接影响设备的稳定性与可靠性，需要通过严格的选材、加工工艺和测试流程来确保长期量产环境下的性能一致性。

价格方面考虑到设备成本和现在国际封锁的大环境。为提升国产 ICP 刻蚀设备在国际市场的竞争力，需在硬件成本和工艺开发成本两方面实现突破。通过与国内零部件厂商、精密加工企业的协同创新，尽可能降低对进口零部件的依赖，并推动关键部件的性能优化和制造成本下降。在此基础上，还需针对不同化合物半导体材料及其目标应用，建立系统化的刻蚀工艺配方库和最佳实践方案。这不仅能快速满足多种生产需求，也能显著提高成品良率与市场认可度。唯有在售后服务与生态体系建设方面，与高校及科研机构保持紧密合作、完善售后与技术支持机制，并积极参与国际学术与行业标准制定，才能持续缩小与国际先进水平的差距，为国产 ICP 刻蚀设备在化合物半导体市场取得更大突破奠定坚实基础。

售后服务与生态体系建设也尤为重要。通过与高校及科研院所积极开展联合研发与人才培养，国内厂商可及时获得前沿技术成果，并储备充足的专业人才。与此同时，建立完善的售后网络和快速响应机制，配合远程诊断系统与备件供应体系，可以有效保障设备的稳定运行和性能调优。最后，积极参与国际学术会议和行业标准制定，有助于加强与国际先进技术的对接，加快设备迭代升级，并持续提升国产 ICP 刻蚀设备在全球市场中的影响力。

CSC：UV-LED 及 Mini/MicroLED 是氮化物光电领域产业的 2 大增长点，备受产业、资本关注，不过在技术、应用或市场层面，还有很多挑战，尤其市场一直不及预期，请谈谈未来 UV-LED 及 MicroLED 相关技术和产业化发展趋势？

UV-LED 技术正在快速发展，并在多个领域展示出广泛

的应用潜力。近年来，针对环境友好型技术的需求正在增加，这推动了 UV-LED 市场的迅速扩展。预计该市场将从 2023 年的 12 亿美元增长至 2028 年的 28 亿美元，复合年增长率为 39.23%。UV-LED 的优势，包括能耗低、寿命长、可快速开关操作以及环保特性，促进了其在消毒和净化等领域的应用。此外，UV-C LED 在水处理中的应用预计将分裂为一般消费市场和先进工业 / 商业市场，进一步创造发展商机。

尽管 UV-LED 具有较高的市场增速和产品应用广度，其普及仍受到若干因素的限制。安装和生产的高成本阻碍了其市场增长，特别是在缺乏投资支持的小型企业中。同时，对比氯消毒方法，UV-LED 消毒方法的成本仍高出 10% 到 15%，这在某种程度上限制了其在小规模应用中的普及。因此，需通过技术进步和成本优化来克服这些障碍，以实现该市场的更广泛应用。

MicroLED 以其能效、亮度和显示寿命而闻名，被认为是下一代显示技术的代表。这种技术正广泛应用于小型设备，如 AR/VR 设备，以及大型显示器市场。MicroLED 市场预计将在 2024 年至 2035 年间实现显著增长，市场潜力巨大。随着技术的发展，如增强的微型传输工艺和衍射光学元件的复杂性，预计 MicroLED 将适用于越来越多的场合。

尽管 UV-LED 与 Mini/Micro LED 在氮化物光电领域备受产业与资本关注，但要真正实现广泛商业化还需在外延和工艺上不断迭代。UV-LED 方面，高铝组分 AlGaN 外延层的晶格失配、缺陷密度和散热设计仍是深紫外高效发光的主要瓶颈，而封装材料的耐紫外老化性能也决定了器件在杀菌、固化等领域的可靠性与寿命。Mini/Micro LED 方面，外延均匀性与芯片微缩带来的发光效率和热管理难题尚未彻底解决，巨量转移和高精度键合工艺也在良率与成本上面临挑战。未来还需要通过衬底工程、外延技术、多量子阱结构优化以及自动化巨量转移和封装等关键环节的协同提升。

总的来说，UV-LED 和 MicroLED 技术在未来几年内都具有广阔的应用前景和增长机会。然而，要实现这些技术的广泛应用与市场渗透，行业需要在成本、制造效率以及性能一致性等方面做出突破性进展。通过持续的技术创新和市场战略优化，这些技术将在多个领域内发挥越来越重要的作用。

CSC：近年来氧化镓、氮化铝、金刚石和氮化硼作为超宽禁带材料，备受学界关注，并在中国、日本产业界也得到极大的青睐，请问如何看待超宽禁带材料相关技术和未来产业化发展，最可能的应用场景在哪里？

超宽禁带材料（UWBG）如氧化镓、氮化铝、金刚石和氮化硼凭借其独特的物理属性，在学术研究和产业应用中获得了越来越多的关注和重视。这些材料不仅在电力电子、射频应用等领域展现出巨大的潜力，并且其未来的产业化前景广阔。

氧化镓具有极宽的禁带宽度和高临界电场强度，这使其在电力开关和射频电子学中极具应用潜力。相比于氮化镓，氧化镓在射频和功率电子领域可能表现出更优越的性能，因其能承受更高的电场强度和实现高电压开关。同样，氮化铝以其高导热性和优良的绝缘特性在高频和功率电子领域中崭露头角。金刚石因其超高的硬度和导热性成为高功率和高温应用的理想选择。

在中国和日本，UWBG 材料技术的产业化发展受到政策支持和市场推动。中国在电动汽车和可再生能源基础设施方面的需求，推动着 SiC 和 GaN 技术的发展，中国在 SiC 和 GaN 研发以及制造能力的投资力度持续加大。日本则注重在电动汽车和工业电力系统方面发展 SiC 技术，进一步推动 WBG 材料在下一代电力电子产品中的应用。

超宽禁带材料因其优越的电学和热学性能，在多领域展现潜在应用价值：

- 电力电子：氧化镓和氮化铝可用于开发高效的电力转换器和高压开关，是电动汽车、太阳能逆变器等领域的关键技术。
- 射频和高频设备：UWBG 材料，如氮化铝，通过高频性能和低能耗引领 5G 基站和卫星通信的新风潮。
- 传感器和光电子学：由于其高禁带宽度，氮化硼和金刚石在紫外 LED 及高稳定性传感器中的应用前景广阔。
- 航空航天和军事应用：因其耐高温和高压的特性，金刚石和氧化镓在航空航天和军事装备的高功率组件中有着重要应用。

然而，广泛应用这些材料仍需克服一些障碍，特别是在材料合成、器件制造以及降低成本方面。例如，复杂的制造过程和高昂的生产成本可能限制这些材料在成本敏感市场中的推广应用。因此，未来的技术进步可能主要集中在材料生长技术的优化和生产效率的提高。

总体而言，UWBG 材料作为下一个技术革命的潜在推动者，拥有广泛的应用前景，特别是在功率电子、高频设备和先进传感器系统中。通过持续的研究和投资，这些材料有望在未来几年进一步推动相关行业的技术进步。

CSC：在国际舞台上，半导体全球供应链正在遭受地域政治的人为破坏，我们应当对此采取哪些措施来应对风险，确保打造可控的自我供应链和国际市场

从设备到零部件国产化的角度，应对地缘政治对全球半导体供应链的冲击，需要在关键设备核心技术攻关、零部件本土化、产业链整合及国际合作等方面同时发力。通过推进设备模块化与平台化设计，优先解决射频电源、真空泵、光学传感器等“卡脖子”零部件的供货问题，并与本土材料企业深度协同开发高性能合金、陶瓷与光学晶体等关键原材料，可以逐步形成自主可靠的技术与产能。同时，

强化上下游的产业联盟与区域集群效应，构建完整的研发、生产和配套生态体系，在自我可控的基础上持续参与国际标准制定和多元化市场拓展，从而在全球范围内提升设备与零部件的竞争力与抗风险能力，确保中国半导体产业实现稳步、可持续的发展。

携手产业链上下游，共同推动金刚石应用领域的持续拓宽



张星
联合创始人、总经理
化合积电（厦门）半导体科技有限公司

CSC：在 2025 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？

随着人工智能、物联网、超级计算等时代的到来，对半导体材料与器件提出了更高的性能要求，在器件特征尺寸的不断缩小的前提下，如何处理芯片热流密度不断上升带来的散热问题成为了半导体行业的主要挑战之一。传统的硅基电子技术临近生命周期极限，摩尔定律正遭遇技术与成本两大发展瓶颈，行业急需寻求新的解决方案。

金刚石是目前已知热导率最高的材料，热导率达硅（Si）13 倍、碳化硅（SiC）4 倍，铜和银 4-5 倍，并具有超宽禁带半导体优异特质，被视为“第四代半导体”或“半导体终极材料”。与 SiC 相比，金刚石芯片成本可便宜 30%，所需材料面积仅为 SiC 芯片 1/50，减少 3 倍能量损耗，并将芯片体积缩小 4 倍。目前，国内外公司已有较成熟的金刚石热管理解决方案，化合积电为广大客户提供完备的热管理解决方案，提供金属化、图形化、焊料层、切割和打孔等定制化服务。

新的一年，金刚石半导体的研发和应用无疑将对半导体行业产生深远影响。从各国研究团队的技术突破到全球的产业布局，金刚石半导体的未来已清晰可见。随着技术的不断成熟以及产业链的完善，大尺寸、规模化量产的高质量金刚石有望在未来进入广泛的应用领域，为高功率、高频、高温及极端环境下的电子器件提供强有力的技术支持。过去这一年，化合积电新建生产基地，大力推动更大尺寸多晶金刚石量产，满足金刚石更广阔的应用领域；不断提升定制化能力，为客户提供专业完善的金刚石一体化解决方案，赋能相关产业升级。

CSC：过去的一年里，在化合物半导体领域，有哪些令您记忆犹新的时刻？这些事件对行业产生了哪些影响？

行业技术突破：Element Six 主导单晶金刚石基板开发超宽带高功率半导体项目，助力实现工业金刚石在先进电子

产品中的应用；Diamond Foundry 制造出世界上最大的金刚石基板（100 毫米单晶晶圆），可用于提高 AI 计算和无线通信的热性能以及用于小型电力电子设备；澳大利亚国家重建基金（NRFC）重资量子科技公司 Quantum Brilliance（QB）加速量子金刚石器件的设计和制造；美国 Akash Systems 研发的金刚石冷却技术可将 GPU 的热点温度降低 10 到 20 摄氏度并大幅提升了 GPU 的性能，获得美国芯片法案支持；日本 Ookuma Diamond Device 将金刚石基辐射探测器应用在福岛核污染处理领域，展示了金刚石半导体在能源和环境领域的潜力……

德国科技巨头企业青睐金刚石材料：2024 年 3 月，化合积电成功获得国际科技巨头贺利氏集团的投资，完成了战略轮融资。在过去的一年里，贺利氏凭借其在全球市场资源、技术洞察力以及先进材料工业化生产方面的深厚专业知识，为化合积电提供了强有力的支持，推动了化合积电金刚石产品向更广泛的应用领域拓展。

品牌出海：在以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局下，“品牌出海”作为中国企业寻求高质量发展和新增长点的战略机遇已逐步成为市场共识。今年，化合积电在“品牌出海”的道路上走出了差异化路线：建立海外全球营销网络，汇聚海外地方专业代理商，构建响应及时、服务专业的营销体系，增强品牌国际影响力；前瞻布局全球化知识产权体系，品牌“硬实力”在全球范围内拓张；强化国际资源合作，和众多海外知名企业建立稳定合作关系；亮相国际展会和学术论坛等，走出“品牌出海”创新之路。

随着金刚石技术的不断成熟与进步，金刚石半导体时代正在加速到来。过去这一年，金刚石产业链呈现蓬勃发展态势。展望新的一年，化合积电将在技术创新和市场扩展上不断努力，携手产业链上下游，共同推动金刚石应用领域的持续拓宽，促进行业的繁荣发展。

新春即至，借此机会感谢《化合物半导体》团队打造了这一专业平台，同时，祝福大家新年快乐、万事顺遂！

国产设备通过持续提高自身竞争力，未来有望与国际品牌展开更激烈的竞争



萧利台
战略及海外营销总监
深圳市纳设智能装备股份有限公司

CSC：在 2025 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？

碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）这两种材料在高功率和高频应用中越来越受欢迎，预计 GaN 和 SiC 器件在电动汽车、电力电子、数据中心等领域的应用将进一步扩大。SiC 在电动车 800V 平台上的应用有望成为高端车型的标配。而在超宽禁带半导体如氧化镓（Ga₂O₃）和氮化铝（AlN）等材料可能会在高功率、高温和辐射环境下的应用中取得新进展。

CSC：碳化硅、氮化镓在新能源汽车、数据中心和白色家电等新兴领域中表现出色，国内碳化硅或氮化镓行业还有哪些亟待克服的堵点？比如政策、技术、产业链协同、市场、资本等方面。

在碳化硅领域，目前材料端已经实现了较大的突破，8 英寸材料的发展速度比预期更快，其衬底和外延的参数指标已经接近 6 英寸，甚至已推出 12 英寸的衬底，为产业发展奠定了坚实基础。然而，高端 MOS 器件制造的核心工艺仍需重点突破，如何保证高压大功率器件的可靠性和一致性仍是一大挑战。这需要在碳化硅器件设计、晶圆加工、封装测试等多个环节综合入手，重点解决材料、工艺、热管理、封装、质量控制等方面的问题。

此外，产业链各环节（材料、器件、封装、应用等）协同不足，难以形成整体合力。例如，材料、器件、设备企业与终端应用企业之间的沟通深度不够，需求与技术的同步迭代受到制约。因此，建议建立上下游企业的联合研发机制，推动材料与器件、设备与应用深度协作，优化产业链资源配置和效率。

综上所述，通过强化技术突破、优化上下游协同，国内碳化硅行业有望逐步打通当前堵点，实现从材料到应用的全产业链升级，进一步提升国际竞争力。

CSC：当前，碳化硅现在所有器件结构几乎都是沿用硅的初期技术路线（如平面型，槽栅结构等），您认为碳化硅技术和应用未来在哪些方面可以所有创新或者发展？

碳化硅作为第三代半导体材料，其独特的物理特性为器件结构和应用提供了丰富的创新空间。未来的创新应充分利用碳化硅的材料优势，再借鉴硅器件的思维框架，开发针对性的新型器件结构和应用领域。

如在器件结构的研发上，碳化硅的高击穿电场特性使得垂直结构更具优势，可以有效减少电流路径中的电阻损耗，提升整体性能，同时垂直结构有助于更好地散热，延长器件的使用寿命，尤其适合在高温环境下的应用，随着技术的不断进步，碳化硅在技术上，终将突破现有设计框架，进一步发掘碳化硅的材料潜力；在应用上，扩展至高频、高温和新能源领域。这些创新将推动碳化硅在新能源汽车、储能系统、数据中心、智能家电等领域更深层次的应用，实现产业的持续升级。

CSC：化合物半导体国产设备一直在迭代追赶中，对比国际

竞品在技术、可靠性、稳定性、价格和服务等方面我们还有哪些提升空间？（可以就某一类型设备具体陈述）

以化合物半导体的 MOCVD 设备为例，第一，国际竞品通常在设备的系统集成与自动化方面具有较高的水准，设备的自动化程度高，能够自动调节工作参数，减少人为操作误差，提高生产一致性。随着国产设备的逐步发展，国产设备的自动化程度也在逐步提升，但整体系统集成的智能化水平相对较低。因此国产设备需要加强智能化控制系统的研发，特别是在自动化调节、数据采集和实时监控等方面，提升系统的自主学习能力和生产效率，减少设备的操作难度，提升生产线的自动化水平。

第二，国际设备厂商在设备的可靠性和长期稳定性上积累了丰富的经验，特别是在高温、高压等极端工作条件下，能够持续稳定运行。国内设备在高温、高压和长周期稳定性方面还存在一定差距。例如，在 MOCVD 设备的高功率运转时，设备内温度、压力的波动可能导致材料生长的性能波动，影响后续产品的良品率。国产设备需要加强系统集成和热管理技术，尤其是在处理温度稳定性和长期操作一致性方面，确保设备的长期可靠运行。同时，做好供应链管理与质量管理，加强电子元器件、温度传感器、气体流量控制系统等关键部件的耐用性和稳定性。

第三，售后服务由于地域优势，能够更快的响应客户需求，国产设备厂商需要加强售后服务和技术支持团队的建设，尤其是在设备安装、调试、维护和升级等方面，需要提供快速响应机制。此外，还需要提升技术支持的专业性，例如，通过建立技术论坛、线上支持平台、远程故障诊断系统等方式，确保客户在设备使用中的高效支持。

通过这些方面的持续努力，国产设备能够提高自身的竞争力，有望在未来与国际品牌展开更加激烈的竞争。

PTM 商业模式让“存储高端力量”遍布不同领域



CSC: 请简单总结一下 2024 年全球半导体行业的发展情况，展望一下 2025 年全球半导体行业的发展前景？

2024 年，半导体产业的发展结构性分化比较明显，国际环境依旧呈现较强的复杂性。

① 市场需求回暖：随着全球数字化进程加速，众多新兴领域如人工智能、物联网、5G 通信、新能源汽车等对半导体芯片的需求持续攀升，推动半导体产业下游新产品不断迭代，驱动行业需求总量不断增长，促使半导体行业走出低谷，迎来新的复苏周期。

② 政策力度大：各国政府纷纷出台政策支持半导体产业发展，给予承担国家战略任务的单位资金配套，支持重大科技成果转化和产业化项目等。以巴西为例，其总统于 9 月正式公布法案，确立了巴西半导体计划 (PL 13/2020)，旨在促进巴西半导体领域的新投资、技术创新和研究加强，推动该行业的创新与发展。

③ 技术创新突破：半导体技术正处于不断突破的关键时期。芯片设计领域新的架构与算法不断涌现，如针对人工智能应用的专用芯片设计，满足了人工智能高速发展的需求，提升了半导体企业的核心竞争力，也为行业的长远发展开辟了广阔空间。

根据行业调研机构预判，中国的内需足够大，在 5G 及 AI 人工智能的加持下半导体产业在 2025 年有望继续保持增长态势。

① 产业整合：随着市场竞争的加剧，越来越多的半导体企业开始通过整合产业链上下游资源来提高自身的竞争力。这种产业链整合的趋势将有助于提高半导体产业的整体效率和降低成本，推动产业的进一步发展。继 2023 年完成元成苏州、智忆巴西的收购后，江波龙将持续整合研发和量产技术能力、产业链资源，为客户带来更好的价值体验。

② 技术创新：随着 AI 技术的持续发展，对于高带宽、低延迟的存储芯片及控制芯片有大幅提升，江波龙将陆续投入研发控制器芯片，满足日益增长的高性能存储控制芯片需求。此外，新型存储技术如 3D NAND 闪存、相变存储器 (PCM)、阻变存储器 (RRAM) 等的研发和应用将继续推进。这些新型存储技术具有更高的存储密度、更快的读写速度和更低的功耗，有望在未来逐步取代传统存储技术，成为存储半导体产业的新增长点。

CSC: 在全球经济动荡的大潮中，半导体行业始终处于变革和发展之中，供需和市场环境复杂多变。我们该如何加速突围，锻长补短、保链稳链？2024 年贵司主营业务，面临哪些压力？同时取得了哪些成绩？

随着半导体回暖态势明显，江波龙取得了如下的成绩：

- 25 周年迈向新高度

2024 年正值公司 25 周年，江波龙转型为半导体存储品牌企业，通过技术、制造、品牌体现价值，为全球合作伙伴提供创新服务。

6 月 30 日，中山存储产业园二期目前已完成竣工验收，预计 2025 年 4 月前投入使用；7 月 22 日，江波龙深圳总部正式迁至鸿荣源前海金融中心，与中山存储产业园隔海相望。

- 财务数据表现出色

2024 年前三季度，营业收入达到 132.68 亿元，同比增长 101.68%；归母净利润飙升至 5.57 亿元，同比增长 163.09%，业绩扭亏为盈。

• 业务拓展成效显著

企业级存储业务：2023 年进入客户认证和量产导入阶段，2024 年上半年企业级存储业务收入达 2.91 亿元，同比增长超过 20 倍，且三季度继续保持环比增长。

海外业务：通过一系列并购与全球布局，江波龙已构建起一条涵盖研发、生产至销售的全链条国际化服务体系。2024 年，Lexar（雷克沙）品牌业务、Zilia（智忆巴西）的收入保持稳定增长，为全球客户带来前所未有的价值体验。

PTM 商业模式：2024 年创新提出的 PTM（存储产品技术制造）模式已经逐步落地，其灵活、高效、定制的优势取得了客户高度认可。以通信行业为例，江波龙依托 PTM 全栈定制服务，为运营商提供超越“标准菜单”的定制化解决方案——从 NAND Flash、DRAM、主控芯片、固件到硬件/元器件的全方位定制化组合，以满足客户在供应链方面的战略要求；在测试制造方面，不仅通过自动化测试脚本库提高了测试效率，降低客户开发部署成本，还在中山的自有存储产业园搭建了高精度 SMT 企业级专用产线，确保了 eSSD 和 RDIMM 产能的稳定性。

• 技术研发成果丰硕

存储产品创新：江波龙在消费类存储、嵌入式存储、工规/车规级存储、企业级数据存储等多个应用场景中积极探索并发布了多款突破性的成果，在产品形态创新上，LPCAMM2 以其独特的 128bit 位宽设计，实现了内存形态的新突破，有望打通 PC 和手机存储应用场景；在新兴技术上，QLC 被江波龙率先应用于 eMMC 产品上，采用自研架构的 CXL2.0 内存拓展模块也已做好量产准备。

主控芯片设计：自主研发的主控芯片 WM6000 和 WM5000 已实现批量出货，赋能 eMMC 和 SD 卡两大核心产品线，且实现了超过千万颗的规模化产品导入。

存储芯片研发：截止至 2024 年 11 月，小容量 SLC NAND Flash 存储芯片累计出货量已达 1 亿颗，在国内市场达到了质的突破，该产品广泛应用于可穿戴、IoT、汽车、安防等领域，并发布了首颗自研 256MB SPI NOR Flash，进一步增强了公司在芯片设计领域的综合能力，并扩展了技术服务范围。

CSC：2025 年，贵司有怎样的市场规划？

2025 年，人工智能、物联网、数据中心建设、汽车电子（智能座舱及自动驾驶发展）、消费电子领域（5G 与 6G 的技术推动，VR 与 AR 的技术发展）等将成为半导体市场需求增长的主要驱动力。在这些领域，江波龙在现有的四大存储产品线（嵌入式存储，固态硬盘，移动存储和内存条）的基础上，持续补充和完善新产品，如 PCIe Gen5 SSD、UFS 4.0、车规级 SPI NOR Flash 等，以满足日益增长及更新迭代的市场及产品需求。此外，基于江波龙的全栈服务能力，PTM 商业

模式将持续在全球细分行业“开花结果”，让“存储高端力量”遍布不同领域。

CSC：请根据自己的经历和经验，谈一谈企业或者高校在培养人才与产业互动这方面的经验，您认为如何能加强培养产业或者社会实实在在所需要的人才？

江波龙高度重视校企合作，和广东工业大学、华中科技大学、西安电子科技大学、山东大学、安徽大学、厦门大学、华东师范大学等高校进行了深度合作。以广东工业大学为例，双方开展长期的科研项目合作并共建了联合创新实验室，联合多家校企合作单位推动存储技术研发与人才培养，共同促进科技成果的转移转化，为项目取得的突破性成果提供了坚实的基石。其中，江波龙与该校联合研发的“高性能大容量固态存储控制器关键技术研发及应用”项目，经过广东省科学技术厅的严格评审，荣获 2023 年度“广东省科学技术奖科技进步奖一等奖”，标志着该项目在固态存储领域的技术创新和产业化方面取得了显著成效。

此外，江波龙制定了雏鹰训练营、飞鹰计划、雄鹰计划、老鹰计划的人才学习发展体系，分别针对校招应届生、储备管理干部、中层干部及高层干部制定了不同的培养发展计划，提升员工个人能力的同时，也为公司不断输出各类关键人才，进一步实现员工与公司共同发展、联合创业的目标。

2025 年将是化合物半导体行业非常关键的一年



张菲 博士
中国区首席代表
韩国帕克 Park Systems

CSC：首先，非常感谢您接受我们的采访。在化合物半导体行业中，贵公司能够提供哪些产品和解决方案呢？

感谢您的提问。对于化合物半导体行业，我们提供了一系列针对不同应用需求的产品。具体来说，我们的产品包括 FA 实验室用的自动化原子力显微镜 FX40，适用于产品品控检测的 NX20 和 FX200，以及产线使用的全自动化 AFM NX-Wafer 产品。这些产品涵盖了从前道制程到后道检测的各个环节，能够满足行业对高精度、高效率检测的需求。

CSC：那针对这些产品，您能详细讲解一下您提供的具体解决方案吗？

当然。从整体解决方案来看，针对前道制程，我们主要提供衬底和外延的粗糙度检测，同时也与前道缺陷检测设备进行联动，提供缺陷的形貌检测。对于器件端，我们提供区域平坦度测量，并且能够进行关键尺寸的测量，比如 trench

沟槽结构的尺寸。同时,我们还提供沟槽侧壁的粗糙度监控。这些检测对于确保器件性能非常重要。

至于失效分析方面,我们的解决方案包括完备的电学测试方案,如 C-AFM 和 SCM,这能够帮助客户深入了解失效原因,优化产品性能。

CSC: 2024 年即将过去,对于化合物半导体行业,您觉得最值得关注的突破或变化是什么?

2024 年对我们来说是一个值得纪念的年份。2024 年,我们国家自主产权的八英寸的化合物半导体,如碳化硅的八英寸衬底、外延和器件已经开始大规模量产并推广。这对行业而言是一个巨大的飞跃,从产能和成本的角度来看,这将推动化合物半导体产业进入一个高速发展的阶段。

CSC: 展望 2025 年,您对化合物半导体行业的未来有何展望?

2025 年将是化合物半导体行业非常关键的一年。随着国内八英寸衬底和外延片的工艺的进步和产量的增加,国内会有大量碳化硅器件企业涌现。这些企业在未来会迎来飞速发展,并且推动整个行业向前进步。作为 AFM 厂商,我们的优势在于提供从衬底、外延到器件端的完备解决方案,未来我们也会推出新的产品,以应对市场的新需求。

CSC: 最近,贵公司在光学计量方面有了新的收购,能否分享一下贵公司未来在这一领域的发展方向?

近年来,帕克公司不断在海外收购一些光学计量设备品牌,旨在把 AFM 量测的先进技术解决思路带入光学量测产品的开发,这是我们未来发展的核心方向之一。我司自去年收购 Accurion(德国欧库睿因品牌)成功取得相关光学专利后,在 2025 年 1 月 7 日又收购了瑞士的 Lyncée Tec 公司,这是一家专注于数字全息显微镜(DHM[®])技术的企业。我们相信,Lyncée Tec 的技术与帕克的 AFM 技术融合后,将为半导体精密测量,提供更加高速,精确的测量结果,进一步推动化合物半导体行业的技术进步。

CSC: 非常感谢您与我们分享这些深刻的见解。未来我们也期待帕克公司在化合物半导体行业的更大突破与发展。

谢谢!我们也期待与行业各界共同推动技术创新和进步,助力化合物半导体产业迎接新的机遇和挑战。

未来可能在功率器件领域首先实现氧化镓的规模化应用



张辉
董事长 / 浙江大学教授
杭州镓仁半导体有限公司

CSC: 近年来氧化镓、氮化铝、金刚石和氮化硼作为超宽禁

带材料,备受学界关注,并在中国、日本产业界也得到极大的青睐,请问如何看待超宽禁带材料相关技术和未来产业化发展,最可能的应用场景在哪里?

氧化镓作为近年来备受关注的超宽禁带半导体材料,是各国的竞争重点。美国、日本对我国氧化镓材料实施禁运政策,使其成为宽禁带半导体领域的“卡脖子”材料,但同时也为中国氧化镓行业提供了发展机遇,促使国内企业加快自主研发和创新。

氧化镓是目前唯一可用常压熔体法量产的超宽禁带半导体材料,主要应用于功率器件、射频器件、日盲探测器件等领域。氧化镓具有其禁带宽度大、击穿电场高、巴利加优值高等优异性能,使基于氧化镓的功率器件具有更大的工作电流、电压以及更小的导通电阻、器件尺寸和更高的转换效率,在制作高性能功率器件方面具有突出优势,因此未来可能在功率器件领域首先实现氧化镓的规模化应用。

常见的氧化镓单晶生长工艺有导模法、铸造法、垂直布里奇曼法、直拉法、冷坩埚法、光浮区法。其中,导模法、铸造法、垂直布里奇曼法这三种方法已经可以生长出直径 6 英寸的氧化镓单晶,是目前最有望实现产业化大规模生产的方法。直拉法在制备大尺寸(O10)衬底方面有特殊优势,目前国际上最大尺寸已达到 3 英寸。冷坩埚法和光浮区法的优势是不需要贵金属坩埚,能够大幅降低单晶生长的成本,其中冷坩埚法已经可以生长出 2 英寸单晶。在上述生长工艺中,垂直布里奇曼(VB)法在氧化镓单晶生长方面具有显著优势,正成为行业的新宠,国内外氧化镓衬底制造商均已开始加速布局。镓仁已在国内率先完成 4 英寸 VB 法氧化镓长晶设备及工艺包的验证,并全面开放销售,助力氧化镓材料的科研和产业发展。

近三年氧化镓产业链也逐渐齐全,其中衬底和外延发展尤为迅速,将很快与国外头部企业并跑,甚至领跑,这也将极大加快国内器件产业化的进程。

除碳化硅和氮化镓持续大幅增长外,2025 年还可能在氧化镓、金刚石等新半导体材料器件取得突破



曹峻
副总经理
上海瞻芯电子科技有限公司

CSC: 在 2025 年,请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势?在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新?

受新能源汽车、AI 数据中心的强劲需求拉动,以碳化

硅和氮化镓为代表的化合物半导体器件的应用市场，将会持续大幅增长。随着技术的不断进步，化合物半导体行业在 2025 年还可能在氧化镓、金刚石等新半导体材料器件取得突破，此外，新型封装技术，如嵌入式 PCB 板级封装技术，将有利于提升器件的散热性、可靠性和集成度，降低寄生参数方面突破。瞻芯电子计划 2025 年推出采用沟槽结构的公司的第 4 代 SiC MOSFET 产品，其比导通电阻将显著降低，更具市场竞争力。

CSC: 过去的一年里，在化合物半导体领域，有哪些令您记忆犹新的时刻？这些事件对行业产生了哪些影响？

在过去的一年里，化合物半导体领域有许多令人瞩目的时刻。

- 在原材料方面，8 英寸衬底技术日益成熟并向 12 英寸迈进，Wolfspeed、罗姆等国际厂商持续领先，天岳先进、天科合达等国内厂商也成功推出量产的 8 英寸碳化硅衬底，部分厂商甚至开始探索 12 英寸碳化硅 N 型衬底。英飞凌推出 12 英寸的氮化镓外延片，展现了其在氮化镓领域的积极拓展的计划。
- 国际厂商推出基于 8 英寸碳化硅晶圆的碳化硅 MOSFET。Wolfspeed、英飞凌、罗姆先后宣布启用或量产基于 8 英寸晶圆的器件产品。意法半导体则联合三安半导体建设一座 8 英寸 SiC 晶圆厂和配套的一座 8 英寸 SiC 衬底厂。2024 年 11 月，安意法的首期生产线已成功点亮，预计 2025 年第一季度通线后开始流片验证。相对保守的是安森美，其位于韩国富川的碳化硅晶圆厂计划于 2025 年完成相关技术验证后过渡到 8 英寸。

CSC: 碳化硅、氮化镓在新能源汽车、数据中心和白色家电等新兴领域中表现出色，国内碳化硅或氮化镓行业还有哪些亟待克服的堵点？比如政策、技术、产业链协同、市场、资本等方面。

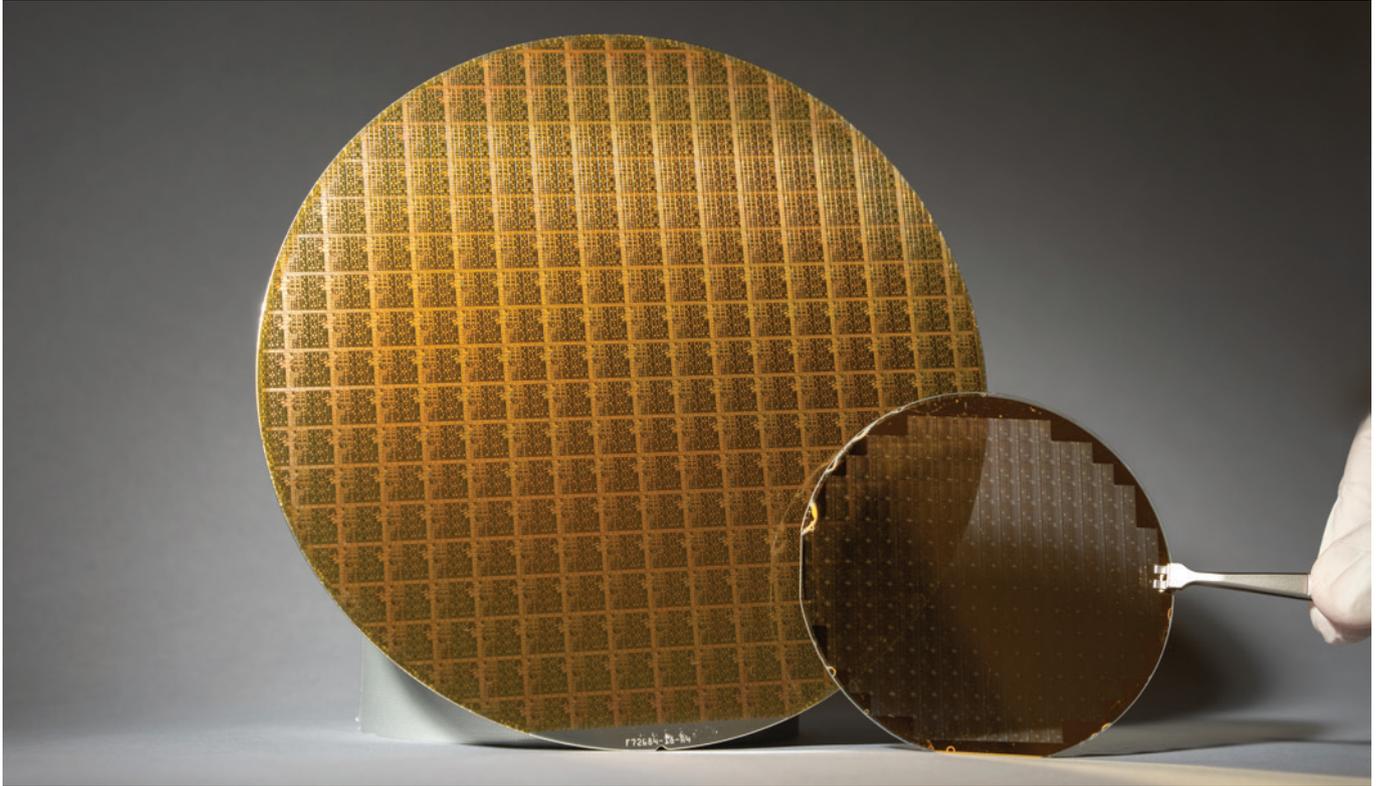
政策不够精准：虽然国家已出台多项支持半导体产业的政策，但针对碳化硅的具体政策细节不够完善，在研发投入、产业化应用等关键环节的扶持力度不够，导致难以获得有效的政策支持。

- 衬底材料质量与尺寸：对于碳化硅，成熟的 6 英寸晶圆生长技术仍为气相沉淀法 (CVD)，成本高、速度慢，而 8 英寸大尺寸衬底的制备则面临良率低、切割难等诸多挑战，导致成本难以降低。

- 器件制造工艺：在器件制造方面，如何进一步降低碳化硅 MOSFET 的失效率、提升质量与可靠性，以及碳化硅器件进一步迭代后带来更高的电流密度所面临的器件鲁棒性和更高的散热需求等挑战；
- 跨领域合作紧迫：碳化硅产品定义和开发周期较长，而新能源汽车、数据中心等新兴领域的技术更新较快，需要广泛开展跨行业的合作，方能开发更具竞争力的产品。
- 新兴应用市场正在起步：虽然碳化硅的应用前景广阔，但以新能源汽车为代表的市场渗透率正在扩大，传统的市场比如白色家电、工业电源等行业也即将起势，主要原因是跟硅基器件比，产品成本相对较高、产业成熟度还需进一步提升以及客户对新技术的接受度需要更长时间等。
- 市场竞争加剧：全球碳化硅市场主要被国外企业占据，国内企业的市场份额相对较小，品牌知名度和市场影响力不足。但随着碳化硅市场的快速发展，吸引了众多企业的进入，市场竞争日益激烈，国内同行之间的出现低价竞争等问题，这影响了企业的盈利能力和可持续发展能力。

CSC: 当前，碳化硅现在所有器件结构几乎都是沿用硅的初期技术路线（如平面型，槽栅结构等），您认为碳化硅技术和应用未来在哪些方面可以所有创新或者发展？

- 新型器件结构研发：除了现有的平面型和槽栅结构，碳化硅未来有望采用 FinFET 结构降低沟道电阻、采用复合衬底技术进一步降低衬底电阻等新技术，从而实现更小的芯片尺寸、更低的功耗和更高的工作频率。
- 高压大功率应用：开发 3300V 及以上更高电压等级的碳化硅器件，以适配风能、轨道交通、输配电等兆瓦级以上应用场景；另外采用 10kV 碳化硅器件的固态变压器将把传统的变压器在体积和重量上缩小，并且提供数字化调控的功能。
- 极端环境应用拓展：凭借碳化硅的高温、高压、高辐射耐受性，进一步拓展其在极端环境中的应用，如航空航天、深海探测、核反应堆等领域。研发适应极端环境的碳化硅器件封装技术和测试方法，提高器件在恶劣条件下的稳定性和可靠性。CS。



迎接异质革命

近期在异质集成电路上的进展凸显了其在现实应用中的潜力

作者：Christopher Maxey、Justin Kim、Dave Hodge、Mark Soler、Bennett Coy、Dan Green、James Buckwalter 和 Florian Herrault 来自 PseudolithiC 公司

自超大规模集成电路（VLSI）硅 CMOS 技术诞生以来，其射频（RF）和毫米波性能在不断追求更小的栅极尺寸和更高器件密度的过程中一直处于次要地位。填补这一空白的是多种化合物半导体，例如砷化镓（GaAs）、氮化镓（GaN）和磷化铟（InP），它们在更高的频率下提供高增益和高输出功率。得益于这些器件，人们得以构建固态相控阵雷达、5G/6G 基站和量子计算机。然而，这些应用在生态系统中面临着诸多挑战，许多人可能认为“异质”材料是一个问题，它会减缓并限制其采用。与硅 CMOS 相比，化合物半导体器件的制造时间通常要长一倍，单位面积的成本要高出 5 到 10 倍，因为它们缺乏高量产带来的基本经济优势。

一个吸引人的解决方案是异质集成。许多人

正在研究这种方法，它将多种技术的独特优势结合到一个集成电路中（见图 1）。在这里，我们回顾了异质集成兴趣的增长、其在半导体技术历史

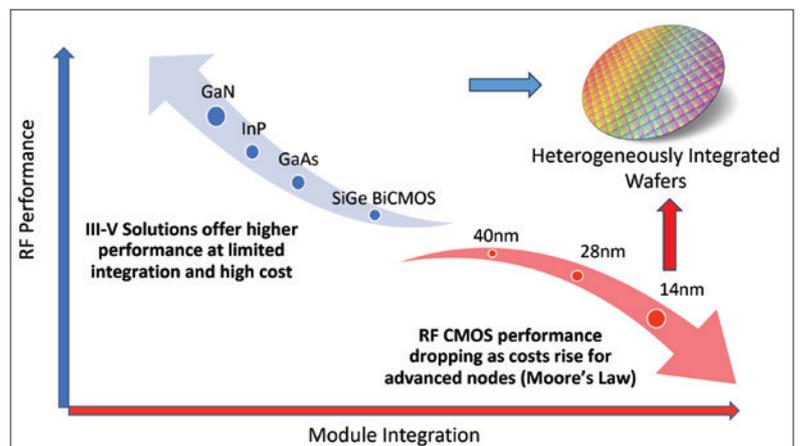


图1：硅基CMOS和化合物半导体各自具有独特的优势，而异质集成有望将两者的优势完美结合。

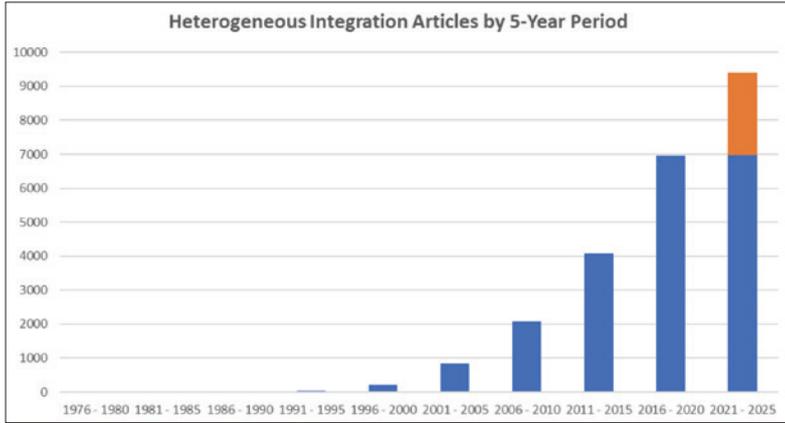


图2：从20世纪70年代至今，每五年为一个周期，涉及异质集成的文章和专利引用情况。最后一个周期包括对当前周期剩余时间的线性外推（数据来源：谷歌学术）。

演变中的进展，以及它为加速新器件进入市场所提供的潜在转折点。我们还描述了我们公司——PseudolithIC 的贡献，我们是许多“史上首次”原型设计的先驱，包括世界上第一个基于 InP 和 GaN 器件的毫米波放大器。

异质集成有望产生重大影响

证据表明异质集成的兴趣正在加速增长，在过去三十年中，期刊文章和专利申请的数量不断增加（见图 2）。在千禧年之初，异质集成开始成为一个真正的主题，从那时起，出版物的数量一直稳步增长，直至今日。与这一趋势相伴的是，实现集成解决方案的潜在方法数量以及异质集成的潜在应用数量都在增加。例如，不同数字芯片的集成催生了多个会议和联盟，包括最近成立的通用芯片互连快速联盟。许多这类活动得到了联邦资助的支持和推动，例如美国国防高级研究计划局（DARPA）的 CHIPS 计划。还有许多由政府研究计划推动的努力，

专注于在芯片级别混合光技术，以降低成本并提高光子集成电路的性能。

从更广泛的半导体创新历史来看，从一项技术的首次成果到其商业部署的时间一直大约是二十年。开发化合物半导体器件技术（例如基于 GaAs 或 GaN 的技术）的时间与硅技术相似（见图 3），最初的器件成果比商业应用的部署早大约 20 年。

对于 GaAs 和 GaN，其发展得到了重大工业投资的支持，部分由美国政府资助。GaAs 器件的开发得到了 DARPA 微型化和集成微电路（MIM-IC）计划的支持，而 GaN 的进步则得益于 DARPA 宽禁带半导体（WBGS）计划。异质集成现在正处于商业应用的边缘，并且也受益于类似的投资。

根据历史发展速度，我们可以得出结论，异质集成已准备好实现其商业影响。

PseudolithIC 方法的优点

许多研究小组专注于射频应用，并探索了多种方法。我们参与了这一领域，但将技术推向了更远的地方，通过商业化一种芯片级 2.5D 集成方法，利用现有的射频硅和化合物半导体生态系统。

我们的方法在三个关键价值主张上超越了专注于单一材料的单片工艺。首先，我们加快了高性能射频电路的设计和制造过程。例如，设计新电路并集成异质材料（如 N 极性 GaN）的速度比传统代工厂更快，因为我们只需要材料的芯片，而不是整个单片微波集成电路（MMIC）。因此，可以从一次流片中获得数千个芯片（见图 4）。

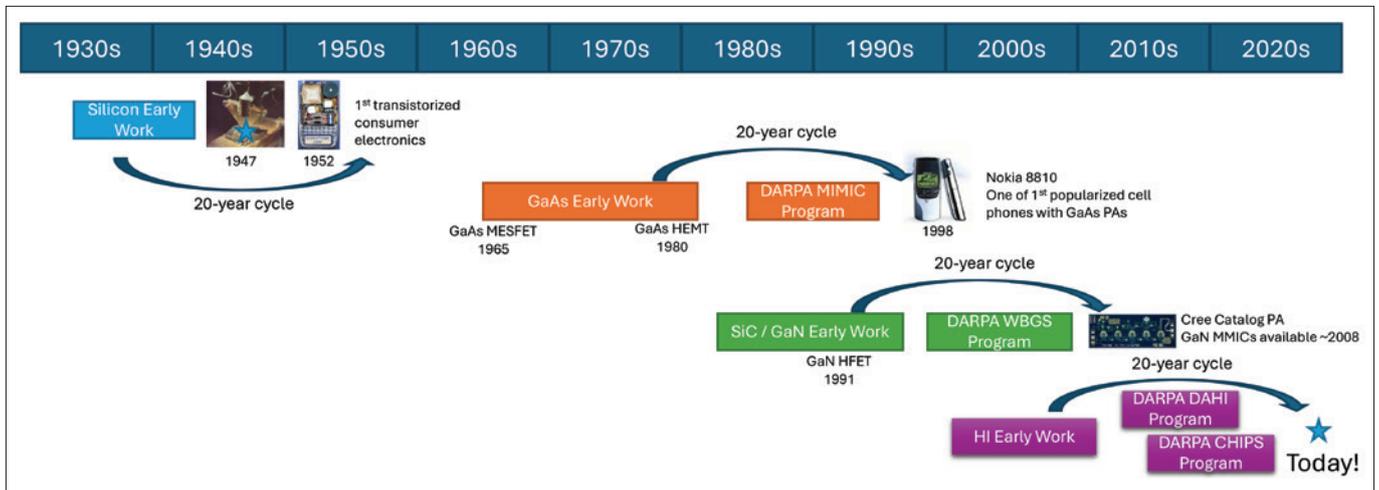


图3：一条时间线，展示了硅、砷化镓（GaAs）、氮化镓（GaN）以及异质集成作为半导体技术的发展演变。

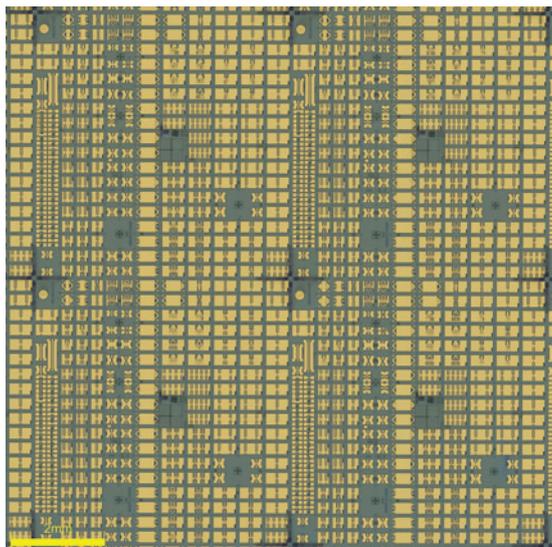


图4: 用于N极性氮化镓 (GaN) 芯片制造的“晶体管海洋”晶圆的显微照片。

一旦我们采购了芯片并建立了库存，我们的设计师只需要设计中介层，以生产一个新的伪单片集成电路 (PLIC)。其次，我们的方法允许在单个 PLIC 中真正“混合和匹配”不同的器件，如 InP 和 GaN，从而实现无需多芯片模块的最佳架构。最后，由于中介层是基于直径至少为 8 英寸的晶圆制造的，它们的面积至少是典型 III-V 工艺中使用的 4 英寸晶圆的四倍，从而带来显著的晶圆厂吞吐量和成本优势。

为了享受所有这些好处，我们采用了一种方法，首先从已建立的国防工业基础或商业代工厂获取单独的活性 III-V 晶体管，甚至是更复杂的集成电路。将这些器件切割成单独的“芯片”后，将它们嵌入到单独设计和制造的硅中介层中，该中介层可能包含无源网络（如变压器）和有源 CMOS 控制电路。通过采用低温工艺，我们保持了芯片和原位 CMOS 器件的完整性。我们最后一步是在晶圆级别完成集成，即在芯片和中介层之间制造铜共面波导互连。

最终产品，即 PLIC，是完全平面的，与商业芯片贴装、封装和芯片级封装工艺兼容，有助于在更高级别的系统中进行下游集成。至关重要的是，PLIC 与单一技术集成电路几乎无法区分（见图 5，该图显示了芯片嵌入中介层后的 PLIC 的横截面，并突出了由于直接接触高功率芯片背面而带来的热优势）。

首次流片的成功

我们独特的工艺利用了硅的成熟度和可靠

性，简化了毫米波和微波 MMIC 设计过程，从而实现了极高的首次流片成功率。我们工艺的优势在最近的出版物中得到了体现，这些出版物概述了我们的技术如何用于制造 N 极性 GaN 功率放大器、InP 功率放大器以及同时包含 InP 和 GaN 技术的两级放大器。

最近的研究表明，N 极性 GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT) 为微波和毫米波应用提供了高效率、高功率密度和出色的线性度。然而，将新兴的 GaN HEMT 技术转化为商业应用受到完整 MMIC 流程的代工厂开发周期长的阻碍——这涉及到器件成熟和认证，并且由于使用了专用的 4 英寸外延晶圆，成本很高。我们的方法解决了其中的一些延迟问题，通过引入将 N 极性晶体管嵌入硅中介层的异质设计，加速了材料的可行性。

对于我们制造的放大器，我们使用了一个 HEMT 芯片，它具有：80 纳米的栅极长度；500 纳米的栅极 - 漏极间距；以及两个宽度为 37.5 微米的指状结构，总栅极周长为 75 微米。对该放大器的 S 参数测量表明，其峰值输出功率为 150 毫瓦（见图 6）。尽管设计跨越了两个工艺，但由于

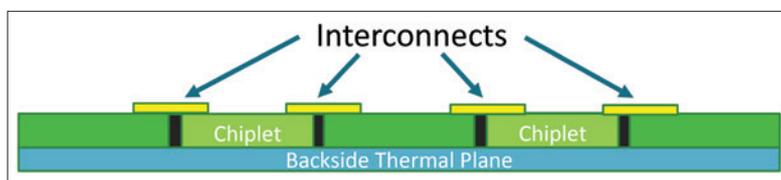


图5: 一个完整的伪单片集成 (PseudolithiC PLIC) 的横截面图，其中嵌入了一个芯片在硅中介层中。

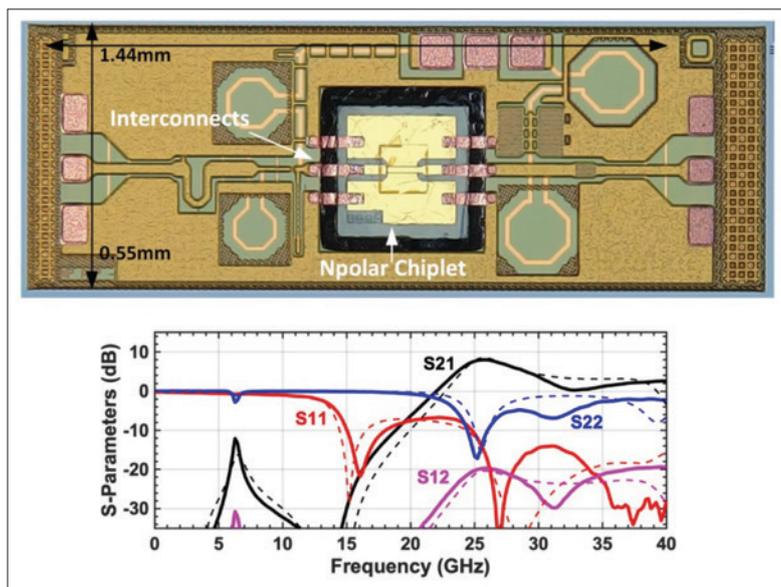


图6: (上) 26 GHz 异质集成放大器的芯片显微照片，展示了输入和输出匹配网络的紧凑实现。为了清晰起见，高电子迁移率晶体管 (HEMT) 芯片和互连部分被突出显示。
(下) 异质集成放大器的模拟 (虚线) 和实测 (实线) S 参数。在 26 GHz 处达到峰值增益 8.0 dB。

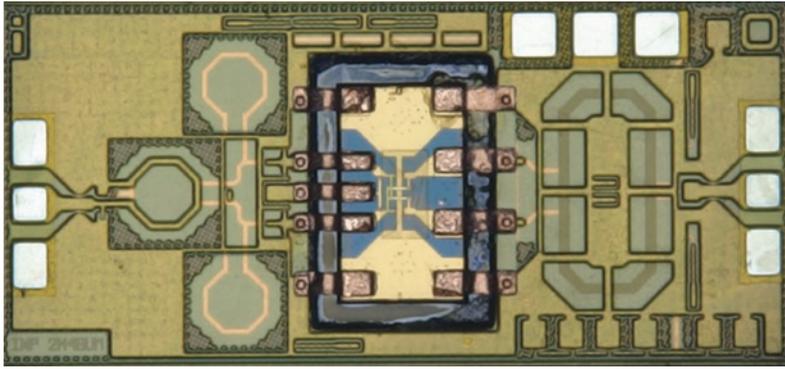


图7: Ka波段异质集成磷化铟 (InP) 放大器的芯片显微照片。

我们定制的设计环境成熟，擅长将硅和 III-V 技术结合起来，因此在 20 到 40 吉赫兹之间有很好的—致性。我们的放大器在 26 吉赫兹时达到峰值增益 8.0 分贝。在这个频率下，输入和输出反射损耗分别超过 16 分贝和 12 分贝。反向隔离度 S12 在整个频段内优于 20 分贝。测量的放大器从 0 到 40 吉赫兹无条件稳定。

我们还在更成熟的工艺技术中展示了类似的首次流片成功，包括 2024 年初报告的 250 纳米 InP 双极型晶体管 (HBT) 工艺。该工艺提供 2.5 伏的电源，最高振荡频率 (f_{max}) 接近 650 吉赫兹。 f_{max} 的高值以及截止频率 (f_T) 的高值确保了该技术适用于高增益和高效模块。

其他属性包括低电源电压和高集电极电流密度，为 2 毫安/微米，这些优势支持与期望的 50

欧姆更接近的匹配。因此，需要较低的阻抗匹配品质因数 (Q) 来匹配到器件，从而实现宽带放大器设计。

我们的异质集成 InP 放大器 (见图 6) 在芯片上包含了差分模式稳定化。为了通过共模节点提供基极电压，在输入端使用了具有电容隔离的变压器。在输出端，通过四分之一波长平衡器将集电极上的差分信号合并。采用这种配置，我们的放大器在 24 吉赫兹时显示出 10.6 分贝的增益，总功耗仅为 45.3 毫瓦。

结合 GaN 和 InP

在我们已经建立了单一 III-V 技术异质集成的可行性和商业竞争力的基础上，我们进一步证明了我们的技术可以在同一集成工艺中混合和匹配不同的 III-V 器件类型。为了进行这一演示，我们借鉴了之前两个电路设计的成功经验，设计并制造了一个具有 InP 前置级和 GaN 后置级的两级放大器。制造这个单个 PLIC 的动机是，没有任何单一技术最适合所有射频功能。在我们的 Ka 波段放大器中，我们需要一个 InP 前置级来最大化增益，以及一个 GaN 后置级来最大化输出功率 (见图 8，显示了制造的 PLIC 的芯片显微照片和两级的顶层原理图)。

由于我们在之前已经分别构建并测试了每一级，因此我们将重点放在新的级间匹配网络上，

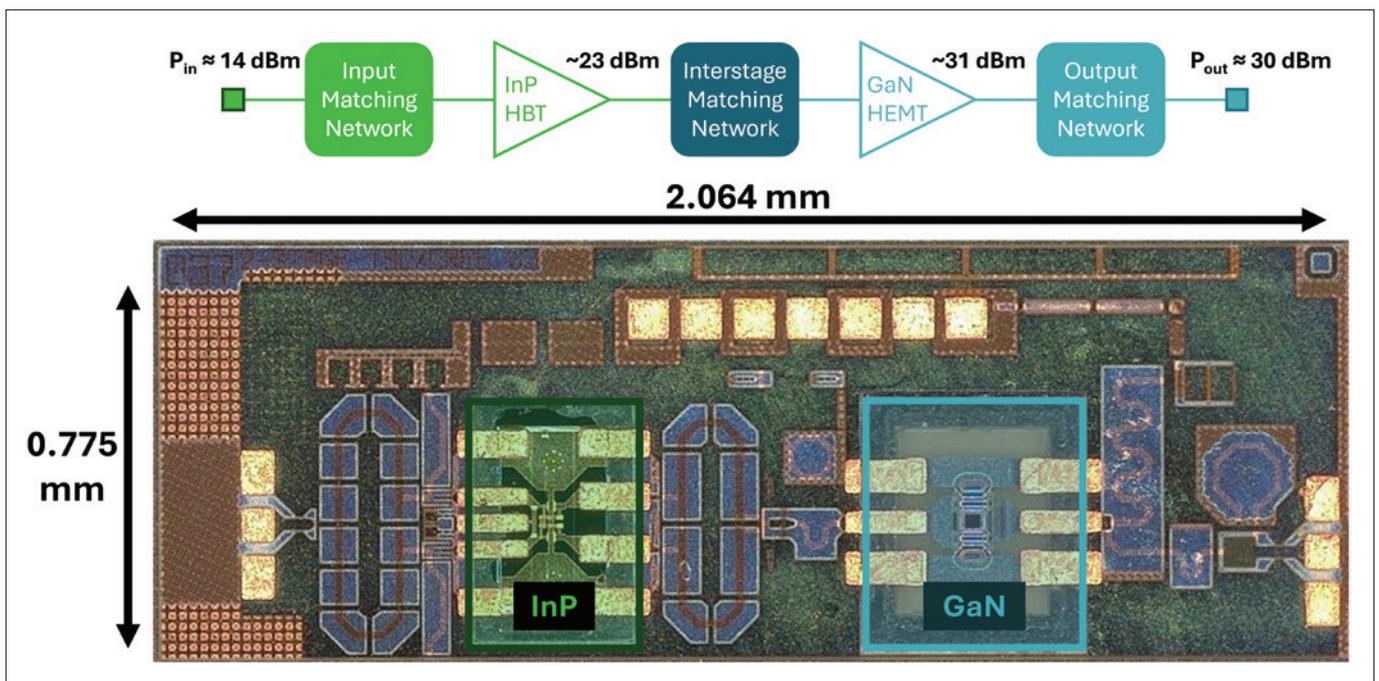


图8: (上) 两级放大器的高级原理图。(下) 制造完成的器件的芯片显微照片。

并对之前的输入和输出匹配网络进行了微调。这再次证明了我们如何通过独特的工艺加速以前不可能实现的电路拓扑结构的采用。我们的组合放大器在 25.7 吉赫兹时测量到超过 20 分贝的增益，验证了我们合并这两种技术的方法。

更高级别的集成

发射 / 接收模块在商业和国防电子领域无处不在。这里对更高性能的需求不断增长，同时要求以更低的成本和更高的频率实现。国防电子正在向 V 波段和 W 波段迁移，以获得带宽和频谱接入优势，以对抗潜在对手。同样，商业电子也在转向更高频率，以满足蜂窝和卫星通信网络中对带宽不断增长的需求。异质集成非常适合满足所有这些应用需求，提供优化的性能，同时保持小尺寸。

传统上，发射 / 接收模块是由多个芯片构成的，并采用传统的印刷电路板 (PCB) 制造技术进行封装和互连。采用这种方法是因为没有任何单一的单片工艺适合每个发射 / 接收功能(见表 1，列出了典型发射 / 接收模块的一些设计考虑因素，包括最适合这些要求的器件)。

在我们多级、多技术放大器的成功基础上，我们已经设计并制造了几代发射 / 接收模块，通过混合不同的器件来实现非常小的尺寸(通常仅约 5 平方毫米)中的最佳性能。根据我们最新的模拟结果，我们的技术可以从模块的发射路径中提供 2 瓦的输出功率。接收路径可以在 28 吉赫兹时提供 12 分贝的增益，同时在考虑开关损耗的情况下，整个模块的噪声系数保持在 2.5 分贝以下。毫无疑问，异质集成是实现最佳技术组合的关键，能够在小尺寸中实现卓越的性能。

经过 20 年的公私投资和研究活动，异质集成似乎现在已准备好实现商业采用，这得益于基础制造技术的持续成熟和演变。我们通过专有工艺为这一发展做出了贡献，该工艺产生了几个“史

表1: Ka波段收发模块的设计考虑因素。

Component	Ideal Qualities	Candidate Technologies
T/R switch	Fast Switching Time High Off/On Isolation Low Insertion Loss	Si SOI CMOS GaN HEMT
Low-Noise Amplifier	Low Noise Figure Wide Bandwidth Low Power Consumption	InP HEMT GaAs pHEMT
Power Amplifier	High Output Power High Efficiency Ease of Matching	GaN HEMT

上首次”的原型设计，突出了异质集成在射频和毫米波电路中的关键优势。

我们的成就包括世界上第一个结合 InP 和 GaN 器件的毫米波放大器，这一演示突出了结合不同技术所关联的极端灵活性。另一个重大成功是我们密集的发射 / 接收模块设计，将 InP、GaN 和 CMOS 结合起来，以提供更高的性能和更低的成本。尽管这一演示针对的是 Ka 波段应用，但这种方法很容易扩展到 W 波段及以上的频率。这些结果突出了现在是将异质集成转向各种应用的时刻，从商业 5G/6G 电信到国防电子等。📡

● 作者感谢：感谢美国国防高级研究计划局 (DARPA) 第二阶段小企业创新研究 (SBIR) 计划的支持，该计划在 David Abe 博士、Thomas Kazior 博士和 Timothy Hancock 博士的监督下进行，以及国家科学基金会 (NSF) 第一阶段的支持，该计划在 Elizabeth Mirowski 博士的监督下进行。部分工作在加州大学圣塔芭芭拉分校 (UCSB) 纳米制造设施中完成，这是一个开放获取实验室。作者感谢使用加州纳米系统研究所内的量子结构设施，该设施由加州大学圣塔芭芭拉分校和加州大学校长办公室支持。

扩展阅读

- ▶ J. Kim et al. “Heterogeneously-Integrated Gallium Nitride and Indium Phosphide Devices for Ka-band Amplifiers” in The Proceedings of the 2024 RF Integrated Circuit Conference (RFIC), Washington, DC, June 2024.
- ▶ J. Kim et al. “A Heterogeneously-Integrated Ka-Band, N-Polar Gallium Nitride HEMT Amplifier” in The Proceedings of the 2024 International Microwave Symposium (IMS), Washington, DC, June 2024.

高功率激光器：量子阱还是量子点？

当谈到卫星通信时，是使用量子阱高功率激光器还是使用量子点高功率激光器更好？

作者：Yongkun Sin, Aerospace Corporation

这十年将见证卫星通信市场的显著增长。这对于发射 915 nm 至 980 nm 波长的高功率大面积激光器制造商来说是个好消息，因为这些光源是空间卫星通信系统的关键组件。例如，马斯克的 SpaceX 公司使用配备有激光链路的星链 (Starlink) 卫星来帮助降低卫星宽带互联网的延迟。请注意，SpaceX 的计划包括在未来的星链卫星上使用激光器，以便在轨道上传输信息。

太空中部署大面积激光器的核心是由 In-GaAs-AlGaAs 异质结构制成的应变量子阱有源区。除了高效率之外，这些具有单个 InGaAs 量子阱的大面积激光器还能够进行前所未有的高功率运行，这要归功于我们努力探究和解决器件故障的原因。研究揭示了砷化镓基激光器中表面灾变性光学损伤或灾变性光学镜面损伤的根源，并推动了表面钝化等技术的发展，显著提高了表面

故障原因的阈值。这些进步使波导宽度约为 100 μm 的大面积激光器能够产生超过 20 W 的 CW 输出功率。然而，虽然这一进步非常令人鼓舞，但这些激光器仍然容易受到灾变性光学损伤，可能会导致灾变性和突发性的退化。这是太空应用的一个主要问题。因此，为了探究这种故障的根源，我们 Aerospace Corporation 的团队深入研究了这个问题，发现这些大面积激光器主要因一种与灾变性光学体损伤相关的新故障模式而退化。

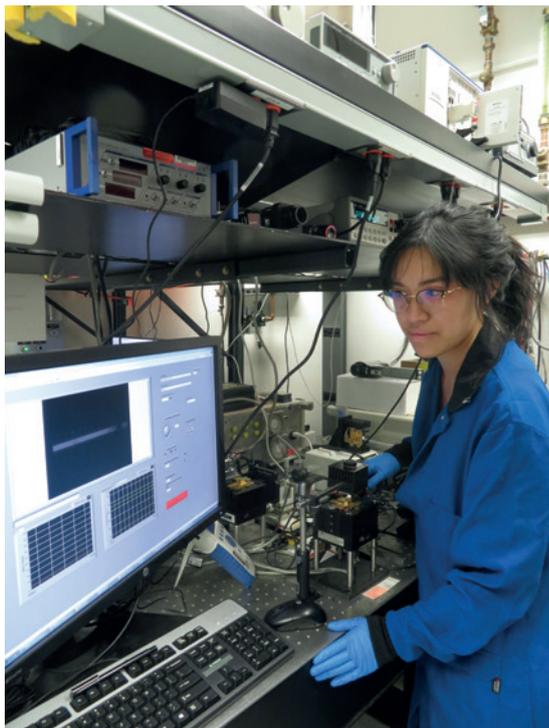
另一种可以为卫星通信提供光源的激光器是 InAs-GaAs 量子点激光器。最近，这种发射器作为硅光子量子阱激光器的潜在下一代而引起了广泛关注，其在有源区中对载流子进行三维限制，有望抑制载流子在生长和辐射引起的缺陷位点的非辐射复合。这一特性使量子点激光器有望成为太空应用的备选者。然而，其失效模式和机理仍不清楚。为了解决这方面的知识匮乏问题，我们将量子阱高功率大面积激光器与量子点高功率大面积激光器有源区的退化过程进行了比较。请继续阅读，了解我们的发现。

器件设计

我们研究了具有相同几何形状的量子阱和量子点激光器。两者都有 2mm 腔长和 100 μm 宽度的波导。

这些激光器已被钝化，在其表面涂上了减反射和高反射率涂层。此外，在制造这些激光二极管的过程中，在背面 n 金属中引入了窗口，使我们能够直接观察整个激光腔的自发发射。

我们的应变量子阱激光器发射 960nm 至 980nm 波长，通过 MOCVD 生长，包含在 AlGaAs-cladding 层之间的 InGaAs 渐变折射率分别限制异质结构。相比之下，InAs-GaAs 量子点激光器的发射波长约为 1 μm ，是通过 MBE 生长的，



Emily Tang, Aerospace Corporation 的助理研究员正在操作时间分辨电致发光装置。

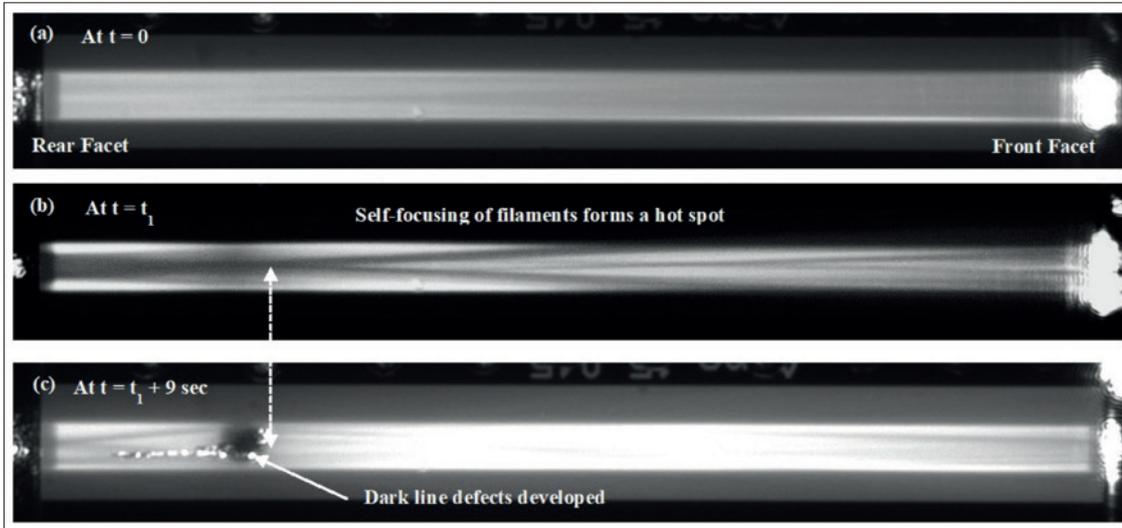


图1: 量子阱激光器的电致发光图像, 显示细丝的自聚焦 (b) 和暗线缺陷的形成 (c)。

并通过 Stranski-Krastanov 工艺形成量子点。这些激光器包含十层堆叠的 InAs 量子点。

为了评估我们的量子阱和量子点窗口激光器, 我们使用 p 侧向下的配置将它们连接到 C 型基座上。由于这两种激光器的激光波长对于 GaAs 衬底来说是透明的, 因此我们很容易透过衬底观察有源层内的光强分布。

比较量子阱激光器

我们的室温测量表明, 量子阱激光器的阈值电流为 280 mA, 斜率效率为 0.9 W/A, 峰值功率转换效率为 50%, 外微量子效率为 0.71。相比之下, 量子点激光器在室温下测量时, 其阈值电流为 700 mA, 斜率效率为 0.8 W/A, 微分电阻为 0.1 W, 阈值电压为 1074 mV, 光输出功率在 6A 时为 3.5W。

两种类型激光器的近场分布明显不同。量子阱激光器具有细丝阵列, 最大值约为 10 个, 典型细丝间距为 10mm。相比之下, 量子点激光器的近场分布显示出明显抑制细丝形成。造成这种差异的最可能原因是量子点激光器的线宽增强因子比其量子阱激光器小得多。我们进行了加速寿命试验, 监测一系列散热器温度下的激光二极管参数, 例如光功率、电流和电压。这使我们能够确定老化特性 (无论是快速性、渐进性还是灾变性/突发性) 和故障时间。

为了深入了解两种类型激光器的退化过程, 我们还在整个寿命实验期间到器件故障期间实时捕获了窗口区域的电致发光图像。利用这种技术, 提供 2 μm/pixel 的标称空间分辨率, 我们通常在寿命实验期间每秒收集一张电致发光图像。这些

图像使我们能够实时观察相当多的关键事件, 包括细丝的自聚焦、暗点和暗线缺陷的形成以及暗线缺陷的蔓延。

我们的量子阱激光器的时间分辨电致发光图像快照如图 1 所示。我们使用 70°C 的散热器温度, 在 6 A 的连续波操作下驱动该激光器。比较 $t = 0$ 和 $t = t_1$ 时刻的图像, 很容易发现故障的前兆特征——细丝的自聚焦, 如白色虚线箭头所示。

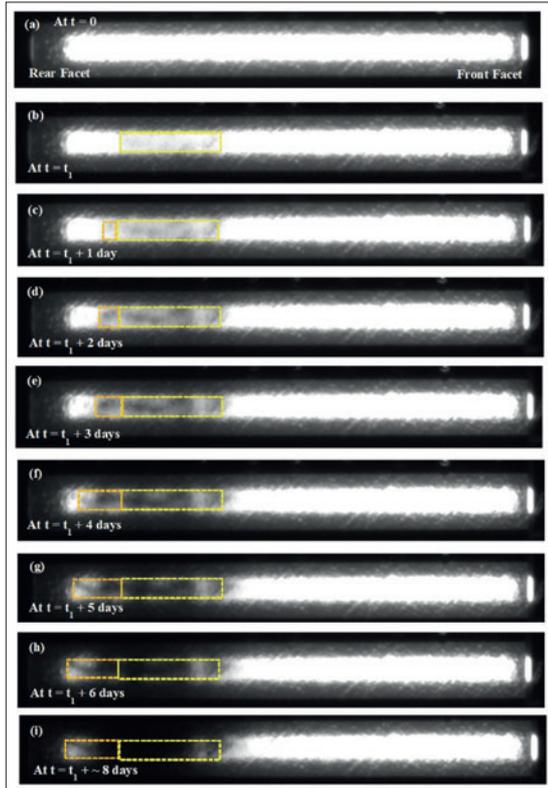
这种自聚焦是由局部增益饱和和空间烧孔造成的, 导致细丝通过热透镜会聚。我们发现, 细丝自聚焦产生的光致加热显著提高了局部区域的温度, 从而形成过热点。我们的电致发光图像表明, 暗线缺陷在 t_1+9s 位置形成 (这些缺陷的起始点, 如图 1 (c) 所示, 由白色虚线箭头突出显示)。随着暗线缺陷的发展, 激光产生的功率显著降低。

在器件运行期间, 有源层中预先存在的点缺陷通过复合增强的缺陷反应过程转化为缺陷复合体。在此过程中, 点缺陷发生迁移、反应和解离。这种退化来自载流子非辐射复合增强的缺陷反应。请注意, 非辐射复合中心位置处的非辐射复合过程会在器件运行期间产生热梯度。

非辐射复合的后果之一是会导致局部加热, 从而增加光吸收。假设没有局部加热, 量子阱激光器的吸收系数为 200 cm^{-1} , 则局部加热为 130°C 时, 吸收系数将增加至 $8.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 。130°C 的局部加热是量子阱激光退化之前的三个临界温度之一。我们发现, 当局部温度达到 130°C 左右时, 局部区域开始强烈吸收激光光子。反过来, 局部增益饱和和空间烧孔导致的细丝形成和自聚焦开始发挥关键作用。

局部加热的另一个影响是它会产生热透镜,

图2: 量子点激光器的电致发光图像显示暗区缺陷的形成。



这也会导致局部增益饱和。热透镜会导致光束在传播时变窄和自聚焦，从而导致局部光功率密度显著增加（参见图 1(b) 中的白色虚线箭头）。由于热透镜效应可以进一步增强细丝沿纵轴传播时的自聚焦，因此局部区域的光强度可能严重依赖于热梯度。

当局部温升超过 130℃ 时，光致加热产生的过热点会加速复合增强缺陷反应过程，导致非辐射复合中心发展成扩展缺陷。当局部加热超过 300℃ 时，会产生另一个情况，吸收系数会增加达到 $2.5 \times 10^8 \text{ cm}^{-1}$ ，并且其热失控过程开始发生。当局部加热达到 1200℃ 时，这种热失控过程可能会导致量子阱激光器局部熔化。然而，局部熔化并不是产生广泛位错网络的先决条件。

量子点激光器

我们还使用自动电流控制和时间分辨电致发

光装置对量子点激光器进行了加速寿命实验（参见图 2 从其中一台量子点激光器捕获的图像）。

6.5 A 的电流和 75℃ 的散热器温度驱动该特定激光器，我们确定发生变化的第一个迹象是轻微损伤的区域（如图 2(b) 中黄色虚点矩形所示（在 $t = t_1$ 时拍摄），而图 2(a) 中没有（在 $t = 0$ 时拍摄））。没有证据表明有任何故障的前兆，如细丝的自聚焦。这清楚地表明，光学效应在量子点激光器中不如量子阱激光器那么重要，在量子阱激光器中，光学效应是形成暗线缺陷的罪魁祸首。然而，电效应和热效应对量子点激光器来说似乎更为关键。

长时间驱动量子点激光器会产生更多损伤区域。图 2 (c) 至 2 (i) 中的每个电致发光图像都有两个虚线矩形，分别用黄色和橙色表示原始损伤区域和新损伤区域。从这些电致发光图像中我们得到了三个值得注意的观察结果：新损伤区域主要向背面发展；7 天后，新形成的暗区缺陷的长度从约 $60\mu\text{m}$ 增加到 $235\mu\text{m}$ ；7 天内，弱受损区域或密度较低的位错区域变得明显更加密集。

为了充分了解这些位错的性质，我们需要从不同退化阶段的一系列量子点激光器制备透射电子显微镜样本。虽然这是我们未来的工作，但仍然可以提出一种退化设想：存在一个复合增强的缺陷反应过程，该过程会产生位错（如图 2 (b) 中的弱损伤区域所示），位错来自量子点有源区的非辐射复合中心和点缺陷。这些位错通过复合增强位错滑移过程缓慢扩散，如图 2(c)-(i) 所示。该过程的扩散速度比量子阱激光器中暗线缺陷的扩散速度慢得多。

量子阱 vs. 量子点

我们的研究表明，量子阱和量子点大面积激光器有源区的有着非常不同的退化过程。在量子阱激光器中，暗线缺陷是由细丝的先兆自聚焦形成的，从而形成过热点；而在量子点激光器中，暗区缺陷的形成没有故障的先兆特征。然而，量子阱和量子点激光器也存在共同点，即显示出体故障——前者是由于快速灾变性光学体损伤，后者是由于缓慢的逐渐退化，可能是通过复合增强的位错滑移过程进行的。为了充分了解量子点激光器的退化机制，还需要进一步的研究，本文所阐述的量子点激光器的优点可以保证这些激光器在未来的空间卫星系统中得到应用。☑

扩展阅读

- ▶ Y. Sin et al. "Catastrophic optical bulk damage in high-power In GaAs-AlGaAs strained quantum well lasers," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics 23 1500813 (2017)
- ▶ Y. Sin et al. "Degradation in high-power broad-area lasers with quantum well and quantum dot active regions: a comparative study," Proc. SPIE 12403 124030C (2023)

氧化镓单晶与外延中的“准对称性”与“晶格巧合”

作者：严宇超，金竹，邓天琪，张辉，杨德仁
(杭州镓仁半导体有限公司，浙江大学，浙江大学杭州国际科创中心)

近日，杭州镓仁半导体联合浙江大学研究团队，在 β -氧化镓 (β - Ga_2O_3) 单晶生长领域取得关键技术突破！在国际知名期刊 *Crystal Growth & Design* 第 25 卷 / 第 3 期发表了题为《Highly Coherent Grain Boundaries Induced by Local Pseudomirror Symmetry in β - Ga_2O_3 》的研究论文。

β - Ga_2O_3 是一种极易在单晶生长与外延过程中产生孪晶的材料，严重制约了单晶生长与外延的良率提升。本研究从对称性 (Symmetry) 原理出发，首次提出了 β - Ga_2O_3 中的准对称性 (Pseudo Symmetry)，成功解析了 (100) 孪晶界与“共格非对称孪晶界”的物理起源，破解了 β - Ga_2O_3 易形成孪晶的“基因”。有助于从科学原理与工程设计的层面提升单晶生长与外延的良率，为高性能器件开发扫清关键障碍。

参考此研究结果，镓仁研发团队基于自研氧化镓专用设备对 β - Ga_2O_3 生长工艺开展优化迭代，初步解决了孪晶这一行业难题。

文章导读：

对称性是宏观世界的核心概念之一，从天体运动的角动量守恒，到自然生物的形态与功能，都深受对称性的影响。即便在更为微观的原子尺

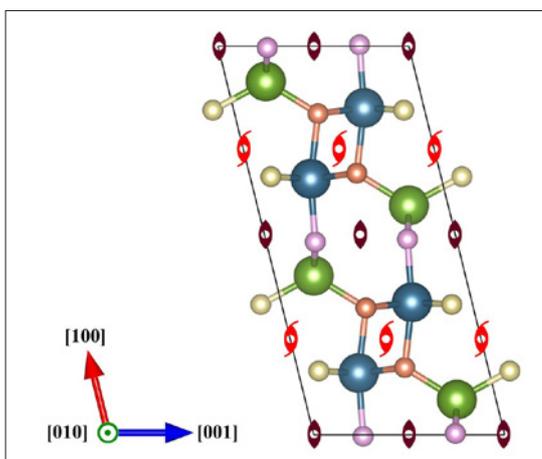


图1: β - Ga_2O_3 单胞中的标准对称性。

度，对称性亦不可或缺。对于晶体材料的透彻理解，同样离不开对其对称性的深刻认识， β - Ga_2O_3 也并不例外。

β - Ga_2O_3 是一种具有广阔应用前景的宽禁带半导体材料。众所周知， β - Ga_2O_3 的空间群为 $C2/m$ ，相较于具有 $P6_3mc$ 空间群的 4H-SiC 与 GaN，其对称操作更少，对称性也更低。在图 1 所示 β - Ga_2O_3 单胞中，存在具有镜面对称性的 (010) 面，以及具有二次旋转对称性与螺旋旋转对称性的 [010] 晶向。

然而，在上述严格的对称性之外， β - Ga_2O_3

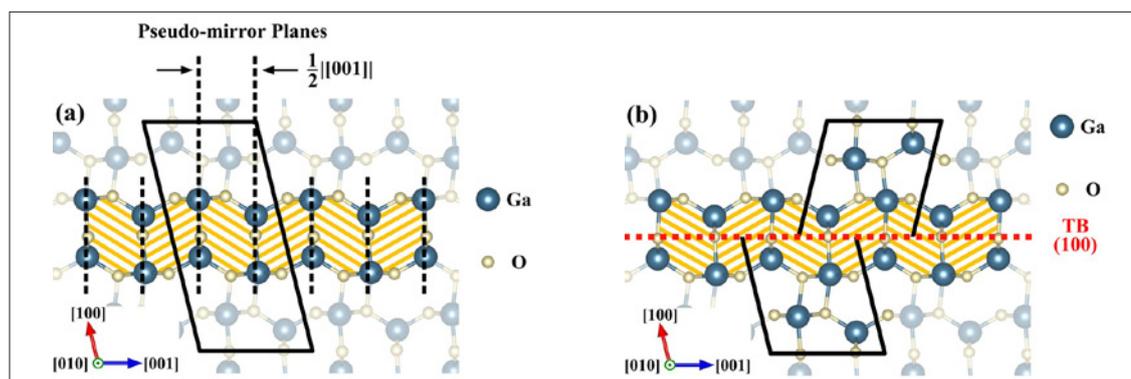


图2: (a) β - Ga_2O_3 中的准对称原子层，(b) 建立于准对称性上的 β - Ga_2O_3 的 (100) 面孪晶。

还具有特殊的“准对称性” (Pseudo Symmetry)。如图 2 (a) 所示, $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 具有“准镜面对称”的原子层结构,“准镜面对称”的含义是,该层原子的镜像和它本身之间的位置并不严格重合,但仅仅差了微不足道的一点距离。该原子层的“准镜面对称”面垂直于 (100) 面,在图 2 (a) 中标注为黑色虚线,该“准对称面”的间距为:。这一“准对称性”使 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的单晶生长和外延过程中极易出现 (100) 面的孪晶。正如图 2 (b) 所示,在形成孪晶结构后,孪晶界面处几乎没有原子的位移与键的扭曲,其孪晶界面能仅为 0.008J/m^2 ——几乎等于没有!

此时,另一个巧合出现: $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的单体结构存在特殊的“晶格巧合”,如图 3 (a) 所示:

这种“晶格巧合”与“准对称性”叠加,使 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中存在两种特殊“孪晶核心”,如图 3 (b) 和 (c) 所示。

图 3 (b) 和 (c) 中的“孪晶核心”的三维拓展,构成了图 4 中的一系列的孪晶界面结构。微观上,它们可被视为由“孪晶核心”串成的孪晶链;而宏观上,这些界面结构表现为由不同晶面构成的孪晶。

例如,图 4 (b) 中的界面结构,宏观上就表现为 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的 (002) 面与 (20-2) 面产生了孪晶!在此,我们将其命名为“共格非对称孪晶界” (Coherent Asymmetric Grain Boundaries, CAGBs)。

共格非对称孪晶界在 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的单晶生长与外延中扮演着不可忽视的角色。如图 5 所示,在采用直拉法生长 2 英寸 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 单晶时,我们观察到

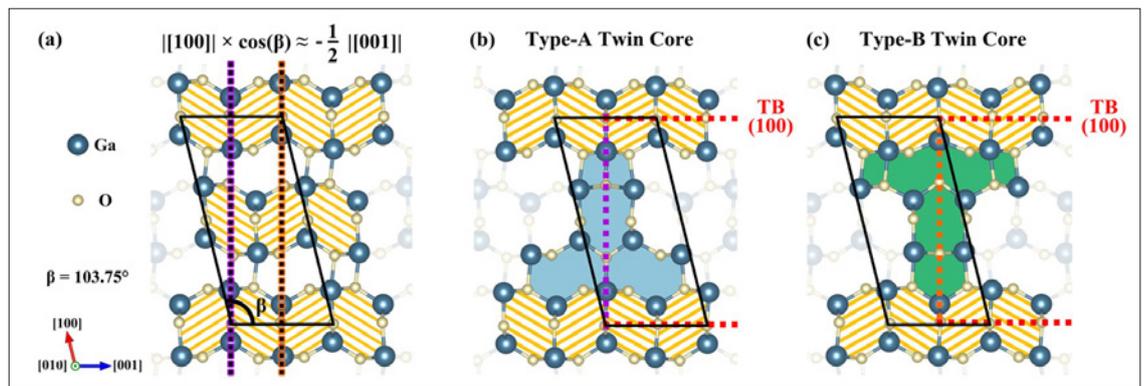


图3: (a) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的特殊“晶格巧合”, (b) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中的A型孪晶核心, (c) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 中的B型孪晶核心。

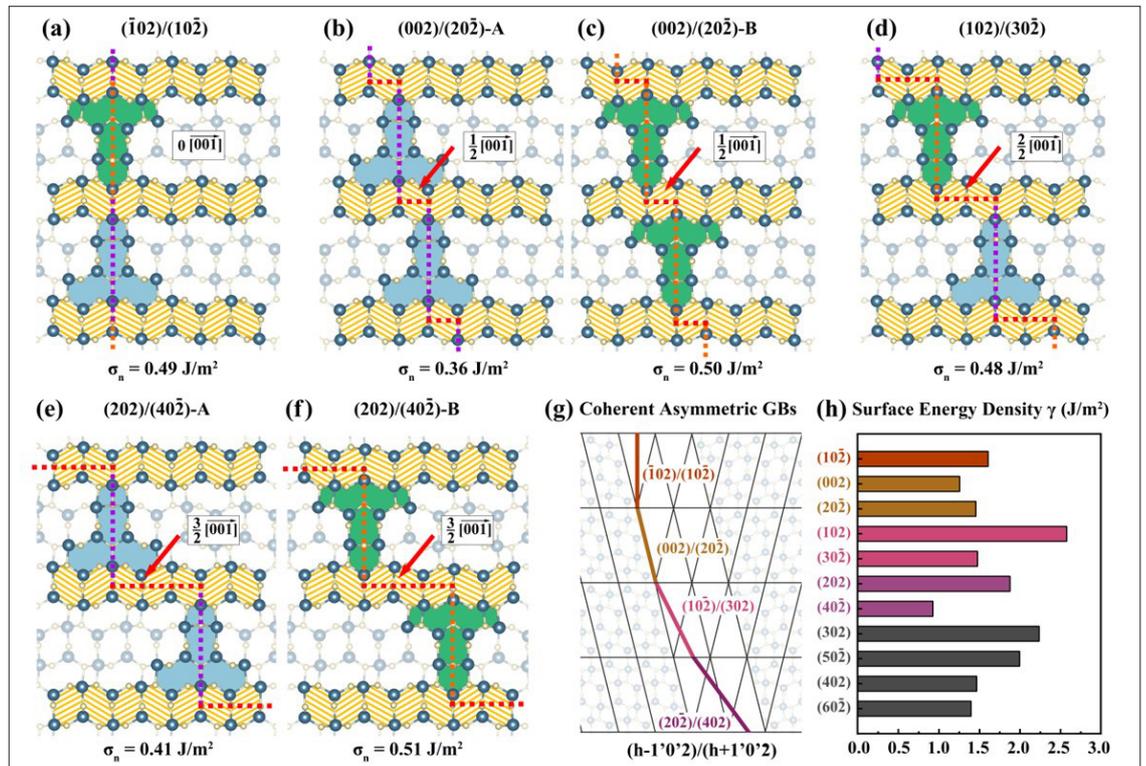


图4: (a) - (f) 由孪晶核心拓展成的三位共格非对称孪晶, (g) 共格非对称孪晶在宏观上表现为由两个不同的晶面组成的孪晶界, (f) 构成共格非对称孪晶的晶面的表面能。

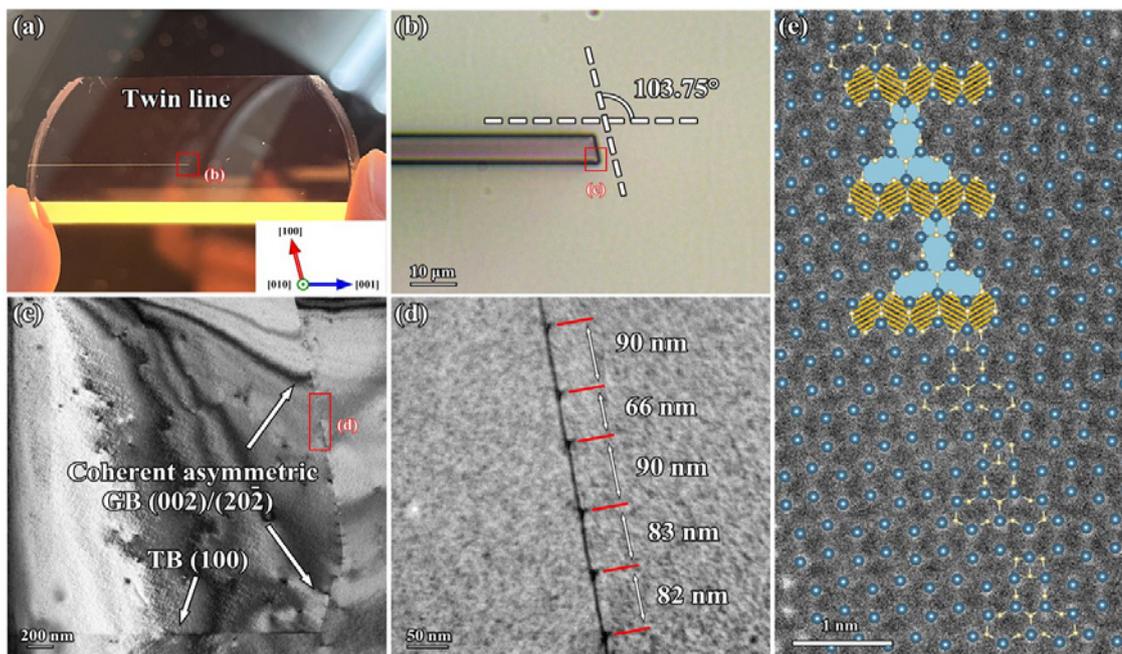


图5：采用直拉法生长的2英寸 β -Ga₂O₃单晶中的共格非对称孪晶，采用 (a) 偏光应力仪，(b) 光学显微镜，(c) TEM，(d) STEM与 (e) HAADF-STEM观察的共格非对称孪晶的结构。

了共格非对称孪晶的结构，并通过图 5 (e) 中的 HAADF-STEM 以及第一性原理计算，明确了图 4 (b) 为最稳定的 β -Ga₂O₃ 共格非对称孪晶结构。

我们以 β -Ga₂O₃ (100) 面衬底的台阶流外延为例，说明共格非对称孪晶对 β -Ga₂O₃ 外延的重要作用。大量研究表明， β -Ga₂O₃ (100) 面可以通过斜切的方式实现台阶流生长，以提升外延质量。然而，斜切方向对外延质量的决定性作用的原理，依然悬而未解 (APL Mater. 7 022515 (2019))。在此，我们需要强调共格非对称孪晶界的关键作用。

如图 6 (a) 所示，(100) 面衬底沿着 [001] 斜切暴露出 (001) 面的台阶面，沿着 [00-1] 斜切暴露出 (-201) 的台阶面。在沿着 [001] 斜切暴露出的 (001) 台阶面处，因共格非对称孪晶的存在，会形成一种孪晶缺陷，它的能量密度是 3.11J/m²，甚至低于无孪晶缺陷的能量密度 3.26J/m²——这意味着在外延过程中，孪晶会自发形成！然而，在沿着 [00-1] 斜

切的 (100) 衬底上，(-201) 台阶面抑制了相关孪晶缺陷的形成。因此，为了提高外延的质量，合理选择 β -Ga₂O₃ 衬底的方向，是至关重要的。

总结

在这项开创性的研究成果中，镓仁半导体联合浙江大学研究团队首次提出了“准对称性”与“晶格巧合”的理论，并通过深入解析孪晶界的物理机制，基于自研氧化镓专用设备对 β -Ga₂O₃ 生长工艺开展优化迭代，初步解决了孪晶这一行业难题，并实现了 2 英寸 (010) 面无孪晶 β -Ga₂O₃ 衬底的量产，标志着我国在宽禁带半导体领域的科学与工程实力迈上新台阶。

展望未来，镓仁半导体将持续致力于推动国家宽禁带半导体产业发展，深耕氧化镓领域科技创新，为客户提供高性价比的优质氧化镓产品，争做行业技术引领者。

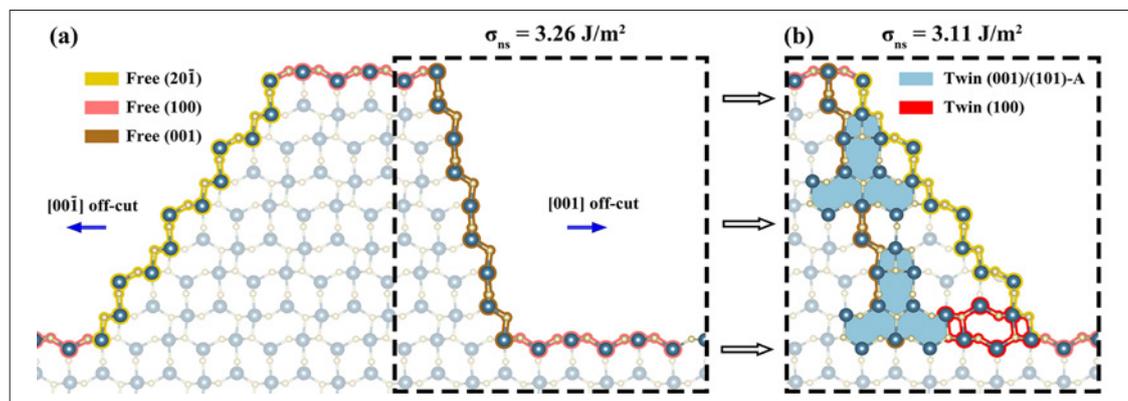


图6：(a) β -Ga₂O₃ (100) 衬底沿[001]方向斜切暴露出 (001) 台阶面，沿[00-1]方向斜切暴露出(-201)台阶面。(b) 在 (001) 台阶面上，由共格非对称孪晶导致的台阶处的孪晶缺陷，其能量低于无缺陷的台阶。

利用拓扑 LED 实现手性发射

在晶体生长过程中施加强磁场可以制造将手性从电子转移到光子的 LED

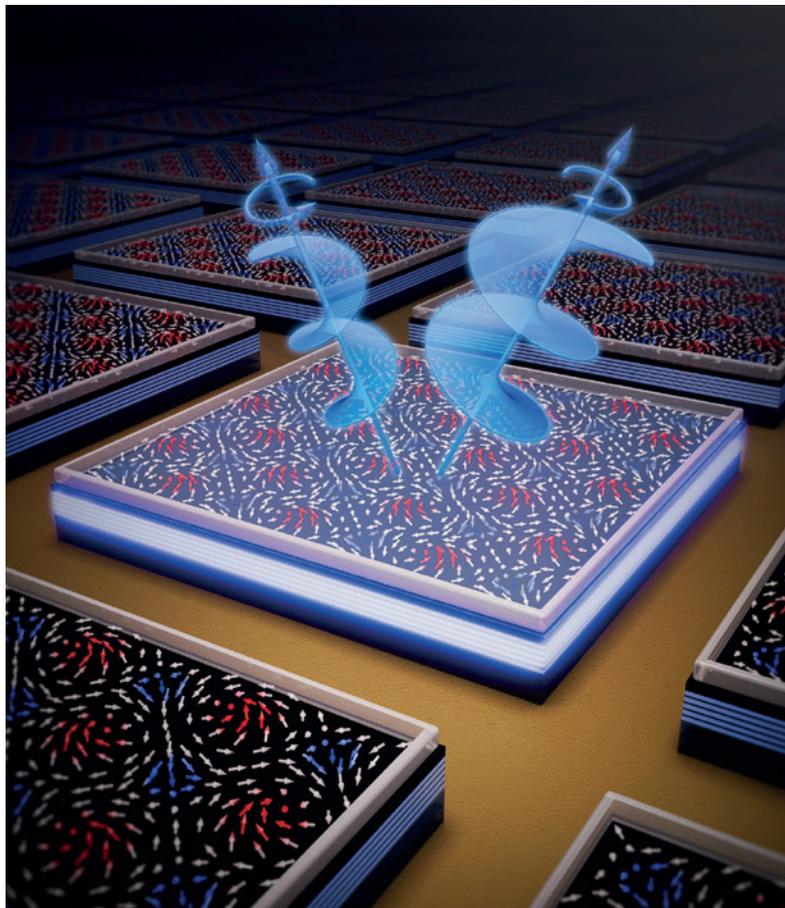
作者：康俊勇，厦门大学

信息共享的变革是以数据的高效处理、存储和传输为基础的。对于后者，信息是通过光网络发送和接收，并通过有效调制传输光的幅度或相位来编码数据。然而，尽管这种方法非常普遍，但也并非没有缺点。一个主要缺点是外部扰动和衰减会影响这种形式的光通信质量。这个问题非常重要，以至于当今的技术将无法应对与未来宽带、高速数据传输相关的挑战。

手性是光子的固有特征，为这一重要问题提供了解决方案。通过对具有不同手性（即左手或右手形式）的光子进行编码，未来网络能够有效地传输二进制信息，同时有更强的抗背景噪声

能力。然而，这并不是唯一的优点：用相位和手性对光进行编码还将实现高度稳定的量子密钥分发，这对秘密通信至关重要。

光子的手性与电子的自旋密切相关。为了确保简洁和简练，现有的手性光子源不是使用极化光学元件来实现手性，而是采用自旋极化材料。这种结构能够通过自旋注入将电子自旋转移到光子手性。然而，由于自旋极化和自旋注入效率的限制，手性选择性不尽如人意。生产高性能实用系统的其他障碍是需要使用外部磁场或低温来抑制电磁或热扰动。为了开发高性能手性光子源，必须在稳定性和极化方面取得实质性进展。



转向拓扑

一个非常有前景的研究方向是使用相对较新的材料。对于这个特殊的集群，其特性不仅取决于材料的材质，还取决于材料的排列方式。由于这种相当惊人的特性，此类材料被称为拓扑结构，以拓扑学的一个数学分支命名。

早在 2007 年，研究人员就发现了第一个拓扑结构，即绝缘体。在此类材料中，电子以不会影响材料变形的方式，沿着边缘或表面快速移动。近年来，拓扑材料的范围已扩大到包括光子拓扑绝缘体（光子在边缘和表面周围快速移动的结构）以及拓扑超导体和半金属。

在这个不断壮大的集群中，有一些涉及电子自旋的成员。在这个子集中有斯格明子和半子——它们在磁性薄膜中具有涡旋状的自旋纹理，分别存在于面外和面内。由于其独特的拓扑保护特性，斯格明子和半子比传统电子材料具有更高的稳定性。

我们厦门大学的团队正试图抓住这一优势，有望解决偏光材料的稳定性瓶颈。我们率先为手性光子源引入拓扑自旋结构，开辟了新天地。

我们并非是个制造拓扑自旋结构的人。已经有一些其他团体的实验成功的报告。然而，有限的晶格规模以及严格的温度或磁场要求阻碍了器件的应用。要实现拓扑自旋结构在手性光子源中的实际应用，需要制造大批有序拓扑晶格，该类晶格存在于室温且没有磁场的环境，因此需要首先解决环境问题。

这方面的成功需要磁性系统中拓扑有序的核心。这可以通过强 Dzyaloshinsky Moriya 相互作用 (DMI) 来实现，DMI 是一种源自自旋轨道耦合的非对称交换相互作用。DMI 与典型金属磁体中 d 轨道的方向相关。不幸的是，操纵轨道方向具有挑战性，多年来一直没有解决方案。

我们的最新研究取得了突破，借鉴了在强磁场下生长磁性晶体的经验。这一进展促使我们提出了一个新原则：轨道调节拓扑保护。基于理论模拟，我们已经确定晶体生长过程中的强磁场可以增强和冻结轨道耦合，从而改善晶体和自旋有序性，并最终产生强 DMI。这一发现有望为室温和零外场下，大批拓扑晶格的稳定成核提供基础——这是实际器件的必要条件。

受到这种诱人可能性的激励，我们开发出强磁场辅助 MBE 设备，该设备随后在中国和美国获得了专利。在系统地选择材料之后，我们决定选择 Pd/Fe/MgO 三层结构，该结构在 GaN 衬底上生长时可提供空间反演对称性破缺。在铁沉积过程中，我们施加高达 9 T 的原位磁场。根据全面的结构和磁性表征，在 9 T 磁场下生长的样品

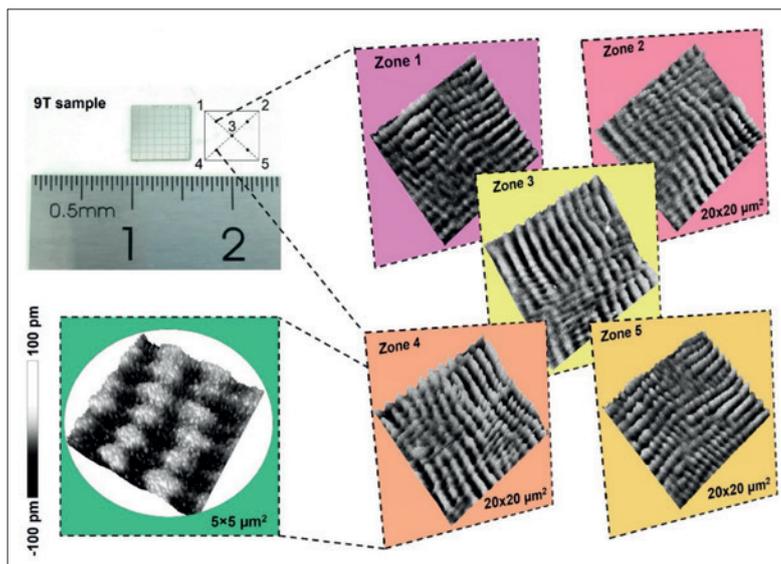


图1：通过强磁场MBE生产并通过磁力显微镜观察的大批半子晶格。

表现出优异的结晶度和更高的磁化强度。测量结果显示出强 DMI(-0.4266 mJ m⁻²) 和占主导地位的面内磁各向异性，与没有任何磁场的情况下生长的相比有所增强。

我们对寻找具有相反极性的成对圆形磁畴非常感兴趣，是通过磁力显微镜（见图 1）和洛伦兹透射电子显微镜（见图 2）发现它们的，证实了我们构建出了拓扑半子-反半子对，并且还揭示了半子晶格中具有左手自旋手性的 Bloch 型自旋纹理，与 DMI 强度的负值一致。这些半子-反半子对在 6 mm × 6 mm 晶圆上表现出长程有序，形成大规模的半子晶格。

值得注意的是，这些半子晶格是在室温且没

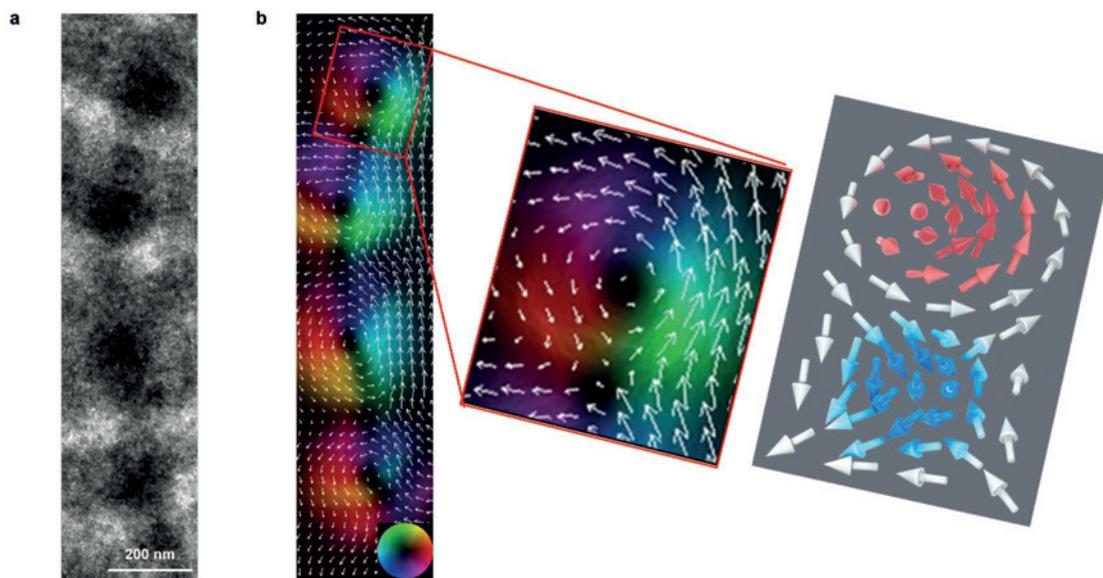


图2：(a) 在零磁场和300 K、比例尺200 nm下测量的具有交替暗白色对比度的半子对的过聚焦洛伦兹透射电子显微镜图像。(b) 半子对示意图，其中使用强度传输方程从300 K下选定的畴区域推导出面内自旋分量分布。插图显示了面内磁化方向的色轮。

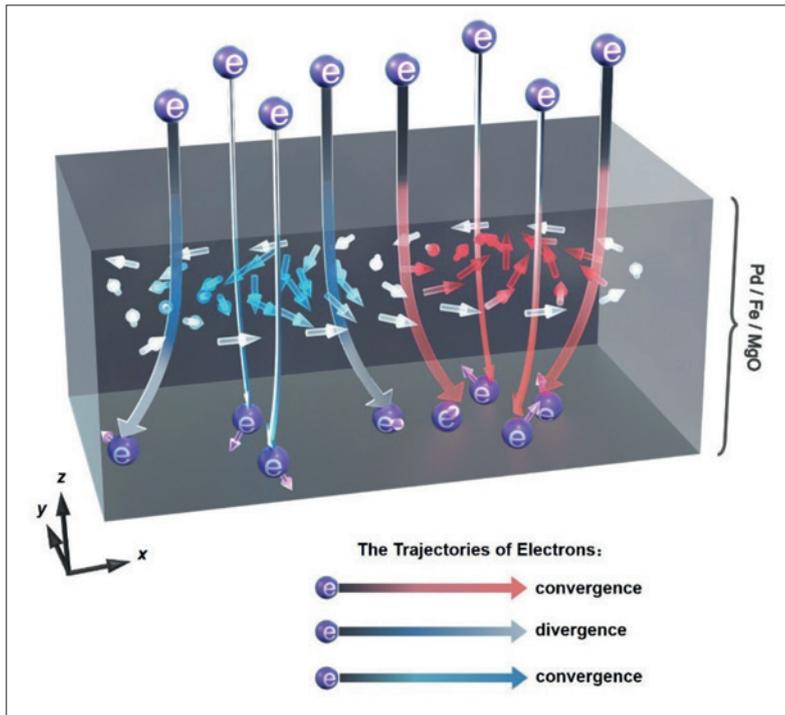


图3: 通过半子对注入的电子轨迹。带有字母“e”的紫色球是电子。紫色箭头表示注入后电子自旋的方向。

有磁场的情况下观察到的。即使 530 天后，我们的半子晶格仍然稳定存在。这些发现表明，可以通过轨道调节生长将拓扑保护引入磁性薄膜中。

转移手性

一个明显且关键的问题是半子晶格中的手性是否可以转移到光，以形成手性光子源。通常我们没有考虑这一点，因为拓扑自旋结构往往被视为未来信息器件的信息载体，会忽略它们在光电子学中的应用机会。目前的研究重点是利用光或自旋流操纵拓扑自旋结构（例如，有针对赛道存

储器和斯格明子逻辑门之类的研究），而通过拓扑自旋结构操纵电子和光子的还没有列入研究计划。

为了促进重置平衡，我们分析了垂直注入半子晶格的电子轨迹（见图 3）。我们发现，半子晶格中的手性自旋以涡旋磁场的形式作用于入射电子。因此，当电子穿过这些涡流时，它们会在没有外部磁场的情况下被额外的洛伦兹力偏转。由于半子核尺寸特别小，这种力足以将电子发送到具有不同自旋极化的区域。

存在计算半子-反半子产生的自旋极化程度的可能。在半子区域，这种力将电子汇聚到核心区域，导致它们沿着核心自旋极化。同时，在反半子区域，这种力确保发散，将一半的注入电子驱动到邻近的半子区域。由于这两种活动，这两个区域的输出电子数量不同，导致输出电流中产生高达 50% 的自旋极化，也揭示了电子手性调制的潜力。

在确定了电子自旋的调制效应之后，我们使用 Pd/Fe/MgO 三层作为自旋注入器，将半子晶格集成到氮化物基 LED 中。通过这种新型结构，自旋向上和自旋向下电子的注入分别产生具有右 ($\sigma+$) 圆极化和左 ($\sigma-$) 圆极化的电致发光，正如电子跃迁选择规则所预期的那样（见图 4）。

发射的手性程度由 MBE 生长过程中的磁场强度决定。对于 0 T 样本，圆极化仅为 0.9%，因此基本上可以忽略不计，而 9T 变体则产生了 22.5% 的历史最高圆极化（见图 5）。

我们将极化的巨大增加归因于高强度生长磁场下形成的拓扑半子晶格的电子自旋调制。因此，我们将器件称为拓扑诱导自旋 LED。其高度极化是有效手性转移从拓扑自旋结构到电子再到光子

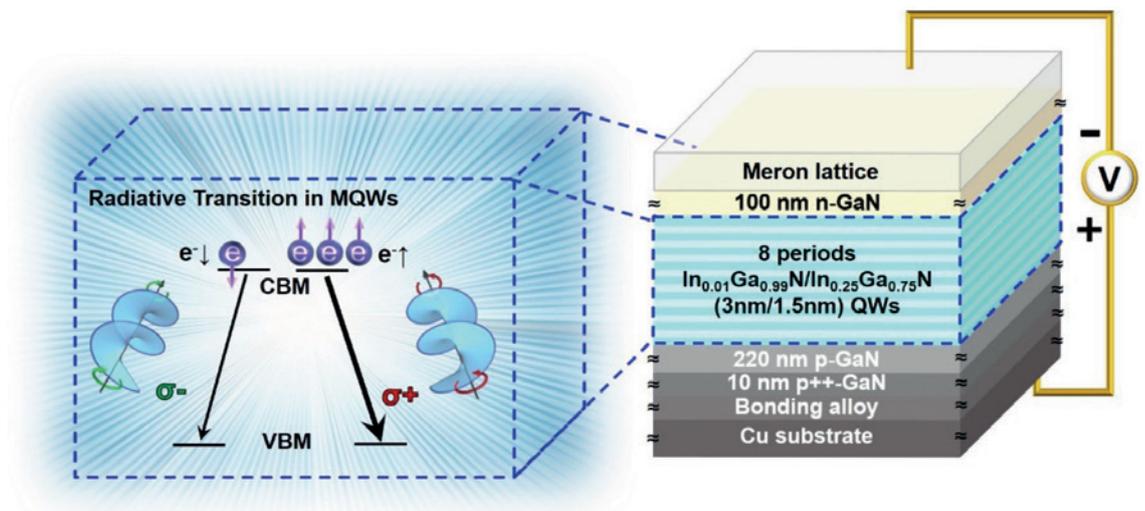


图4: 拓扑诱导自旋LED结构以及电致发光测量中从注入电子到发射光子的手性转移原理。

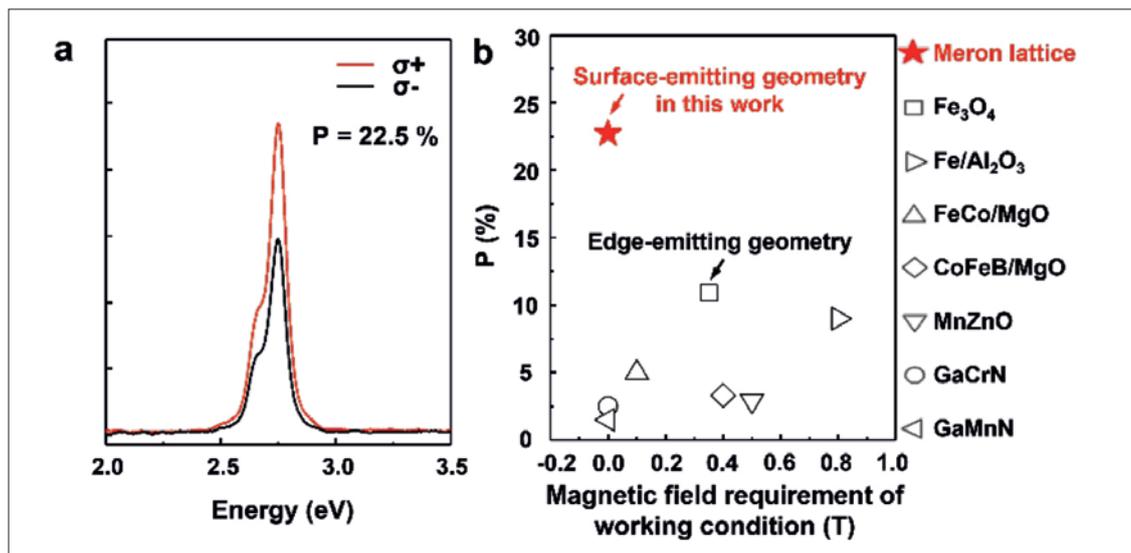


图5: (a)在9T磁场下生长的拓扑诱导自旋LED(T-LED)的圆极化电致发光光谱。(b)采用文献中报告的结果来比较T-LED和氮化物基自旋LED。T-LED具有表面发射几何形状。由于载流子跃迁的各向异性,这确保了其发光效率比边缘发射几何形状高很多。

的直接证据。请注意,这种特性发生在LED的实际工作条件下,即施加的电流为1 mA时,在零磁场下的室温运行中。因此,我们的拓扑诱导自旋LED突破了稳定性差和极低化,以及削弱现有手性光子源的缺点的限制。

我们突破的关键点是高磁场MBE生长技术,该技术通过轨道控制来操纵相关材料内的强相互作用。

请注意,这是一种通用方法,可用于其他晶体和拓扑晶格(例如斯格明子和涡旋)的可控生长。

我们研究中创建的大批拓扑半子晶格具有室温和零场稳定性,为光子学研究的前沿提供了理想的平台。这是因为我们的片上手性光子源能够

将手性从拓扑保护的准粒子转移到有质量的费米子,并进一步转移到无质量的玻色子。这是一项具有科学意义的突破,也是迈向拓扑自旋结构实际应用的重要一步。

准粒子到有质量的费米子,再到无质量的玻色子。这是一项具有科学意义的突破,也是迈向拓扑自旋结构实际应用的重要一步。

作者谨此感谢中国国家自然科学基金会(批准号61227009、62022068和62274139)和日本科学技术振兴机构CREST(批准号JPMJCR20T1)的资助

扩展阅读

- ▶ X Wu et al. "Topology-induced chiral photon emission from a large-scale meron lattice" Nat. Electronics 6 516 (2023)
- ▶ X. Wu et al. "Semiconductor applications of large-scale meron lattices" Nat. Electronics 6 477 (2023)

士兰集宏 SiC 生产线项目预计 Q1 封顶

据厦门日报报道,1月21日,士兰集宏8英寸碳化硅功率器件芯片制造生产线项目主厂房核心区三层作业面上,钢结构首吊成功,该项目预计今年一季度封顶。

据悉,士兰集宏8英寸碳化硅功率器件芯片制造生产线项目总投资120亿元,总建筑面积23.45万平方米,分两期建设。其中,一期项目

总投资70亿元,预计2025年三季度末初步通线,2025年四季度试生产,达产后年产42万片。

两期全部建成投产后,将形成年产72万片8英寸碳化硅功率器件芯片的生产能力,届时将较好满足国内新能源汽车碳化硅芯片需求,助力厦门市第三代半导体产业加速发展与配套产业的快速培育。



人工智能推动数据中心能耗增加

数据中心是数字经济的核心，对数据中心的需求预计将大幅上升，使其成为增长和投资的主要焦点。但由于电价上涨和数据中心消耗增加，运营数据中心的成本也在大幅上升。国际数据公司（IDC）的新报告考察了数据中心的电力支出及其对技术提供商和数据中心运营商的影响。

电力是数据中心运营商最大的持续支出，占企业数据中心总支出的46%，服务提供商数据中心的60%。随着数据中心承担更多工作负载和更多能耗密集型工作负载，如人工智能，电力消耗正在迅速增长。

IDC 预计，对 AI 工作负载的激增需求将导致数据中心容量、能源消耗和碳排放显著增加，预计 AI 数据中心容量的复合年增长率（CAGR）将达到 40.5%，直至 2027 年。相应地，预计 AI 数据中心的能源消耗将以 44.7% 的 CAGR 增长，到 2027 年达到 1462 亿千瓦时（TWh），AI 工作负载消耗的电力占数据中心总电力消耗的比例将不断增加。

总体而言，IDC 预计全球数据中心的电力消耗将在 2023 年至 2028 年间翻倍，五年 CAGR 为 19.5%，到 2028 年达到 8570 亿千瓦时（TWh）。与此同时，由于供需动态、环境法规、地缘政治事件以及对极端天气事件的敏感性（部分由气候变化加剧），电价正在上涨。IDC 认为，导致过去五年电价上涨的趋势可能会持续。消耗增加和能源成本上升将使数据中心的运营成本显著增加，但具体增加多少尚不确定。

为了更好地理解电价上涨对数据中心运营的影响，IDC 对 2023 年拥有 1 兆瓦 IT 负载的数据中心进行了情景规划，该数据中心以 50% 的容量运行，功率使用效率（PUE）为 1.5。研究考察了美国、德国和日本的能源定价和增长率的三种能源价格增长情景。在所有三种情景中，电力支出的百分比增长都超过了 15% 的 CAGR，在大多数情景中增长超过 20%。研究还表明，能源效率提高 10% 可以为数据中心运营商节省可观的费用。

IDC 云到边缘数据中心趋势研究总监 Sean Graham 表示：“提高数据中心效率的选项有很多，

从技术解决方案如提高芯片效率和液体冷却，到重新考虑数据中心设计和电力分配方法。但提供节能解决方案只是满足客户需求的一部分。包括云和共址服务在内的数据中心提供商应继续优先投资可再生能源。通过投资可再生能源，他们正在帮助增加总体供应，同时也帮助客户实现他们的可持续性目标。”

特别是太阳能和风能，它们提供了显著的环境优势，同时也提供了最低的电力平均成本(LCOE)，这反映了发电机在其生命周期内电力发电的平均净现成本。通过在可再生能源发电源附近或附近共址设施，提供商可以减少与分配相关的建设成本和能源损失，提高整体效率和可持续性，同时也通过消除电网可靠性问题来提高弹性。

共享云基础设施继续引领基础设施支出

根据国际数据公司 (IDC) 全球季度企业基础设施跟踪器：买家和云部署，2024 年第二季度 (2Q24) 用于云部署的计算和存储基础设施产品的支出，包括专用和共享 IT 环境，同比增长 61.5%，达到 429 亿美元。云基础设施支出继续超过非云部分，后者在 2Q24 增长了 41.4%，达到 194 亿美元。云基础设施部分由于 GPU 服务器出货量的指数增长，平均售价 (ASP) 大幅上涨，导致单位需求增长放缓，仅为 17.7%。

IDC 全球企业基础设施跟踪器研究总监 Juan Pablo Seminara 表示：“云基础设施支出增长继续由加速的 AI 相关投资推动，这特别影响了服务器，

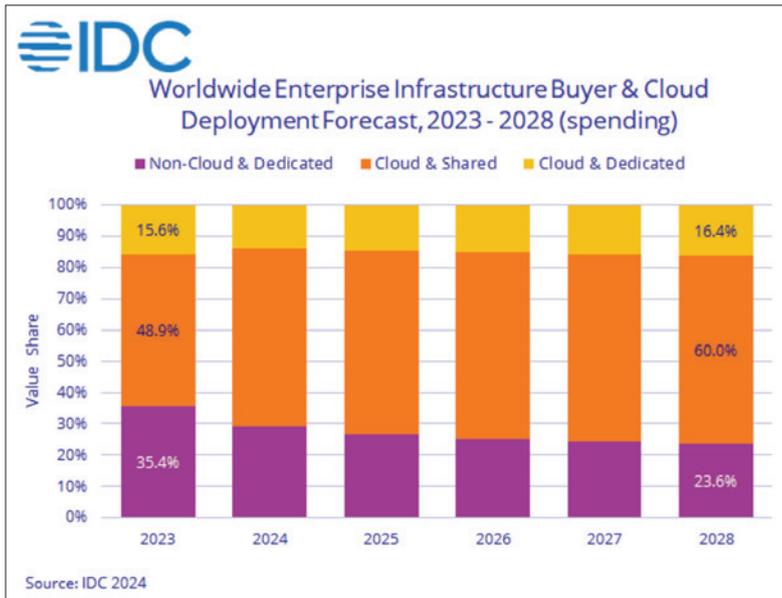
但也引发了企业存储支出。IDC 在 2024 年进行的不同调查显示，AI 投资计划一直在扩大，并推动了几乎所有地区的投资优先事项。超级扩展商、数字服务提供商和主要云服务提供商是推动增长的主体，并将对 2024 年和 2025 年的市场继续产生积极影响。改善的经济前景将有助于进一步延续这种积极情绪。”

共享云基础设施支出在本季度达到 353 亿美元，比去年同期增长了 74.9%。与专用部署和非云支出相比，共享云基础设施类别继续占据最大的支出份额，共享云占 2Q24 总基础设施支出的 56.6%。专用云基础设施部分在 2Q24 的同比增长为 19.2%，达到 76 亿美元。

对于 2024 年，IDC 预测云基础设施支出将比 2023 年增长 48.8%，达到 1640 亿美元。非云基础设施预计将增长 11.7%，达到 675 亿美元。共享云基础设施预计将同比增长 57.9%，达到 1319 亿美元。专用云基础设施支出预计在 2024 年也将实现两位数增长，增长 20.4%，达到 321 亿美元。非云基础设施增长预测的低迷反映了尽管大部分增长将来自云支出，但一般的非云专用系统正在巩固今年的复苏。

IDC 的服务提供商类别包括云服务提供商、数字服务提供商、通信服务提供商、超级扩展商和管理服务提供商。在 2Q24，服务提供商群体在计算和存储基础设施上的支出为 418 亿美元，比去年同期增长了 64.2%。这一支出占总市场的 67.2%。非服务提供商（例如，企业、政府等）也





背景为白色，数据图的描述自动生成，置信度中等

增加了支出，达到 205 亿美元，同比增长 38.2%。IDC 预计服务提供商在计算和存储上的支出在 2024 年将达到 1578 亿美元，同比增长 49.4%。

从地理角度来看，2Q24 云基础设施的同比增长在所有地区都表现出非常积极的结果，增长最快的地区是亚太地区（不包括日本和中国）、日本、美国和加拿大，同比增长分别为 110.7%、98.1%、72.1% 和 53.8%。其他地区也表现出非常稳健的年度增长，中欧和东欧、西欧、中国、中东和非洲、拉丁美洲分别增长了 48.7%、27.7%、24.8%、23.4% 和 9.7%。

长期来看，IDC 预测云基础设施支出在 2023-2028 年预测期间的复合年增长率（CAGR）为 18.1%，到 2028 年达到 2530 亿美元，占总计算和存储基础设施支出的 76.4%。

共享云基础设施支出将占 2028 年总云支出的 78.6%，以 18.9% 的 CAGR 增长，达到 1988 亿美元。专用云基础设施支出将以 15.3% 的 CAGR 增长，达到 543 亿美元。非云基础设施支出也将反弹，以 5.3% 的 CAGR 增长，到 2028 年达到 783 亿美元。服务提供商在计算和存储基础设施上的支出预计将以 17.1% 的 CAGR 增长，到 2028 年达到 2330 亿美元。

AI 要求工程劳动力提升技能

到 2027 年，生成性人工智能（GenAI）将在软件工程和运营中催生新的角色，需要 80% 的工程劳动力提升技能，根据高德纳公司（Gartner,

Inc.）。“对 AI 能力的大胆声明导致了 AI 可能会减少对人类工程师的需求甚至完全取代他们的猜测，”高德纳高级首席分析师 Philip Walsh 说。“虽然 AI 将改变软件工程师的未来角色，人类的专业知识和创造力对于交付复杂、创新的软件始终是必不可少的。”

高德纳分析师预计 AI 将从三个方面影响软件工程角色：

- **短期内**，AI 将在边界内运作 AI 工具将通过增强现有开发人员的工作模式和任务，适度提高生产力。对于拥有成熟工程实践的组织的高级开发人员来说，AI 的生产力优势将最为显著。
- **中期来看**，AI 代理的出现将推动边界 AI 代理将通过使开发人员能够完全自动化和卸载更多任务，改变开发人员的工作模式。这将标志着 AI 原生软件工程的出现，届时大多数代码将由 AI 生成，而不是人类编写。
- **从长远来看**，AI 的进步将打破边界，标志着 AI 工程的崛起，尽管 AI 将使工程更加高效，但组织将需要更多技能熟练的软件工程师来满足对 AI 赋能软件的快速增长需求。

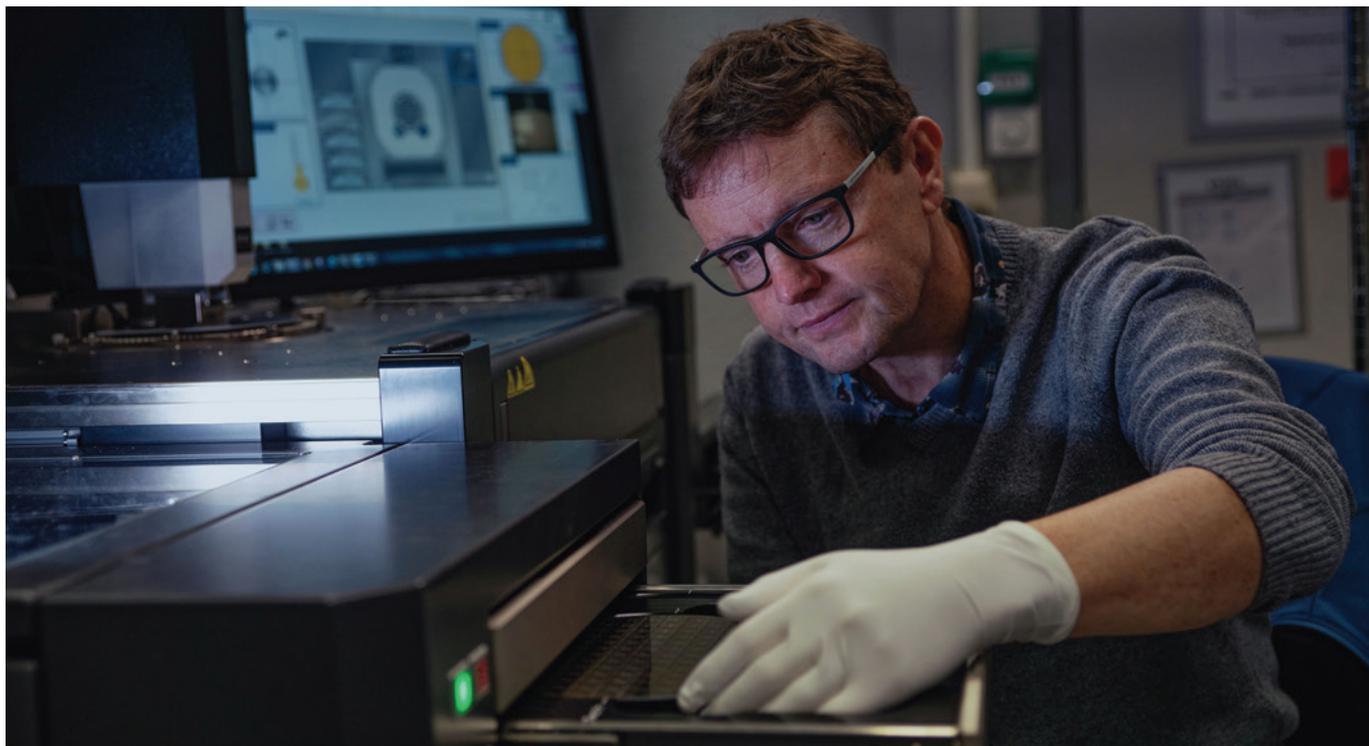
Walsh 说：“在 AI 原生时代，软件工程师将采取‘AI 优先’的心态，他们主要关注将 AI 代理引导到给定任务最相关的上下文和约束中。”这将使自然语言提示工程和检索增强生成（RAG）技能对软件工程师至关重要。

Walsh 说：“构建 AI 赋能软件将需要一种新型的软件专业人员，即 AI 工程师。”AI 工程师拥有软件工程、数据科学和 AI/ 机器学习（ML）的独特技能组合，这些技能是备受追捧的。

根据高德纳在 2023 年第四季度对 300 家美国和英国组织进行的一项调查，56% 的软件工程领导者将 AI/ 机器学习（ML）工程师评为 2024 年最需要的角色，并将将 AI/ML 应用于应用程序评为最大的技能缺口。

为了支持 AI 工程师，组织需要投资 AI 开发平台。AI 开发平台将帮助组织更有效地构建 AI 能力，并将 AI 集成到企业解决方案中。

Walsh 说：“这项投资将要求组织提升数据工程和平台工程团队和技能，以采用推动 AI 工件持续集成和开发的工具和流程。”



检视 GaN MOS-HEMT 中的陷阱

实验揭示了影响 5G 毫米波段 GaN MOS-HEMT 性能和可靠性的缺陷的物理和能级位置

作者：Barry O'Sullivan, IMEC

如今的移动技术与 20 世纪 80 年代相比已大相径庭。曾经，手机仅能用于拨打电话和发送限制在 160 字符以内的短信。如今，手机集成了计算机的强大功能和令人印象深刻的静态及视频拍摄能力，几乎可以在任何地方实现高效通信，这得益于其能够以高速上传和下载海量数据。

最新一代的智能手机及其使用方式推动了数据流量的爆炸性增长，以及对更高带宽的持续需求。随着人工智能和虚拟现实时代的到来，这种增长趋势不仅没有放缓迹象，反而更有可能加速发展。

为了支持这种惊人的数据流量增长，无线基础设施正在稳步升级。目前正在进行的是第五代技术，即我们熟知的 5G。在目前运行于低于 6 GHz 频段时，5G 结合了前所未有的数据速率、超低延迟以及能够同时连接大量设备的能力。这一系列卓越特性为许多新应用铺平了道路，包括智能城市、自动驾驶汽车和物联网 (IoT)。

目前可用的低于 6 GHz 频段的设备基于硅基绝缘体上硅 (SOI) 技术，利用了硅微电子行业的可扩展性。然而，这种特定材料系统受到速度方面的基本限制，这为化合物半导体材料打开了替代硅基设备的大门，使其有望成为下一代射频技术的主要基础。

这一有前景的替代材料家族包括硅锗 (SiGe)、磷化铟 (InP) 和氮化镓 (GaN)。其中，GaN 因其卓越电子迁移率、高击穿电压以及在更高频率和功率下运行的能力而脱颖而出。凭借这些优势，结合其出色的热稳定性和效率，GaN 基器件非常适合用于射频和微波应用，包括 5G 基础设施、雷达和卫星通信。

GaN-on-silicon 技术

在 IMEC，我们目前正研究 GaN-on-silicon 技术在 FR3 频段 (约 7 GHz 至 25 GHz) 毫米波

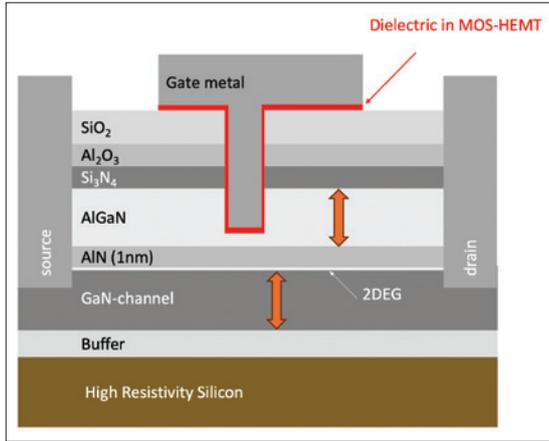


图1：一种MOS-HEMT器件的设计，其栅极介电层沉积在部分凹陷的AlGaN层中。

射频应用中的潜力。我们选择研究 GaN 功率放大器，是因为它们在毫米波频率下比其他技术具有更高的输出功率，且在硅基上制造时具有成本优势。对于这类功率放大器，核心晶体管是 AlGaN/GaN 高电子迁移率晶体管 (HEMT)，它们以其高频性能和高功率处理能力而闻名。

在 5G 及更高版本的应用中，优化射频晶体管性能的关键杠杆是缩小尺寸。这种微型化可以是横向的，涉及缩小晶体管的宽度和长度，也可以是垂直的，通过减少层的厚度来实现。横向缩小尺寸的好处包括提高速度和频率响应，而相应的垂直缩小尺寸则需要应对可能降低晶体管性能的短沟道效应。然而，持续的垂直缩小尺寸令人担忧，因为它可能导致漏电流增加，尤其是在晶体管处于导通状态时。

一种对抗缩小尺寸引起的漏电流增加的方法是在栅极金属和 AlGaN 势垒之间插入高 κ 介电层。这一举措创造了金属氧化物半导体高电子迁移率晶体管 (MOS-HEMT) 结构。高 κ 介电层已经应用了 20 年，用于减少硅技术中超缩晶体管的漏

电流。但它们的广泛应用并不能保证成功，因为它们出了名的有缺陷的材料。由于在硅基逻辑器件中应用时面临可靠性挑战，因此研究它们在 MOS-HEMT 中的影响至关重要。

在这里，我们展示了针对用于功率放大器的 GaN-on-silicon MOS-HEMT 的首批可靠性研究的关键发现，我们首次在 2024 年 IEEE 国际可靠性物理研讨会 (IRPS) 上报告了这项研究，并在会议记录中发表。

我们研究的一个重要发现是，在具有高 κ 介电层的 HEMT 结构中存在电荷捕获和发射。在我们的研究过程中，我们成功地隔离了导致缺陷的物理和能级位置。我们发现，当器件中的载流子被限制在半导体或介电材料中的某些缺陷中，或者从这些缺陷中释放出来时，就会发生捕获和发射。这些过程影响了 HEMT 的性能和可靠性，特别是在高频和高功率应用中。我们研究的另一个结果是，它确定了最佳的材料组合和层厚度，用于整体器件工艺优化。

从介电层捕获电子

影响 MOS-HEMT 的主要可靠性问题是偏置温度不稳定性 (BTI)，这种问题会导致器件因长时间暴露于高温下的电应力 (偏置) 而逐渐退化。这一问题的根源是电子在介电层中被捕获，或者在介电层与半导体层之间的界面处被捕获。BTI 的一个后果是阈值电压逐渐偏移。由于这种偏移，晶体管需要更高的电压才能导通，最终电路变得更慢、效率更低。

我们通过在具有 HfO_2 和 Al_2O_3 高 κ 介电层的 MOS-HEMT 上施加直流电压或“应力”，并监测阈值电压的偏移，来模拟 BTI。对于具有 Al_2O_3

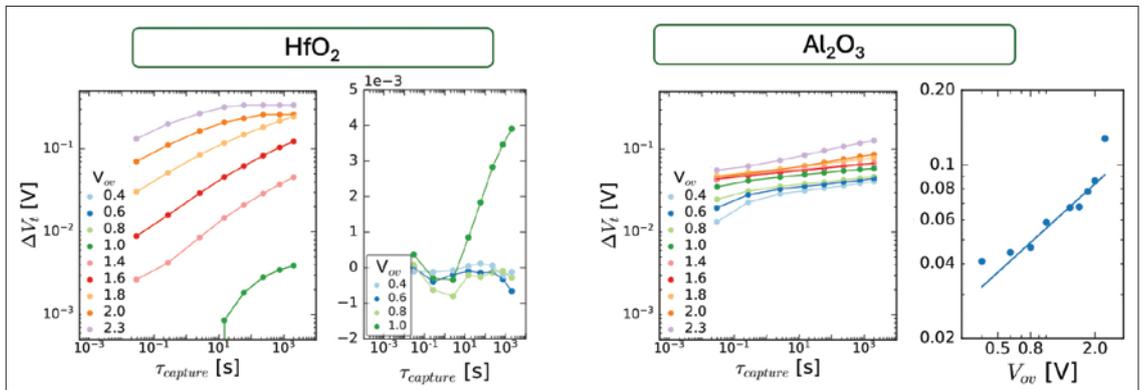


图2：具有 HfO_2 或 Al_2O_3 高 κ 层的 MOS-HEMT 结构的电荷捕获特性。 Al_2O_3 的结果显示，随着时间和偏置的增加，阈值电压 (V_t) 逐渐增加，这表明存在具有较宽能量范围的缺陷类型。相比之下， HfO_2 在低偏置下表现出可忽略的电荷捕获，但在高偏置下出现了显著的阈值电压 (V_t) 偏移。这表明在该偏置范围内存在相对狭窄的缺陷类型。该图基于 O'Sullivan 等人 2024 年 IEEE 国际可靠性物理研讨会 (IRPS) 的研究。

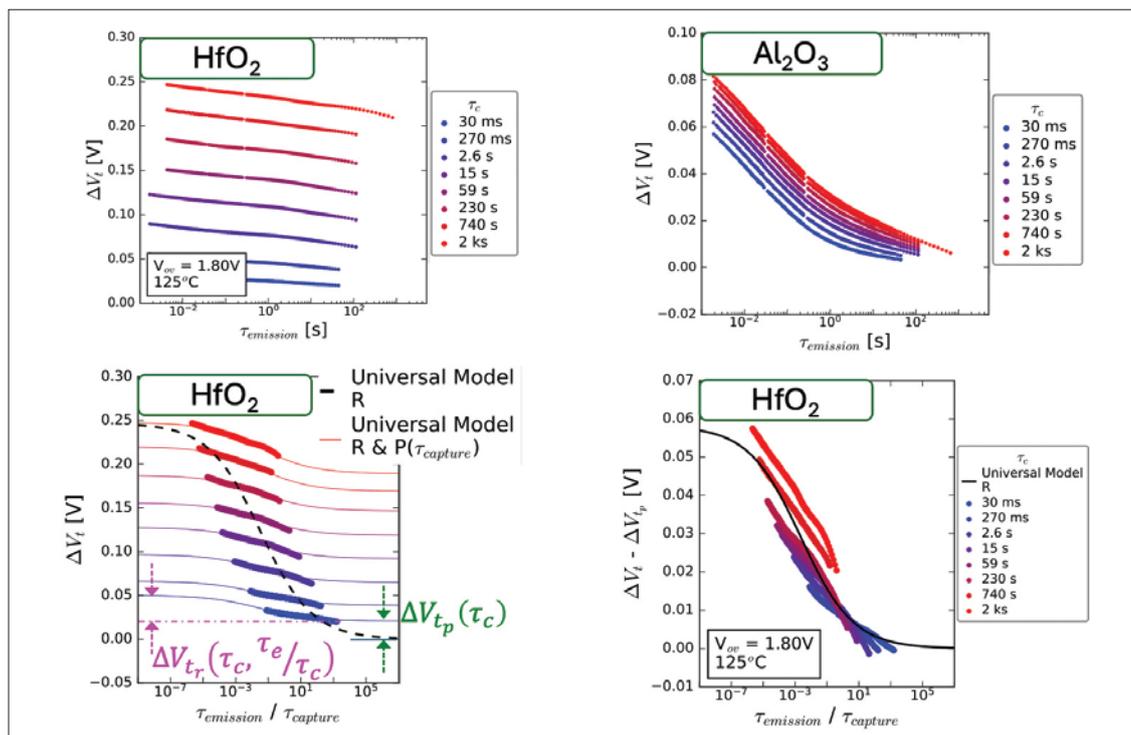


图3: (上) 在施加应力不断增加的时间后, (左) HfO₂和 (右) Al₂O₃ MOS-HEMT的发射动力学。注意Al₂O₃和HfO₂之间的发射行为差异, HfO₂仅部分发射。(下) 将数据拟合到通用松弛模型表明, HfO₂的发射由 (左) 可恢复分量、(右) 永久分量和第三个分量描述, 因为数据与拟合结果不完全匹配。该图基于O'Sullivan等人2024年IEEE国际可靠性物理研讨会 (IRPS) 的研究。

层的变体, 随着时间和偏置的增加, 阈值电压增加, 这表明在广泛的偏置和能量范围内存在缺陷。在HfO₂的情况下, 我们观察到两种退化模式。在较低电压下, 图表显示HEMT类似的时间独立且可忽略的电荷捕获, 而在更高的应力偏置下, 我们看到显著的阈值电压偏移, 随着时间和偏置的增加呈幂律增长, 直到在大约 300 mV 时饱和。这种高度的偏置依赖性表明在这个应力范围内存在相对狭窄的缺陷类型。

关键问题是: 电荷是被捕获在体介电层中还是在界面处? 我们可以通过观察高κ介电层厚度变化时阈值电压偏移的变化, 利用电容测量和模拟来区分这两个位置。这种方法已确定大部分电荷捕获发生在体介电层中。

发射行为: 3 种类型的缺陷?

关闭施加在MOS-HEMT上的应力会导致被捕获的电荷释放或发射。通过分析这些发射动态, 可以通过观察阈值电压的恢复和缺陷的起源来了解器件的可靠性。

我们的结果表明, 导致Al₂O₃MOS-HEMT 阈值电压偏移的缺陷会快速且完全地释放其电荷。相比之下, 具有HfO₂的器件释放电荷的速度更慢, 且这一过程不完整。根据这些发现, 改变介电材

料的时, 导致电荷捕获的缺陷的性质存在差异。

为了确定我们的HfO₂MOS-HEMT 中存在多少种缺陷类型, 我们将实验结果拟合到通用松弛模型。该模型假设每种类型的缺陷都有其自身的特征能量, 遵循一定的分布。

将该模型拟合到我们的HfO₂ 数据清楚地表明, 存在多个缺陷水平; 发射数据与模型不重叠。我们的模拟仅考虑了显示完全发射的缺陷, 这种情况发生在阈值电压恢复时。然而, 在某些情况下, 被捕获的电荷不会从缺陷中发射出来, 阈值电压的变化是永久性的。当将这种永久分量添加到模型中时, 它与实验数据的拟合更为接近。不过, 需要注意的是, 拟合并不完美。尽管差异可能只有 10 mV, 但这表明HfO₂MOS-HEMT 中总共存在三种不同的缺陷类型。

这一发现与之前关于Al₂O₃ 介电层的研究不同。根据这些在文献中发表的报告, 只有两种缺陷类型对Al₂O₃ 介电层中的电荷捕获有贡献。然而, Al₂O₃ 中存在广泛的缺陷分布, 这使得进一步详细分析变得复杂。

检视 HfO₂ 器件

我们研究的下一步是调查HfO₂MOS-HEMT 中的缺陷如何导致阈值电压偏移。凭借这一知识,

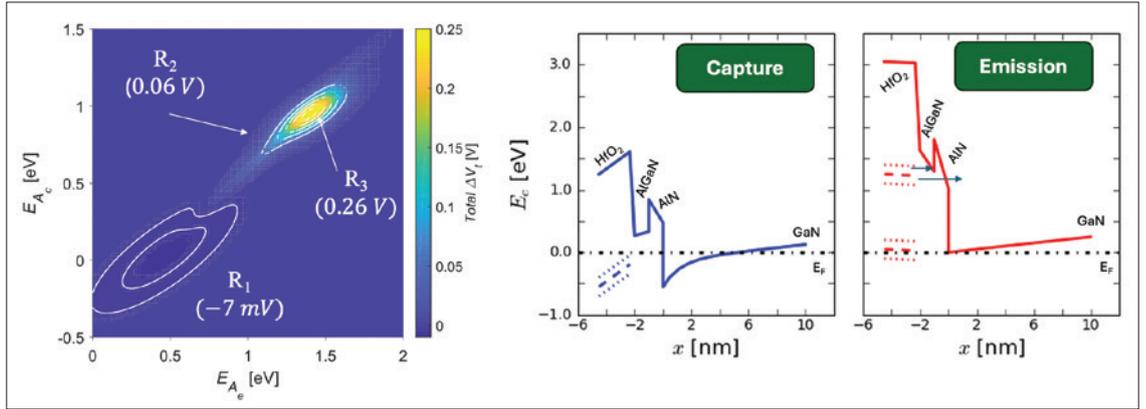


图4: (左) HfO₂MOS-HEMT的活化能图,展示了三种缺陷类型,这些缺陷类型被建模用来解释所测量到的偏置温度不稳定性(BTI)行为。(右) HfO₂MOS-HEMT的模拟能带图,显示了电子在捕获过程中填充浅缺陷,并从三种缺陷类型发射。浅缺陷的发射可以是到沟道(可恢复)或到AlGaIn导带(不可恢复),同时深HfO₂能级可以被充电,这解释了在低温下观察到的阈值电压(V_t)增加的现象。该图基于O'Sullivan等人2024年IEEE国际可靠性物理研讨会(IRPS)的研究。

我们获得了对器件稳定性的更深入了解。

通过计算缺陷捕获和释放电荷所需的活化能,我们为HfO₂绘制出了三种不同的缺陷类型。它们是:一个低热激活缺陷,我们将其命名为R1,它快速捕获和发射电子;以及一对具有更高活化能的缺陷,分别标记为R2和R3,它们具有相似的电荷捕获速率,但发射电荷的方式不同。根据我们HfO₂MOS-HEMT的能带图,在施加偏置电压期间,电子被捕获到位于HfO₂导带下方约2 eV的浅缺陷中。由于在低应力偏置下这个缺陷能级在能量上不可达,因此在更高电压下电荷捕获变得更加明显。

能带图还有助于解释为什么在移除偏置后,一些被捕获的电子会重新发射回GaIn通道,从而导致可恢复的阈值电压偏移(R2)。并非所有电子都如此,有些仍然被困在HfO₂和AlGaIn层之间的能量势垒中,这导致了永久性的阈值电压偏移(R3)。这种不同的发射行为表明,尽管相同的缺陷类型导致了阈值电压偏移,但由于存在两种发射路径,因此必须将其建模为两个单独的缺陷。

我们还识别出一个更深的缺陷,位于导带下方约3 eV处,它对负阈值电压偏移(R1)有贡献。这些电子在恢复阶段被捕获。

提高可靠性

我们的这项研究为了解不同高κ介电材料,特别是HfO₂和Al₂O₃,如何影响MOS-HEMT器件的性能和可靠性提供了关键见解。通过识别HfO₂中的多种缺陷类型,这些缺陷具有不同的电荷捕获和发射特性,我们强调了这些材料在电应力下的不同响应。

根据我们的发现,我们认为Al₂O₃由于其更快的电荷恢复速度,可能更适合需要快速切换的应用。与此同时,HfO₂由于较慢的发射速度而显示出更持久的阈值电压偏移,这可能会影响器件的长期可靠性。此外,HfO₂具有更高的缺陷密度,但它们在狭窄的能量范围内分布;而Al₂O₃的缺陷密度较低,但相关缺陷分布在更广泛的能量范围内。这些见解对于优化高频、高功率器件中的材料组合和层厚度选择至关重要,从而可以改进设计,以在各种应用中平衡性能和耐用性。

我们下一步计划将我们的结果与增强型HEMT的结果进行比较,增强型HEMT是一种阈值电压大于0 V的器件。本质上,HEMT结构是耗尽型器件——即在0 V时器件处于导通状态——但增强型操作更适合射频应用,因为它降低了功耗并提高了可靠性。增强型操作的另一个好处是它简化了电路设计,消除了对电压移位器的需求,电压移位器用于为耗尽型晶体管创建负电压以将其关闭;或者消除了多步设备开启的需求,这可以防止耗尽型器件中的短路和电源浪涌。

展望未来,我们计划研究这些介电层的MOS-HEMT的射频性能,以及缺陷能级之间的相互作用。CS

扩展阅读

- ▶ B. J. O' Sullivan et al. "DC Reliability Study of high-κ GaN- on-Si MOS-HEMT's for mm-Wave Power Amplifiers," 2024 IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), Grapevine, TX, USA, 2024, pp. 1-9, doi: 10.1109/IRPS48228.2024.10529379
- ▶ <https://www.imec-int.com/en/200mm-GaN-on-Si-technology-and-RF-devices>
- ▶ <https://www.imec-int.com/en/expertise/solutions-5g-and-wireless-iot-communication/beyond-5g-technology>



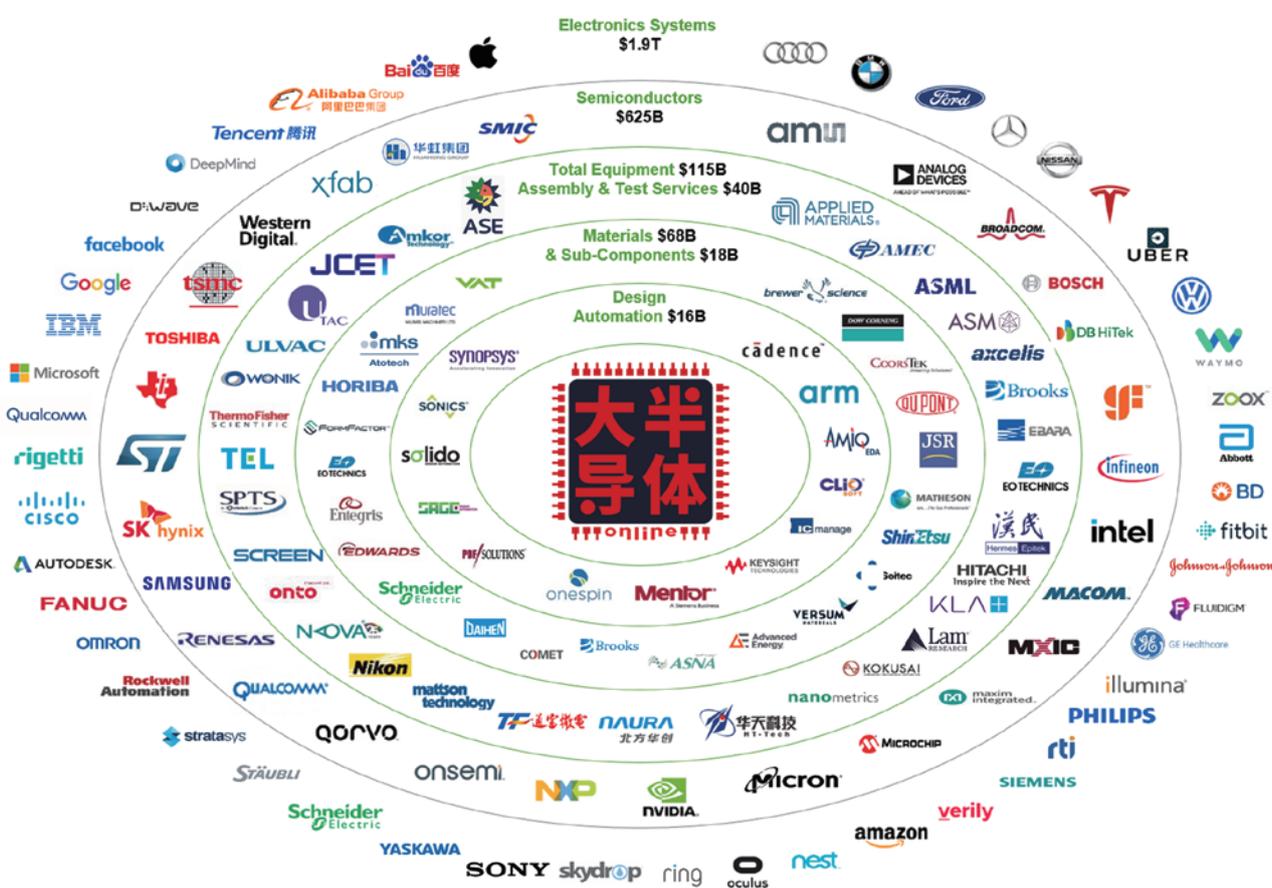
SEMICON[®] CHINA

FPDCHINA 跨界全球·心芯相联

2025年3月26-28日 | 上海新国际博览中心



全球最大的半导体行业盛会



免费自助发产品
 7000+公司 | 26万+专业观众
货比三家选精品



高场电子器件非侵入式、亚微米级精确电场检测

近日，南京大学张荣院士、叶建东教授与美国弗吉尼亚理工张宇昊教授、贾晓婷教授联合研究团队，在第70届国际电子器件大会 (IEDM 2024, 国际电子器件领域权威会议) 上以“Non-Intrusive and Precise Electric Field Sensing of High-Field Electron Devices by Franz-Keldysh Effect”为题报告了在强场下对超宽禁带半导体功率器件进行无损原位电场微区检测的最新成果。该成果已获得授权发明专利（一种半导体晶片内部电场的检测办法，ZL202410919386.X）。

面对光伏逆变器、汽车电子和轨道交通等复杂电气环境中的应用需求，提升功率电子器件的可靠性成为发展的关键，而器件内部电场的精准调控则是保证其性能与可靠性的核心要素。目前，功率器件内部电场的分布主要依赖 TCAD 数值仿真预测，现有的一些电场检测手段仍存在高场不准确性、检测限低或损伤性等问题，尚缺乏在强电场条件下对器件内部电场进行原位精确无损检测的有效手段。

基于上述问题，南京大学与美国弗吉尼亚理工联合研究团队利用半导体普遍具有的 Franz-Keldysh (F-K) 效应 (图 1a)，研究了半导体在电场作用下光吸收跃迁过程的变化机制，并通过检测材料吸收边的位移精确测定电场。由于 F-K 效应在高电场条件下表现更为显著，因此特别适用于高场条件下功率器件的原位电场检测。研究团队首次将该效应应用于超宽禁带半导体功率器件，对不同氧化镓功率二极管器件 (图 1b) 进行精确的光响应建模 (图 1c)。通过以界面电场为唯一拟合参数，将模型与不同电压下器件的亚带隙光响应测试谱进行定量拟合 (图 1d)，最终获得了界面电场的具体数值，并建立了光电流与界面电场之间的关系 (图 1e)。

研究团队进一步利用由陆海教授和任芳芳教授构建的微区光电测试先进平台 (图 2a)，基于光电流与界面电场的内在量化关系，实现了对工作中器件内部微区电场分布的亚微米级检测 (图 2b)，检测限达到 3.1 MV/cm。这一方法成功“可

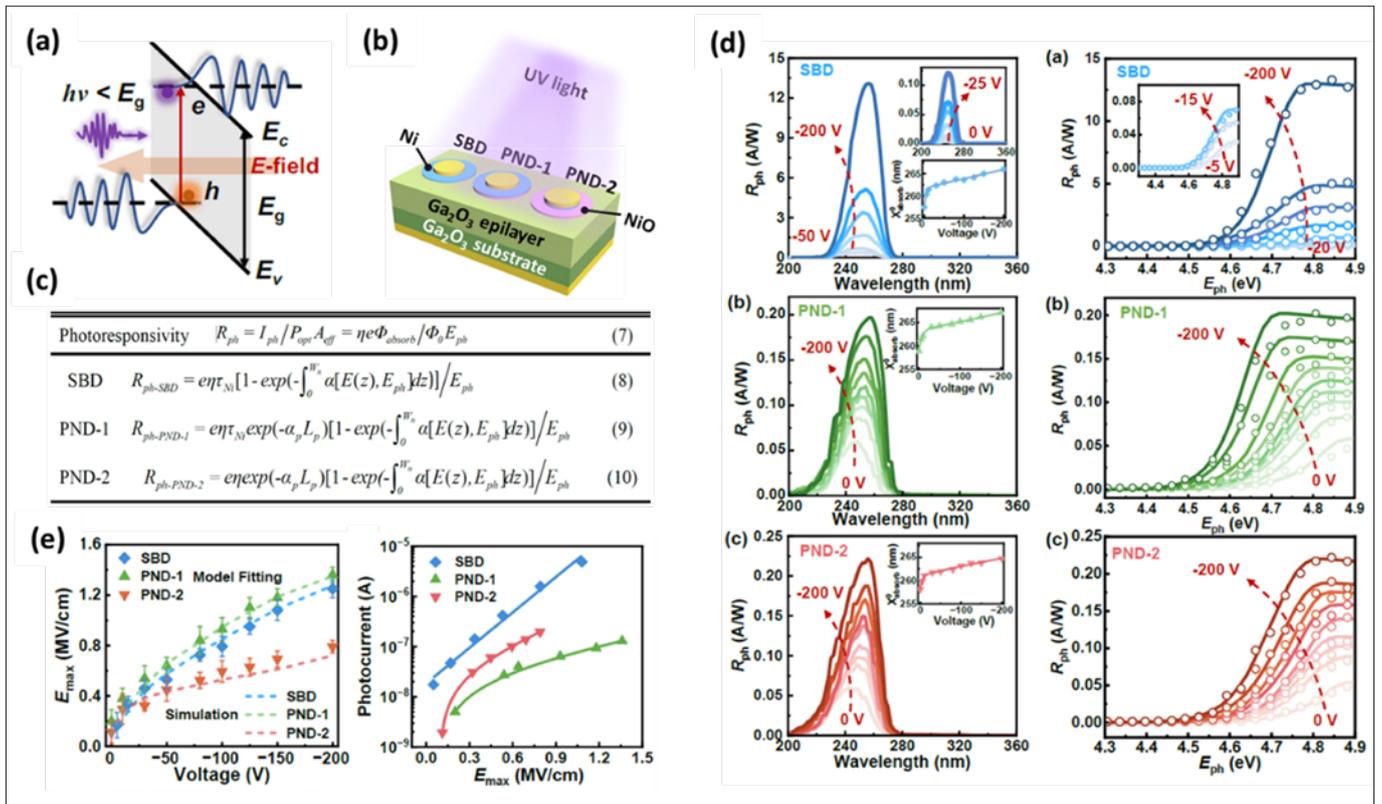


图1: (a) 半导体中的F-K效应原理图; (b) 本工作中制备的三种β-Ga₂O₃二极管的结构示意图; (c) 构建的光响应模型; (d) 光响应测试谱以及与模型的拟合结果; (e) 拟合得到的界面电场与仿真值的比较以及光电流与拟合得到的界面电场的关系。

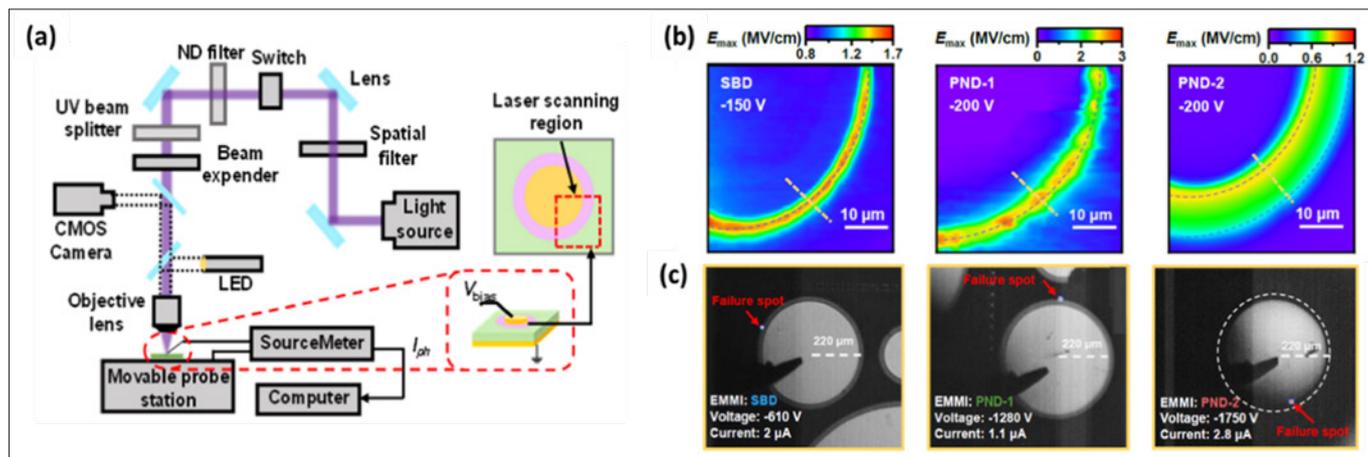


图2: (a) 搭建的光电流扫描系统示意图; (b) 通过该方法得到的高反向偏压下器件内部界面电场分布的二维图; (c) 三种器件临界击穿电压下的失效点的微光显微镜图。

可视化”了不同氧化镓功率器件中电场分布的差异，并揭示了导致这些器件击穿电压差异显著的物理机制。此外，通过江南大学闫大为教授自主研发的微光发射显微镜 (EMMI) 系统，对临界击穿热点位置进行观察对比 (图 2c)，进一步验证了该方法获得的电场分布结果的准确性。这表明，该方法能够在较低偏压下精准预测器件在过电压状态下发生破坏性失效的位置。

与现有的电场检测方法相比，本研究首次同时实现了电场的原位无损检测和亚微米级分辨率，且检测限达到了目前的最高水平。由于 F-K 效应适用于所有半导体材料，这一研究方法具有广泛的适用性和扩展性，适用于各种功率电子器

件的检测。这一创新性成果有望为高场器件的结构设计与优化提供重要指导，从而进一步推动其性能和可靠性的提升。

本工作在国家重点研发计划、国家自然科学基金和江苏省科技重大专项等项目支持下开展。南京大学裴馨仪博士生和美国弗吉尼亚理工巩贺贺博士为论文共同第一作者，南京大学叶建东教授和弗吉尼亚理工张宇昊教授、贾晓婷教授为论文共同通讯作者。同时，本工作获得了南京大学陆海教授、任芳芳教授、顾书林教授、王欣然教授、张荣院士的指导，同时也获得江南大学闫大为教授在 EMMI 测试方面的支持。©

西班牙获得欧洲批准，将向 Diamond Foundry Europe 新厂提供 8100 万欧元的补贴

根据欧盟 (EU) 国家援助规则，欧洲委员会已批准由西班牙直接拨款 8100 万欧元，支持 Diamond Foundry Europe (美国加利福尼亚州旧金山的 Diamond Foundry Inc 的子公司) 在埃斯特雷马杜拉的特鲁希略 (Trujillo) 建立一座新厂，用于生产半导体级人造金刚石原石，投资总额约为 6.75 亿欧元。根据《欧盟运作条约》(TFEU) 107(3)(a) 条，该地区有资格获得地区援助。

人造金刚石可用于半导体行业，替代目前使用的其他材料，如硅。该项目旨在满足 5G 网络或电动汽车等关键领域的需求。利用 Diamond Foundry 的等离子体反应器技术，该工厂将生产人造金刚石原石晶圆，年产能为 400-500 万克拉。

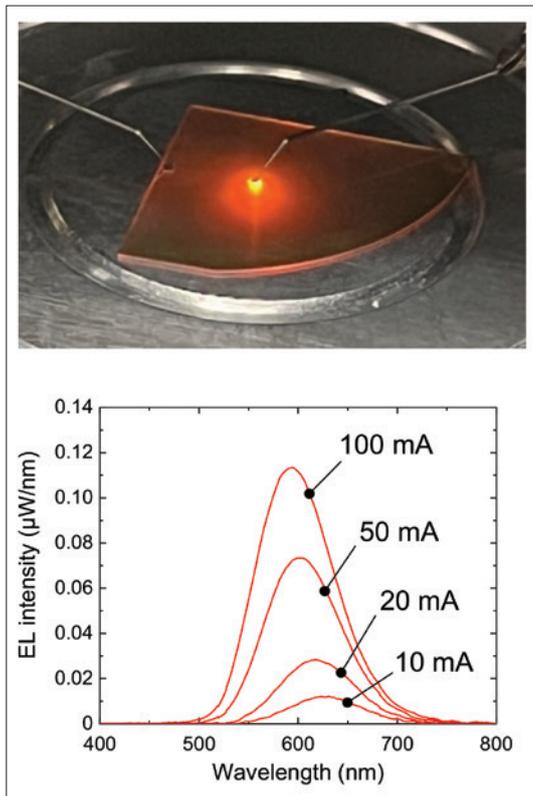
这笔补贴将有助于实现欧盟有关创造就业、地区发展和地区经济绿色转型的战略目标。该项目将创造约 300 个直接就业机会，以及更多的间接就业机会。新厂被设计为碳中和型，完全由太阳能光伏发电厂产生的可再生能源供电。

负责清洁、公正和竞争性过渡事务的执行副总裁 Teresa Ribera 评论道：“今天的决定使西班牙能够支持 Diamond Foundry Europe 建立第一家生产半导体级人造金刚石原石的工厂。”她补充道：“这将促进向去碳化经济和竞争力的过渡。这项措施还将促进该地区的经济发展，同时限制可能出现的竞争扭曲。” ©

实现基于 ScAlMgO_4 衬底的红色发光二极管

ScAlMgO_4 衬底为生产具有晶格匹配、富铟量子阱的 LED 提供了基础

沙特阿拉伯和日本的工程师合作声称首次在 ScAlMgO_4 衬底上生产出红色发光二极管 (LED)。据来自沙特阿拉伯阿卜杜拉国王科技大学和日本爱知工业大学的研究团队介绍, ScAlMgO_4 材料是一个有前景的衬底, 可用于生长红色、绿色和蓝色的氮化物发光器件。如果在这方面取得成功, 将为生产能够发射三种原色的像素铺平道路, 这对于显示应用来说是一个有吸引力的选择。



量子阱中铟组分的显著波动导致了宽的电致发光谱

的好处, 这对于实现更高的晶体质量至关重要。

在此基础上, 沙特阿拉伯和日本的研究人员合作表明, 可以在 ScAlMgO_4 上生产红色发光的 LED, 该衬底与 $\text{In}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ 实现了晶格匹配。尽管这些工程师并非首次在 ScAlMgO_4 上生长 InGaN 层, 但其他研究小组生产的外延层存在材料质量差、杂质水平高和表面粗糙等问题。

避免这些问题, 沙特阿拉伯和日本的团队在

低温缓冲层上生产了红色 LED, 该缓冲层具有 Ga 极性结构, 有助于降低残余电子浓度并实现有效的 p 型 InGaN 层。在这种基础上生长的器件, 其特征是 4 纳米厚的 InGaN 量子阱, 在 20 毫安的驱动电流下, 发射峰位于 629 纳米。这种电致发光的光谱宽度相对较宽, 其特征类似于 InGaN 量子点结构的特征, 表明量子阱中铟含量存在显著的分波波动。

红色 LED 的横截面明场扫描隧道电子显微镜显示, 由于位错线的生成, V 坑密度很高。这种次优生长归因于低温缓冲层的再结晶不足。

在 ScAlMgO_4 上生产红色 LED 的另一个缺点是衬底成本高。团队发言人 Kazuhiro Ohkawa 告诉《化合物半导体》, 这种仅限于 2 英寸直径的衬底价格比蓝宝石高出两个数量级以上。

尽管如此高的成本可能会阻碍在此基础上生产的红色 LED 的商业化, 但这并不是生产激光器的障碍——而这正是该团队的主要目标。朝着这一长期目标努力, Ohkawa 及其同事已经在蓝宝石上生产出了高效的 InGaN 基红色 LED, 他们声称这表明有可能生产出 InGaN 基红色激光器。

Ohkawa 表示, 蓝宝石上的红色 LED 结构由于存在应变弛豫层和缺陷阻止层而变得复杂——这两者都消除了波导所需的空间。通过转向 ScAlMgO_4 衬底, 可以避免这一问题, 因为其晶格匹配更好。

该团队成功的关键在于其自制的 MOCVD 工具, 该工具能够实现更高的生长温度。这一优势对于实现更高的晶体质量至关重要, 它能够降低背景电子浓度, 最终实现 p 型 InGaN 。在团队尝试生产 InGaN 红色激光二极管之前, 他们需要在外延层的晶体质量方面实现进一步改进。Ohkawa 表示: “添加波导层将是下一步。”

参考文献

M. Najmi et al. Appl. Phys. Express 17 116503 (2024)

SiC MOSFETs : 了解等离子体氮化带来的好处

基于等离子体氮化的工艺形成的 SiC 和 SiO₂ 界面，减少了界面态并提高了对抗正栅偏压应力的能力

大阪大学的工程师们提供了他们为 SiC MOSFETs 形成关键界面的新方法所带来的好处的新见解。该团队刚刚确定，其方法——涉及 SiC 表面的等离子体氮化、SiO₂ 的溅射沉积以及沉积后的退火——将界面态密度降低了超过一个数量级，并显著提高了对正栅偏压应力的免疫力。

这些宝贵的发现突出了远离标准 SiC MOSFETs 制造方法的好处，尽管取得了显著的商业成功，但大阪团队认为这些方法存在高导通电阻和可靠性差的问题。该团队将这些弱点归因于高界面态密度和近界面陷阱。

大阪大学的研究人员表示，界面氮化通常用于降低界面态密度并钝化缺陷。然而，这种方法远非完美：界面态密度的降低有限，可能是因为界面处氮含量的饱和；此外还存在可靠性问题，例如在栅偏压应力下阈值电压的强烈漂移。

为解决这些问题，大阪的工程师们正在开创一种方法，抑制氮进入 SiO₂，同时最小化 SiC 的氧化。他们的三步过程包括：SiC 表面的等离子体氮化；SiO₂ 的溅射沉积；以及沉积后的 CO₂ 退火。

据该团队称，这种方法的一个好处是，通过高密度等离子体直接对 SiC 进行氮化，能够在 SiC 表面掺入高比例的氮原子。该方法的其他优点包括在纯氩气氛围中溅射沉积 SiO₂ 以最小化 SiC 氧化，以及沉积后的退火，以减少 SiO₂ 介质中的缺陷密度。

研究人员此前已经确定，他们的工艺使界面处 SiC 一侧掺入的氮原子密度增加了三倍，将界面态密度降低到 $1 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 。然而，他们尚未研究沉积后退火对器件特性的影响。

他们刚刚通过深入研究用于沉积后退火的特定气体以及所采用的温度来解决这一问题。为此，他们制造了 SiC 金属氧化物半导体电容器，

使用了 n 型 SiC (0001) 外延层，其施主密度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。在湿法清洗后，他们在 $1.4 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的高密度氮等离子体中将 SiC 表面氮化 30 分钟，温度为 350°C，然后在纯氩气氛围中溅射 30 纳米厚的 SiO₂ 薄膜。最后一步是在 1050°C 至 1250°C 的温度下，在 CO₂ 或氩气下进行 30 分钟的沉积后退火。

比较在不同温度下 CO₂ 退火的电容 - 电压曲线显示，1050°C 的退火过程确保了足够的电子积累。然而，这种技术导致了由于界面陷阱而产生的滞后和拉伸。在 1250°C 退火的器件的电容 - 电压曲线中没有发现这些问题，这表明界面陷阱显著减少。研究人员还观察到随着退火温度的升高，电容 - 电压曲线出现负向移动，表明界面处存在正固定电荷。

该团队还进行了额外的研究，考虑了陷阱电荷密度和界面态的能量分布。对于 CO₂ 退火，随着退火温度的升高，陷阱电荷密度急剧下降。在氩气下，陷阱电荷密度的下降幅度明显较小，这使得团队得出结论，电荷密度的降低不仅仅是退火效应，还涉及 CO₂ 分子与界面陷阱的反应。

研究界面态密度的能量分布显示，当在 CO₂ 下退火时，随着温度的升高，界面态密度降低。切换到氩气则导致界面态密度的降低不足，这表明该团队工艺的好处不仅仅是等离子体氮化和最小化氧化，还包括通过 CO₂ 沉积后退火实现的缺陷钝化。

该团队还进行了应力测试，施加了长达 2000 秒的正应力偏压，场强为 $5\text{-}8 \text{ MV cm}^{-1}$ 。这项研究表明，在 CO₂ 下提高退火温度可以增加器件的免疫力。

参考文献

H. Fujimoto et al. Appl. Phys. Express 17 116503 (2024)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AIXTRON SE		www.aixtron.com	BC
Applied Materials Inc.		www.appliedmaterials.com	17
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
华卓精科		www.u-precision.com	FC
RABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	7
Riber		www.riber.com	IFC
Park Systems		parksystems.cn/nx-wafer	1
SEMICON China 2025		www.semiconchina.org	55

欢迎投稿

《化合物半导体》(CSC) 是针对中国化合物半导体及光电市场出版的专业杂志, 用简体中文出版。

本刊主要报道化合物半导体相关的材料、工艺、设备、器件、模块 / 组件、封测技术, 及其发展趋势和相关厂务设施。与读者一起紧跟行业发展, 共同面对在研发、制造过程中遇到的问题及挑战。

本刊的读者是活跃在化合物半导体及光电行业的技术管理人员、项目经理、科研人员、工程师以及从事开发、制造、工艺的专业人士。

本刊文章精选自英国物理协会著名杂志《Compound Semiconductor》, 翻译并编辑成形; 我们也报道全球平面显示制造商和研究机构的最新技术与资讯, 以及撰写其他与本地市场息息相关的新闻和文章; 并选编专业投稿。

本刊欢迎读者和供应商投稿, 文章一经采纳, 将在印刷版本和网上刊登。CSC 将为设计者和管理人员, 提供一个展现国内外厂商的最新成果的平台。

文章投稿指南

1. 文章主题突出、结构严谨、短小精悍, 中文字数不超过 3,000 字;
2. 文章最好配有两幅至四幅与内容相关的插图或表格; 插图与表格分别用图 1、图 2 或表 1、表 2 的次序编号, 编号与文中的图表编号一致;

3. 请注明作者姓名、职务及所在公司或机构的名称。作者人数以四人为限;
4. 请勿一稿多投;
5. 请随稿件注明联系方式 (邮编、地址、电话、电子邮件)。

新产品投稿指南

1. 新产品必须是中国市场新上市、可以在中国市场上买到;
2. 有关新产品来稿的内容应包含产品的名称、型号、功能、主要性能和特点、用途;
3. 短小精悍, 中文字数不超过 300 字;
4. 来稿请附产品照片。最好是在单色背景下简单的产品实物照片, 照片的分辨率不低于 300dpi;
5. 注明能提供进一步信息的人员姓名、电话、电子邮件。

优先刊登中文来稿 (翻译稿请附英文原稿)。来稿请用电子邮件寄到: minL@actintl.com.hk, lynnw@actintl.com.hk。

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

Deputy Publisher (副社长) - China
Lisa Cheng (程丽娜)
lisac@actintl.com.hk

Editor in China (中国版编辑)
Min Lu (陆敏)
minL@actintl.com.hk
Lynn Wang (王清玲)
lynnw@actintl.com.hk

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

Chief Operating Officer
Stephen Whitehurst
stephen.whitehurst@angelbc.com
Tel: +44 (0)2476 718970

销售人员 Sales Offices

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

China (中国)
Lisa Cheng (程丽娜)
lisac@actintl.com.hk
Tel: 86 185 7156 2977

Mini Xu (徐若男)
minix@actintl.com.hk
Tel: 86 187 7196 7314
Phoebe Yin (尹菲菲)
phoebey@actintl.com.hk
Tel: 86 155 2754 0817

Ron Wang (汪毓翀)
ronw@actintl.com.hk
Tel: 86 186 9404 8156

Grace Zhu (朱婉婷)
gracez@actintl.com.hk
Tel: 86 159 1532 6267

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

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

Korea (韩国)
Lucky Kim
semieri@semieri.co.kr
Tel: 82-2-574-2466

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

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

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

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



CHIP China
晶芯研讨会

CS 2025
化合物半导体
CON 先进技术及应用大会

2025年5月 中国·苏州
May 2025 Suzhou, China

半导体先进技术创新发展和机遇大会

Semiconductor Advanced Technology Innovation Development And Opportunities Conference

化合物半导体先进技术及应用大会

氮化镓 (GaN) 技术的突破
GaN Technology Breakthrough

碳化硅 (SiC) 的优化与机遇
Optimization & Opportunities of SiC

Micro-LED技术的持续发展
The Sustainable Development of Micro-LED Technology

超宽禁带半导体材料
Ultra-wide Bandgap Semiconductor Materials

光电半导体与发射技术
Optoelectronic Semiconductors And Emission Technology

市场趋势与应用
Market Trends & Applications

主办单位：雅时国际商讯
官方媒体：《化合物半导体》《半导体芯科技》

CHIP China晶芯研讨会

2.5D/3D/3.5D封装在AI趋势下大有可为
2.5D/3D/3.5D Packaging Has Great Potential Under the AI Trend

玻璃通孔 (TGV) 技术创新发展和应用推动
TGV Technology Innovation, Development and Application Promotion

面板级封装技术的崛起
The Rise of Panel-Level Packaging Technology

先进封装对新型装备技术
Advanced Packaging for New Equipment Technology

光电合封 (CPO) 及光电互连技术发展
CPO & Optoelectronic Interconnection Technology Development

2.5D/3D封装设计仿真与可靠性
2.5D/3D Packaging Design Simulation & Reliability

2.5D/3D封装新材料进展
Progress in New Materials for 2.5D/3D Packaging

以技术为媒, 以产业为基, 诚邀全球创新力量共绘泛半导体蓝图!

赞助及媒体合作：徐若男 Mini Xu

157 8288 4236

参会报名：吴漫 Mandy Wu

156 2304 9536

AIXTRON

THE NEW G10 SERIES

Your Productivity Solution for All Advanced Epitaxy Materials



G10-SiC

- ▶ 9x150 mm (6") or 6x200 mm (8")
- ▶ New hardware & process surpassing Single Wafer Reactor uniformities
- ▶ +50% productivity per fab area with large batch technology & small footprint

End Markets/Products:

EV inverters & charging infrastructure

G10-GaN

- ▶ 8x150mm (6") or 5x200 mm (8")
- ▶ 1st fully automated compact GaN MOCVD cluster designed 100% for Si Power fabs
- ▶ Novel hardware solution for unmatched barrier uniformities and device yields

End Markets/Products:

Power Electronics & Wireless communication



G10-AsP

- ▶ 8x150 mm (6") or 5x200mm (8")
- ▶ 1st fully automated AsP MOCVD system enabling 10x lower defect density
- ▶ Unmatched wavelength uniformity on all wafer sizes

End Markets/Products:

Micro LED, Optical Data communication, 3D-sensing & LiDAR

