

化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2025年 6/7月

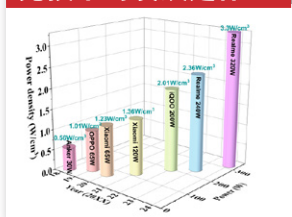
BAW 技术——基于
AlScN 的射频滤波器



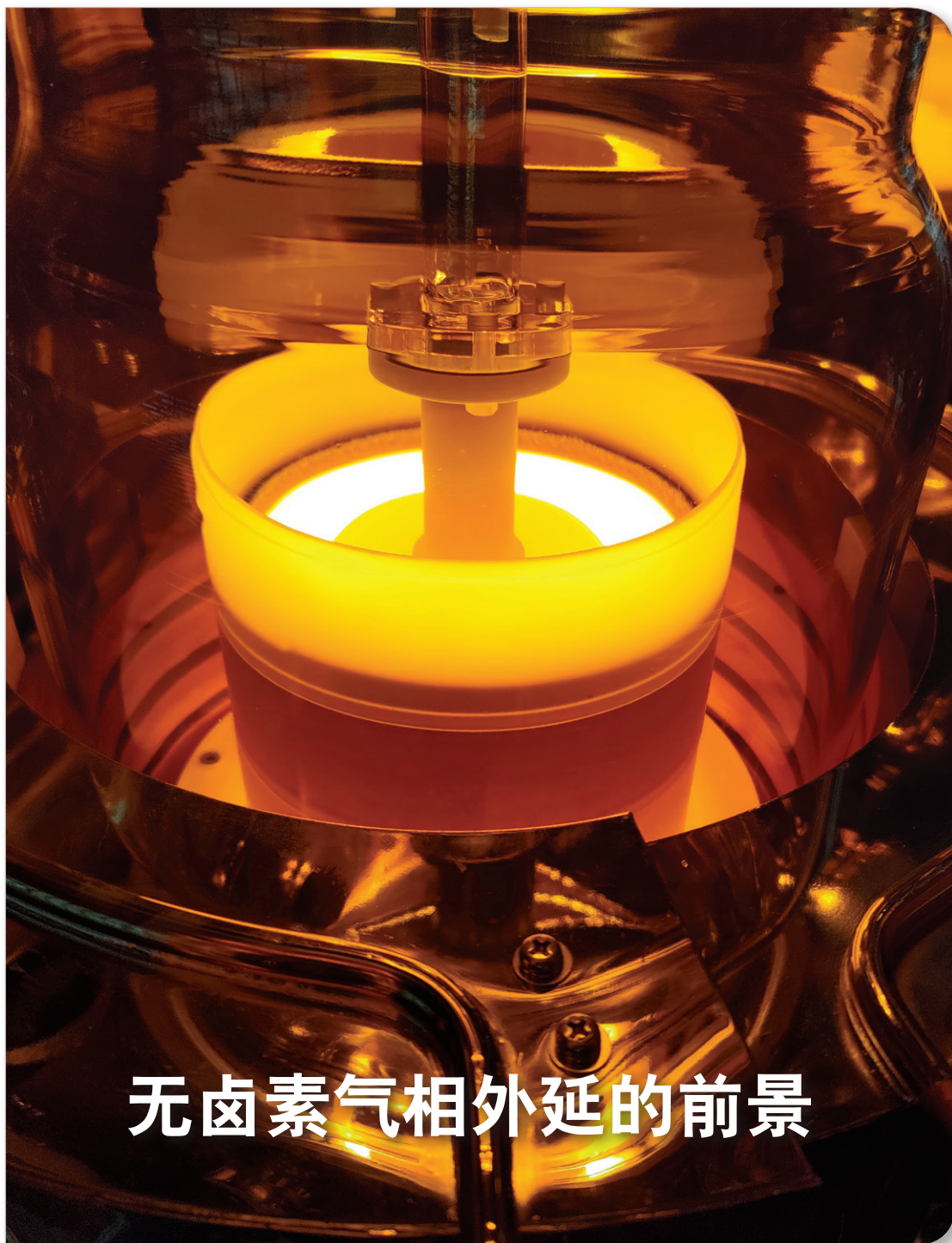
迈向无缺陷的碳化硅
外延片



荔园定律：氮化镓快
充技术的发展定律



降低 InP 基器件成本



无卤素气相外延的前景

ACT INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

www.compoundsemiconductorchina.net

RIBER's MBE 6000

引领MBE 大规模生产

低真空背景

低原子能量

低外延温度

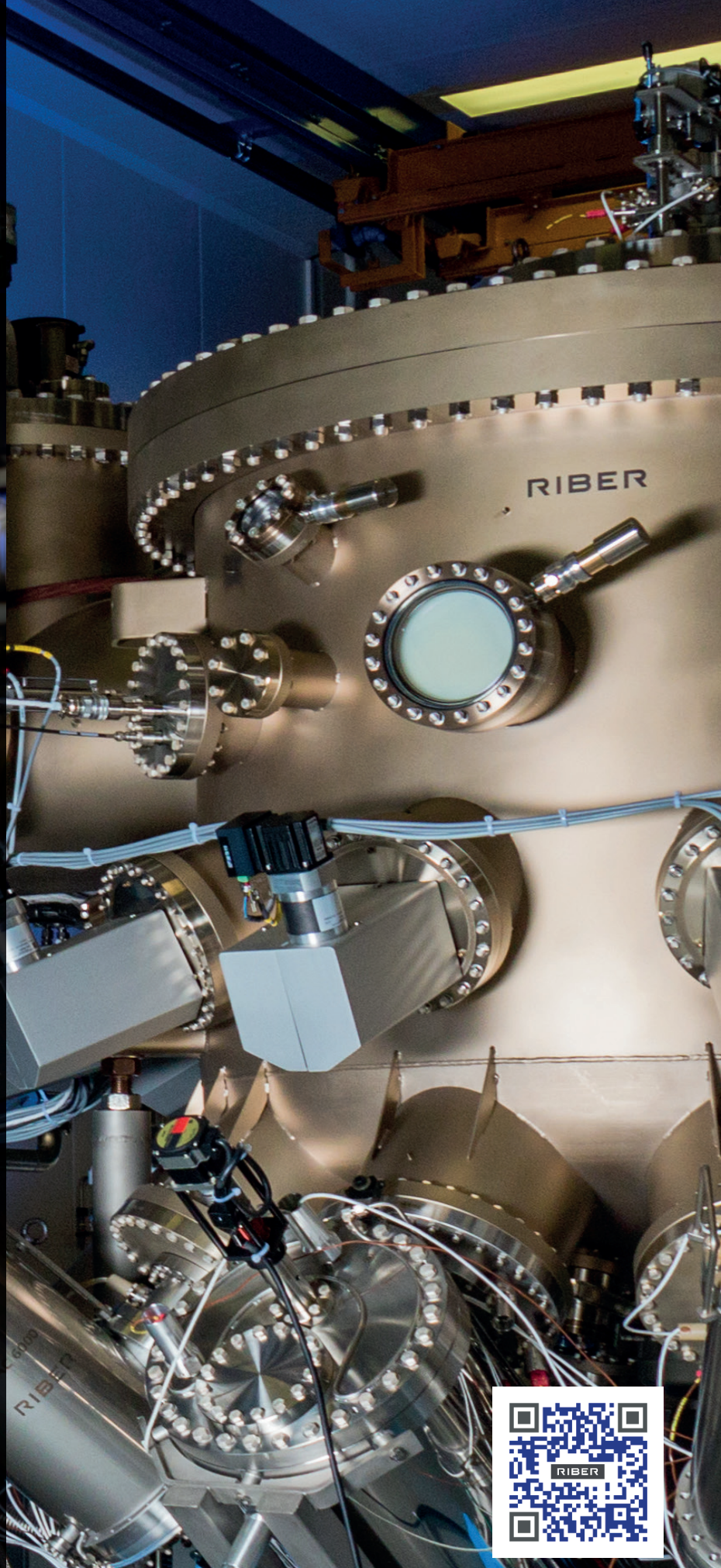
低晶体缺陷

完美晶体

高均匀性

单原子层

高再现性




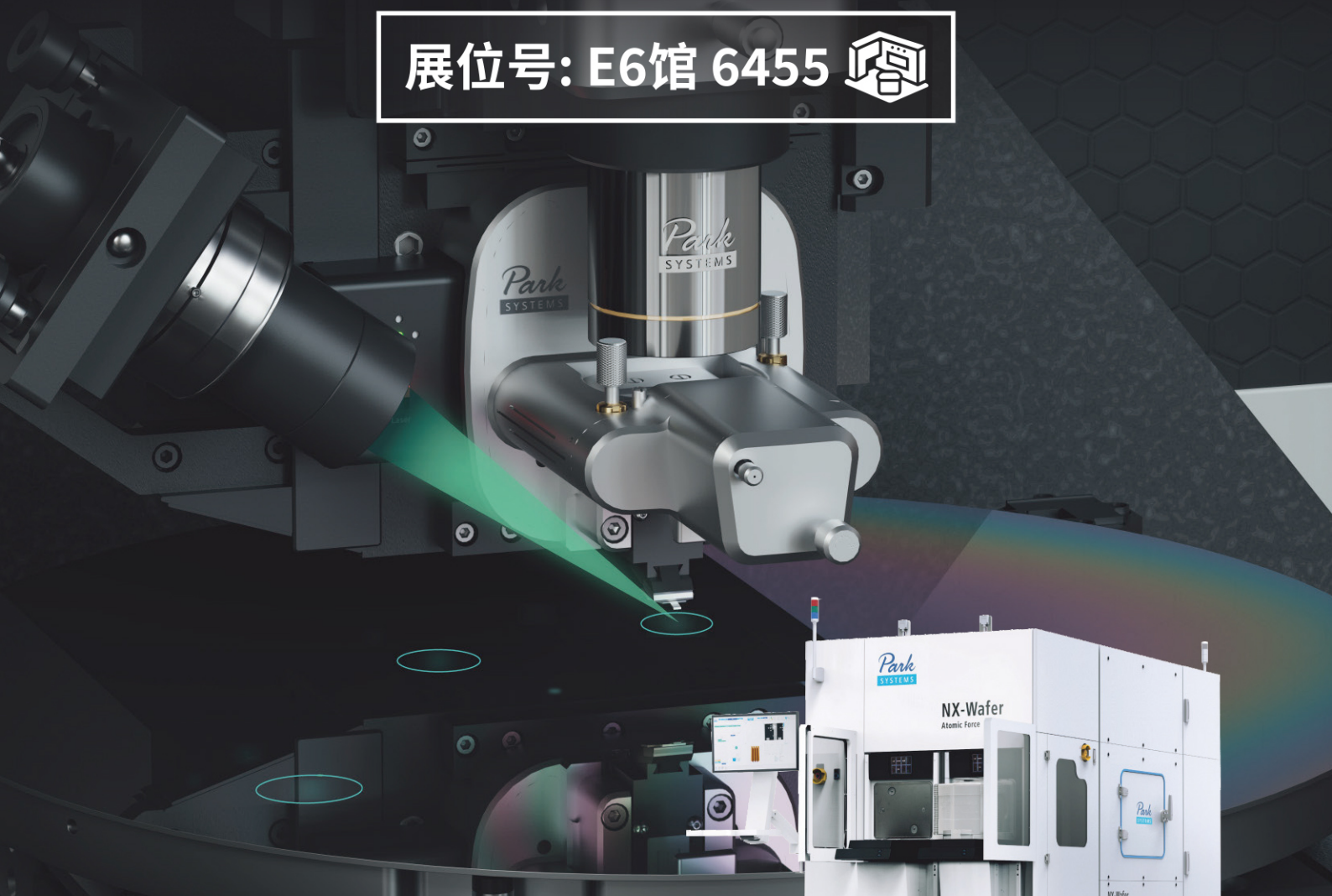
RIBER

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



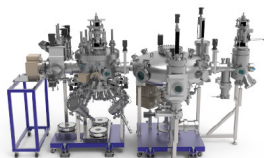
Watch the video

半导体薄膜物理沉积设备供应商

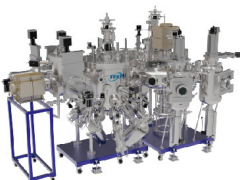
FERMI 费勉仪器

创立于2017年,提供设计开发、集成测试、售后服务等一站式供应服务平台。

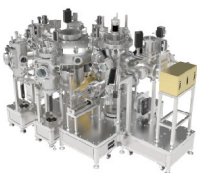
主营业务:半导体装备制造、精密零部件制造、不锈钢真空腔体焊接制造等。



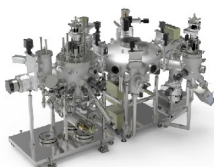
MBE-800 cluster 分子束外延系统



MBE-1000 cluster 分子束外延系统



LFPC-600 真空解理和钝化系统



HLFP-800P 原子氢清洗钝化系统



PV-200C全自动磁控PZT薄膜生产线

费勉仪器科技(南京)有限公司

Fermion Instruments (Nanjing) Co., Ltd.

YFCA 服务热线 +86-25-5888 3672

南京市江北新区智达路6号智城园区3号楼 info@fermi.com



费勉仪器公众号



费勉仪器官网

封面故事 Cover Story

16 无卤素气相外延的前景

The promise of halogen-free vapour phase epitaxy

无卤素 (HF) VPE 源材料为金属镓和氨气,生长速率可高达每小时 700 微米,金属镓的利用率接近 50%,凸显了 HF-VPE 在实现氮化镓材料晶锭的成本效益能力。

- TAISHI KIMURA 和 DAI SUKE NAKAMURA, 丰田中央研发实验室

编者话 Editor's Note

04 碳化硅: AR眼镜的未来“视”界

Silicon Carbide: The Future "Vision" of AR Glasses

- 陆敏

业界动态 Industry

05 我国首条光子芯片中试线实现量产

China's first pilot production line for photonic chips has achieved mass production.

05 株洲中车8英寸SiC产线年底通线

CRRC Zhuzhou's 8-inch SiC production line is scheduled to be operational by the end of the year.

05 天岳先进临港工厂二期8吋SiC衬底扩产项目持续推进

The Phase II 8-inch SiC substrate expansion project at SICC's Lingang factory is continuing to advance.

06 突发! Wolfspeed将申请破产, 股价暴跌

Breaking! Wolfspeed to file for bankruptcy, causing its stock price to plunge.

06 德州仪器宣布投600亿美元在美扩建半导体工厂

Texas Instruments announced plans to expand semiconductor manufacturing facilities in the US with a \$60 billion investment.

07 SEMI报告: 2025年第一季度全球半导体设备出货金额同比增长21%

SEMI report: In the first quarter of 2025, global semiconductor equipment shipments increased by 21% year - on - year.

九峰山实验室专栏 Jiufengshan Laboratory Column

08 【2025九峰山论坛】创新与突破:

九峰山实验室构建“材料-工艺-设备”三位一体关键技术体系

2025 JiuFeng Mountain Forum: Innovation and Breakthrough: JiuFeng Mountain Laboratory Develops an Integrated Key Technology System of 'Materials-Process-Equipment'

- 九峰山实验室

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 INTERNATIONAL 产品系列,包括印刷和数字媒体以及会议和活动,雅时国际为国际营销公司和本地企业提供了进入中国市场的机会。雅时国际的媒体品牌为电子制造、机器视觉系统、激光/光学、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》中文版(CSC)是全球最重要和最权威的杂志Compound Semiconductor的“姐妹”杂志,亦是中國唯一专注于化合物半导体产业的权威杂志,重点介绍国外先进技术和产业化经验,促进国内产业发展,为国内读者提供化合物半导体行业的专业知识。内容涵盖晶体的特性研究,器件结构的设计,生产中用到的材料、设备、软件、测量、厂房设施,以及有关市场分析和动态。



扫一扫
免费下载电子书

Evatec专栏 Evatec Column

- 12 BAW技术—基于AlScN的射频滤波器
BAW technology—AlScN based RF filters Helping customers keep the lead in 5G and beyond
- Oguz Yildirim 博士, Evatec

技术 Technology

- 22 迈向无缺陷的碳化硅外延片
Towards defect-free SiC epilayers
- 新加坡A-STAR微电子研究院的Nguyen Xuan Sang和Shiv Kumar; 法国 Soitec 公司的 Marcin Zielinski

- 27 荔园定律：氮化镓快充技术的发展定律
Liyuan Law: GaN Fast Charging Technology Development Trend
- 深圳大学：钟智祥、吴雨桐、蒋冰；浙江大学：李京波；江南大学：敖金平；电子科技大学：朱仁强、张波；复旦大学：桑立雯；北京大学：魏进；西安电子科技大学：刘志宏、张春福；北京大学东莞光电研究院：王琦；湖南大学：胡伟；北京大学深圳研究生院：周航；深圳平湖实验室：万玉喜、张道华；第三代半导体产业技术创新战略联盟：赵璐冰；广东电网有限责任公司电力科学研究院：李盈；深圳市洲明科技股份有限公司：陈黎暄；肯特智能技术（深圳）股份有限公司：陈胜森；广东天域半导体股份有限公司：李锡光；福建三安光电股份有限公司：林科闯；无锡华润华晶微电子有限公司：巴建锋、储凯闻；苏州能讯高能半导体有限公司：裴轶；江西誉鸿锦芯片科技有限公司：闫怀宝；红与蓝微电子（上海）有限公司：杨战武；深圳市倍思科技有限公司：何世友；深圳罗马仕科技有限公司：李秋；通信作者：深圳大学 刘新科

- 30 降低 InP 基器件成本
Cutting the cost of InP-based devices
- 弗劳恩霍夫太阳能研究所的弗兰克·迪姆罗斯、卡敏·佩莱格里诺、延斯·奥尔曼和大卫·莱克纳；III/V-RECLAIM 公司的约尔格·施瓦尔茨

科技前沿 Research Review

- 33 提高基于GaN的HEMTs的功率附加效率
Increasing the power-added efficiency of GaN-based HEMTs
- 34 提高基于GaN的反射镜
Improving GaN-based mirrors
- 35 二氧化锆GeO₂肖特基势垒二极管展现整流性能
A debut for the vertical rutile GeO₂ Schottky barrier diode

36 广告索引 Advertisement Index

《化合物半导体》编委会（排名不分先后）

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

专注于化合物半导体、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 and 核心竞争力，为客户提供更加优化完善的技术服务和专业定制化解决方案。



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
(京津冀) 责任人：130 5158 6631
(大项目) 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：AR 眼镜的未来“视”界

在科技的浪潮中，总有一些材料如同隐藏的宝藏，等待着被挖掘出无限的可能。碳化硅 (SiC)，这个曾经在半导体领域闪耀的名字，如今正悄然改变着 AR 眼镜的世界。今天，就让我们一起揭开碳化硅在 AR 眼镜应用领域的神秘面纱，探索它如何成为未来“视”界的关键。

一、AR 眼镜的光学挑战：透明的难题

想象一下，你戴上一副 AR 眼镜，眼前的世界瞬间变得丰富多彩，虚拟信息与现实场景完美融合。然而，这一切的实现都离不开一个核心部件——光学镜片。AR 眼镜的镜片需要具备极高的透光率和均匀的折射率，才能确保虚拟图像清晰、稳定地呈现在用户眼前。

传统的光学材料，如微晶玻璃，在透光率和折射率均匀性上已经达到了很高的水平。但随着 AR 眼镜对视觉效果要求的不断提高，这些材料逐渐显得力不从心。碳化硅，作为一种新兴的光学材料，以其独特的物理特性，为解决这一难题带来了希望。

碳化硅的透光率和折射率均匀性要求极高，这意味着它需要在材料内部消除包裹物缺陷、减少应力，以确保光线能够均匀地通过。然而，随着晶圆尺寸的增大，这一挑战变得愈发艰巨。12 英寸的碳化硅晶圆在消除缺陷和维持应力均匀性上的难度，远远超过了 6 英寸和 8 英寸的晶圆。这就好比在一个巨大的舞台上，要让每一个演员都完美地完成舞蹈动作，难度可想而知。

二、平整度的极致追求：纳米级的精度

在 AR 眼镜的世界里，镜片的平整度如同一张完美的画布，任何微小的瑕疵都可能影响虚拟图像的呈现效果。碳化硅镜片的折射率较高，约为 2.6-2.7，高折射率放大缺陷敏感性，导致对表面平整度 (TTV、LTV、Bow) 要求更严苛 (如 LTV 需达百纳米级)。大尺寸碳化硅将带来更大的加工技术障碍。另外传统的加工工艺已经无法满足这种高精度的需求，离子抛光等先进技术将应运而生。

离子抛光技术能够将镜片表面的平整度控制在百纳米级，这相当于在头发丝的十分之一上进行精细雕刻。这种高精度的加工工艺不仅提高了镜片的质量，也为 AR 眼镜带来了更加清晰、逼真的视觉体验。但大尺寸随之而来的是成本和技术门槛的大幅提高，这使得碳化硅镜片的制造变得更加复杂和昂贵。

三、成本的天平：大尺寸 vs 小尺寸

在科技发展的道路上，成本始终是一个不可忽视的因素。对于碳化硅镜片来说，尺寸的增大似乎是一个直观的降本路径。然而，事实并非如此。随着尺寸的增加，光波导制造固投成本呈非线性上升，包括纳米压印模板、光刻机、刻蚀设备等设备投入。例如，12 英寸的压印模板成本随着尺寸指数上升。

此外，光刻、刻蚀等工艺制造成本与晶圆面积基本成正比，大尺寸晶圆在经济性上并不占优势。相反，小尺寸厚晶锭技术却展现出了巨大的降本潜力。通过提升晶锭的厚度，如液相法可制备 6 厘米以上的厚晶锭，能够有效减少大晶片掏圆损耗，抵消小尺寸的产能限制。与主流的 PVT 法相比，液相法在厚晶锭制备上更具潜力，可能是未来技术突破的关键。

四、未来“视”界：碳化硅的无限可能

当我们将目光投向未来，碳化硅在 AR 眼镜应用领域的前景令人兴奋。小尺寸厚晶锭技术 (包括 PVT 及液相法) 不仅能够降低制造成本，还能提高镜片的光学性能。随着技术的不断进步，我们有理由相信，碳化硅镜片将成为 AR 眼镜的标配，为用户带来更加沉浸式的视觉体验。

社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak
adonism@actintl.com.hk

荣誉顾问 Honorary advisor

郝跃院士 Academician Hao Yue

主编 Editor in Chief

陆敏 Min Lu
MinL@actintl.com.hk

出版社 Publishing House

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

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 25988573
Fax: 86 755 25988567

武汉 Wuhan

Tel: 86 27 82201291

UK Office

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

ACT
INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

© 2025 版权所有 翻印必究

我国首条光子芯片中试线实现量产

据“无锡科技”公众号消息，日前，无锡光量子芯片中试平台顺利下线首片6寸薄膜铌酸锂光子芯片晶圆，同时超低损耗、超高带宽的高性能薄膜铌酸锂调制器芯片也实现规模化量产。

据悉，上海交大无锡光子芯片研究院于2022年底破土动工，并率先启动国内首条光子芯片中试线建设。上海交大无锡光子芯片研究院院长金贤敏表示，无锡光量子芯片中试平台的“投产”，不仅标志着研究院构建起贯通“技术研发—工艺验证—规模量产”的全链条能力，更意味着我国自主可控的量子科技国际竞争力进一步提升。

“一片直径6寸的晶圆可以切割出350颗芯片，这些芯片如同‘心脏’，驱动着高性能薄膜铌酸锂调制器高效运行。”中试平台负责人透露，在滨湖达产后，无锡光量子芯片中试平台将具备年产1.2万片薄膜铌酸锂晶圆的量产能力。未来平台将与更多产业链上下游企业合作，加速科技成果转化落地，推动我国光子芯片核心器件从技术研发向产业化应用的实质性跨越。

此外，为了攻克薄膜铌酸锂晶圆的制备工艺难题，上海交大无锡光子芯片研究院为无锡光量子芯片中试平台引进了110台国际顶级CMOS工艺设备，覆盖了薄膜铌酸锂晶圆从



光刻、薄膜沉积、刻蚀、湿法、切割、量测到封装的全闭环工艺。依托尖端设备以及领先的纳米级加工能力，研究院在6寸薄膜铌酸锂晶圆上实现了110纳米高精度波导刻蚀，在兼顾高集成度的同时，调制带宽突破110GHz、插入损耗低至3.5dB以下，信号强度和抗干扰能力等性能指标达国际一流水平。

近期，中试平台将发布工艺设计包，薄膜铌酸锂晶圆制备的核心工艺参数与器件模型将全面纳入、开放共享，助力产业链企业快速完成从概念设计到流片验证再到量产的全流程闭环，显著缩短研发周期，让创新成果加速“落地生金”。

株洲中车8英寸SiC产线年底通线

日前，株洲中车董事长、执行董事李东林在投资者活动中透露，株洲三期于2024年11月份启动建设，2025年5月主体厂房封顶，预计2025年下半年启动设备搬入，2025年底有望实现产线拉通，该项目为8英寸SiC晶圆。

此外，株洲中车还拥有一条6英寸SiC芯片产线，当前已具备年产2.5万片6英寸SiC芯片产能。

技术方面，株洲中车第三代精细平面栅SiC产品已定型，技术水平行业主流；第四代沟槽栅设计定型，达行业先进水平，并且对第五代SiC技术完成布局。目前SiC重点产品包括3300V高压平面栅SiC MOSFET、1200V精细平面栅SiC MOSFET、1200V SBD等，1200V沟槽栅SiC MOSFET性能指标基本对标国际龙头企业。

天岳先进临港工厂二期8吋SiC衬底扩产项目持续推进

大半导体产业网消息，5月21日，天岳先进在投资者互动平台表示，公司立足全球市场，持续提升核心产品的产能产量。其中，济南工厂的产能产量稳步推进，2024年上半年，上海临港工厂已经实现年30万片导电型衬底的产能规划。

此外，上海临港工厂二期8英寸碳化硅衬底扩产计划已进入实质性推进阶段。根据规划，该工厂8英寸衬底总体产

能目标为60万片，公司将分阶段实施建设，以逐步释放产能并巩固长期竞争力。

在产能扩张的同时，天岳先进超前布局碳化硅衬底产品矩阵。不仅主导8英寸导电型衬底量产，还推出业内首款12英寸碳化硅衬底，单片晶圆芯片产出量较8英寸提升2.5倍，大幅降低单位成本，引领行业向更大尺寸迭代。目前，其8英寸产品已批量供应国际头部客户，市场份额持续攀升。

突发！Wolfspeed 将申请破产，股价暴跌

近日，据《华尔街日报》援引知情人士的话报道称，由于难以解决巨额债务问题，美国碳化硅芯片制造商 Wolfspeed 准备在未来数周内申请破产。受此消息影响，Wolfspeed 美股盘后股价大幅跳水，一度暴跌超 66%。

Wolfspeed 一直在努力应对工业和汽车市场需求低迷以及关税引发的不确定性。报道称，在拒绝了债权人提出的几项庭外债务重组提议后，该公司正寻求申请第 11 章破产保护，这将获得大多数债权人的支持。

本月早些时候，Wolfspeed 表示，由于经济不确定性导致电动汽车需求放缓，公司提出了持续经营的疑虑，并预测年收入将低于预期，导致其股价当天大跌 23%。

即将离任的首席财务官奈尔·雷诺兹在电话会议上表示，公司可能需要寻求法庭选择来重新协商其债务，并且可能会在季度文件中添加“持续经营”措辞。该公司执行董事长托马斯·沃纳表示，将把高级领导团队裁员 30%。

Wolfspeed 公司还表示，根据《芯片与科学法案》，预计 2026 财年将获得 6 亿美元的现金退税。但在特朗普政府呼吁立法者废除《芯片与科学法案》后，拜登时代承诺为国内芯片制造提供补贴的立法的未来仍不确定。

值得一提的是，在崩盘前夕，知名投资机构提前清仓抛售。据一份监管文件显示，激进投资者 Jana Partners 在今年第一季度已退出其在 Wolfspeed 的全部头寸。该机构去年曾推动 Wolfspeed 考虑出售以提振股价。

监管文件显示，Jana Partners 在今年第一季度出售了近 500 万股 Wolfspeed 股票。此前文件显示，Jana Partners 去年底曾减持约 19% 的股份。

市场调研机构 Yole 分析数据显示，从短中期来看，2024 年电动汽车市场的需求放缓对 SiC 器件市场产生了重大影响。在过去的一年里，Wolfspeed 已经解雇 CEO，关闭

一家工厂，并裁员 20%，以应对其股价自疫情期间达到峰值以来暴跌 90% 以上的情况。

投资机构 Jana Partners 认为，Wolfspeed 管理层在资本配置、执行和战略方面的失误导致公司经营出现巨大问题，股价持续崩盘。

多位华尔街分析师认为，Wolfspeed 的归宿基本上就是破产或者被收购。Wolfspeed 成立于 1987 年，前身是 Cree，于 2017 年更名为 Wolfspeed，是全球知名的碳化硅 (SiC) 和氮化镓 (GaN) 半导体制造商。公司业务涵盖碳化硅和氮化镓材料、功率器件和射频器件等，产品广泛应用于电动汽车、充电基础设施、可再生能源、工业和航空航天等领域。

2022 年，Wolfspeed 在纽约州莫霍克谷开设了一家新的芯片制造工厂，并在查塔姆县西部西勒城附近开设了一家大型碳化硅材料工厂，Wolfspeed 预计该工厂将于今年夏天开业。

财务记录显示，Wolfspeed 于去年夏天成立，全球员工超过 5000 人。大多数员工驻扎在北卡罗来纳州，该公司是达勒姆县第五大雇主。过去六个月，这家芯片制造商还对其高管团队进行了调整；上周四的财报电话会议是新任首席执行官罗伯特·费尔勒首次出席的电话会议，也是即将离任的首席财务官奈尔·雷诺兹最后一次出席的电话会议。

“有一点非常清楚，”费尔勒说道，“Wolfspeed 是一家拥有巨大潜力的公司，其基础要素已经到位。”该公司在财报电话会议上没有回答分析师的提问。尽管一些债权人已向该公司提出了重组债务的协议，但 Wolfspeed 的领导层表示，他们希望得到更广泛的答案，因为他们正在考虑“一项战略性的法庭内交易”。Wolfspeed 投资者关系主管泰勒·格伦巴赫在上周五的一封电子邮件中表示，“法庭上”的措辞表达了公司的信念，即“可能需要一个全面的解决方案来在未来 12 个月内加强我们的资产负债表”。

德州仪器宣布投 600 亿美元在美扩建半导体工厂

据外媒报道，6 月 18 日，德州仪器宣布将在美国德州和犹他州投资超 600 亿美元（约合人民币 4314 亿元）建设七座晶圆厂，预计带来超 6 万个工作岗位，并称这是美国历史上在基础半导体 (foundational semiconductor) 制造领域的最大投资。德州仪器表示这笔资金将用于升级现有工厂及新建项目，其中包括在得州谢尔曼新建两座工厂，但具体进度取决于市场需求。公司长期资本支出计划未变，现有资金已分配至部分在建工厂的投产准备阶段。据了解，德州仪器在谢尔曼的首座

新晶圆厂 SM1 将于今年投入生产，第二座新晶圆厂 SM2 的外墙也已完工。此外，TI 还计划增建两座晶圆厂 SM3 和 SM4，以满足未来的需求。德州仪器总裁兼首席执行官哈维夫·伊兰 (Haviv Ilan) 表示，正在大规模建设可靠且低成本的 300 毫米晶圆生产能力。这一投资计划旨在支持几乎所有电子系统所需的核心组件——模拟芯片和嵌入式处理芯片。随着智能手机、汽车电子和物联网的快速发展，对这些芯片的需求不断增加，此次的扩建计划将有助于满足市场日益增长的需求。

SEMI 报告：2025 年第一季度全球半导体设备出货金额同比增长 21%

美国加州时间 2025 年 6 月 5 日，SEMI 在其发布的《全球半导体设备市场报告》Worldwide Semiconductor Equipment Market Statistics (WWSEMS) Report 中指出，2025 年第一季度全球半导体设备出货金额同比增长 21%，达到 320.5 亿美元。按照典型的季节性规律，2025 年第一季度的出货金额环比下降了 5%。

SEMI 总裁兼首席执行官 Ajit Manocha 表示：“全球半

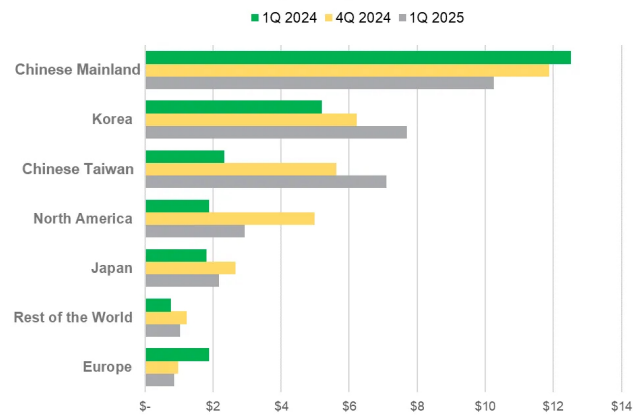
导体设备市场在 2025 年第一季度取得了稳健的开局，这反映了各地区对未来芯片制造产能的前瞻性投资。随着人工智能热潮持续推动晶圆厂扩张和设备销售，尽管面临地缘政治、关税波动和出口管制的不确定性，行业仍展现出韧性。”

Semiconductor Equipment Market Revenue by Region
(U.S. Dollars in Billions)

Region	1Q 2025	4Q 2024	1Q 2024	1Q (QoQ)	1Q (YoY)
Chinese Mainland	\$10.26	\$11.88	\$12.52	-14%	-18%
Korea	\$7.69	\$6.22	\$5.20	24%	48%
Chinese Taiwan	\$7.09	\$5.63	\$2.34	26%	203%
North America	\$2.93	\$4.98	\$1.89	-41%	55%
Japan	\$2.18	\$2.66	\$1.82	-18%	20%
Rest of the World	\$1.03	\$1.22	\$0.76	-15%	36%
Europe	\$0.87	\$0.97	\$1.89	-11%	-54%
Total	\$32.05	\$33.56	\$26.42	-5%	21%

Sources: SEMI (www.semi.org) and SEAJ (www.seaj.or.jp), June 2025
Note: Summed subtotals may not equal the total due to rounding.

Semiconductor Equipment Billings By Region (US\$B)



Source: SEMI (www.semi.org) and SEAJ (www.seaj.or.jp), June 2025



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



创新与突破： 九峰山实验室构建“材料-工艺-设备” 三位一体关键技术体系

当下，国内半导体在部分领域（如存储、第三代半导体等领域）已实现“点”突破，但整体产业链在EDA工具、先进制程工艺等方面仍有提升空间，有待突破。

4月23日，2025九峰山论坛暨化合物半导体产业博览会在中国·武汉光谷科技会展中心举行。论坛汇聚了全球相关领域的科研机构、领军企业及行业专家，集思广益，博采众长，共同探讨推动武汉及全国化合物半导体产业发展的路径。

会上，北京北方华创微电子装备有限公司化合物行业营销总裁李仕群表示，“从中长期看，我

是持乐观态度。”他认为，借鉴中国光伏行业的经验，半导体产业上下游通过诚信合作，充分利用国内庞大的应用市场，未来发展前景广阔。

九峰山实验室（JFS Laboratory）作为国内半导体研究的重要基地，汇聚了众多顶尖专家人才，致力于推动基础科学突破和关键核心技术攻关，打造“产学研用”一体化的高端创新平台。在此次论坛上，九峰山实验室多位专家人才报告了多项关键技术，展示了其在外延、EDA工具、功率电子、无线通信、异质集成及检测技术等领域的研究进展。





一、大尺寸硅基氮化物外延

半导体器件的性能高度依赖于材料与制造工艺。大尺寸硅基氮化物（如 GaN-on-Si）外延技术是当前半导体领域的研究热点之一，在功率电子、射频器件和光电子应用中具有重要价值。

氮化镓（GaN）等 III 族氮化物半导体材料凭借其优异的物理特性，成为制备可见光至紫外波段发光二极管（LED）和激光二极管（LD）的理想选择，同时在功率电子和射频器件领域也展现出卓越的性能表现。然而，受限于 GaN 单晶衬底的高成本和尺寸制约，业界将研究重点转向了硅（Si）、蓝宝石和碳化硅（SiC）等衬底上的异质外延技术开发。

九峰山实验室工艺工程师卢双赞在九峰山论坛上介绍，九峰山实验室布局了目前工业化应用的金属有机物化学气相沉积（MOCVD）和分子束外延（MBE）等设备，重点开发 GaN、SiC、InP & GaAs 等化合物外延关键工艺，覆盖主流化合物半导体工艺需求，形成 GaN/SiC/InP/GaAs 多材料平台协同研发能力。此外，其团队成功开发 8 英寸硅基 GaN HEMT 外延片，实现业界领先的垂直耐击穿特性（关键功率器件指标），并且创新性结合 MOCVD（量产优势）与 MBE（精密控制）技术优势，针对射频器件需求定制开发超薄势垒结构。该实验室在大尺寸外延均匀性控制、异质界面精准调控、多工艺协同创新等领域的核心竞争力方面已初见成效，



图1：九峰山实验室8英寸硅基氮化镓衬底

为 5G 射频和高压功率器件提供了特色化技术解决方案，为低成本、高性能射频（RF）和功率器件奠定了基础。

目前，大尺寸硅基氮化物外延技术已从实验室走向产业化，尤其在 8 英寸平台上趋于成熟。未来随着 5G、电动汽车等需求增长，该技术有望在成本和性能上进一步突破，成为氮化物器件的主流制备方案。

二、核心器件开发：氮化镓（GaN）与碳化硅（SiC）

碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）等宽禁带半导体材料目前正处于产业热点研究阶段，高品质、大尺寸衬底材料的制备是近期技术突破的重点。作为最具有发展潜力和应用前景的新型半导体材料，宽禁带半导体的发展面临着重大的挑战与机遇。

1) 射频 GaN 器件建模与 PDK 开发

氮化镓生态链中，器件模型是关键技术环节，模型作为工艺 / 器件行为表征的桥梁，其仿真功能完整性和精度，很大程度上决定设计成败。随着氮化镓器件应用场景的不断拓展，对器件建模的精度和速度提出了更高的要求。PDK 的可扩展性和兼容性也将成为重要的发展方向，以支持不同类型芯片设计和制造的需求。

在近期举行的九峰山论坛上，九峰山实验室研究员郭涛表示，九峰山实验室具备完善的器件模型 DOE、TEG 及去嵌结构设计能力，可完成无源及有源器件商业化精准建模，还构建了覆盖 100 nm 硅基 GaN 和 250 nm 碳化硅基 GaN 的完整 PDK 平台，解决了高频大功率下的自热、陷阱效应等建模难点。

九峰山实验室开发的 6 寸硅基集成无源器件 PDK，相较于传统的 GaAs 衬底，性能更优，成本更具优势。实验室还全部开发了 100 nm 射频硅基氮化镓器件工艺设计套件，该套件面向高频低压应用，可覆盖 DC-Ka 波段应用。其开发的 250 nm 射频碳化硅基射频器件工艺设计套件，可实现高功率、高效率。此外，IPD_PDK & 100 nm GaN on Si 和 250 nm GaN on SiC PDK 还提供完整的 MPW 以及 Full Wafer 流片。

九峰山实验室的 GaN PDK 技术填补了国内高端射频器件设计工具的空缺，降低了对国外 EDA 工具的依赖，为 5G 通信等关键领域提供了自主可控的解决方案。未来，随着 GaN-on-Si 技术的成熟，该平台有望进一步推动国产射频芯片的产业化进程。

2) SiC 超结器件技术探索

SiC 超结技术可降低导通损耗，适用于新能源车、光伏逆变器等高频场景，正处于从实验室向产业化过渡的关键阶段。虽在高压性能上展现优势，但工艺复杂性和成本仍是需要克服的难点。面对竞争压力，国内需聚焦高精度掺杂控制、8 英寸工艺整合及专利突围。

九峰山实验室研究员王宽在九峰山论坛所作报告《SiC 超结器件技术探索》表示，九峰山实验室致力于探索一种有可靠性、有可制造性、有规模量产价值的 SiC 超结器件。他在会议上提出了一种多级沟槽半超结结构。据报告，其团队在过去的一年中进行了一些工艺探索，多级沟槽自对准刻蚀降低了对于光刻精度的要求，可以自由控制每一级台阶的宽度，有利于更好的实现电荷平衡。

此外，其实验室开发的国内首个 6 寸碳化硅沟槽 MOSFET 中试及研发平台，完成了两种结构的 SiC 沟槽 MOSFET 结构 DEMO 及优化迭代。开发出国内第一颗碳化硅沟槽 MOSFET 的器件原型，器件击穿电压 $\geq 1500\text{V}$ ，比导通电阻 $\leq 2.5\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ，拥有 70+ 项专利，旨在抢占下一代沟槽 MOSFET 技术高地。

三、GaN-on-Si 产业化路径与市场应用

据 Yole 预计，在电信等应用的推动下，到 2028 年 RF GaN 器件市场将达到 27 亿美元。2032 年后，GaN-on-Si 在电信基础设施、通信等领域将进一步扩大份额，尤其手机终端应用可能实现全面突破。为了满足更高性能芯片设计的需求，PDK 技术将不断向更小的工艺节点发展，提高器件的集成度和性能。PDK 将更加注重与新型半导体工艺和材料的结合，如三维集成工艺、碳化硅氮化镓等，以充分发挥这些新技术和材料的优势。当前，GaN-on-Si 射频技术逐渐成为市场主流，尺寸可扩展到 8-12 英寸晶圆。在过去几年的硅基氮化镓生态系统中，意法半导体、MACOM、英飞凌科技等公司以及格芯、联华电子等代工厂一直积极参与射频硅基氮化镓技术的开发和引进。

在 2025 九峰山论坛上，九峰山实验室无线领域首席专家吴畅指出，GaN-on-Si 凭借成本低、CMOS 兼容等优势，可实现先进集成应用，覆盖未来小型化，低功耗，高频场景，在 5G 基站、手机终端和通信中潜力巨大。

他表示，九峰山实验室于 2025 年 1 月正式对外发布的基于 6 英寸平台的 $0.1\mu\text{m}$ GaN-on-Si PDK，可实现国内 RF

GaN-on-Si 技术重要布局。

此外，面向 Ka 波段的射频前端应用，JFS 已发布 6-inch 100nm GaN on Si PDK1.0，其功率密度可达 $2\text{W}/\text{mm}$ ，连续波测试、无谐波匹配情况下功率附加效率可超过 40%。 $0.1\mu\text{m}$ Si 基 GaN 器件方面，九峰山实验室实现 100nm T 型栅，同时源漏间距缩小至 $1\mu\text{m}$ ，可提升器件整体特性；在大尺寸 Si 基 GaN 上采用二次外延技术实现 $R_c < 0.1\Omega \cdot \text{mm}$ ，处于行业一流水平。其报告的未来规划显示，未来将推出超高频、高功率、高集成器件，进一步推动毫米波市场的发展。

如今 GaN-on-Si 产业化已进入加速期，在 5G 基站、快充等领域逐步落地。九峰山实验室在 GaN-on-Si 技术方面成果显著，技术亮点涵盖器件、模型构建、工艺开发及 PDK 平台等多个层面，为射频氮化镓技术的发展与应用提供了有力支撑。

四、硅基光电子异质集成：算力与通信的底层革新

目前，硅基光电子异质集成领域呈“中美欧三足鼎立，东亚生态链加速整合”格局趋势。Intel、Broadcom、Ayar Labs 等全球多家领先企业正通过硅光芯片与先进封装技术，为高速通信、传感和计算等领域带来新可能。

2025 九峰山论坛上，九峰山实验室工艺工程师权志恒提出，通过异质集成将新材料、薄膜 chiplet 融入硅基光电子平台，可充分发挥不同半导体及功能材料的特性，构建高性能光电子器件与新型集成芯片系统，满足高速光通信和 AI 计算等领域对大带宽、低功耗的功能需求。

他介绍，九峰山实验室在此领域取得了一些突破性成果。全球首片 8 英寸硅光薄膜钒酸锂异质集成晶圆成功在该实验室下线，单片集成光电收发功能。此外，“芯片出光”技术改善了 III-V 族材料生长与结构设计匹配，晶圆键合良率低以及异质集成晶圆片上图形化与刻蚀控制等难点，填补我国光电子领域在国际上仅剩不多的空白环节。

此外，九峰山实验室采用自研异质集成技术，经过复杂工艺过程，在 8 寸 SOI 晶圆内部完成了磷化铟激光器的工艺集成，是国内首次实现 8 寸晶圆芯片出光，对数据中心、算力中心、CPU/GPU 芯片、AI 芯片等领域将起到革新性推动作用。硅光微转印异质集成光电探测方面，在 8 英寸硅光晶圆上集成 III-V 族光电探测器，集成贴合良率 $\geq 96\%$ ，对准精度 $\leq \pm 1.5\mu\text{m}$ ，OE 带宽达 42 GHz，助力 CPO（共封装光学）和 OIO（光互连）技术发展。

硅基光电子异质集成正处于从实验室到大规模商用的拐点，技术突破与产业链协同是关键。九峰山实验室的晶圆级集成与微转印技术突破为下一代光电子集成芯片铺平道路，推动多个领域的创新，并巩固其作为未来关键使能技术的地位。



图2：氮化镓器件（九峰山实验室微波无线传能系统，在20米范围内实现对无人机的动态无线供能示范验证）

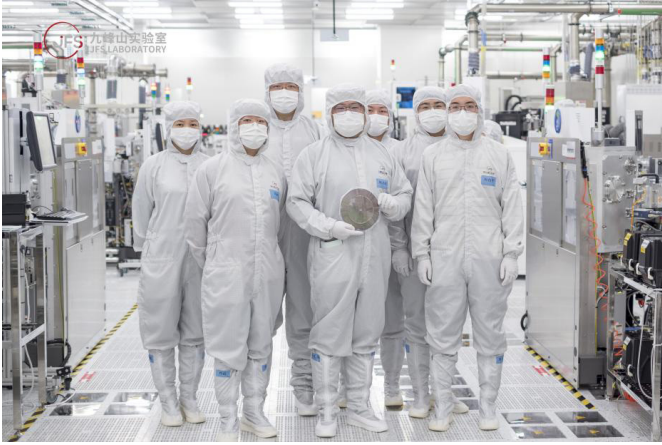


图3: 8寸硅光薄膜钽酸锂光电集成晶圆



图4: 九峰山实验室8寸硅基片上光源芯片晶圆

五、高端装备自主化：高功率测试分析系统

高端装备自主化是国家战略的重要组成部分，而高功率测试分析系统作为支撑电力、新能源等领域的关键技术装备，其自主化进程直接影响相关行业的竞争力。如今，功率半导体测试设备（如碳化硅晶圆静态测试）国产化率不足，亟需突破高功率晶圆测试技术。

九峰山实验室检测技术专家韦德远指出，“国外公司仍占据功率测试设备的主要市场份额，核心技术突破与国产自主装备研制重要而紧迫。国外测试系统分工协作合作密切，功能覆盖范围广，但售价高，并且配件昂贵，维护难”。由此，九峰山实验室联合六家单位共同开发宽温区千伏千安功率半导体晶圆综合测试系统。通过低噪声电源、真空环境温控和抗高压击穿等核心技术突破，项目成功研制出具备国际竞争力的高功率半导体晶圆测试系统，部分性能指标超越国外同类产品，解决维护成本高等问题，可适配国产功率半导体产业链需求。

九峰山实验室在高功率宽禁带半导体晶圆测试系统上的突破，是国家高端装备自主化战略在关键领域取得的重要进

展。另外在开幕式上九峰山实验室也发布了一批合作的优秀国产装备项目名单，包括诚芯智联全自动标定研发生产基地、埃芯半导体量检测设备研发生产基地、腾景科技高速 COB 光引擎研发生产基地、引光联创中心项目等化合物半导体领域重点高端自主化装备项目。这一系列合作成果通过“联合攻关”模式（产学研用结合）有效整合了资源，为国内解决高端测试装备难题提供了成功经验，体现了从“可用”到“好用”甚至“领先”的潜力。

六、支撑体系：表征与可靠性

新能源汽车、5G 通信、轨道交通和特高压输电的需求增长，正推动各类半导体功率器件的发展。但其大规模应用面临挑战：高质量材料可控生长、高性能高可靠性器件制造、成本控制。特别是在晶圆质量上，缺陷控制、材料均匀性及重复性需要持续改进以满足量产要求。因此，大规模高质量的材料与器件的表征分析及可靠性测试技术亟需提升。

2025 九峰山论坛上，九峰山实验室检测技术专家杨安丽表示，九峰山实验室开发了体系化的半定量及定量表征方法，全面覆盖化合物半导体的组分、掺杂、痕量元素及缺陷表征需求，旨在助力新一代半导体器件的研发与产业化。九峰山实验室检测技术专家宋洁也介绍了其实验室检测中心的热管理优化服务，以及可靠性中心的一站式可靠性测试解决方案。这些能力有效满足了化合物半导体各环节的表征及可靠性测试需求。

总结

在当今科技领域，半导体技术无疑是推动各行业飞速发展的核心动力之一。九峰山实验室依托其独特的跨学科协同创新机制，在半导体行业多个关键环节成功实现了突破性进展。这些技术突破有效解决了半导体产业长期面临的一系列关键性技术挑战。

在全球半导体格局重塑之际，九峰山实验室的成果为我国行业赢得了竞争优势，构建了核心技术能力。这不仅加速了国内半导体产业升级，也带动了相关科技领域的协同发展。通过强化自主创新与开放合作，这些进展显著提升了我国在化合物半导体技术领域的国际影响力。

未来，九峰山实验室将继续基于跨学科协同创新的理念，专注于半导体产业链中的核心技术环节，持续投入研发资源，探索创新技术路径。该实验室还计划推进化合物半导体领域“材料-工艺-设备”的协同发展，整合相关材料研发、制造工艺优化与设备创新等资源，构建具有自主知识产权的完整产业链，促进基础研究成果向产业化应用转化。CS

BAW 技术—— 基于 AlScN 的射频滤波器

助力客户持续领跑 5G 及未来通信技术

Evatec 无线应用产品市场经理 *Oguz Yildirim* 博士展示了最新压电层与电极沉积薄膜工艺如何助力客户保持 BAW 滤波器技术的领先性能。

CLUSTERLINE® 200——BAW 技术领域的市场引领者

Evatec 已在为 BAW 技术提供薄膜生产解决方案方面确立了领先地位。《LAYERS》杂志前刊（《LAYERS》第 6 期第 60 页）曾报道过高 Sc 含量压电薄膜（Sc 含量最高达 30%）沉积工艺及生产工具的研发进展。目前全球有超过 150 台 Evatec 设备全天候运行，生产稼动率高达 95% 以上。CLUSTERLINE® 200 系统可配置多达 6 个独立工艺模块及前端晶圆盒或 SMIF 端口，采

用 304mm 直径靶材的 ARQ 151 阴极技术，是实现客户所需优异片间厚度与应力均匀性的主力设备。如今，新一代 ARQ320 阴极凭借更优异的均匀性和更长的使用寿命，进一步降低了总体拥有成本（CoO）。

射频前端模块中采用的体声波（BAW）滤波器，可实现手机高速大带宽数据传输速率，为下一代 6G 通信奠定基础（见图 1）。BAW 器件基于通过接触压电层的底部和顶部电极激发的压电薄膜。



图1：体声波（BAW）滤波器。

市面上 80% 搭载 BAW
射频滤波器的移动设备
均采用 Evatec 薄膜层



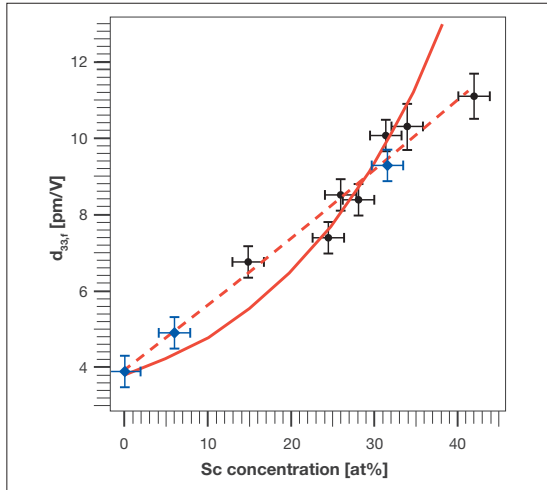


图2a: d_{33f} 随 Sc 含量的变化关系。红色实线代表通过从头计算获得的值

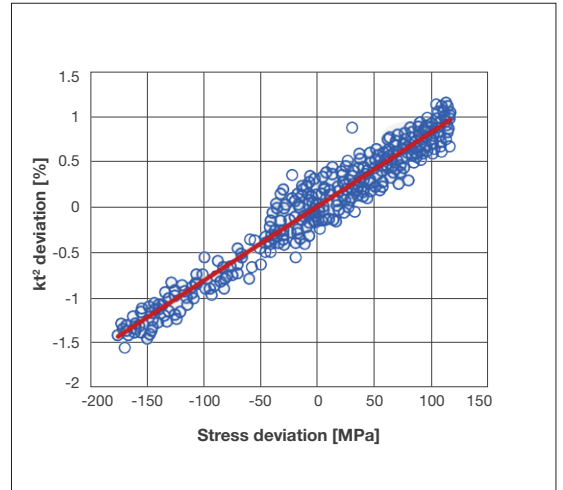


图2b: $Al_{0.7}Sc_{0.3}N$ 薄膜的耦合系数与应力关系

压电层

通过将 Sc 含量提升至 30% 以上，将 $AlScN$ 性能推向新高度

随着数据传输量不断增加且工作频率持续升高，对 Sc 含量更高、薄膜更薄的需求日益迫切，但这一目标必须在确保薄膜质量不受影响的前提下实现。晶圆上的平均应力及其变化必须得到控制，同时薄膜表面质量需避免出现通常在较高 Sc 含量下观察到的异常取向晶粒 (AOG)。这一切都无需在晶圆边缘极低排除区域做出妥协，从而

确保制造工艺良率。图 2a 展示了通过提高 Sc 含量可实现的压电系数增益，而图 2b 则呈现了文献报道中机电耦合系数随薄膜应力变化的规律。这使我们意识到，在生产中实现晶圆厚度优异均匀性和窄应力范围的重要性。

表 1 展示了 200mm 量产中的典型工艺性能，使客户能够实现最高晶圆利用率，边缘排除区域仅需 5mm。

高 Sc 含量薄膜的表面质量

图 3 展示了通过原子力显微镜 (AFM) 获得的 $Al_{1-x}Sc_xN$ 薄膜测试结果，其中靶材中 x 值从 20 at.% 变化至超过 36 at.%，最终制得的 $Al_{1-x}Sc_xN$ 薄膜平均 Sc 浓度最高达到 39.7 at.%。上述产品采用“量产级”单靶源在 CLUSTERLINE® 200 设备上生产。这些层已在晶圆和器件级别完成验证。

基于实验结果，我们展示了 Sc 掺杂在实验可行范围内的沉积路径。然而， $AlScN$ 中的 Sc 原子也可能引发缺陷，导致异常取向晶粒 (AOG) 的形成，或根据生长条件发生相分离现象。此类缺陷的形成是制备高度均匀、应力中性 $Al_{1-x}Sc_xN$ 薄膜面临的巨大挑战，而目前我们已能提供 Sc 含量高达约 40at.% 的成熟量产解决方案。

200 毫米晶圆上的 $Al_{1-x}Sc_xN$ 薄膜性能

基板	薄膜参数
晶圆直径	200 mm
薄膜中 Sc 浓度	高达 39 at.%
薄膜厚度	500nm
厚度均匀性 (片内) 1σ	<0.5%
厚度均匀性 (片间) 1σ	<0.3%
折射率 @633nm 波长	2.07
薄膜平均应力范围	-300至+500 MPa (可调)
膜应力范围 (片内)	± 75 MPA (@0.5% Uth)
± 50 MPa (@ 1.0%Uth)	
应力重复性 (片间)	± 30 MPa
$R_c <002>$	< 1.5°(FWHM)

表1: 典型工艺性能

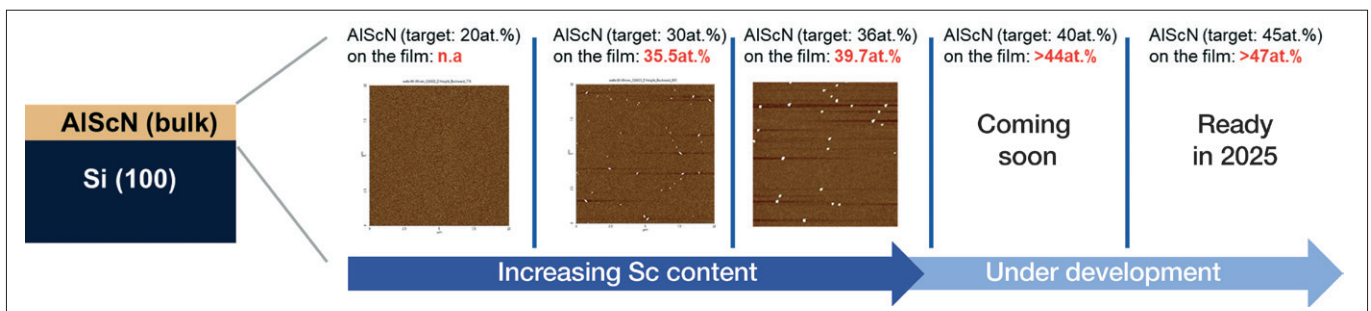


图3: 不同 Sc 掺杂浓度且厚度为 500nm 的 $Al_{1-x}Sc_xN$ 层的 AFM 图像。所有各层均在 8 英寸晶圆上进行生产模拟沉积时生长，厚度均匀性 <0.5% (1σ)，平均应力中性且应力范围 <150MPa。靶材的 Sc 浓度与薄膜中测得的平均 Sc 浓度始终存在差异。

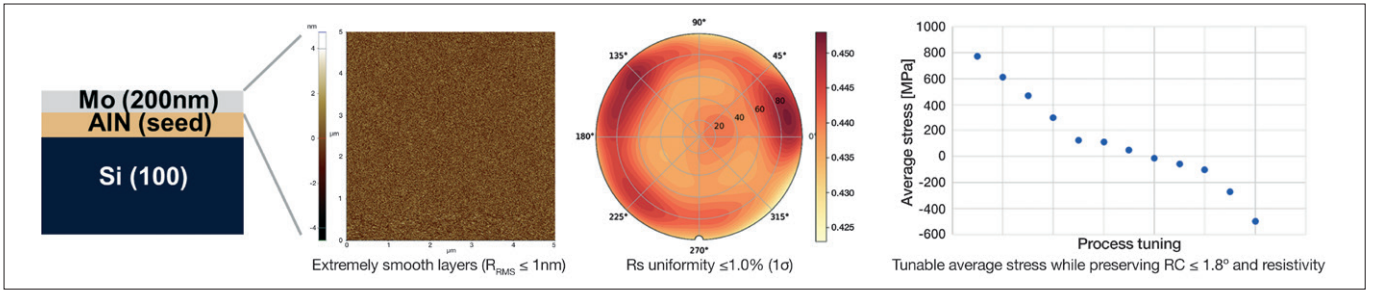


图4: Evatec标准生产解决方案在多晶种子层上生长钼层的性能表现。从左至右依次为: 层结构示意图、AFM图像、电阻分布图及平均应力数据。在保持其他层属性不变的情况下调节平均应力。

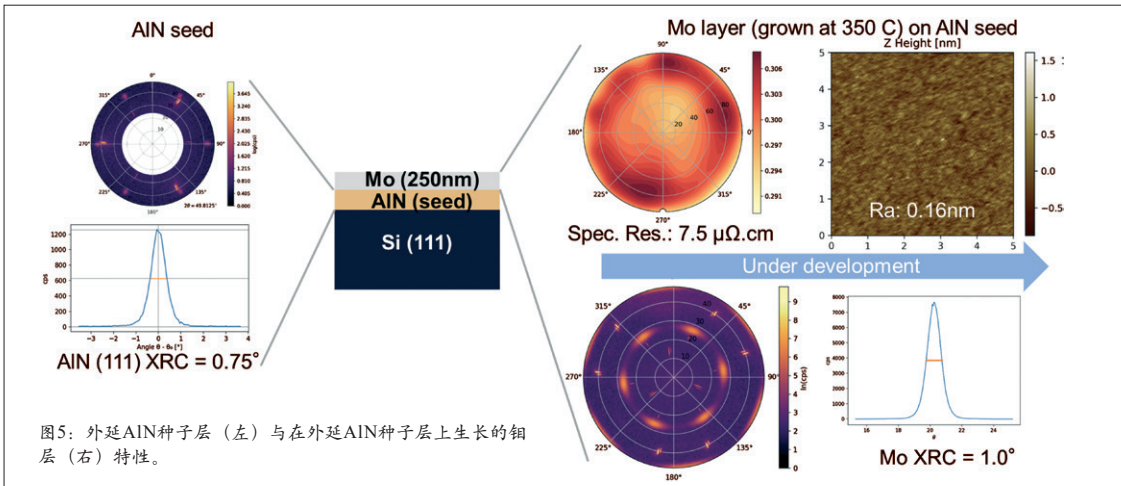


图5: 外延AlN种子层(左)与在外延AlN种子层上生长的钼层(右)特性。

电极

提供优质的压电层固然备受关注,但这并非全部——我们还能电极生产提供具备工艺灵活性的独特解决方案。

当前技术发展水平

Evatec 现有的热静电吸盘 (ESC) 技术已被公认为可调电极沉积工艺的标准生产解决方案,能提供光滑、高导电性层及可控应力。我们的标准生产解决方案可在保持晶体质量、电阻率和均匀性等基本薄膜性能的前提下,灵活调节电极层的平均应力。典型结果如图4所示。在电极沉积前,可采用我们独特的溅射外延种子层解决方案实现进一步优化。这能显著提升钼层的电阻率、表面粗糙度和晶体结构性能,且无需在生长过程中提高沉积温度。结果如图5所示。

电极工艺——未来已至!

BAW 器件通常选用钨、钼等高熔点材料作为电极材料。要进一步提升基于这些材料的薄膜性能,需采用高温工艺解决方案。Evatec 的最新研发成果聚焦于为客户提供超热吸盘 (VHC) 功能,该技术可在高达 750°C 的温度下运行。如图6所示,该技术能显著降低电阻率并大幅提升薄膜结晶度,从而显著增强器件性能。

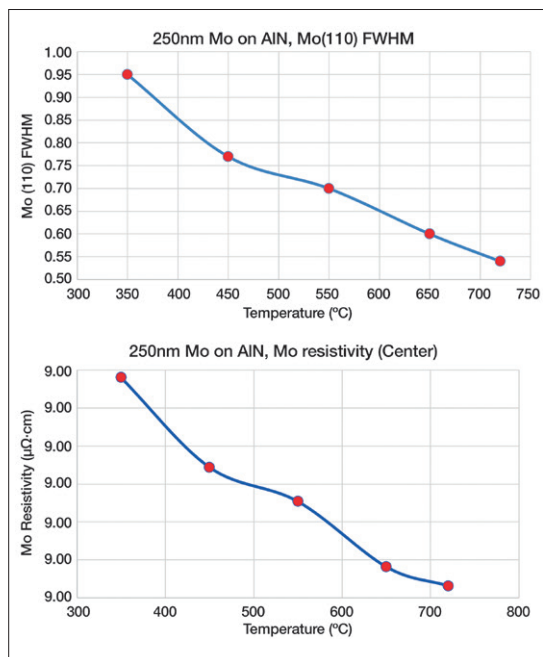


图6: 在外延AlN种子层上生长的新一代超高温钼层的特性钼(110) XRD摇摆曲线的半高宽(上图)与电阻率(下图)。

BAW技术——前景广阔

从SMR到FBAR、XBAR和XBAW,无论客户选择何种滤波器架构,我们都能在CLUSTERLINE® 200平台上为其提供功能层与电极层的先进沉积工艺。如需了解更多信息,请联系您当地的Evatec销售与服务中心:

<https://evatecnet.com/about-us/contact-us/>



无卤素气相外延的前景

基于金属源的简单反应可改善衬底生产以及用于垂直功率器件的厚漂移层的生长

作者：TAISHI KIMURA 和 DAI SUKE NAKAMURA，丰田中央研发实验室

当今最重要的技术有哪些？虽然很难给出一个明确的答案，但可以非常有说服力地提出人工智能和电池驱动的汽车这两种技术。

这两种技术的崛起产生了广泛的影响，包括消耗了大量的电力。消耗量如此之大，以至于像谷歌、亚马逊、微软和元宇宙这样的 AI 技术公司都对核电站产生了兴趣；而生产电动汽车的企业已经在推动全球交通能源消耗比例上升至 30%，预计这一数字还会增加。

为了控制电力分配，AI 基础设施、电动汽车以及类似充电器和电源的设计师们，往往依赖于成熟的硅技术，包括硅 IGBT 和 MOSFET。然而，由于硅的带隙较小，这些现有技术的性能受到了限制。由于这一限制，现在宽禁带功率器件的销量正在增长，其中包括由碳化硅和氮化镓制成的器件。

氮化镓的优势不仅仅在于其因宽禁带而产生的高击穿电压。此外，氮化镓器件还具有高迁移率的优势。由于这些特性，氮化镓的优值大约是硅的 1000 倍，是碳化硅的 2 到 4 倍。

用于制造氮化镓器件的架构有多种。横向架构迄今已取得了最大的商业成功，但垂直功率器件展现出巨大潜力——它们是服务于电动汽车 / 混合动力汽车 / 氢燃料电池汽车的有力候选者，在这些应用中，它们结合了 1200 伏的击穿电压和每平方米数百安培的电流密度。如果在电动汽车的功率控制单元中部署垂直氮化镓功率器件，这将由于电感部件更小而大幅减小其尺寸；并借助氮化镓出色的材料特性提高效率——进而延长续航里程。

氮化镓功率器件的障碍

在材料制备（即生长）方面，必须克服两个主要问题，才能实现可行的低成本氮化镓功率器件。其一是开发一种具有成本效益的氮化镓体材料生长方法。为了确保制造高性能、高可靠的氮化镓基功率器件，需要以低成本生产大尺寸、高质量的本征氮化镓单晶晶圆；因此，开发获得氮化镓体材料晶体的晶体生长技术至关重要。

另一个与材料制备相关的主要问题是，必须找到一种方法来确保厚漂移层中的高纯度和精确的掺杂浓度控制。在垂直功率器件中，与射频器件不同，能量损耗由用于确保高阻断电压的 n 型漂移层的电阻部分决定。由于这一原因，需要探

索一种具有成本效益且高度精确的氮化镓外延生长方法，用于漂移层的生长。

氮化镓的一个难点是，无法使用已建立的提拉法来生产晶体。这种方法用于从熔融硅中拉出硅晶体，但由于氮化镓的平衡氮气压力预计会超过 6 GPa，因此不可用。

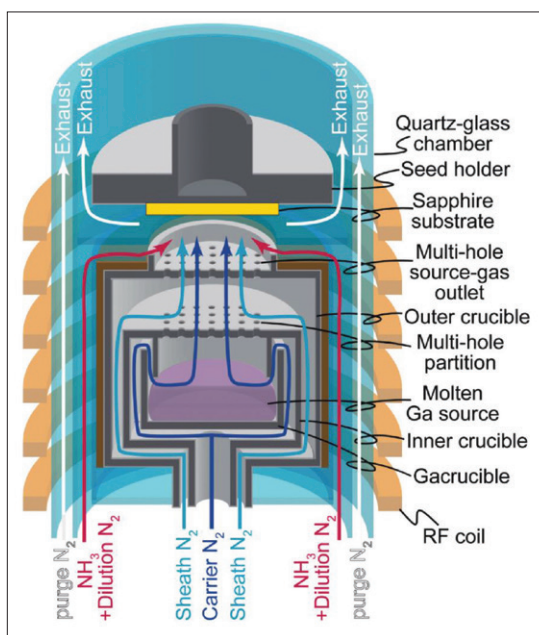


图1: HF-VPE的生长装置和气流通道示意图。更多详细信息请参阅 D.Nakamura et al. "Halogenfree vapor phase epitaxy for high-rate growth of GaN bulk crystals" Appl. Phys. Express. 10 045504 (2017).

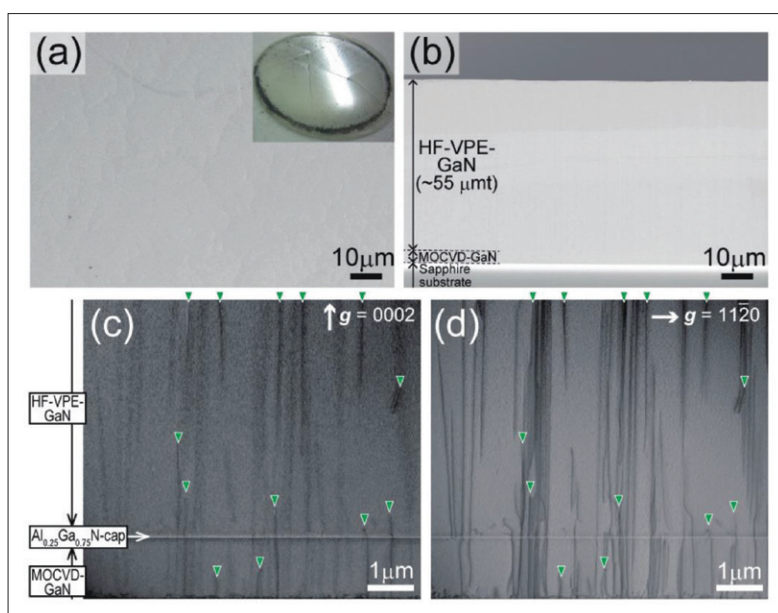


图2: (a) 平面视图和 (b) 横截面扫描电子显微镜图像显示厚 HF-VPE-GaN 层（约 55 微米）。插图显示了生长的无卤素 (HF) -VPE-GaN 生长面的外观（生长后冷却过程中由于氮化镓和底层蓝宝石层之间的热膨胀差异导致的热应力引起的裂缝）。来自约 5 微米厚的薄 HF-VPE-GaN 层的明场横截面扫描隧道电子显微镜图像，包括 MOCVD-GaN 和 HF-VPE-GaN 层之间的界面，在 g 矢量 (a) 0002 和 (b) 11-20 处，用/未用绿色三角形标记混合/刃错位。更多详细信息请参阅 D. Nakamura et al. "Halogen-free vapor phase epitaxy for high-rate growth of GaN bulk crystals" Appl. Phys. Express. 10 045504 (2017).

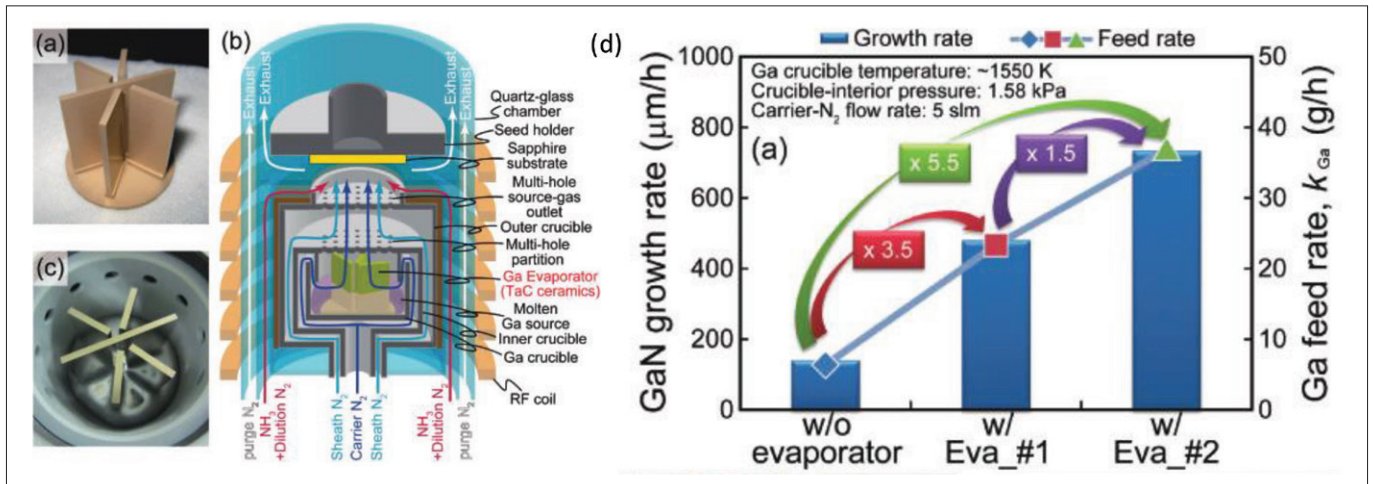


图3: (a) 制造的蒸发器 (Eva #2) 的照片, 由 TaC 陶瓷制成。(b) 带有蒸发器的 HF-VPE 装置示意图。(c) 生长后完全被熔融金属镓润湿的蒸发器的照片。(d) 有无金属镓蒸发器的情况下氮化镓生长速率和金属镓供应速率的比较。更多详细信息请参阅 D. Nakamura et al. "Significant increase in GaN growth rate by halogen-free vapor phase epitaxy with porosity-controlled evaporator" Appl. Phys. Express. 10 095503 (2017).

由于这一限制, 人们致力于开发生产氮化镓晶体的替代方法, 如高压氮源生长、氨热生长、酸氨热生长、钠 flux 生长和卤化物气相外延 (HVPE)。在这五种方法中, 前三种仅适用于制备氮化镓籽晶。它们的生长速率——每小时不到 10 微米——不足以生产晶圆。对于生产商用的自支撑的氮化镓衬底, 是通过 HVPE 生长的, 其生长速率可超过每小时 100 微米, 并且能够在籽晶氮化镓衬底上沉积厚度达 1 毫米的氮化镓层。多亏了这些优势, 自支撑的晶圆是通过生长厚层, 然后去除衬底来生产的。然而, 在通过 HVPE 生长氮化镓的过程中, 气态三氯化镓与氨气的反应会产生不需要的副产品氯化铵。这种副产品以灰烬形式存在, 增加了维护成本, 并阻碍了生长周期的长度。

消除卤素

为了避免这种不需要的灰烬, 我们丰田中央研发实验室的团队正在开创无卤素 (HF) VPE 的开发。这涉及到将源材料从氨气和气态三氯化镓切换到金属镓和氨气。多亏了这种向无卤素源的转变, 我们的反应产生了氮化镓和氢气 (见图 1)。我们的新工艺使用金属镓蒸气作为镓源, 大约 2 千帕的低压力增强了金属镓蒸气的供应。

通过这种新方法, 我们展示了氮化镓的高质量生长 (见图 2)。此外, 我们发现, 通过使用孔隙率可控的蒸发器可以增加熔融金属镓的表面积, 从而显著增加金属镓蒸气的供应和生长速率, 生长速率可高达每小时 700 微米 (见图 3)。

HF-VPE 的另一个好处是它带来了更高的产

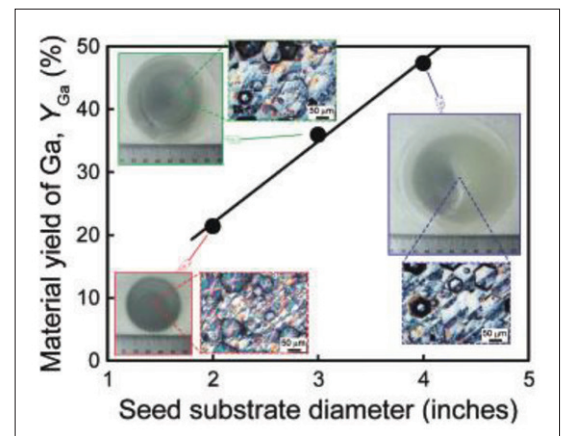


图4: 在 HF-VPE 氮化镓生长过程中, 镓的材料利用率与籽晶基板直径的依赖关系。插图显示了各自生长样品及其表面形貌的图像。表面上的六边形小丘结构是由于在蓝宝石上直接生长而没有缓冲层, 生长层的黑色外观是由于六边形小丘结构引起的光学限制效应。更多详细信息请参阅 D. Nakamura et al. "Ultra-high-yield growth of GaN via halogen-free vapor-phase epitaxy" Appl. Phys. Express. 11 065502 (2018).

量。与传统的 HVPE 相比, 金属镓的材料利用率约为 10%。相比之下, 借助我们的生长技术, 利用率接近 50%, 这要归功于没有逆反应的简单反应。这种利用率的提高, 加上快速的生长速率和没有不需要的副产品, 凸显了 HF-VPE 在实现氮化镓体材料晶圆的成本效益能力。我们在 HF-VPE 开发中的关键下一步是展示厚氮化镓层的生长——即厚度超过 5 毫米的层。要取得成功, 我们需要解决籽晶周围多晶氮化镓的寄生生长问题。这个问题阻碍了长时间的生长, 而长时间生长是生产高质量体材料 HF-VPE 氮化镓的先决条件。

我们正在研究这个问题的潜在解决方案。其中一种是为我们的反应器部件引入由碳化钨制成的抗寄生反应涂层。初步结果很有希望, 经过修改的支撑体和坩埚确保了坩埚周围多晶氮化镓形

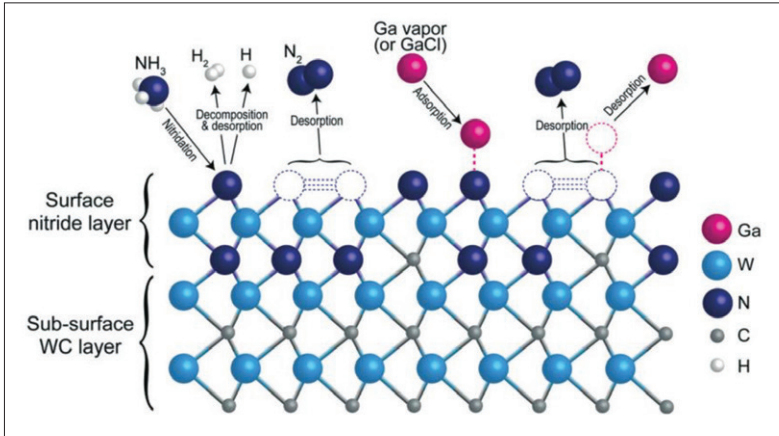


图5: 基于表面氮化物形成(伴随 H_2 、原子H脱附或两者兼有)的WC催化层的可能抗寄生反应效应机制, 导致缺乏用于氮化镓形成的活性氮吸附物(如 $-NH$ 、 $-NH_2$ 和 $-NH_3$)。表面氮原子通过 N_2 形成脱附, 这可能导致金属镓吸附物的脱附。更多详细信息请参阅 D. Nakamura et al. "Tungsten carbide layers deposited on graphite substrates via a wet powder process as antiparasitic-reaction coatings for reactor components in GaN growth" Cryst. Eng. Comm. 22 2632 (2020)。

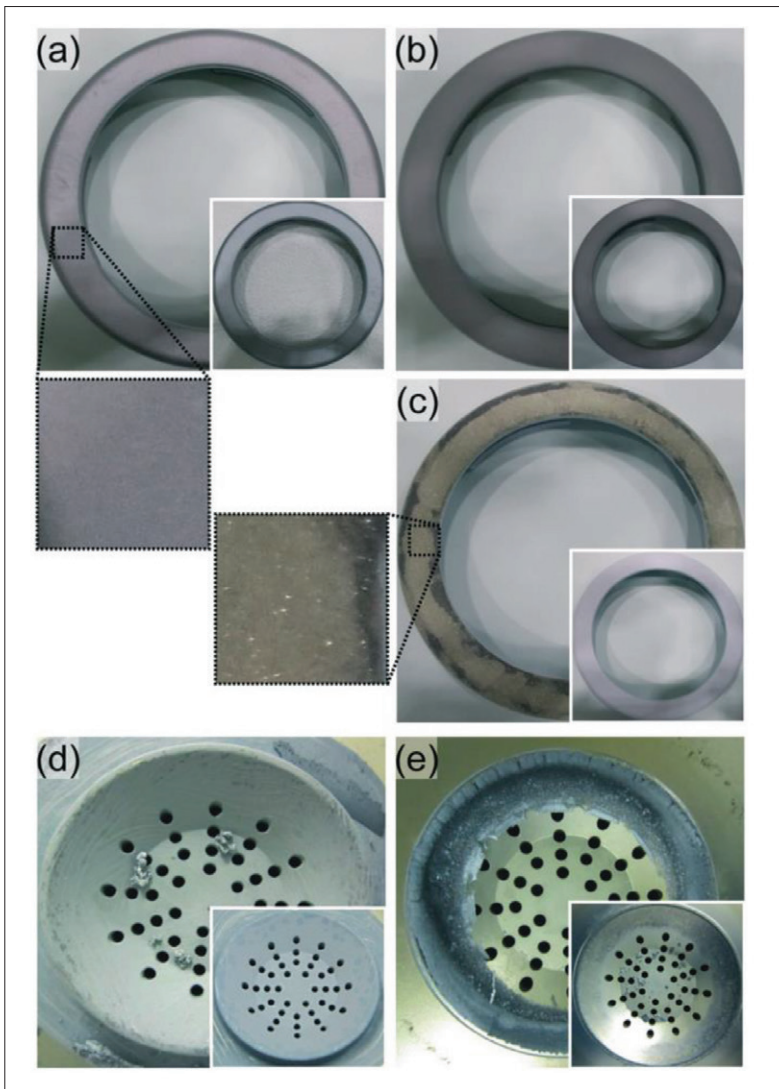


图6: 在相同生长条件下(籽晶温度约 $1080^{\circ}C$; V/III 比约 20), 经过 HVPE 氮化镓生长后, (a) 单层抗寄生反应涂层、(b) 双层抗寄生反应涂层和 (c) 传统 pBN 涂层(参考)的 4 英寸籽晶基座的照片。(d) 双层抗寄生反应涂层和 (e) TaC 涂层(参考)的石墨坩埚出口在相同生长条件下(籽晶温度约 $1250^{\circ}C$; 部分 NH_3 压力 0.53 kPa; 生长时间约 0.5 小时)经过 HF-VPE 氮化镓生长后的照片。插图照片是在生长实验之前拍摄的。更多详细信息请参阅 D. Nakamura et al. "Tungsten carbide layers deposited on graphite substrates via a wet powder process as antiparasitic-reaction coatings for reactor components in GaN growth" Cryst. Eng. Comm. 22 2632 (2020)。

成的减少(见图 5 和图 6)。另一个我们正在追求的想法是使用晶体生长计算机模拟来设计更合适的氨气喷嘴, 以减少氮化镓生长区周围多晶氮化镓的形成。

改进漂移层

用于生长氮化镓外延晶圆的最常用方法是 MOCVD。这种外延技术在厚度和杂质掺杂浓度方面提供了出色的可控性, 用于商业生产氮化镓 HEMT 以及激光和发光二极管。

如前所述, 垂直氮化镓功率器件中 n 型漂移层的电阻部分对能量损耗有很大影响。这一关键层通常约为 10 微米厚, 并需要精确控制净载流子浓度, 范围在 $10^{15} - 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。

根据几位研究人员的工作, 作为深受主掺杂剂的碳杂质会对垂直氮化镓功率器件造成严重破坏。主要缺点是电子迁移率大幅下降, 导致迁移率崩溃, 进而导致导通电阻急剧增加。由于这个原因, 必须使用无杂质的生长方法来生长漂移层。尽管 MOCVD 可以用于此任务, 但它有几个弱点。

使用 MOCVD 生长功率器件的漂移层的最大缺点是生长速率慢——通常每小时只有几微米——以及碳杂质含量高。解决后者问题绝非易事, 因为镓的来源是金属有机物。由于这些问题, 使用 MOCVD 生长氮化镓垂直功率器件的漂移层是不切实际的。

一种用于生长厚氮化镓漂移层的替代方法是由住友化学集团提出的, 即使用高纯度 HVPE。这种方法也被称为无石英 HVPE 氮化镓, 涉及降

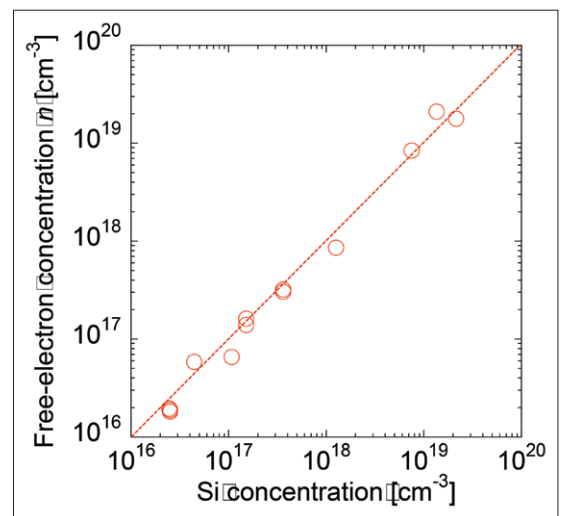


图7: 通过 HFVPE 生长的硅掺杂氮化镓的硅浓度与净施主(Nd-Na)浓度之间的关系。更多详细信息请参阅 T. Kimura et al. "Growth of high-quality GaN by halogen-free vapor phase epitaxy" Appl. Phys. Express. 13 085509 (2020)。

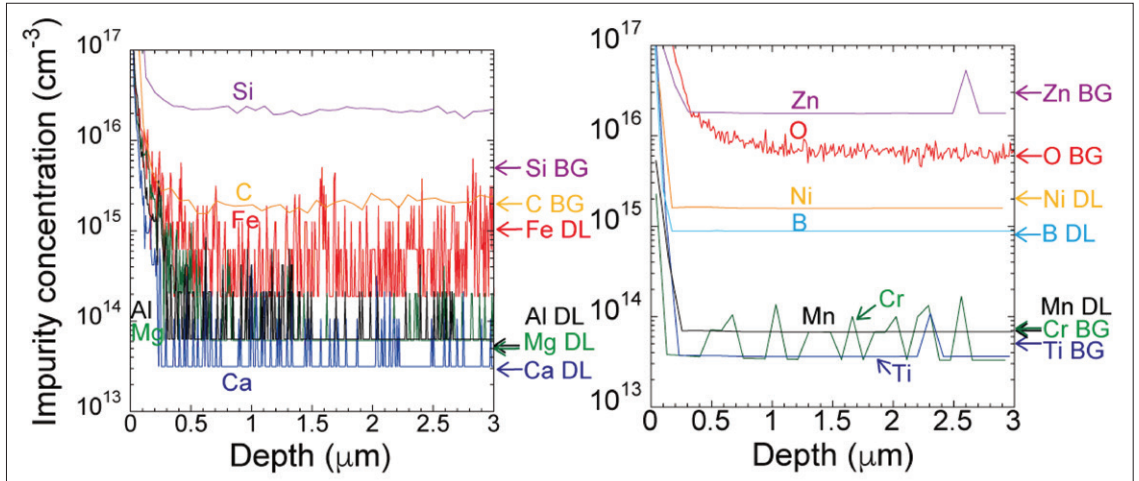


图8: 升级工艺后 HF-VPE 氮化镓层的杂质浓度深度分布。更多详细信息请参阅 T. Kimura et al. "Impurity reduction in lightly doped n-type gallium nitride layer grown via halogen-free vapor-phase epitaxy" Appl. Phys. Lett. 124052104 (2024).

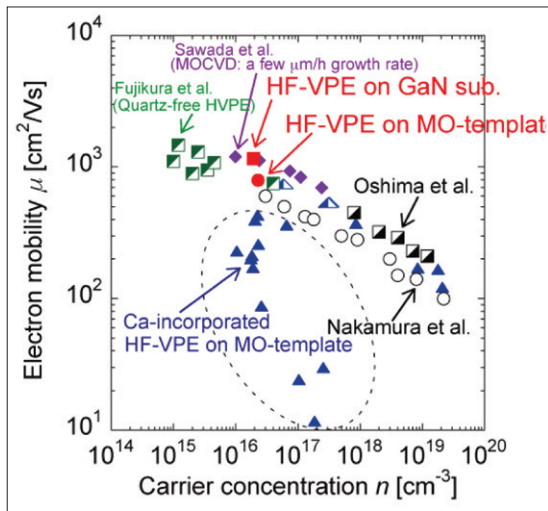


图9: 氮化镓层在 300 K 时的霍尔迁移率 (mH) 与载流子浓度的依赖关系。更多详细信息请参阅以下文献: [1] Fujikura et al. Appl. Phys. Lett. 117 012103 (2020). [2] S. Kaneki et al. Appl. Phys. Lett. 124 012105 (2024). [3] N. Sawada et al. Appl. Phys. Express. 11 041001 (2008). [4] Y. Ohshima et al. Jpn. J. Appl. Phys. 45 7685 (2006). [5] S. Nakamura et al. Jpn. J. Appl. Phys. 30 L1705 (1991). [6] S. Nakamura et al. Jpn. J. Appl. Phys. 31 2883 (1992).

低源区温度。为此, 在反应器中引入不透明石英。这种改进减少了辐射热传递, 防止了用于生长装置的不锈钢的加热。

住友的方法取得了一些成功, 该公司的研究人员展示了碳含量低于 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的高纯度氮化镓。然而, 用于 HVPE 的卤素气体会增加维护成本, 因为副产品。此外, 气体的腐蚀性可能会缩短生长装置的使用寿命。此外, 控制厚层中的掺杂水平也很具有挑战性。这个问题的出现是因为 HVPE 生长条件通常接近大气压, 使得在深度轮廓中很难形成硅掺杂剂的锐利开启/关闭, 因为掺杂气体的流速低。此外, 根据波兰科学院高压物理研究所的一个团队的说法, 由于在反应器

或 / 和用于硅掺杂的二氯硅烷线中无意中沉积了硅, 因此使用 HVPE 控制掺杂水平还有其他困难。

生长漂移层的更好选择是 HF-VPE。这种外延技术提供了高纯度, 因为不含碳, 且生长速率可高达每小时几十微米。HF-VPE 的另一个优势是, 可以轻松使用任何固态源材料作为掺杂源。

我们在这方面的努力包括使用固态硅源对氮化镓进行硅掺杂 (见图 7)。然而, 我们最初对通过 HF-VPE 生长的氮化镓的电子迁移率结果低于通过 HVPE 生长的样品, 这意味着可能存在大量其他杂质。这一发现质疑了使用 HF-VPE 生长垂直功率器件漂移层的前景。

我们并没有放弃, 进一步的努力确定了通过 HF-VPE 生长的氮化镓层中的污染源: 用于生长准备的丁腈手套。这些手套由含有硅酸盐 (例如 $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}$ 和方解石 (CaCO_3)) 的丁腈橡胶制成, 用作填料。在炉子维护期间, 从丁腈手套中洗脱的污染附着在生长炉部件上, 然后在生长过程中进入外延层。

在确定污染源并消除污染后, 我们证明了 HF-VPE 可以生产出与我们革命性的“无石英”HVPE 技术在生长质量和位错密度方面相当的氮化镓层。根据二次离子质谱分析, 我们的 HF-VPE 生长的氮化镓层的碳和氧浓度分别不超过 $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 和 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。这种形式的质谱分析无法在我们的氮化镓外延层中检测到硼、铁、镁、铝、钙、铬、锌、镍、锰或锰 (见图 8)。

我们还研究了载流子传输特性。在消除无意杂质后, 我们的 HF-VPE 生长的氮化镓显示出高电子迁移率 (见图 9)。

根据我们的材料特性分析，我们可以得出结论，我们的 HF-VPE 生长方法能够生长高纯度、低位错密度的氮化镓层。由于生长时间延长，这些层可以很厚，并且以高材料产量生产。此外，我们的研究首次提供了实验证据，证明除了碳和铁之外，钙杂质也作为深受主存在。我们验证了避免这些钙杂质至关重要，因为它们会导致轻掺杂 n 型层中的迁移率崩溃。

我们未来的计划包括调查通过供应金属镁蒸气的 HF-VPE 是否能够生产出具有增强控制和简单性的 p 型氮化镓层。在这方面取得成功将使这种方法优于现有的使用固态氧化镁源的 HVPE 方法。HF-VPE 的另一个前景是由于其非常低的生长环境压力（仅 1-10 千帕），对掺杂外延层的控制更好。

毫无疑问，HF-VPE 在为未来的氮化镓功率器件应用提供外延生长方面具有巨大潜力。朝着这一目标迈出的关键一步是我们展示了不含碳、铁和钙杂质的氮化镓层。因此，我们相信 HF-VPE 生长方法是一种有前途且具有成本效益的方法，适用于体材料氮化镓和外延氮化镓层。☞

扩展阅读

- D. Nakamura et al. "Halogen-free vapor phase epitaxy for high-rate growth of GaN bulk crystals" Appl. Phys. Express. 10 045504 (2017)
- D. Nakamura et al. "Significant increase in GaN growth rate by halogen-free vapor phase epitaxy with porosity controlled evaporator" Appl. Phys. Express. 10 095503 (2017)
- T. Kimura et al. "Growth of high-quality GaN by halogen-free vapor phase epitaxy" Appl. Phys. Express. 13 085509 (2020)
- D. Nakamura et al. "Ultrahigh-yield growth of GaN via halogen-free vapor-phase epitaxy" Appl. Phys. Express. 11 065502 (2018)
- T. Kimura et al. "Nanopipe formation as a result of boron impurity segregation in gallium nitride grown by halogen-free vapor phase epitaxy" J. Appl. Phys. 120 245703 (2016)
- D. Nakamura et al. "Tungsten carbide layers deposited on graphite substrates via a wet powder process as antiparasitic-reaction coatings for reactor components in GaN growth" Cryst. Eng. Comm. 22 2632 (2020)
- T. Kimura et al. "Impurity reduction in lightly doped n-type gallium nitride layer grown via halogen-free vapor-phase epitaxy" Appl. Phys. Lett. 124 052104 (2024)

与 Evatec 一起探索 薄膜技术



您是否正在寻找经济高效的抗反射和高反射率涂层生产，以支持先进光集成电路和光通信应用的EEL光源？或者，您是否正在寻找高激光诱导损伤阈值 (LIDT) 的激光光学元件？Evatec 的生产设备和磁控溅射工艺专业知识，包括“纳米叠层技术”的使用，将助您加速前进！



量子化纳米叠层
采用(QNL)
量子纳米线的
新型干涉涂层



了解
纳米叠层
技术



纳米叠层技术
支持
激光光学



半导体 & 先进封装 | 化合物 & 光学 | 半导体镀膜专家 | evatecnet.com/cn



迈向无缺陷的碳化硅外延片

通过在碳面生长近乎无缺陷的碳化硅 (SiC) 外延层，并在硅面生长无基平面位错的外延层，推动碳化硅功率器件性能的提升。

作者：新加坡 A-STAR 微电子研究院的
Nguyen Xuan Sang 和 Shiv Kumar；
法国 Soitec 公司的 Marcin Zielinski

通过超越硅器件的性能极限，碳化硅 (SiC) 器件在功率电子市场中占据的份额不断增加。然而，这种宽禁带半导体的高成本仍然是一个阻碍因素，而器件价格因可追溯至衬底和外延层缺陷导致的产量损失而进一步加剧。

由于碳化硅材料的固有物理特性，会产生各种类型的缺陷。这些缺陷包括微管、三角形缺陷、胡萝卜形缺陷、堆垛层错和位错。在位错这一类缺陷中，主要形式包括基平面位错、穿透螺位错和穿透刃位错。其中，基平面位错被认为是关键的“致命缺陷”，因为它们会导致碳化硅功率器件中的双极退化。

多年来，在碳化硅晶体生长和衬底生产方面，无论是在晶片尺寸还是缺陷减少方面，都取得了显著进展。在晶片尺寸方面，碳化硅晶片制造商正在迅速过渡到 200 毫米的生产。

碳化硅升华过程的关键里程碑发生在 2004 年，丰田中央研发实验室的 Daisuke Nakamura 及其同事在《自然》杂志上发表了一篇文章，报告了

一种无微管且位错极少的籽晶的创建。这一进步为在高质量籽晶层上进行稳定、优化的升华生长打开了大门。由于这一突破，如今市面上可买到的 150 毫米和 200 毫米碳化硅衬底已几乎无微管，且位错密度低：基平面位错密度低于 500 cm^{-2} ，穿透刃位错和螺位错均低于 $5,000\text{ cm}^{-2}$ 。

碳面与硅面的特性差异

由于碳化硅键的极化特性，碳化硅的表面可能表现为硅面或碳面极性。这两种极性导致了不同的表面特性。在氧化方面，碳面的氧化速率高于硅面。这种差异归因于碳面上悬挂键的浓度更高，使得氧化过程中的钝化变得复杂。另一个显著的差异是，碳面样品通常表现出贯穿整个晶片的 4H-SiC 多型体包含物，而硅面样品则通常没有此类包含物。表面粗糙度也有所不同，硅面倾向于具有更粗糙的表面，尤其是在边缘附近，裂纹密度更高。

碳面的优势

目前的碳化硅高功率器件技术主要利用硅面碳化硅衬底。这种面确保了与栅极氧化物的高质量界面和大的带隙偏移。然而，在碳化硅沟槽 MOSFET 中，无论对于硅面还是碳面衬底，栅极堆叠都在碳化硅 (113) 平面上形成 (见图 1)。

对于沟槽 MOSFET，碳面具有优势，因为其氧化速率更快。这一特性使得在沟槽底部形成的氧化层厚度可达侧壁的三倍，简化了制造过程并提高了栅极击穿电压。这些优势得以实现，尽管在碳面碳化硅与二氧化硅之间的带隙偏移较低。

通过 A-STAR、新加坡国立大学和 Soitec 之间的合作，我们展示了近乎无缺陷的碳面碳化硅外延生长工艺，其生长速率极高——在 150 毫米碳面碳化硅衬底上达到每小时约 50 微米。

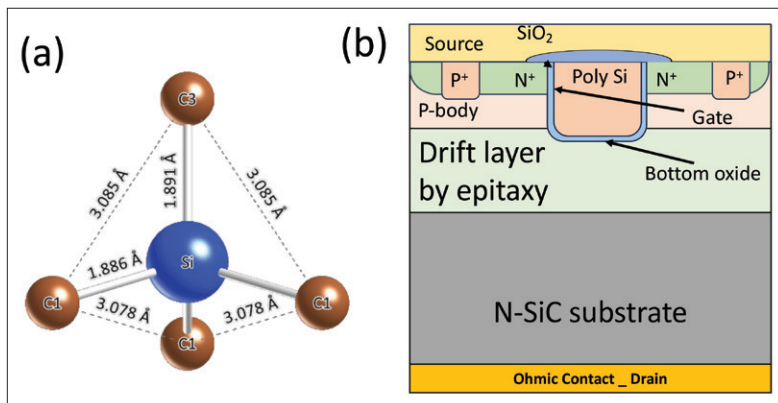


图1: (a) 碳化硅晶体的基本结构单元和 (b) 典型的碳化硅沟槽 MOSFET 设计。

在这项工作中，我们将一个已准备好外延生长的 150 毫米 n 型碳面碳化硅衬底 (向 (11-20) 偏移 4 度) 装入商业热壁化学气相沉积 (CVD) 系统中。在生长约 0.5 微米厚的缓冲层后，我们以每小时 50 微米的速率添加了 11 微米厚的碳化硅漂移层。

通过傅里叶变换红外光谱，我们确认了缓冲层和漂移层的厚度，并确定厚度均匀性小于 3% (见图 2 (a))。根据原子力显微镜的结果，我们的外延片表面光滑，均方根粗糙度略低于 0.3 纳米。

我们还研究了外延片的电学特性。这包括使用汞探针获得电容 - 电压曲线图，并从电容 - 电压数据计算掺杂曲线 (见图 2 (c))。结果显示，碳面碳化硅外延层中的非故意 (或背景) 掺杂约为 $1.5 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ ，这一值足够低，可以实现对 MOSFET 器件漂移层掺杂在 $1-2 \times 10^{16}\text{ cm}^{-3}$ 范围内的精确控制。

使用 KLA Candela 8520 系统，我们测量了碳面碳化硅外延片中的缺陷密度。该工具结合了表面和光致发光缺陷分析，确定我们的材料中存在非常少的缺陷——缺陷密度低于 0.1 cm^{-2} (见图 3 (a-d))。

为了评估我们的碳面碳化硅外延片，我们将其与硅面碳化硅外延层进行了比较 (见图 3 (e))。碳面碳化硅外延片中的缺陷密度几乎低一个数量

图2: (a) 在 150 毫米碳面碳化硅衬底上生长碳化硅外延的结构。 (b) 通过原子力显微镜进行的典型表面形貌扫描，确定均方根粗糙度 Rq 约为 0.28 纳米。 (c) 使用汞探针测量的碳化硅外延层的电容-电压特性和计算掺杂。

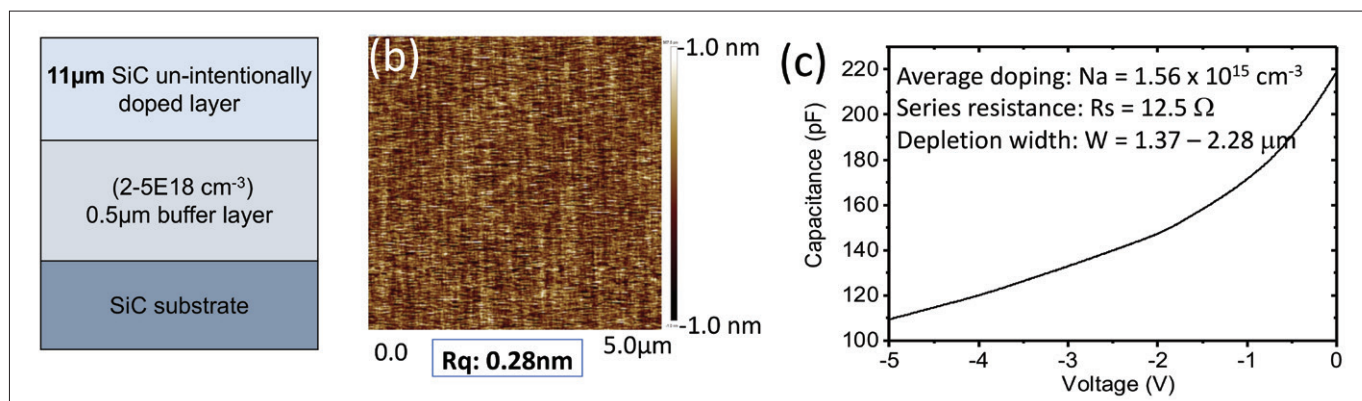
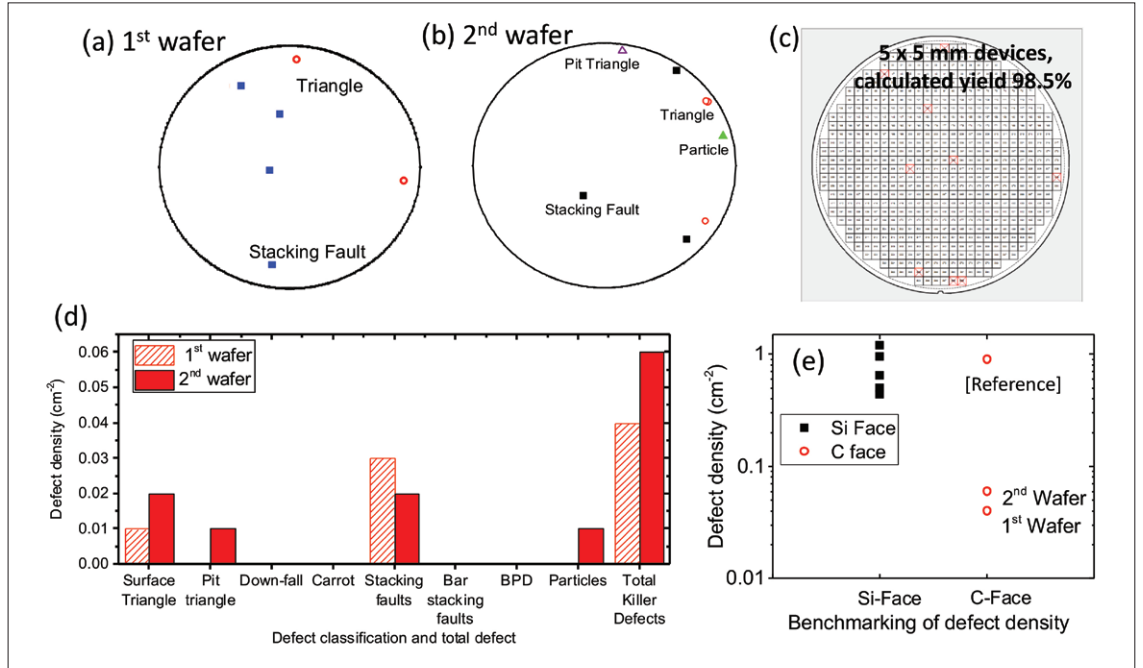


图3: (a-c) 通过 Candela 8520 扫描获得的两个碳面碳化硅晶片的缺陷分布和芯片良率图。(d) 晶片的总致命缺陷密度、碳面碳化硅外延几乎无缺陷。(e) 碳面外延与硅面外延的致命缺陷密度基准比较。



级，表明我们的生长工艺产生的材料近乎无缺陷。这种低缺陷密度为碳面碳化硅器件提供了显著优势，特别是在大面积器件架构中，如双极器件。

几乎无缺陷外延的关键因素

我们近乎无缺陷外延的关键因素是我们显著减少了碳化硅衬底中的预先存在的表面和亚表面晶体缺陷。我们通过优化化学机械抛光 (CMP) 工艺实现了这一点，该工艺涉及氧化和氧化物去除 (见图 4 (a) 和 (b) 对此工艺的说明)。我们的方法针对碳面碳化硅进行了定制加工，其氧化速率远高于硅面。通过定制的化学机械抛光工艺，我们生产出表面光滑且亚表面损伤很小的衬底。

硅面外延的增强

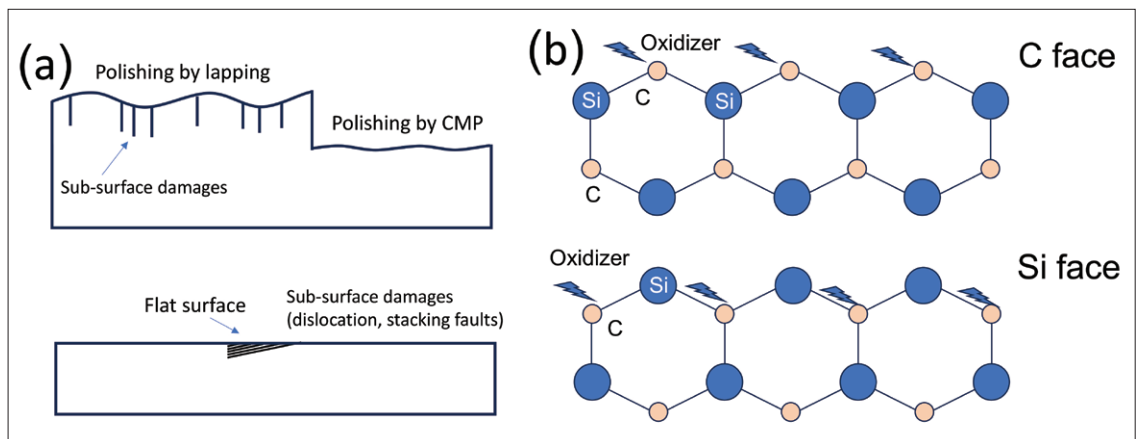
除了我们在碳面碳化硅衬底上的外延工艺开

发外，我们还对传统的硅面碳化硅衬底外延工艺进行了创新。我们在 200 毫米碳化硅衬底上开发了这些突破。我们成功的关键是将衬底中的基平面位错转换为缓冲层中的穿透刃位错，然后在器件漂移层生长之前进行转换。

我们的成功建立在南卡罗来纳大学 Tangali Sudarshan 团队的工作基础上。早在 2005 年，他们在《应用物理快报》(87 151913) 上报告称，通过在将衬底装入处理室之前用氢氧化钾蚀刻衬底表面，可以使外延生长无基平面位错。然而，该工艺的缺点是不适合大规模生产碳化硅外延片。但在围绕基平面位错区域进行蚀刻以促进其在外延生长过程中转换为穿透刃位错的表面准备原则上具有很大的价值。

借鉴这一方法，我们开发了一种适用于碳化硅衬底的原位蚀刻技术，该技术包括两个蚀刻步

图4: (a) 碳化硅晶片上的化学机械抛光 (CMP) 过程以及在晶片平坦表面上观察到的亚表面损伤。(b) 碳面和硅面碳化硅氧化过程的示意图，突出碳面碳化硅的更快氧化速率如何有助于在碳化硅晶片的 CMP 过程中提高材料去除速率。



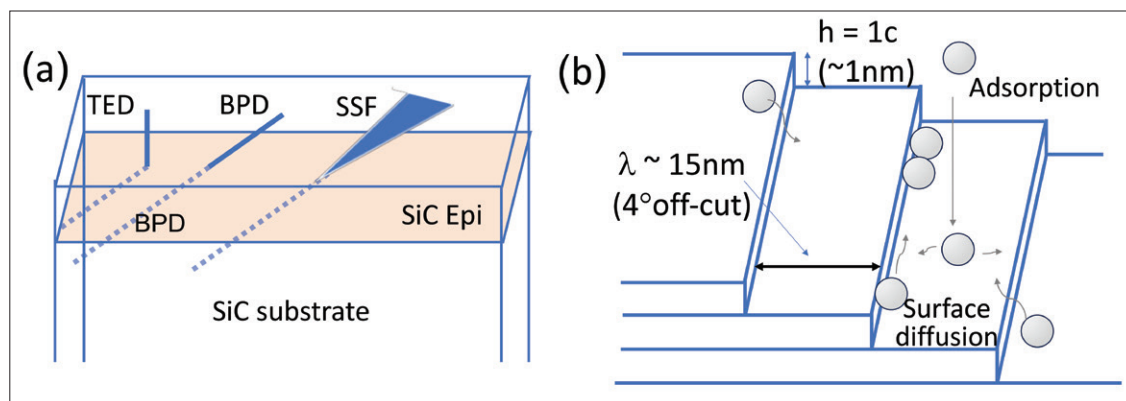


图5: (a) 碳化硅外延中基平面位错 (BPDs) 的转换和 (b) 台阶控制的外延过程。

骤：一个在烘烤过程中，另一个在缓冲层生长步骤之间。在处理温度下进行的原位氢蚀刻与通过蚀刻回退和低温烘烤恢复材料相结合，有效过滤掉漂移层中的基平面位错。通过这种工艺生产的材料具有实际性和可扩展性，适用于碳化硅外延

制造，几乎完全无基平面位错。

智能碳化硅衬底

另一种实现无基平面位错碳化硅外延片的方法是从没有这种缺陷的衬底开始。在这方面，

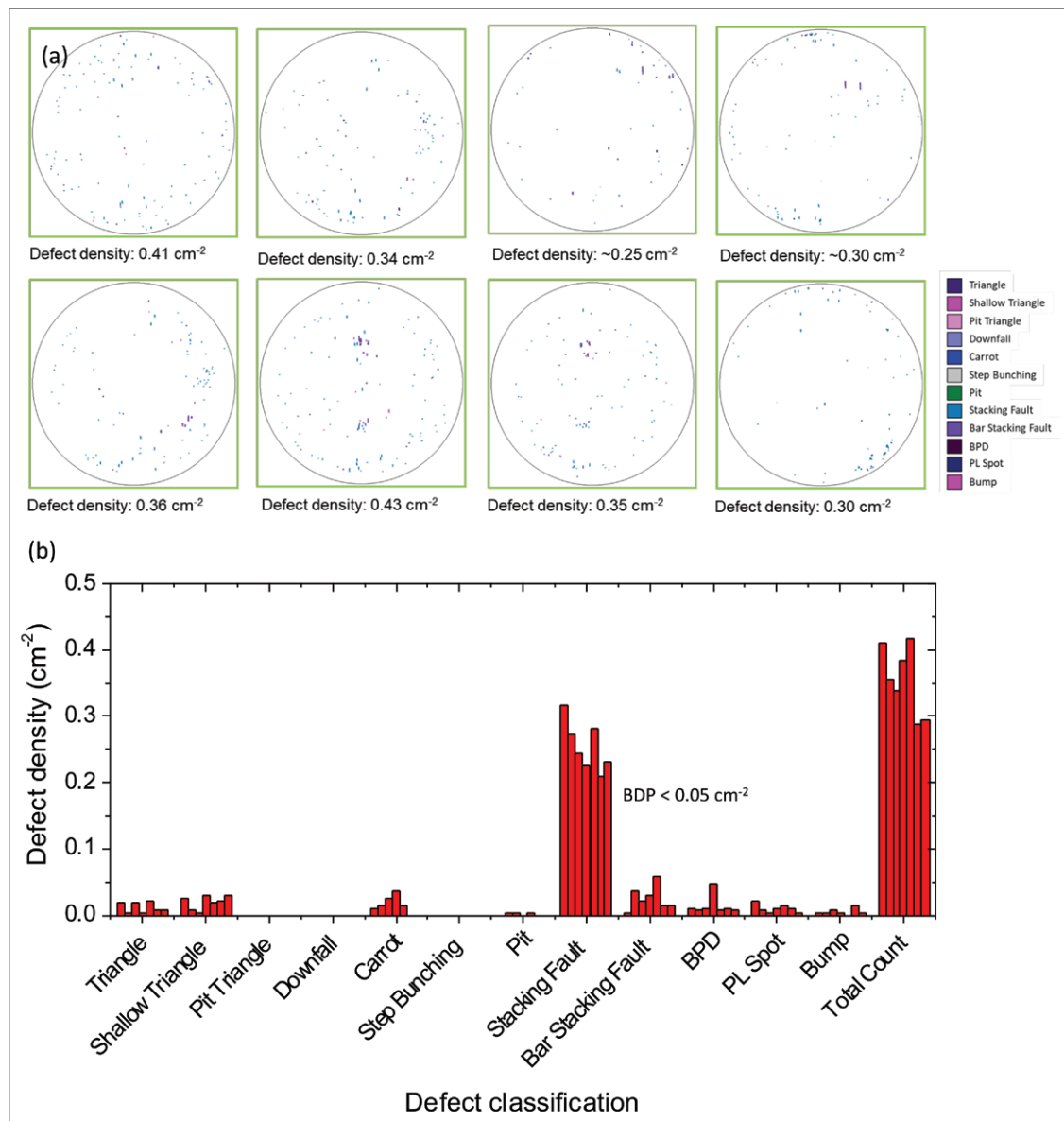
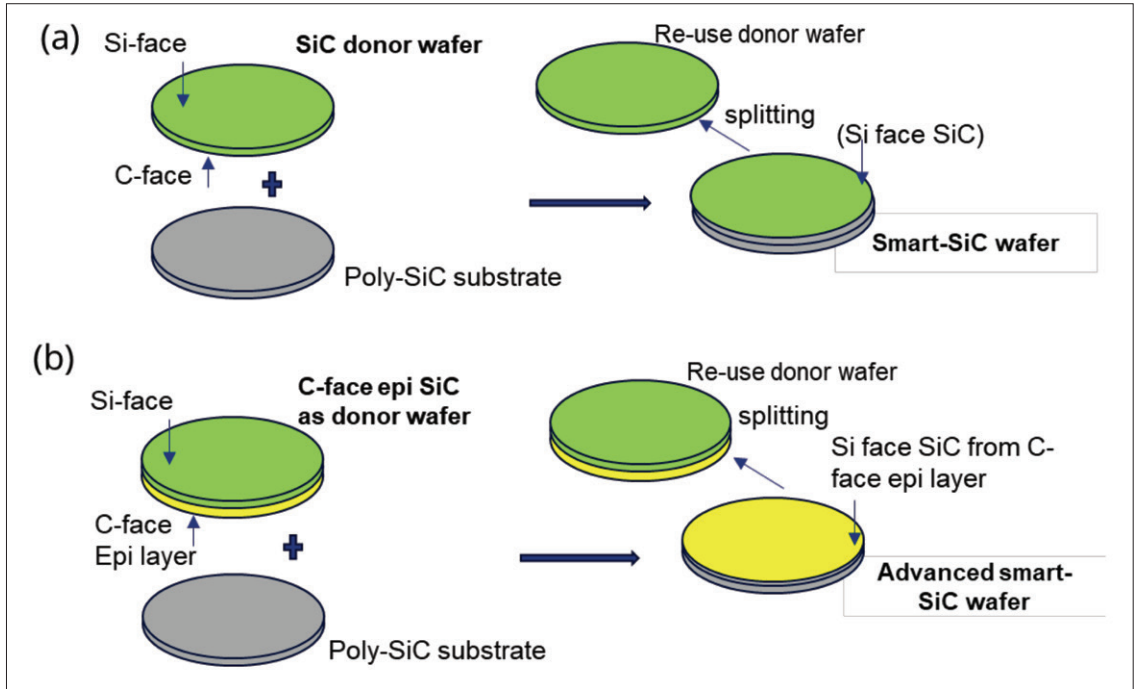


图6: (a) 使用KLA Candela 8520 测量工具对八片晶片批次进行的 200 毫米碳化硅外延表面和总缺陷分布的缺陷扫描。(b) 这些晶片的缺陷密度图，显示极低的缺陷密度和几乎无基平面位错的硅面碳化硅外延层。

图7: (a) Soitec 典型 SmartSiC 晶片制造的工艺流程。(b) 使用碳面碳化硅外延层的先进 SmartSiC 晶片工艺。



Soitec 开发的 SmartSiC 是一种潜在的候选材料。

该公司的工程衬底通过晶片键合和层转移形成外延生长的基础 (见图 7 (a))。这些衬底是通过将碳面碳化硅晶片键合到掺杂浓度高的多晶碳化硅衬底上生产的。在分裂单晶碳化硅晶片后, 约 1 微米厚的碳化硅单层留在多晶碳化硅上, 形成一种新型碳化硅晶片, 称为 SmartSiC。

SmartSiC 的主要优势之一是多晶碳化硅衬底的掺杂浓度高, 这简化了碳化硅 MOSFET 的制造工艺, 通过实现简单的背面欧姆接触并降低碳化硅 MOSFET 中的导通电阻。除此之外, SmartSiC 还有其他优点, 与将供体晶片从单晶碳化硅键合到多晶碳化硅衬底上的碳面外延层有关 (见图 7 (b))。通过这种碳面碳化硅外延片供体调整, SmartSiC 晶片中的转移层来自碳面碳化硅外延层, 并保留其相关优势。

用作 SmartSiC 供体晶片的碳面碳化硅外延层

必须具有低缺陷密度和高掺杂水平。

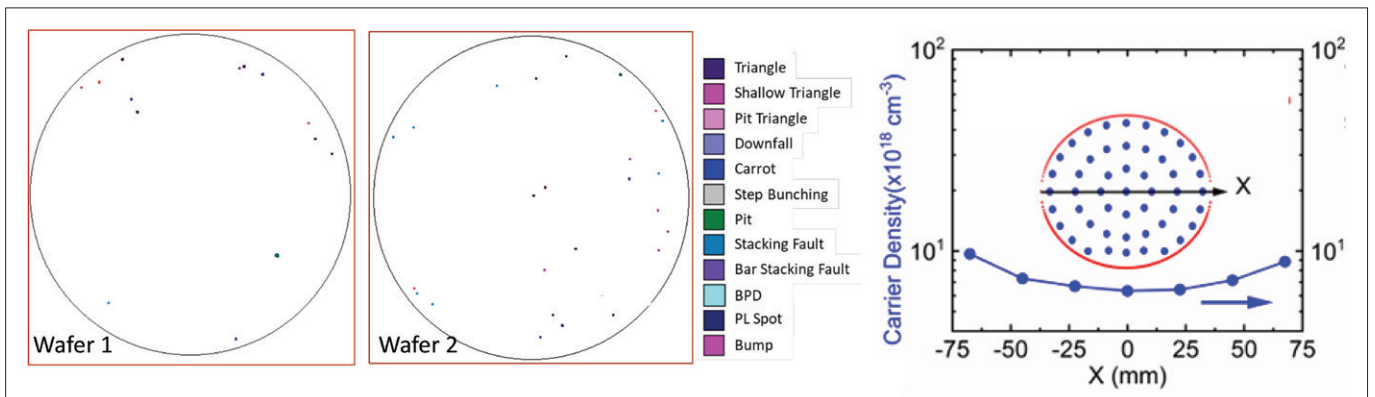
根据 KLA Candela 8520 的表征, 我们在这项工作中开发的晶片满足这些标准, 显示出极低的缺陷密度, 且没有基平面位错。

这些晶片的掺杂测量值超过 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, 表明 SmartSiC 技术是生产碳化硅 MOSFET 的一种有前景的新方法。

虽然碳化硅晶片距离成为像硅外延片一样“无缺陷”还有很长的路要走, 但在这一方向上正在取得进展——我们的工作提供了这一道路上的又一重要步骤。

作者感谢新加坡微电子研究院的 Lakshmi Kanta Bera、Chand Umesh、Surasit Chung、Navab Singh、Gong Xiao 和 Yeo Yee-Chia, 新加坡国立大学的 Tok Eng Soon, 以及法国 Soitec 的 Shian Yeu Kam、Loic Kabelaan、Walter Schwarzenbach、Ionut Radu 和 Loann Boudin。

图8: (a) 使用 KLA Candela 8520 系统扫描的掺杂浓度高的碳面碳化硅外延层的缺陷密度。两个晶片无基平面位错。(b) 沿碳面碳化硅外延层 X 方向的掺杂分布, 显示掺杂水平超过 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。



荔园定律： 氮化镓快充技术的发展定律

作者：深圳大学：钟智祥、吴雨桐、蒋冰；
 浙江大学：李京波；江南大学：敖金平；
 电子科技大学：朱仁强、张波；
 复旦大学：桑立雯；
 北京大学：魏进；
 西安电子科技大学：刘志宏，张春福；
 北京大学东莞光电研究院：王琦；
 湖南大学：胡伟；
 北京大学深圳研究生院：周航；
 深圳平湖实验室：万玉喜、张道华；
 第三代半导体产业技术创新战略联盟：赵璐冰；
 广东电网有限责任公司电力科学研究院：李盈；

深圳市洲明科技股份有限公司：陈黎暄；
 肯特智能技术（深圳）股份有限公司：陈胜森；
 广东天域半导体股份有限公司：李锡光；
 福建三安光电股份有限公司：林科闯；
 无锡华润华晶微电子有限公司：巴建锋 储凯闻；
 苏州能讯高能半导体有限公司：裴轶；
 江西誉鸿锦芯片科技有限公司：闫怀宝；
 红与蓝微电子（上海）有限公司：杨战武；
 深圳市信思科技有限公司：何世友；
 深圳罗马仕科技有限公司：李秋华；
 通信作者：深圳大学：刘新科

自氮化镓技术应用于消费类快充领域以来，其发展一直呈现蓬勃之势。2023年，我们通过深入的市场调研，对当时的发展规律进行了系统总结，由此得出了“荔园定律”。而在“荔园定律”提出至今的两年时间里，经过持续的跟踪与研究发现，直到2025年，消费类氮化镓快充依然遵循着快速迭代的规律。即平均每间隔12个月，商用氮化镓快充的输出功率提升50%左右。从2018年Anker发布的30W氮化镓快充至今，部分品牌已推出功率超过300W，功率密度超过3.3W/cm³的产品，展现了惊人的发展速度。

可直观比对不同年度上市产品的功率参数分布情况。从体积的数据分布图1(a)看，2021年以前的快充产品多集中在1W/cm³下方，功率密度普遍处于0.7-0.9W/cm³区间，反映出早期氮化镓技术尚未完全成熟。到2023年，大部分快充产品突破1W/cm³，甚至少部分已突破2W/cm³，可能是行业首款实验性高密度产品。2024到2025年快充产品密集分布于1-3W/cm³带。最高点达到3.3W/cm³，但仍有少数产品回落到1.8W/cm³附近，反映市场出现技术分层——部分厂商追求极限密度，另一部分则侧重成本与稳定性。

图1整合了氮化镓快充产品的3C认证信息，

从质量数据分布图1(b)来看，2018年，

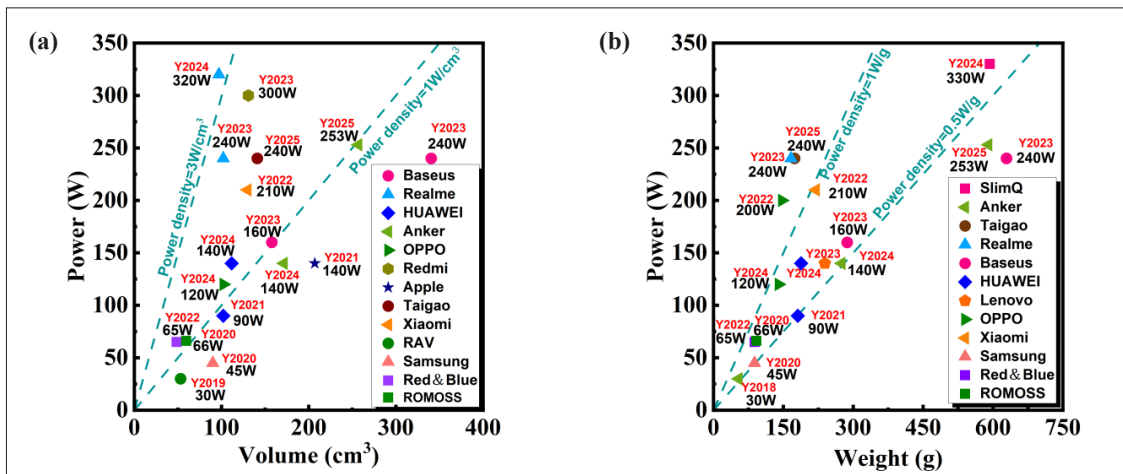


图1: (a) 氮化镓快充输出功率-产品体积图; (b) 氮化镓快充输出功率-产品质量图

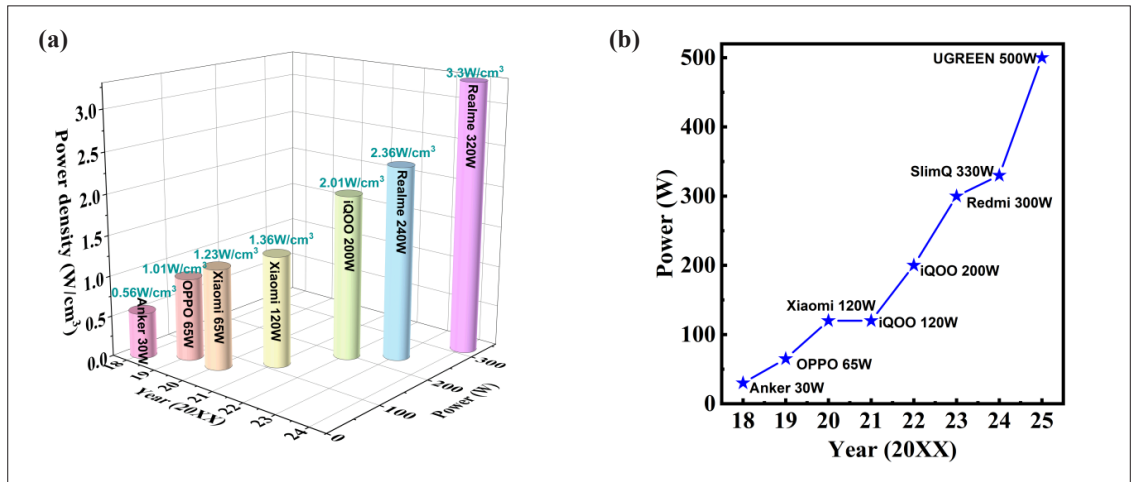


图2：近几年消费类氮化镓快充 (a) 功率密度增长情况；(b) 功率增长情况

Anker 推出的首款 30 W 氮化镓快充，质量 54 g，功率密度仅 0.53 W/g。2022 年，OPPO 发布 200 W 氮化镓快充，其质量为 147 g，功率密度达 1.36 W/g，成为首个突破 200 W 且功率密度超 1 W/g 的快充产品。Realme 和 Taigao 分别在 2024 年和 2025 年推出 240 W 氮化镓快充，功率密度分别达到 1.44 W/g 和 1.37 W/g，树立了行业新典范。

通过收集历年氮化镓快充产品中功率和功率密度最高的相关数据，分别绘制了功率密度增长（见图 2 (a)）以及功率增长情况（见图 2 (b)）的图表。通过观察图 2 (a) 和 (b) 可以发现，这些高功率产品的发展路径呈现出明显的上升趋势，其功率和功率密度随时间推移不断攀升，且提升速度与之前提出的“荔园定律”高度吻合，即平均每间隔 12 个月，商用氮化镓快充的输出功率提升 50% 左右。充分证明了该定律在描述氮化镓快充技术发展时的准确性和前瞻性。

2020 年起，氮化镓 (GaN) 技术从消费级快

充向工业级电源领域加速渗透。研究团队再次对 2018-2025 年消费级快充及工业级氮化镓电源产品进行了全面调研，并绘制出图 3。从图 3 (a) 中可以清晰看到，工业级氮化镓电源在效率方面平均高出 4% 左右，且在功率输出方面高三倍以上，普遍高于消费级氮化镓快充产品。这表明氮化镓在工业领域已得到更为广泛且深入的应用，其高功率、高效率的特性在工业场景中得以充分发挥，满足了工业设备对高性能电源的需求，展现出广阔的应用前景。

从图 3 (b) 数据分布看，2020-2021 年氮化镓技术初期主要验证中低功率场景，2020 年 HUAWEI 推出的 3000 W 产品已展现功率密度提升潜力。至 2022 年，GaNNEXT 推出 3600 W 氮化镓服务器电源，功率较早期提升 20%，但受限于封装技术，体积效率仍较低。同期行业平均功率密度低于 5 W/cm³，主要面向边缘计算等轻量化场景。2023 年以后，Navitas 在氮化镓服务器电

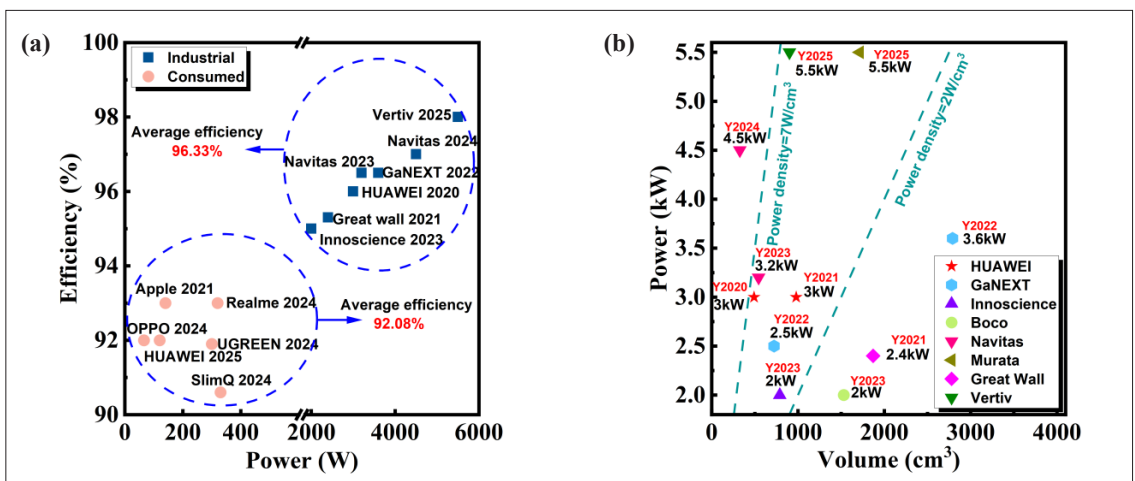


图3：(a) 工业级和消费级氮化镓电源效率-功率图；(b) 工业级氮化镓电源功率-体积图

源方面持续突破，从 2023 年 3200 W 产品功率密度达 5.88 W/cm³，到 2024 年 4500 W 模块更提升至 13.79 W/cm³，两年间体积效率增长 134%。此时 GaN 技术开始规模化应用于数据中心，8500 W 原型机亮相（2024 年），功率较 2022 年提升 136%，标志 GaN 突破中高功率界限。而在工业级氮化镓电源领域，氮化镓的功率输出密度普遍在 3-6 W/cm³ 区间内，比消费类氮化镓快充高出两到三倍，再一次印证了氮化镓在工业领域的突出优势。

通过系统整合近年工业级氮化镓服务器电源峰值功率数据及消费级产品参数，构建功率 - 年份坐标系，形成了图 4 所示工业与消费领域功率演变技术发展对比图。通过深入分析这张图表，我们清晰地观察到氮化镓技术的发展轨迹。数据表明，氮化镓功率器件的性能提升与“荔园定律”高度契合。具体而言，工业级氮化镓电源的输出功率大约每 12 个月就会提升 50%。

通过研究消费级氮化镓快充和工业级氮化镓服务器电源的发展趋势，可以总结出以下规律：

无论是消费级氮化镓快充还是工业级氮化镓服务器电源，其输出功率均呈现出显著的增长趋势。

平均每 12 个月，氮化镓快充的输出功率提升 50% 左右；

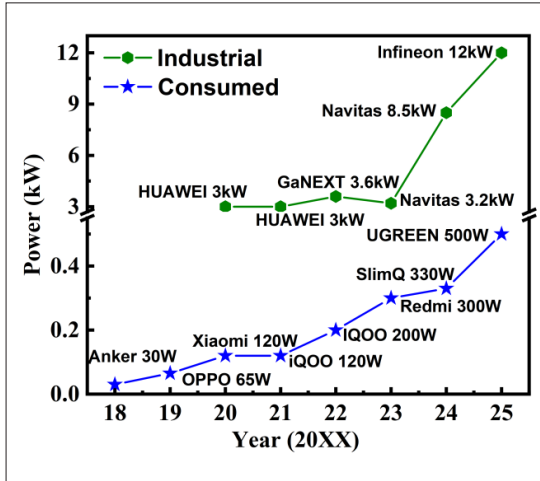


图4：氮化镓消费级快充和工业级电源发展

年年有荔枝压枝，年年有定律成章。当三月荔枝花香漫过深圳大学荔园，科研的星火在枝叶间跃动。我们围坐树下，以花香为引，剖解氮化镓快充的脉络，让每缕甜香都凝成智慧的结晶。愿岁岁花相似，定律常新，以荔园的风，吹开科技长河里永不褪色的春天。🌿

- 声明：本篇文章属于原创，数据来自网上，拒绝原文转载，如果需要转载，请联系我们。

总投资超 200 亿！长飞先进武汉基地正式投产

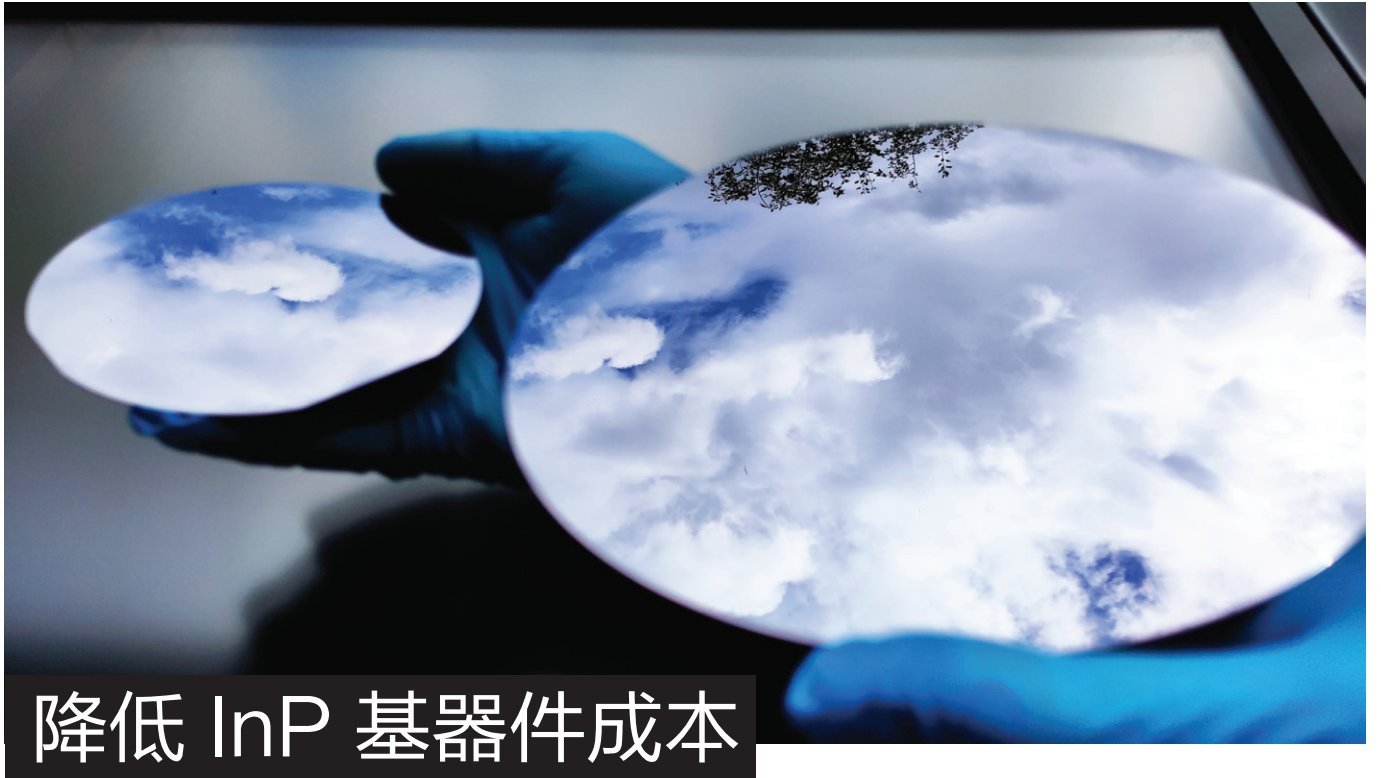
据“长飞先进”官微消息，5月28日，长飞先进武汉基地首片晶圆从生产车间成功下线，标志着总投资超200亿元的长飞先进武汉基地正式投产，全面进入量产倒计时。

据悉，长飞先进武汉基地坐落于东湖高新区光谷科学岛，于2023年9月1日正式破土动工。此前消息显示，该基地占地面积498亩，聚焦第三代半导体功率器件研发与生产。其中一期总投资80亿元，占地344亩，达产后将具备年产36万片外延、36万片6寸碳化硅晶圆、6100万个碳化硅功率模块的制造能力，产品将主要用于新能源汽车、光伏、储能、充电桩、电力电网等领域。同时，配套全产业链实验室，可完成材料分析、可靠性测试、失效分析等全流程检测，致力于打

造车规级芯片设计、制造及先进技术研发一体化的现代化半导体制造基地。

长飞先进武汉晶圆厂总经理李刚介绍，除了目前下线的首款晶圆之外，长飞先进武汉基地还有8款产品正在验证阶段，年底有望达到12款，项目满产后可满足144万辆新能源汽车对高端芯片的需求。

据介绍，武汉基地目前已全线配备6/8英寸兼容设备，对标国际碳化硅器件大厂。同时构建了完善的工艺流程和完整的工艺平台，可提供全面的工艺开发与技术解决方案。还建成了碳化硅行业第一家全自动化天车搬运工厂 (Auto3)，可实现生产资源的高效利用，最大化发挥制造效率。



由弗劳恩霍夫太阳能研究所和 III/V-RECLAIM 公司合作开发的工程化 InP-on-GaAs 衬底，直径可达 200 毫米，提供了一种坚固且低成本的平台，可快速提升至量产规模

作者：弗劳恩霍夫太阳能研究所的弗兰克·迪姆斯、卡敏·佩莱格里诺、延斯·奥尔曼和大卫·莱克纳；III/V-RECLAIM 公司的约尔格·施瓦尔茨

我们所处的行业对材料的需求不断增长，这些材料需要具备卓越的性能、可扩展性和成本效益。基于 III-V 族化合物的 InP 器件具有独特的特性，例如 InGaAs 极高的电子迁移率，以及吸收和发射波长可达 1500 纳米及以上的红外光的能力。凭借这些特性，基于 InP 及其相关合金的器件非常适合多种高端应用，包括红外相机、光电探测器和高速晶体管。然而，尽管 InP 衬底一直是这些应用的黄金标准，但其高成本和供应有限对大规模生产构成了重大挑战。

为了解决这些问题，弗劳恩霍夫太阳能研究所与 III/V-RECLAIM 公司的合作开发了一种创新技术，该技术利用我们在生长非晶格匹配材料以及抛光方面的专业知识，在 GaAs 衬底上创建高质量的 InP 层。我们的进展使我们推出了一种新产品，即 InP-on-GaAs 工程化衬底，它可以在多种应用中有效替代标准 InP 晶圆。这种新型衬底目前有 4 英寸和 6 英寸两种规格，未来有望扩展到 8 英寸，

其性能与纯 InP 相当，但显著降低了成本并提高了生产规模。由于这些优势，我们的新型衬底是制造商在快速发展的市场中寻求竞争力的理想选择。

InP 块状衬底在光电子器件的大规模生产中面临重大挑战。其中最显著的问题可能是高成本、易碎性和供应有限。这些劣势可归因于制造高质量 InP 晶圆的工艺复杂性，与生产 GaAs 相比，它需要更昂贵的设备。这种复杂性源于 InP 的固有特性，例如其在熔点时的高分解压力以及更大的孪晶倾向。由于这些因素，必须实施更严格的质量保证标准以控制缺陷并确保晶圆质量。

InP 生产工艺的高复杂性还阻碍了其可扩展性，限制了大尺寸衬底的供应。目前，InP 衬底主要提供 2 英寸至 4 英寸的尺寸，6 英寸版本最近才投入生产。这种有限的尺寸范围是扩大规模的关键障碍。扩大尺寸的努力还受到 InP 易碎性的阻碍，这增加了器件制造过程中断裂的风险，并导致生产良率降低，从而推高了成本。

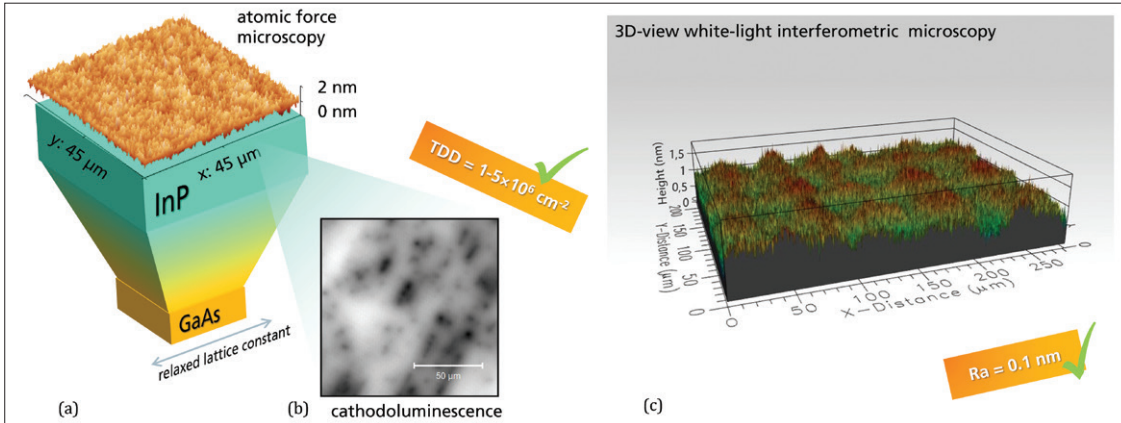


图1: (a) InP-on-GaAs 工程衬底的示意图, 包括 GaAs 衬底、工程化的外延缓冲层和最终弛豫的 InP 表面层。原子力显微镜图像显示了表面形貌; (b) 阴极发光图像显示了低穿透位错密度(TDD)为 $1.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。 (c) 白光干涉显微镜图像显示表面粗糙度 Ra 为 0.1 纳米, 与优质 InP 晶圆相当。

此外, InP 技术依赖于钢, 这是一种相对稀缺且昂贵的元素。由于供应有限以及在各行业需求高, 钢的市场价格可能会出现波动。例如, 去年钢价上涨了 50%。这一因素与其他因素共同阻碍了基于 InP 的光电子器件的广泛采用和经济量产。

相比之下, GaAs 行业在大规模生产方面具有显著优势, 因为 GaAs 衬底的生产成本相对较低, 这得益于经过数十年完善的成熟制造工艺。与 InP 不同, GaAs 衬底更耐用, 且可提供高达 8 英寸直径的尺寸, 更适合高产量制造。GaAs 的高稳定性还允许使用更薄的晶圆, 从而减少贵金属的使用。这些因素使 GaAs 成为光电子器件大规模生产的更具成本效益和实用性的选择。

将基于 InP 的技术集成到 GaAs 衬底上并非易事, 因为半导体制造中一个最关键挑战: 晶格失配。InP 和 GaAs 之间的原子间距差异接近 4%, 这阻碍了 InP 直接在 GaAs 上高质量外延生长, 因为整个层结构中会形成不受控的缺陷。这些有害缺陷, 也称为穿透位错, 作为复合中心会缩短载流子寿命, 导致器件性能和效率严重下降。

通过利用我们在开发非晶格匹配材料方面的长期专业知识, 我们开发了一种稳健的制造工艺, 确保我们的 InP-on-GaAs 衬底具有最高质量。我们的最终 InP-on-GaAs 晶圆 (见图 1 (a)) 具有 GaAs 衬底, 顶部有一系列外延缓冲层, 最终形成几乎完全弛豫的 InP 表面。这个表面的穿透位错密度仅为 $1.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ (见图 1 (b)), 可作为后续 InP 基器件外延生长的虚拟衬底。由于这种出色的材料质量, 我们的工程晶圆即使对于对载流子寿命退化敏感的器件也能确保可靠的性能。

为了确保外延级表面, 我们的原生晶圆经过了专门的化学机械抛光过程。根据白光干涉显微镜, 这些工程衬底具有卓越的表面形貌, 算术平均粗糙度(Ra)仅为 0.1 纳米, 与优质 InP 晶圆相当。

我们的最新实验提供了一个代表性的例子, 展示了我们的新型晶圆可以实现什么。为了公平比较在 InP 和 InP-on-GaAs 上制造的器件性能, 我们在 4 英寸纯 InP 晶圆和 6 英寸 InP-on-GaAs 工程衬底上制造了 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 激光功率转换器 (带隙为 0.74 电子伏特) (器件结构见图 2 (a))。

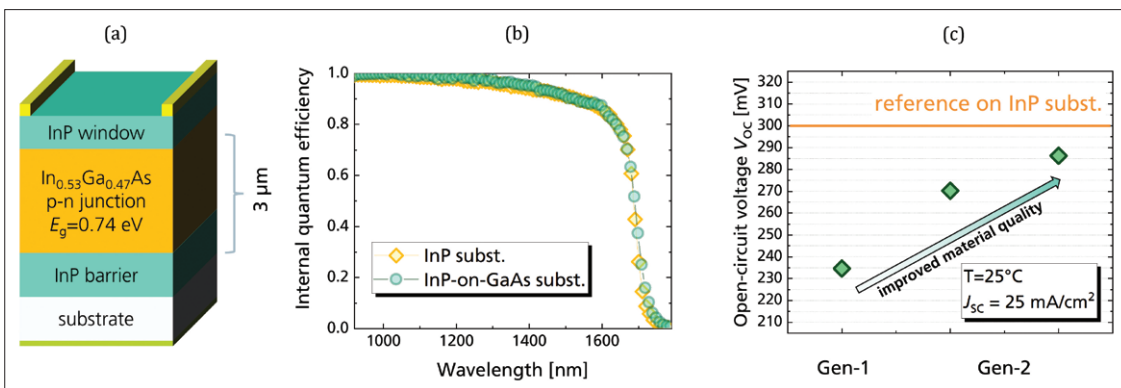


图2: (a) 在 InP 和 InP-on-GaAs 衬底上生长的激光功率转换器的示意图。 (b) 在参考 InP 衬底 (橙色菱形) 和 InP-on-GaAs 工程衬底 (绿色圆圈) 上生长的激光功率转换器的校准内部量子效率 (IQE)。 (c) 在 InP 上制造的激光功率转换器的开路电压 (VOC) 和不同代次的 InP-on-GaAs 衬底在光电流密度 (JSC) 为 25 mA cm^{-2} 时的测量值。我们最新一代的 InP-on-GaAs 衬底 (第二代) 的 VOC 值仅比在 InP 块状衬底上的参考器件低 15 毫伏。

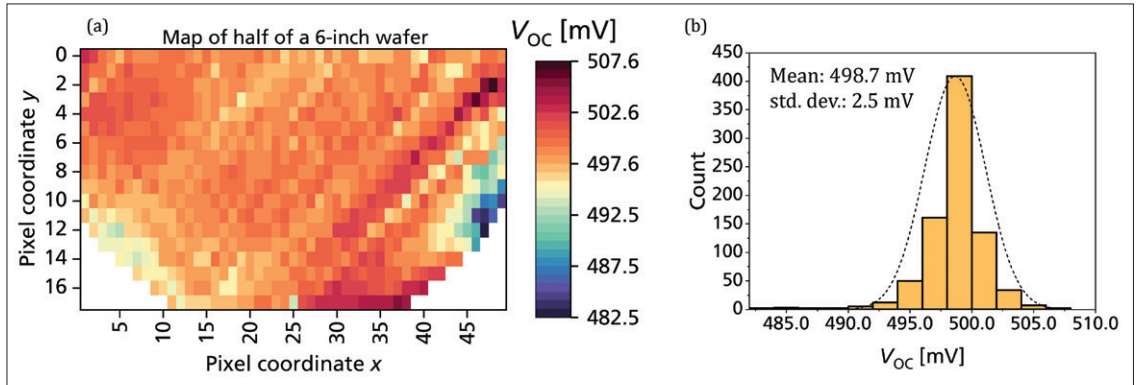


图3: (a) 在充满了 InGaAs 激光功率转换器的 6 英寸 InP-on-GaAs 衬底上的开路电压(VOC)图。每个坐标为(x,y)的像素对应一个名义面积为 5.4 平方毫米的单个器件。总共处理并测量了 826 个电池。光电流密度平均为 7.98 A cm^{-2} ，标准偏差为 0.11 A cm^{-2} 。(b) VOC 性能的直方图。

通过采用相同的外延生长和加工步骤，我们实际上在两种衬底上生产了相同的器件。

我们使用电光特性对比了这些器件的性能。校准的内部量子效率测量产生非常相似的值，用于在 InP-on-GaAs 和参考 InP 衬底上制造的器件的光电流生成效率（见图 2 (b)）。对于 p-n 结的性能指标，我们考虑了我们的功率转换器在光电流密度为 25 mA cm^{-2} 时的开路电压。这两种类型的器件在这个指标上产生了相似的值，在 InP 上制造的器件开路电压高出 15 毫伏。我们认为，通过微调生长条件有可能缩小甚至完全消除这一小差距，尽管我们在此项调查中没有采取这一步骤。

尽管高性能令人鼓舞，但制造商需要确保整个晶圆上所有器件都有良好的结果。好消息是我们的工程衬底满足了这一关键标准，在整个 6 英寸衬底面积上实现了卓越的性能一致性。这一优势确保了通过最大化可用晶圆面积来提高生产力。

为了突出我们的技术生产的器件具有高度均匀性，我们生产了一个密集的像素单元矩阵，每个单元的名义活性面积为 5.4 平方毫米。制造过程涉及每个像素的台面蚀刻，以确保与相邻单元

的电气隔离。这一步骤使得在晶圆上进行准确的特性测试成为可能。

总共，我们在一个 6 英寸晶圆的一半上处理了 826 个器件，采用 2.46 毫米乘 3.60 毫米的像素间距。然后，我们使用带有脉冲氙灯的自动电流-电压特性测试装置对该晶圆半片上的激光功率转换器的性能进行了绘图，该氙灯提供了一个宽带照明源。开路电压图（见图 3 (a)）证实了衬底上性能的一致性，表明我们的晶圆能够通过充分利用其面积来维持高生产力标准。

我们的努力表明，InP-on-GaAs 工程衬底提供了一种具有成本效益的 InP 块状晶圆替代方案，利用了较低的材料成本和成熟的 GaAs 晶圆供应链。这个平台以器件级的类似性能实现了成本的显著降低，使制造商能够在不显著牺牲质量的情况下降低生产成本。即使是生产小批量产品的芯片制造商也能从我们工程衬底的极具竞争力的成本中受益——其成本显著低于 InP，且对于大批量生产，有望低于当前 InP 价格的 20%。

我们的技术的另一个特点是，由于以 GaAs 作为起始材料，可以迅速扩大制造规模，因为我们的方法避免了 InP 供应的限制。这一优势对于那些寻求缩短交货时间并希望满足 5G 及即将到来的 6G 电信、数据中心和先进光子学等高性能半导体市场需求的制造商来说非常宝贵。

我们很高兴将这项技术推向市场。它为制造商提供了一种新的方式，在降低成本和提高生产能力的同时实现性能目标，这些优势提高了器件的性价比并开拓了新的市场机会。对于那些寻找一种具有成本效益、可扩展和高性能的外延晶圆生长基础的芯片制造商来说，我们的 InP-on-GaAs 工程衬底可以成为答案，为下一代半导体技术打开了大门。☞

扩展阅读

- C. Pellegrino et al. "InP-on-GaAs engineered substrates: A pathway toward low-cost, high-efficiency optoelectronic device fabrication" AIP Advances 15 025319 (2025)
- F. Dimroth et al. "Metamorphic GaInP/GaInAs/Ge triple-junction solar cells with >> 41 % efficiency," 2009 34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Philadelphia, PA, USA, 2009, pp. 001038-001042
- C. Pellegrino et al. "High-Efficiency 1064 nm Metamorphic Photonic Power Converters for Spacecraft Wireless Power Transfer," 2023 13th European Space Power Conference (ESPC), Elche, Spain, 2023, pp. 1-4
- M. N. Beattie et al. "InP- and GaAs-Based Photonic Power Converters Under O-Band Laser Illumination: Performance Analysis and Comparison," IEEE J. Photovolt. 13 113 (2023)

提高基于 GaN 的 HEMTs 的功率附加效率

优化的氮化镓沟道和降低的硅残留使工作在 2.45 GHz 频段的氮化镓高电子迁移率晶体管的功率附加效率得以提升

富士通的工程师们声称，他们打破了在工业、科学和医疗频段工作的晶体管的功率附加效率记录。该团队的 AlGaIn/GaN HEMTs 在 2.45GHz 下实现了超过 85% 的功率附加效率，打破了富士通此前创下的 82.8% 的记录。

据该团队称，效率的提升归因于 GaN 沟道晶体质量的提高以及减轻了衬底与外延层界面处残余硅的影响。对于这两代破纪录的 HEMTs，富士通的工程师们均在外延层上生长晶圆，而最新器件则采用了 4 英寸的晶圆。

该团队的发言人 Toshihiro Ohki 告诉《化合物半导体》杂志，使用 4G 英寸 GaN 晶圆的另一个好处是展示了大规模生产的能力，但主要原因是它允许制造更高质量的器件。

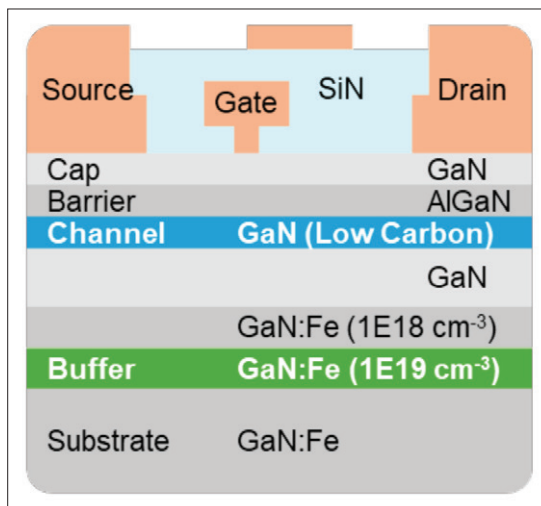
富士通最新一代 GaN HEMTs 的制造始于重复制造前代产品的第一步，即使用 HF 酸进行化学预处理，以去除 GaN 晶圆表面的残余硅。这种处理现在被应用于一个半绝缘的 4 英寸晶圆，其位错密度低于 $5 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ ，将残余硅浓度降低了两个数量级，同时降低了沿晶圆表面横向流动的漏电流。

化学处理后，团队将晶圆放入 MOCVD 腔室中，并沉积了掺杂铁的铁 GaN 缓冲层，掺杂浓度为 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。“掺杂铁的缓冲层本身并不新奇，” Ohki 说，“这次，我们在 GaN 上 GaN 添加了高于残余硅的铁的浓度，以抑制漏电流。”

为了评估新缓冲层的有效性，Ohki 及其同事通过使用隔离评估模式对两种样品进行了比较，该模式通过用氟离子注入使二维电子气 (2DEG) 失活。与无缓冲层样品相比，掺杂铁的缓冲层样品在抑制漏电流方面表现出显著优越性。

在生长外延结构的过程中，工程师们将 GaN 沟道中的 III-V 比率从 1600 提高到 8200，以减少残余碳并提高晶体质量。光致发光光谱显示，在约 560nm 处出现与碳相关缺陷相关的峰值，证实了残余碳浓度的降低。

为了降低欧姆电极的接触电阻，Ohki 及其同事采用了条形周期性凹槽蚀刻。据工程师们介绍，



通过增加缓冲层中的铁浓度，富士通的 HEMTs 的功率附加效率得到了提升。

这种结构确保了 2DEG 与电极之间的直接接触，并且由于不存在薄的势垒层，因此比平面型凹槽结构具有更稳定、更低的接触电阻。此外，条形凹槽结构还降低了热预算，这可能是电子陷阱的来源。

该团队的 HEMTs 具有条形凹槽结构，将接触电阻从 $0.38 \Omega \text{mm}$ 降低到 $0.25 \Omega \text{mm}$ ，其 0.5 微米栅长的 HEMTs 产生最大漏电流 853mAmm^{-1} ，导通电阻为 $4.74 \Omega \text{mm}$ 。在 10V 漏极电压下，这些器件的最大跨导为 288mSmm^{-1} ，阈值电压为 -1.77V 。

在将基本和高次谐波阻抗设置为功率附加效率匹配条件后，Ohki 及其同事确定，他们的 HEMTs 同时实现了 85.2% 的功率附加效率、89.0% 的漏极效率和 44.04dBm 的输出功率，对应于 7.9Wmm^{-1} 的功率密度。随着漏极效率接近 90%，Ohki 及其同事认为他们接近了该频率的极限。

Ohki 补充道：“我们打算将这项技术扩展到更高频率，如毫米波。”

参考文献

T. Ohki 等, Appl. Phys. Express 18 034004 (2025)

提高基于 GaN 的反射镜

以革命性尺寸的应变平衡镜改善基于 GaN 及其合金的 VCSEL 前景

基于 GaN 的 VCSEL 的最大弱点在于其反射镜——它们可能会受到应变影响，从而降低材料质量，而且生长这些分布式布拉格反射镜 (DBR) 需要花费数小时，使得器件生产不切实际。但得益于日本理光公司的工程师们的工作，这两个障碍都有望被克服。在短短 5 小时内，这些研究人员就能生长出一种新颖的高质量应变补偿分布式布拉格反射镜，具有 60.5 个周期，其峰值反射率接近 100%。

该团队在同质衬底上生长的 DBR 采用了 $\text{Al}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{N}/\text{GaN}$ 多层作为低折射率组成部分，以及 $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ 层作为高折射率组成部分。应变补偿源于平衡了来自 $\text{Al}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{N}$ 的张应变和与 $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ 相关的压应变。

与传统的 DBR 不同，传统的 DBR 交替堆叠厚度等于激光波长四分之一 ($\lambda/4$) 的两层，理光的工程师们开发了一种非对称结构，将比 $\lambda/4$ 更厚的 $\text{In}_{0.04}\text{Ga}_{0.96}\text{N}$ 层与比 $\lambda/4$ 更薄的低折射率多层配对。

在设计这种结构时，团队决定采用 0.04 的镓氮摩尔比，以防止镓氮层的弛豫，该层将有几十纳米的厚度。对于另一个反射镜，工程师们最初尝试使用 AlN ，但由于岛状生长导致的坑洞形成，该层受到了影响。为了抑制这一点，他们在 $\text{Al}_{0.60}\text{Ga}_{0.40}\text{N}$ 上添加了一层薄的 GaN 层。

模拟表明，在传统的 DBR 中，如果层的厚

度偏离 $\lambda/4$ ，就会引起相移，从而降低反射率。但该团队的应变补偿设计通过增加 DBR 中应变 AlGaIn 和 InGaIn 的比例并减少 GaN 的比例来提高反射率——这是因为由于更高的折射率对比度而增加的反射率超过了由于相位差而减少的反射率。

为了通过 MOCVD 生产他们的反射镜，团队在 InGaIn 和 AlGaIn/GaN 多层之间仅采用了 150°C 的温差，因为 InGaIn 的摩尔比很低。这一相对较小的温差将生长中断缩短到了不到 4 分钟。

使用来自准直卤素灯的光，该团队确定了 DBR 的中心波长为 440nm，以及超过 99.9% 的中心反射率。

该团队还生产了一种 VCSEL 结构，包括一个新颖的 DBR、具有三个量子阱的有源区和由 11 对 Ta_2O_5 和 SiO_2 制成的介质 DBR。光学泵浦产生了清晰的阈值特性。

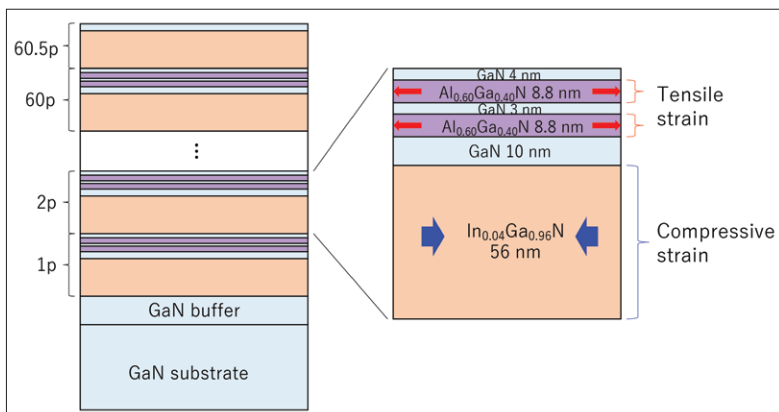
团队发言人 Takeshi Kawashima 表示，通过进一步开发，可能可以制造出一个完整的基于 GaN 的 VCSEL，其中包含两个半导体 DBR。

“挑战在于控制电导率和生长温度，” Kawashima 指出，并解释说使用 $\text{Al}_{0.60}$ 的 AlGaIn 预计会导致高电阻率。他解释道：“通过梯度组分或高浓度掺杂 AlGaIn 层，有可能实现低电阻 n 型 DBR，但另一方面，p 型 GaN 具有很高的电阻率，使得实际 p 型 DBR 的实现极为困难。一个潜在的解决方案是隧道结，但已报道的隧道结仍然具有高电阻率。”

Kawashima 透露，接下来的两个目标是实现电流注入激光和减少 DBR 的生长时间。关于后者，他评论道：“我们旨在尽量减少 DBR 生长过程中的温差，理想情况下实现相同的生长温度。这将使我们能够在 2-3 小时内生长出 DBR。”

参考文献

T. Kawashima 等, Appl. Phys. Express 18 041002 (2025)



理光公司的新型DBR提高了GaN VCSEL的前景，GaN VCSEL是视网膜扫描显示器和自适应前照灯的有前途的光源。

二氧化锗 GeO₂ 肖特基势垒二极管展现整流性能

采用极具前景的超宽禁带材料金红石型GeO₂制备的肖特基势垒二极管展现出整流特性

京都工艺纤维大学的研究人员声称，他们通过展示首个垂直二氧化锗 GeO₂ 肖特基势垒二极管（二氧化锗 GeO₂ 是一种四方晶体结构，其中 Ge⁴⁺ 与六个等效的 O²⁻ 原子键合，形成角落和边共享的 GeO₆ 八面体混合物）开辟了新天地。

该团队发言人 Hiroyuki Nishinaka 指出：“虽然一家日本风险公司在其网站上展示了一个伪垂直肖特基势垒二极管，但尚未在经过同行评审的期刊上发表详细信息。”

Nishinaka 补充道：“尽管其他团队已经报道了 GeO₂ 光电探测器，但我们的工作代表了首个垂直功率器件的演示。”

二氧化锗 GeO₂ 与其表亲 Ga₂O₃ 一样，具有超宽禁带，确保了高临界电场，使其成为制造功率器件的有前途的材料。

但除了这一相似之处之外，二氧化锗 GeO₂ 还具有比 Ga₂O₃ 的几个优势。最显著的是，理论工作表明二氧化锗 GeO₂ 可以掺杂 n 型和 p 型。

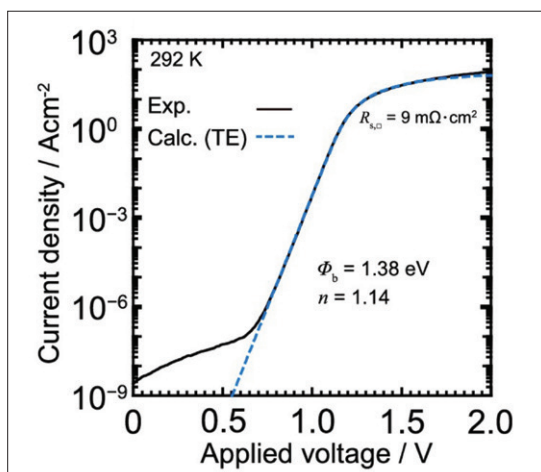
根据这些计算，尽管相对较高的受主电离能，共掺杂策略有可能增加受主溶解度，以通过杂质带实现空穴导电。“相比之下，β-Ga₂O₃ 由于其固有的材料特性，在 p 型掺杂方面面临重大挑战，至今尚未成功实现 p 型掺杂，” Nishinaka 认为。

他和他的同事们在掺杂铌的 TiO₂ 晶圆上制造了垂直二氧化锗 GeO₂ 肖特基势垒二极管，因为同质衬底尚未商业化。

“然而，德国 IKZ 的研究人员已经报道了高导电性的掺杂铌的块状二氧化锗，表明未来可能会出现适合功率器件应用的内质衬底。”

该团队使用 850°C 的雾化外延法沉积了他们的外延结构，包括掺杂铌的 Ge₇Sn_{1-γ}O₂ 缓冲层和未掺杂的二氧化锗 GeO₂ 层。

“我们使用雾化 CVD 进行生长，因为我是京都大学开发雾化 CVD 的研究人员之一，因此我们对该技术有丰富的经验，” Nishinaka 解释道。“雾化 CVD 在材料研究的早期阶段具有特殊优势，因为它可以利用任何可溶解在溶液中的材料。尽管 MOCVD 也适合——并且已被用于生长二氧化



垂直GeO₂肖特基势垒二极管的正向电流-电压特性，显示出明显的整流行为。

锗——但雾化 CVD 在材料探索方面具有优势。”

二次离子质谱法显示，缓冲层厚度为 149nm，GeO₂ 层厚度为 198nm。这种技术还确定了来自缓冲层的铌扩散到 GeO₂ 层中，这可能是由于缺陷辅助扩散机制，如位错或点缺陷。

在清洁样品后，该团队转向蒸发添加直径为 320nm 的镍肖特基接触。

电气测量确定了：在 ±2V 时整流比为 6×10⁵ 的明显整流行为；导通电阻为 9mΩcm²，与基板的电阻一致；理想因子为 1.14；以及肖特基势垒高度为 1.38eV。

肖特基势垒二极管的一个弱点是其相对较高的反向漏电流，可能由于漏电流路径引起。

据该团队称，需要改进外延生长，以确定理想二氧化锗中的反向漏电流机制是否能够被热发射模型准确描述，该模型已成功应用于 4H-SiC、GaN 和 β-Ga₂O₃。

二氧化锗 GeO₂ 的进展还取决于减少位错和 / 或点缺陷以及在厚外延层中实现均匀掺杂控制。

“我们的下一个目标是实现可靠的 p 型掺杂，以实现 p-n 结器件，最终实现二氧化锗的 MOS-FET 开发，” Nishinaka 表示。

参考文献

K. Kanegae 等, Appl. Phys. Express 18 041001 (2025)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
Evatec AG		vatecnet.com/cn	21
FERMI	费勉仪器	www.fermi.com	2
RABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	7
Riber		www.riber.com	IFC
Park Systems		parksystems.cn/nx-wafer	1

欢迎投稿

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

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

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

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

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

文章投稿指南

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

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

新产品投稿指南

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

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

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

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

Lynn Wang (王清玲), lynnw@actintl.com.hk

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

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

销售人员 Sales Offices

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

China (中国)
Mini Xu (徐若男), minix@actintl.com.hk
Tel: 86 187 7196 7314

Phoebe Yin (尹菲菲), phoebey@actintl.com.hk
Tel: 86 155 2754 0817

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

Mandy Wu (吴漫), mandyw@actintl.com.hk
Tel: 86 156 2304 9536

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

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

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

Korea (韩国)

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

US (美国)

Janice Jenkins, jjenkins@brunmedia.com
Tel: 724-929-3550

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

Europe (欧洲)

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

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

◆ 线下 ◆

化合物半导体&半导体芯科技 综合论坛

05月·苏州 半导体先进技术创新发展和机遇大会

平行论坛: Compound Semiconductor China

- 化合物半导体材料衬底、外延生长及其相关设备技术
- 超宽禁带器件:最终解决方案?
- 功率电子器件及封装和应用技术
- “AI+先进光显”引领未来
- 面向未来数据中心和6G网络下的射频器件研究进展
- 激光通信、精密加工及量测技术
- 先进半导体材料、器件的可靠性验证和故障分析

平行论坛: CHIP China晶芯研讨会

- 玻璃通孔(TGV)技术创新发展和应用推动
- 面板级封装技术的崛起
- AI驱动的光电合封(CPO)新态势
- 车规级封测的挑战与解决方案
- 2.5D/3D/3.5D封装在AI趋势下大有可为
- 异构集成、芯粒(chiplet)、先进互连、混合键合、背面供电.....技术发展与应用

Compound Semiconductor China

7月·广州 化合物半导体先进技术及应用大会

- 化合物半导体材料衬底、外延生长及其相关设备技术
- 能源变革大时代,功率器件及应用市场格局
- 先进显示与照明取得的进展
- 先进半导体材料、器件的可靠性验证和故障分析
- 超快通信射频器件新应用

10月·常州 化合物半导体先进技术及应用大会

- 化合物半导体材料衬底、外延生长及其相关设备技术
- 面向未来数据中心和6G网络下的射频器件研究进展
- 功率电子器件及封装和应用技术
- 扩大表面发射器的视野
- 激光通信、精密加工及量测技术

CHIP China晶芯研讨会

11月·厦门 第三届-半导体先进封测产业技术创新大会

- 玻璃通孔(TGV)技术创新发展和应用推动
- 面板级封装技术的崛起
- AI驱动的光电合封(CPO)新态势
- 车规级封测的挑战和解决方案
- 2.5D/3D/3.5D封装在AI趋势下大有可为
- 异质集成·先进封装关键材料与创新
- 2.5D/3D封装设计仿真与可靠性
- 先进封装对新型装备技术的需求和挑战
- 异构集成、芯粒(chiplet)、先进互连、混合键合、背面供电.....技术发展与应用

◆ 线上 ◆

Compound Semiconductor China

先进半导体材料的检测/量测关键技术 | GaN功率应用,厚积薄发

MicroLED取得的进展 | 超宽禁带材料、器件解决方案 | PIC的新应用

面向未来数据中心和6G网络下的射频器件研究进展

CHIP China晶芯研讨会

玻璃通孔(TGV)技术创新发展和应用推动 | 面板级封装技术的崛起

先进封装制造工艺与材料的创新 | 先进半导体键合集成技术

光电合封(CPO)及光电互连技术发展 | 2.5D/3D封装设计仿真与可靠性

◆ 定制专场论坛 ◆

重点依据企业需求定制会议主题,线上直播与线下执行双向选择,垂直听众定向邀约,充分发挥资源链接优势,突破原有格局,助力泛半导体产业客户实现多元化探索路径。



推介目的性强 会议听众垂直
议题内容聚焦 直击产品核心

* 以上主题暂定,请以会议举办议题为准



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)