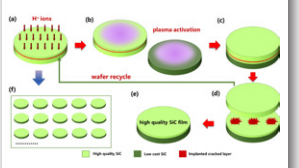
化合物半导体

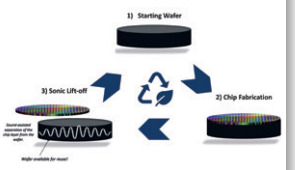
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2024年 4/5月

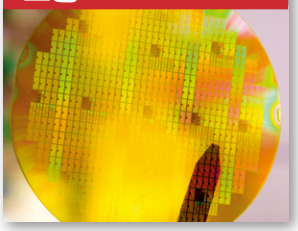
“万能离子刀”技术为 8 英寸SiC 提供低成本方案



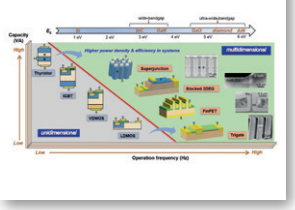
一种削减成本的合理方法



SiC超结的一种卓越工艺



多维功率器件





利用 USACH BoulePro-200AX 为 SiC 行业制定标准

ACT INTERNATIONAL

ISSN 2789-2735

USACH



DREAM IT. BUILD IT. TOGETHER.

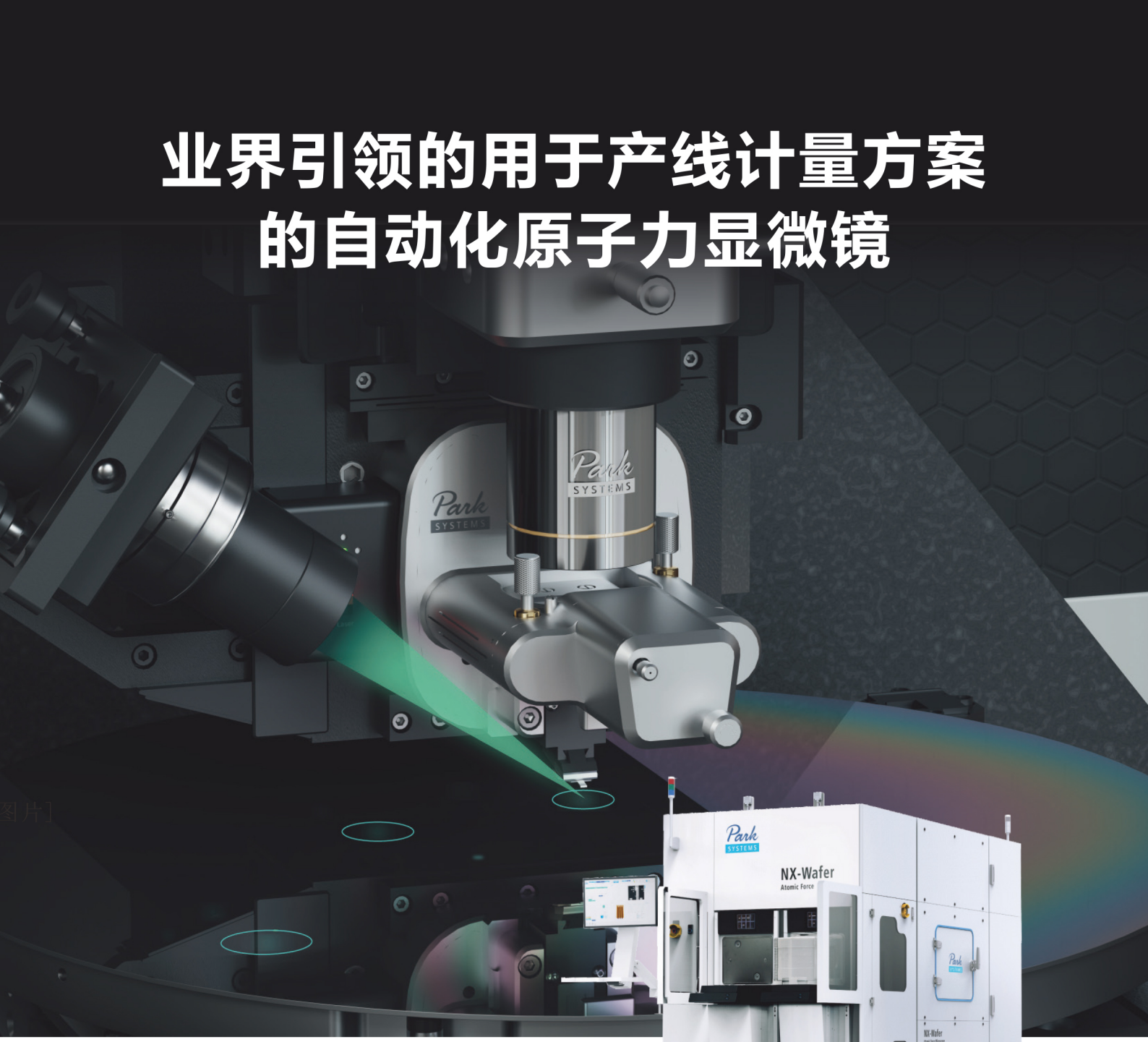
WELCOME TO USACH, THE PREMIER PROVIDER OF CUTTING-EDGE TECHNOLOGY IN MANUFACTURING SYSTEMS.

Located in Elgin, Illinois USA, our company boasts Swiss engineering roots and a steadfast commitment to turning your dreams into reality. For over half a century, we've collaborated closely with our clients to craft single-machine solutions and multi-machine production cells with seamless automation. From precision fuel injection components to aerospace engine parts, semiconductor boules to professional lawnmower blades, our revolutionary grinding systems have revolutionized industries across the board. Leveraging multi-axis interpolation and a suite of integrated technologies, including on-board gauge systems and X-ray guided part orientation, we deliver precision custom solutions tailored to diverse materials, including ceramics, silicon, and silicon carbide. At USACH, we don't just meet expectations; we exceed them, offering the innovative solutions our clients have only dreamed of.

LEARN MORE ABOUT USACH TECHNICAL SOLUTIONS | USACH.COM | 847-888-0148

USACH © 2024 USACH USA

业界引领的用于产线计量方案的自动化原子力显微镜



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。
Park NX-Wafer具有最高的纳米级表面分辨率和亚埃级的高精度。
在持续扫描后，探针针尖的变化可以忽略不计，仍具有高超的针尖锐度保护力。

Watch the video

- 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
- 能够扫描300mm晶圆

parksystems.cn
销售热线：+86-10-62544360
售后热线：+86-21-60251578

Park SYSTEMS | 帕克 原子力显微镜

目录

Contents

封面故事 Cover Story

20 **利用USACH BoulePro-200AX为SiC行业制定标准**
Setting standards in the SiC industry with the USACH BoulePro-200AX

对SiC日益增长的需求促使制造商不断创新和优化生产工艺。USACH BoulePro-200AX正是帮助制造商实现这一目标的尖端系统，代表了SiC晶体制造技术的重大进步。USACH BoulePro-200AX因其革命性的SiC制造方法被公认为行业标准。该工具可使制造商有效满足对高品质SiC材料日益增长的需求。USACH BoulePro-200AX拥有创新功能以及无与伦比的性能和可靠性，对于想在快速发展的SiC行业中努力保持领先地位的公司来说，它是首选解决方案。

- Jeff Gum，先进材料专家（半导体材料）；James Carl，营销专家；Hardinge美洲地区

编者话 Editor's Note

04 **AI开启半导体行业新纪元**
AI ushers in a new era for the semiconductor industry
- 陆敏

业界动态 Industry

06 **SEMI报告：2023年全球半导体设备出货金额为1063亿美元**
SEMI Report: The global semiconductor equipment shipment value reached 106.3 billion US dollars in 2023

06 **SK siltron 获美国7700万美元支持扩建SiC晶圆厂**
SK Siltron Receives $77 Million in U.S. Support for SiC Wafer Factory Expansion

06 **Luminus 推出首批激光器产品**
Luminus launches its first laser products

08 **格芯GaN晶圆厂将受益于15亿美元的《芯片与科学法案》资金**
GF GaN fab to benefit from $1.5B CHIPS Act funding

08 **苹果microLED手表计划摇摆不定**
Apple microLED watch plans falter

09 **Wolfspeed报告称第二季度设计采纳创下新高**
Wolfspeed reports record design wins in Q2

10 **化合物半导体产业全新风向标-2024 九峰山论坛暨化合物半导体产业博览会圆满落幕**
The Compound Semiconductor Industry's New Benchmark - The 2024 JSF Forum and Compound Semiconductor Industry Expo Concluded Successfully

24 **总投资约300亿元，重庆三安意法半导体项目预计8月投产**
The total investment is about 30 billion yuan, and the Sanan-ST Microelectronics project in Chongqing is expected to start production in August

宽禁带半导体国家工程研究中心专栏 WBS Column

14 **氮化镓毫米波功率器件与电路研究进展**
Research Progress on Gallium Nitride Millimeter-Wave Power Devices and Circuits

关于雅时国际商讯 (ACT International)

ACT INTERNATIONAL 雅时国际商讯（ACT International）成立于1998年，为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品－包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动－为跨国公司及中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。 ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站，以及各种技术会议，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、电磁兼容等领域的约二十多万专业读者及与会者。ACT 亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT总部在香港，在北京、上海、深圳和武汉设有联络处。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

目录

Contents

技术 Technology

25 “万能离子刀”技术为8英寸SiC提供低成本方案
"Universal Ion Blade" Technology Provides a Cost-Effective Solution for 8-inch SiC
- 欧欣，伊艾伦

28 扩展高速VCSEL的应用范围
Extending the reach of high-speed VCSELs
- Haonan Wu1, Dufei Wu1, Milton Feng[1]和xin Yu[2]
[1]伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校，[2]鸿腾精密科技

32 多维功率器件
Multi-dimensional power devices
- Yuhao zhang，Virginia Tech

34 SiC超结的一种卓越工艺
A superior process for the SiC superjunction
- Reza Ghandi，GE Research

38 一种削减成本的合理方法
A sound approach to cutting costs
- Arno Merkle，Crystal Sonic

科技前沿 Research Review

41 低温热氧化与自对准刻蚀工艺结合制备了8.7A@2V/700V氧化镓功率半导体器件
Low-temperature thermal oxidation combined with self-aligned etching technology was used to fabricate gallium oxide power semiconductor devices with a breakdown voltage of 8.7A at 2V/700V

42 加深对沟槽后修复工作的理解
Deepening the understanding of post-trench restoration

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



AI 开启半导体行业新纪元

近日，一家领先的半导体公司成功开发了一种新型 SiC 功率器件，这种器件利用了先进的 AI 算法来优化其性能和效率；还有利用氧化物半导体铟镓锌氧化物 (IGZO) 开发出的高性能 AI 半导体器件，这种新器件在性能和功率效率方面表现出色。这一进展不仅展示了 AI 技术在推动半导体行业创新方面的潜力，也预示着一个全新的时代——AI 开启的半导体行业新纪元。随着 AI 技术的快速发展，对高性能计算的需求日益增长，这直接推动了对更高效、更强大的半导体器件的需求。核心要素包括 AI 芯片的设计与制造、机器学习算法的应用以及大数据处理能力的提升。根据 DIGITIMES Research 研报预测，到 2030 年，全球半导体市场规模预计将超过 1 万亿美元。

AI 技术的发展已经深刻改变了半导体行业的面貌。从芯片设计到制造，再到封装测试，AI 的应用极大地提升了效率、降低了成本并确保了高性能。例如，AI 技术已被广泛应用于晶圆制造过程中的缺陷检测、设备维护预测以及生产流程优化等方面；另外英伟达的 GPU 产品在 AI 计算领域取得了显著的成功，其市值将突破了 2 万亿美元。这些成就的背后，是多个研究机构和公司的共同努力，特别是那些专注于 AI/ML 在半导体领域应用的企业。尽管 AI 在半导体领域的应用取得了巨大进展，但仍面临一系列挑战。例如，如何进一步提高芯片的能效比、如何解决 AI 芯片的高成本问题等。未来，随着技术的不断进步和市场需求的增长，AI 有望在芯片设计、制造等环节实现更广泛的应用，推动整个半导体行业的技术创新和产业升级。

AI 及半导体行业产业链涉及上游原材料供应、中游制造和下游各大应用领域。其中，EDA（电子设计自动化）作为半导体产业链的前端，对于降低设计门槛和优化芯片 PPA（性能 - 功耗比）具有重要作用。而在制造环节，光刻技术的进步是实现高精度晶圆图案化的关键，这对于提升半导体器件的质量和可靠性至关重要。中国在半导体产业链的某些环节已展现出强大的竞争力，尤其是在成熟制程、SiC 材料等领域。与此同时，国际竞争同样激烈，特别是美国对半导体产业的出口限制加剧了中美在半导体领域的竞争。尽管如此，中国企业仍在通过自主研发和政策支持，不断缩小与国际领先水平的差距。

AI 在半导体领域的应用为行业带来了新的增长点和创新机会。通过优化芯片设计和制造过程，可以提高效率，降低成本，最终推动产品的快速上市。此外，AI 还能够帮助企业应对人才短缺等挑战，促进行业的可持续发展。然而，AI 的应用也给半导体行业带来了不少挑战。首先，AI 算法的复杂性要求高度专业的人才；其次，高成本的 AI 芯片可能会阻碍其广泛应用。因此，企业需要加大研发投入，同时寻求政府和社会的支持，以克服这些挑战。AI 正在成为推动半导体行业发展的关键力量。随着 AI 技术的不断成熟和应用领域的不断扩大，我们有理由相信，半导体行业将迎来更加繁荣的发展前景。对于中国而言，抓住 AI 发展的机遇，加强自主创新能力，既是挑战也是机遇。只有这样，才能在全球范围内保持竞争力，甚至引领行业的发展趋势。



化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

社长 Publisher
麦协林 Adonis Mak
adonism@actintl.com.hk

荣誉顾问 Honorary advisor
郝跃院士 Academician Hao Yue

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

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

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

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





ISSN 2789-2735
© 2024 版权所有 翻印必究

ULVAC



爱发科苏州公众号

爱发科真空技术（苏州）有限公司

爱发科（苏州）坚持扎根本土、服务当地，将日本先进技术研发与中国制造优势相结合，为平板显示器、功率器件、化合物半导体、传感器、光通信及光电器件、滤波器、电子元器件等行业相关的企业以及大学研究所等提供生产、研发所需的设备及设备周边产品的售后服务。

高精度蒸发台（±1%）

- 可对应不定形片及2~12寸；
- 可对应各种金属，合金，非金属，化合物等工艺以及 lift-of 工艺。





Load-lock 式溅射台

- 可对应2~8寸方片，未定型片，切换兼容；
- 可对应多元溅射材料。

手机：李女士 18136982302
手机：何先生 15050403809
地址：苏州市工业园区苏虹东路277号

SEMI 报告：2023 年全球半导体设备出货金额为 1063 亿美元

美国加州时间 2024 年 4 月 10 日，SEMI 在其发布的《全球半导体设备市场报告》Worldwide Semiconductor Equipment Market Statistics (WWSEMS) 中指出，2023 年全球半导体制造设备销售额从 2022 年的 1076 亿美元的历史记录小幅下降 1.3%，至 1063 亿美元。

2023 年芯片设备支出排名前三的中国大陆、韩国和中国台湾地区占全球设备市场的 72%，中国仍然是全球最大的半导体设备市场。2023 年在中国的投资同比增加了 29%，达到 366 亿美元。由于需求疲软和 memory 市场库存调整，第二大设备市场韩国的设备支出下降了 7%，至 199 亿美元。在连续四年增长后，中国台湾地区的设备销售额也减少了 27%，达到 196 亿美元。

北美的年度半导体设备投资增长了 15%，主要得益于《芯片和科学法案》的投资；欧洲增长了 3%；日本和世界其他地区的销售额同比分别下降了 5% 和 39%。

Region	2023	2022	% (YoY)
China	$36.60	$28.27	29%
Korea	$19.94	$21.51	-7%
China Taiwan	$19.62	$26.82	-27%
North America	$12.05	$10.48	15%
Japan	$7.93	$8.35	-5%
Europe	$6.46	$6.28	3%
Rest of the World	$3.65	$5.95	-39%
Total	**$106.25**	**$107.64**	**-1%**

Sources: SEMI (www.semi.org) and SEAJ (www.seaj.or.jp), April 2024
Note: Summed subtotals may not equal the total due to rounding.

SEMI 总裁兼首席执行官 Ajit Manocha 表示：“尽管全球设备销售额略有下降，但今年的整体业绩好于早期的预期，战略投资推动了关键地区的增长。”

晶圆加工设备的全球销售额 2023 年增长了 1%，而其他前端领域的销售额增长了 10%。封装设备的销售额 2023 年下降了 30%，测试设备的销售额降低了 17%。

SK siltron 获美国 7700 万美元支持扩建 SiC 晶圆厂

4 月 12 日消息，近日，韩国 SK 集团旗下半导体晶圆制造商 SK Siltron 获得了美国政府的 7700 万美元补贴，用于扩建其位于密歇根州的碳化硅（SiC）晶圆工厂。这笔补贴包括投资补贴和税收优惠，将有助于 SK Siltron 加速其在美国的半导体生产布局。

SK Siltron 的美国子公司 SK Siltron CSS 目前已经在密歇根州贝城运营一家生产 SiC 晶圆的工厂，并且计划利用这笔补贴资金进行工厂的扩建。扩建后的工厂预计将提高 SiC 晶圆的生产能力，以满足电动汽车和储能系统（ESS）等领域不断增长的需求。

值得注意的是，SK Siltron CSS 在今年 2 月还获得美国能源部 5400 万美元的贷款支持，以扩大密歇根州用于电动汽车晶圆制造设施，该笔贷款将扩大用于电动车传动系统、逆变器及配电系统的半导体产量。

SK Siltron CSS 计划利用美国能源部和密歇根州政府提供的资金，到 2027 年完成其湾城工厂的扩建。

Luminus 推出首批激光器产品

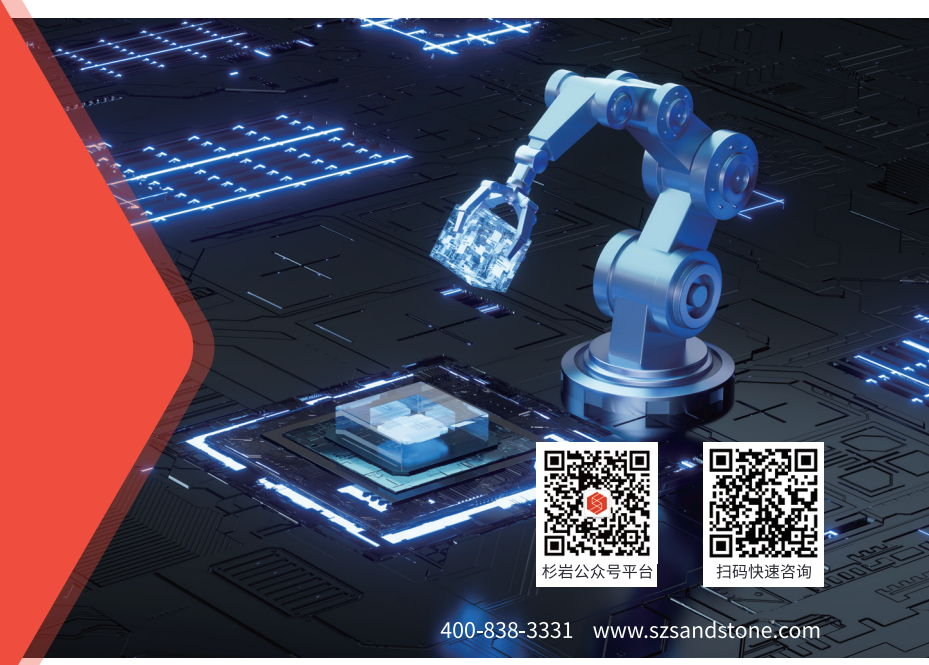
Luminus Devices Inc 位于美国加利福尼亚州森尼韦尔，致力于为照明市场设计并制造 LED 和固态技术（SST）光源，为满足娱乐照明、激光投影显示、水准测量、生物监测等广泛应用的需求，该公司推出了绿光激光器和蓝光激光器，拓展了其产品组合。新型绿光激光器的典型峰值波长为 515nm，输出功率为 80mW（CW），可在脉冲和 CW 模式下高效工作，并采用单模二极管激光技术。此外，它还具有高速调制功能，采用 TO-56 封装，并配有一个光电二极管。蓝光激光器的典型峰值波长为 455nm，输出功率为 100mW（CW）。与绿光激光器一样，它也能在脉冲和 CW 模式下高效工作，采用单模二极管激光器技术，且具有高速调制功能。也采用 TO-56 封装，并配有一个光电二极管。激光器业务线总监 Chun-Jui Lee 表示：“我们首次推出激光器产品组合，标志着我们致力于扩大光电解决方案的产品范围，以满足客户不断变化的需求。通过这些新的绿光和蓝光激光器产品，我们的目标是以独特的性能和可靠性服务于各行各业。”据称，这类激光器具有出色的电光转换效率，有利于电池供电系统，有助于激光光源在消费、医疗、生命科学、工业等市场的广泛应用。Luminus 计划在不久后大幅扩展其激光器产品组合，推出波长选择更多的激光器和先进的封装解决方案，为客户群提供一系列全面的 LED 和激光器平台，以满足其特定的市场需求和应用需求。

杉岩数据
SANDSTONE

产线质检数据存储管理领导厂商

领先智造企业质量提升的共同选择

深圳市杉岩数据技术有限公司
是领先的海量数据存储与管理解决方案提供商，国家高新技术企业、国家级专精特新“小巨人”企业，其产品已在高端制造、金融科技、党政、能源、电信等10余个行业**1500+**客户实现大规模商用部署，总交付容量超**6000PB.**



您是否遇到过这些问题？

1 品质/工艺管理
数据检索维度少，效率低，问题定位难？

2 产线操作
机台数量多，数据管理繁琐？

3 数据中心运维
存储空间不足，管理运维难，成本高？

杉岩数据产线质检数据存储管理解决方案，面向

六大细分行业

- 半导体
- 动力电池
- 液晶面板
- 光伏
- 3C电子（含零部件）
- EMS

三大场景

- 数据检索/标识/定位场景
- 数据采集/汇聚场景
- 数据存储利用场景

解决您的产线质检数据管理难题，实现降本、提质、增效！

更高效质量管理

- **人工复审更快捷**
  文件秒级检索，效率提升百倍
- **质量追溯更及时**
  数据极速打包下载，业务少等待
- **工艺提升更精准**
  灵活标签，准确定位，分析更精准

更敏捷数据管理

- **机台管理更省心**
  统一监控，统一部署/升级，省时省力
- **数据管理更敏捷**
  自动分层到磁带库；元数据快速查阅
- **权限管理更清晰**
  细粒度权限分级管控，个性化灵活使用
- **快速适配多业务**
  高效协同对接YMS、MES等生产业务系统

更低TCO

- **存储成本更低**
  图片压缩转换可缩小**90%**，节省存储成本**60%+**
- **工作更有价值**
  自动化替代降低**90%**低效投入，工作更聚焦
- **运维投入更少**
  万级机台集中运维，减少**30%**现场IT人力投入
- **投资成本更省**
  数据全生命周期管理，免备份系统，TCO更低

格芯 GaN 晶圆厂将受益于 15 亿美元的《芯片与科学法案》资金

作为美国《芯片与科学法案》的一部分，美国商务部宣布计划向格芯提供 15 亿美元的直接资金。这笔投资将使格芯扩大并建立新的制造能力和产能，以满足汽车、物联网、航空航天、国防和其他重要市场所需的 GaN 芯片。格芯是首家获得《芯片与科学法案》大额资金（超过 15 亿美元）的纯晶圆代工厂商，该法案旨在加强美国的半导体制造、供应链、国家安全。部分拟议资金将为建立美国首家能够大批量制造下一代 GaN 半导体的工厂提供支持，所制造的 GaN 半导体将用于电视、电网、数据中心、5G 和 6G 智能手机、其他关键技术。新工厂将位于格芯连续运营时间最长的晶圆厂所在地，即佛蒙特州 Essex Junction 的 200mm 工厂。2023 年 10 月，GaN 项目还获得 3500 万英镑美国政府资金。

15 亿美元投资还有助于格芯升级并扩大佛蒙特州现有工厂的产能。此外，这笔投资还将用于格芯纽约州马耳他的工厂，利用其新加坡工厂和德国工厂已在生产的技术，为美国汽车行业提供服务。总体而言，根据市场要求和需求，格芯计划在未来 10 多年里，通过公私合作伙伴关系，在联邦和州政府以及包括关键战略客户在内的生态系统合作伙伴的支持下，为其两个美国基地投资 120 多亿美元。格芯总裁兼首席执行官 Thomas Caulfield 表示：“这些拟议的投资以及半导体制造的投资税收抵免（ITC）是格芯故事和我们行业下一篇章的核心。它们还将在提高美国半导体生态系统的全球竞争力和复原力方面发挥重要作用，并巩固纽约首都地区全球半导体枢纽的地位。随着新的陆上产能和技术的出现，作为一个行业，我们现在需要把注意力转向增加对美国制造芯片的需求，以及发展优秀美国半导体劳动力上。”

美国商务部部长 Gina Raimondo 表示：“从我们的手机、冰箱、汽车、最先进的武器系统，半导体无所不在，使用半导体对经济和国家安全具有重要影响。在 COVID-19 疫情期间，正是半导体短缺抬高了消费者购买的价格，并导致全国各地的汽车制造厂停产。得益于《芯片与科学法案》，我们正在努力将这些关键技术转移到岸，以加强国内芯片的供应，其中芯片对纽约州、佛蒙特州、全国各州制造汽车、电子产品、国防系统至关重要。”为了吸引和培养纽约州和佛蒙特州所需的半导体人才储备管道，格芯公布了一项新的学生贷款偿还计划，帮助在职员工和新员工偿还学生贷款债务。这项新的福利计划是公司数百万美元投资的一部分，旨在帮助公司现在和未来的员工减轻接受高等教育和培训的经济负担，进而加强半导体人才队伍建设。格芯还与美国全国的大学及社区大学合作，帮助建立多元化的劳动力队伍和半导体人才储备管道。格芯获得《芯片与科学法案》资金后，将利用部分资金继续投资和发展新的劳动力发展工作，包括课程开发、实习和学徒计划、K-12 STEM 外展服务以及其他教育和培训计划。

苹果 microLED 手表计划摇摆不定

LED 巨头艾迈斯欧司朗突然宣布终止与苹果的重要 microLED 合作，作为苹果唯一的芯片供应商，这给备受期待的 microLED 版 Apple Watch 的推出带来巨大不确定性。TrendForce 指出，Apple Watch 的原始供应商包括艾迈斯欧司朗（其马来西亚 8 英寸工厂供应 microLED 垂直芯片）和韩国面板巨头 LG Display（供应玻璃驱动背板和大规模转移工艺）。现在，随着合作关系的解除，原计划 2026 年首次亮相的 microLED Apple Watch 似乎越来越遥不可及。TrendForce 报告称，microLED Apple Watch 正处于多事之秋。首先，供应链的稀缺性正将 microLED 面板成本推向高位，可能是同尺寸 OLED 面板的 2.5 至 3 倍。其次，艾迈斯欧司朗的小型 microLED 垂直芯片虽然节省成本，而且有利于冗余设计，但需要更高的传输精度，对大规模生产构成了另一个关键瓶颈。第三，microLED 仍然缺乏专用的驱动架构，使得 Micro IC 或 TFT 解决方案悬而未决。不过，希望并未破灭。TrendForce 仍持乐观态度，针对苹果为何会继续进军 microLED 技术，列举出了三个令人信服的理由。首先，在 microLED 芯片、背板、相关转移工艺方面，台湾和韩国拥有强大的制造商阵容，他们随时准备填补空白，为苹果寻求新的供应链合作伙伴提供了机会。其次，苹果对 microLED 创新的承诺体现在其广泛的专利组合上，包括集成显示器和传感器元件以及基于 microLED 的柔性显示器。放弃这些创新可能会违背苹果一贯强调的价值观。最后，作为备受瞩目的新型显示技术，microLED 的潜力不仅限于手表，还可应用于头戴式 AR 设备，因此仍是苹果中长期产品多元化战略的创新型新技术。总体而言，TrendForce 强调，microLED 技术目前还处于早期发展阶段。苹果等行业巨头的参与极大地推动了整个行业的积极进步。值得注意的是，未来 2 到 3 年内，将 microLED 集成到手表等产品中可能会成为旗舰应用。随着潜在出货量达到数百万台，这一发展有望在塑造行业未来方面发挥至关重要的作用。

Wolfspeed 报告称第二季度设计采纳创下新高

Wolfspeed 公布了 2024 财年第二季度业绩，并报告称该季度的设计采纳价值 29 亿美元，创下新高，其中 75% 以上涉及汽车应用。第二季度总收入为 2.084 亿美元，上季度为 1.738 亿美元。莫霍克谷工厂贡献了 1200 万美元的收入，是上季度的三倍。Wolfspeed 首席执行官 Gregg Lowe 表示：“我们为本季度的业绩感到自豪，这反映了我们对战略的有力执行，并巩固了我们对 Wolfspeed 和 SiC 未来的愿景。我们在莫霍克谷的工厂取得了长足的进步，收入连续增长了两倍。我们成功扩大了 200mm 晶圆的生产规模，并继续在 200mm 衬底上对高品质电动汽车产品进行质检，这些都是满足客户持续需求的关键步骤。设计采纳达到创纪录的 29 亿美元，且主要涉及多个原始设备制造商的电动汽车领域，就证明了这一点。”Gregg Lowe 继续说：“设计成果转化为显著的设计采纳，促使我们坚定不移地追求长期目标。这坚定了我们对电气化趋势的信心，而电气化趋势越来越依赖于 SiC 技术的广泛应用。我们是这一变革时代的先行者，正朝着更加电气化和高效的未来迈进。”

对于 2024 财年第三季度，Wolfspeed 的目标是将持续经营收入控制在 1.85 亿美元至 2.15 亿美元之间。预期 GAAP 持续经营净亏损为 1.34 亿美元至 1.55 亿美元，每股摊薄亏损 1.07 美元至 1.23 美元。Wolfspeed 表示，作为扩大生产规模以支持预期增长的一部分，公司正在建设或扩建尚未开始创收生产的工厂，因此产生了大量工厂启动成本。Wolfspeed 在 2024 财年第二季度产生了 1050 万美元的工厂启动成本和 3560 万美元的未充分利用成本。2023 财年第二季度没有产生未充分利用成本。2024 财年第三季度的运营支出预计将包括约 1300 万美元的工厂启动成本，主要与材料扩张工作相关。



设计采纳价值29亿美元，其中75%以上涉及汽车应用



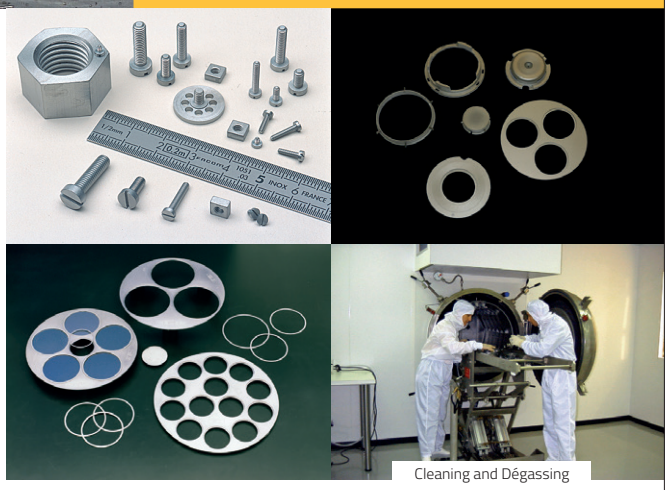
Large stock of Molybdenum and Tantalum

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

  Possibilitiy of substrate support with cavity and washer, on request and according to drawings
- Stock of platens blanks for all types of MBE from various manufacturers.
- « Usable in clean rooms » Platens and washers produced according to drawings.



Cleaning and Dégassing

RABOUTET SA

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

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

www.raboutet.fr

化合物半导体产业全新风向标
2024 九峰山论坛暨化合物半导体产业博览会圆满落幕

4 月 9 日 -11 日，2024 九峰山论坛（JFSC）暨化合物半导体产业博览会 (CSE) 在武汉举行。在学术权威高峰论坛 JFSC 上，共有 9 位国内外院士、800 多名国内外企业家代表齐聚武汉，超过 180 余位嘉宾在 30 余场专业论坛上分享行业报告。同时，作为化合物半导体产业最高规格展览，2024CSE 还设有超万平化合物半导体展区，来自全球超过 10 个国家的 200 多家企业参展，超过 2 万人次观众观展参会。



研发服务体系首发 全球领先成果亮相 产业生态聚合

九峰山实验室精彩亮相 CSE

作为湖北省十大实验室之一，九峰山实验室以建设先进的化合物半导体研发和创新中心为愿景。2023 年 3 月投运以来，实验室全面转入发展跃升期，接连迎来关键技术新突破。本次展会现场，实验室发布 2024 研发服务体系，首次展示全球首片 8 寸硅光薄膜铌酸锂光电集成晶圆，由实验室各领域首席科学家带领的科研团队进行了 11 场技术报告，分享最新研究进展。



九峰山实验室超净间实景

九峰山实验室 2024 研发服务体系首次发布

九峰山实验室主任丁琪超现场发布 2024 研发服务体系。丁琪超介绍，实验室目前已搭建起完备的材料体系，建设起包含 7 条工艺线在内的量产级研发流片平台、能力全面的先进检测分析平台，已具备以“异质集成”、“先进键合”、“化合物外延”、“集成微波无源器件（IPD）PDK”、“碳化硅（SiC）沟槽”、“PZT 压电 MEMS”为代表的技术服务能力。基于异质集成的未来技术规划方向，实验室推出五个开放式基金课题，期待与更多同仁一起实现相应技术的实现和突破，共同攀峰。



九峰山实验室发布2024研发服务体系

全球首片 8 寸硅光薄膜铌酸锂光电集成晶圆亮相

展会现场，九峰山实验室最新的一批科技成果公开亮相。其中，全球首片 8 英寸硅光薄膜铌酸锂光电集成晶圆是首次公开展出，该项成果可实现超低损耗、超高带宽的高端光芯片规模制造，为目前全球综合性能最优的光电集成芯片。一同展出的还有实验室最新下线的碳化硅沟槽 MOSFET 晶圆等 30 余项最新成果，吸引不少观众驻足咨询。

由实验室各领域首席科学家带领的科研团队进行了 11 场技术报告，分享实验室最新研究进展。九峰山实验室领域首席科学家闫春辉在主旨报告环节分析了“全彩集成氮化物 Micro LED 显示技术”领域的主要挑战，分享实验室研究最新进展；检测中心首席科学家麦志洪对实验室建立的第三代化合物半

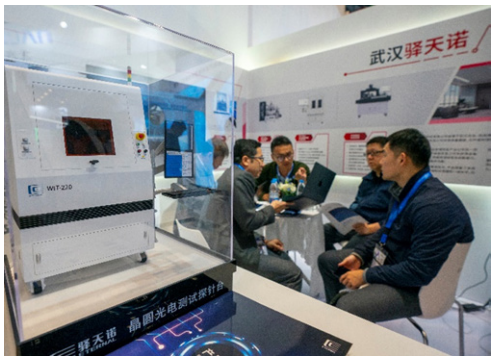


导体材料表征技术能力展开详细介绍；研究中心无线领域首席专家吴畅分享了“毫米波硅基氮化镓的机遇与挑战”；宽禁带材料研究首席专家魏强民则围绕“氧化镓 SBD 界面缺陷分析”展开探讨。

产业生态聚合

成立 3 年来，九峰山实验室联合学界、产业界解决共性关键技术的“堵点”，共同为未来技术难题进行前沿探索和技术攻关，打通全产业链条中的“断点”。本次展会，来自全球的化合物半导体产业链上下游生态伙伴以及科研机构、孵化平台齐聚光谷，共赴盛会。

展会现场，不断有企业提及与九峰山实验室的合作经历。毗邻九峰山实验室展台，是 4 家由实验室产业带动培育发展的企业的展位，武汉驿天诺科技有限公司就是其中一家。这家公司与九峰山实验室合作开发了国内领先的第三代半导体晶圆级检测设备，董事长兼总经理单娜介绍，通过实验室的科研平台，产品量产的进程迅速提升。



成立于 2020 年的上海邦芯半导体科技有限公司，研发出的刻蚀、薄膜沉积设备等产品正是通过与九峰山实验室的合作而顺利通过验证。“正是九峰山实验室的助推，公司成立仅 4 年时间，就实现了多款设备量产。”该公司 CEO 王兆祥说。

作为光电子芯片设计领域一年一会的重要活动，“LUCEDA 光电子芯片设计技术研讨会暨 2024 全球用户大会”把会场搬到了 CSE 现场。华工科技将“碳化硅检测系列新品发布会”设在了展会现场。



同期举办的LUCEDA光电子芯片设计技术研讨会暨2024全球用户大会

“实验室目前拥有 70 多家产业链上的合作伙伴，他们可以在这里验证材料、催熟设备、研发软件等，推动产业化应用。”九峰山实验室主任丁琪超介绍，实验室希望与更多合作伙伴一同点亮全球化合物半导体平台、技术、产业的“灯塔”。

九峰山论坛大咖云集

9 位国内外院士领衔出席、180 余位嘉宾分享行业报告

本届博览会的重头戏——“九峰山论坛”采取“1 主 +8 专 + 多场行业专题会 + 多场展边会”模式。9 位国内外院士领衔出席开幕式，会期共 180 余位嘉宾在 30 多场系列活动上分享行业前沿报告，议程可谓相当充实。



行业专题会与展边会现场图

开幕式上，中国工程院院士、国家新材料产业发展专家咨询委员会主任干勇表示，当前我国化合物半导体产业链基本形成，有机会形成有国际竞争力的产业体系。加强全球产业链供应链的协作，仍然是半导体产业发展的重要路径。

第三代半导体产业技术创新战略联盟理事长吴玲发布《第三代半导体产业发展报告（2023）》。她指出，2023 年，伴随半导体产业逐渐复苏，以及电动汽车、新能源等应用市场的蓬勃发展，国内第三代半导体技术和产业取得显著进步。

本届九峰山论坛设有八大平行论坛，覆盖化合物半导体关键材料、化合物半导体核心装备、EDA 工具与生态链、光电子技术、功率电子技术、无线电子技术、先进半导体检测技术与标准、化合物半导体投融资趋势等重点方向，深入探讨产业链关键环节相关重点技术发展进展与前沿趋势，传递最新技术发展信息，寻找新的动力源泉，促进产业链不同环节协同创新。

此外，展会期间，LUCEDA 光电子芯片设计技术研讨会暨 2024 全球用户大会、Lightcounting 行业分析报告会、是德科技化合物半导体培训会、讯石传感创新发展论坛、2024 世界碳化硅大会等一系列行业专题会及展边会也同期举行。

化合物半导体最高规格展

10 多个国家 200+ 企业参展　一批全球首创产品集中亮相

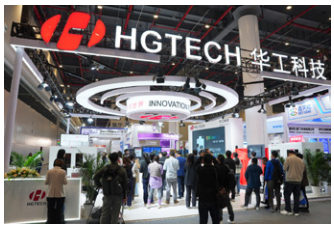
CSE 展会现场，超万平方米展会面积吸引了来自全球 10 多个国家的 200 多家企业参展。参展单位覆盖半导体材料、设备、检测、设计、制造及封测、终端应用等全产业链及科研机构与孵化机构平台。其中，多家国际顶级展商是首次亮相中国展会。众多国际龙头企业齐聚中国展示最新技术与产品，这在全球化合物半导体领域内也是首次。



CSE展会现场图



CSE展会现场图



华工科技展位



九峰山实验室展位

与会嘉宾观点



干勇
中国工程院院士、国家新材料产业发展专家咨询委员会主任

当前我国化合物半导体产业链基本形成，有机会形成有国际竞争力的产业体系。加强技术研究和原始创新，实现关键核心技术突破，同时坚持加强全球产业链供应链的协作，仍然是半导体产业发展的重要路径。



尤政
中国工程院院士、华中科技大学校长

智能微系统具有尖端科技深度交叉融合，高集成度、高性能等特点。物联网、航空航天、医疗健康都是其发展驱动力，MEMS、光电子、3D 异质 / 异构集成技术是其发展的核心要素。智能微系统是一种新质生产力的使能技术，为相关传统产业跨越式发展提供新机遇。



Viorel Dragoi
EV Group首席键合科学家

等离子体激活键合和室温共价键合两种工艺类别对于化合物半导体键合以及将化合物半导体集成到 Si 技术中用于光子应用都非常有前途。



刘煊杰
芯联集成电路制造股份有限公司执行副总裁

新能源汽车向电动化、智能化发展，电动化正迎来新一代技术突破。SiC 从根源上提高电驱功率转化效率，实现整车效率飞跃。SiC 特性使 800V 超充成为可能，满足特定应用场景需求。借鉴新能源汽车发展路径，中国 SiC 产业有望实现换道超车。



吴玲
第三代半导体产业技术创新战略联盟理事长

化合物半导体产业是我国在全球半导体产业竞争格局重构过程中一个重要的突破口，既要补短板，也要锻长板，期待能尽快形成发展合力，打通产业链断点堵点，用 10 年时间全链条进入世界先进行列。



刘胜
中国科学院院士、武汉大学教授

电力电子器件及模块产业链条长、可靠性要求苛刻，传统试错验证选代的方法难以达到 ppb 级质量要求，数字孪生技术与 DFX 工程方法的结合，能帮助芯片及封装企业快速产品选代实现极致可靠的产品目标，在工艺生产、新型材料研发与改良、创新性装备开发上也能很好的应用。



荣海生
英特尔研究院资深首席工程师

用于 AI/ML 的高带宽计算互连将需要光学 i/o，硅光子学是实现高带宽和高能效的光学 i/o 的理想平台。异质集成使不同的光子功能完全集成在硅光子平台上，具有高可靠性和可制造性。集成激光器和放大器的硅光子学在光通信和光互连等领域有着广泛的应用。



黄伯宁
华为数字能源技术有限公司首席科学家

工业革命伴随着能源革命，绿色低碳智能世界加速到来。碳中和引发能源生产和消费革命，同时带来各行各业升级换代机会，SiC 为代表的化合物功率器件与绿色能源产业需求高度共振。



惠峰
云南锗业公司首席科学家

绿色低碳发展，万物智能互联成为全球共识，5G、人工智能、新能源等发展提速，市场驱动需求猛增。砷化镓和磷化铟的光模块和射频器件是目前发展的热点。磷化铟、砷化镓衬底大直径低位错关键技术突破进程加快，高品质、高均匀性性、低缺陷衬底需求剧增。磷化铟、砷化镓衬底材料需要提高合格率、降低成本。



熊文
华工科技产业股份有限公司党委委员、副总裁

基于 InP/GaAs 化合物半导体的高速光芯片是高速连接的引擎。高速数通光模块的迭代与数据中心架构升级相辅相成。流量数据的高速增长，不断推动数据中心架构升级。数据中心内外部互连正在向 400G 快速升级，800G 已成为全新需求，应用在超大规模数据中心、云计算及人工智能算力中心中。1.6T 光模块在 2024 年进入公众视野，3.2T 也在悄然酝酿之中。



Frank Heidemann
National Instruments (NI) 全球副总裁，技术负责人

汽车行业需要一个通用的、可接受的、精确的、针对特定应用的可靠性标准，AQGs 工作组正在与全球标准化机构进行长期和深入的交流，以使行业具有最大的价值。



刘国友
株洲中车时代电气股份有限公司中车科学家

功率半导体是电能转换与控制的核心芯片，是支撑交通与能源领域“双碳”战略的基础。主要技术挑战涉及“低功耗芯片 + 异构封装”带来的高电压、大电流、高耗散功率、高温可靠性等以“热”为中心的一系列科学与技术问题。

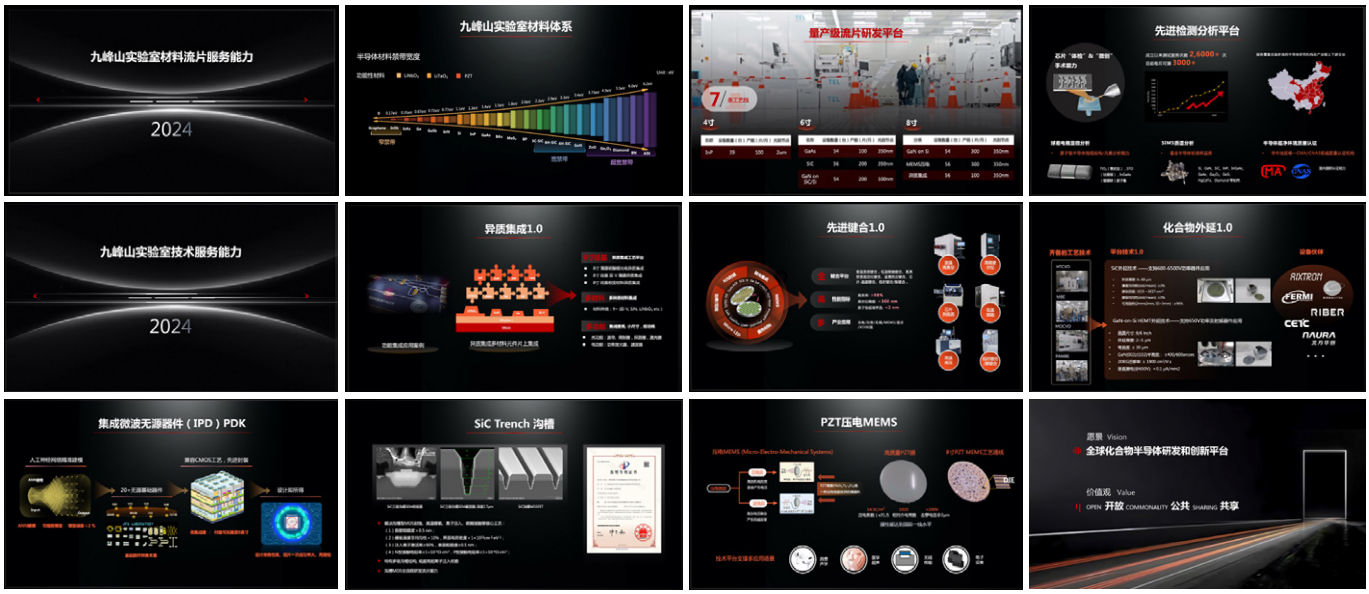


闫春辉
九峰山实验室领域首席科学家

人工智能时代，Micro-LED 是智能交互的重要端口，是连接现实世界和虚拟世界的窗口。未来显示技术中，显示与传感融合，万物互联，一切皆可屏。

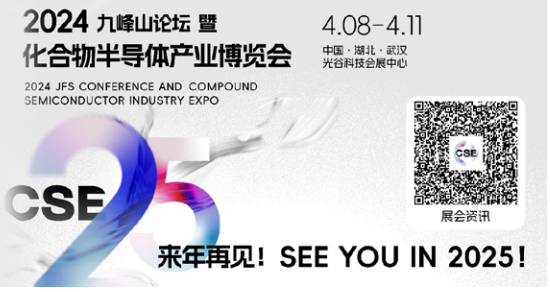
九峰山实验室 2024 研发服务体系

2024 九峰山论坛暨化合物半导体产业博览会现场，九峰山实验室发布了 2024 研发服务体系。同时，基于异质集成的未来技术规划方向，实验室推出五个开放式基金课题，期待与更多同仁一起实现相应技术的实现和突破，共同攀峰。



关于 CSE

九峰山论坛暨化合物半导体产业博览会（CSE），打造全球化合物半导体产业风向标。CSE 每年定期举办行业最高规格展会及专业高峰论坛（JFSC），为学术界及全产业链提供高效的交流和展示服务平台，积极推动科学进步及化合物半导体产业发展。



氮化镓毫米波功率器件与电路研究进展

作者：祝杰杰，王鹏飞，秦灵洁，杜翔，易楚朋，周钰晰，马晓华，郝跃
(1. 宽禁带半导体国家工程研究中心，西安 710071; 2. 西安电子科技大学微电子学院，西安 710071)

摘要：氮化镓毫米波功放具有工作频率高、输出功率大、功率转换效率高等优势，在新一代移动通信、高分辨毫米波成像雷达等领域具有广阔的应用前景。本论文从碳化硅基氮化镓毫米波器件、硅基氮化镓毫米波器件、E-W 波段氮化镓毫米波器件和氮化镓 MMIC 电路等四个方面对国内外氮化镓毫米波功率器件与电路的发展进行了总结。最后，提出了未来在 Ka-W 波段高性能氮化镓毫米波器件与电路、硅基氮化镓毫米波器件及集成技术、超高频氮化镓方面开展更深入研究的建议。

引言

毫米波指的是频率范围 30-300GHz 的电磁波，5G 通信、卫星通信和毫米波雷达等应用场合都需要用到毫米波波段。相比于射频与微波频段，毫米波频段的竞争力一方面表现在其极为丰富的频谱资源和大气吸收特性，这使得工作于大气窗口的收发机拥有大带宽，而工作于大气吸收峰的收发机不易被窃听；另一方面在于，毫米波频段的电路尺寸往往很小，可以实现单片微波集成电路（MMIC），其高集成度优势使得系统便于携带和隐藏。然而，相比于低频段，如此高频率的工作场合给电路和系统的设计带来了诸多挑战，尤其是功率放大器（PA）的设计，其主要指标包括输出功率 Pout、增益（Gain）、功率附加效率 PAE、带宽（BW）和线性度等。

常见的半导体工艺如 GaAs、InP、SiGe 和 CMOS 等都有成熟的工艺和良好的高频特性，可用于毫米波 MMIC PA 设计。对于发射机来说，其一大核心指标是覆盖范围，它由天线增益和 PA 输出功率共同决定，尽管总发射功率可以通过大量 PA 功率合成来实现，但晶体管的功率密度才是决定性因素。相比于以上工艺，化合物半导体中的 GaN HEMT 工艺在功率密度、效率和带宽这三方面具有优势，GaN HEMT 器件中的二维电子气（2-DEG）使得其可以工作在毫米波至亚毫米波频段，而 GaN 材料的宽禁带特性使得器件具有高功率密度。图 1 是各种工艺之间的对比，可以看到 GaN 工艺优势明显。

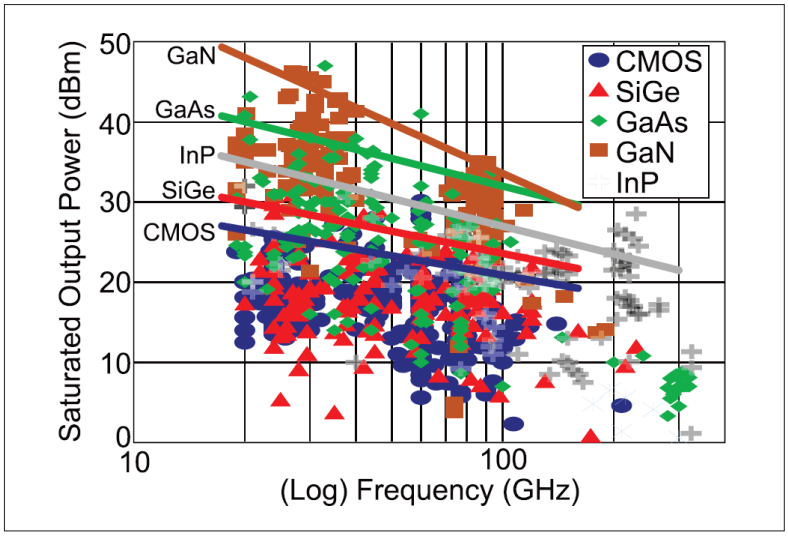


图1：常见半导体技术在微波毫米波功率应用中的性能对比。

SiC 基 GaN 毫米波功率器件研究进展

对于毫米波频段的功率放大器而言，输出功率、效率以及线性度是三个重要的指标。目前国外的 HRL 实验室、UCSB、IEMN 以及国内的西安电子科技大学、中电 55 所、中电 13 所、中科院微电子所等单位在氮化镓毫米波功率器件的功率、效率、线性度提升方面开展了大量研究工作。

• 氮化镓毫米波器件功率性能提升

2001 年南卡罗来纳州立大学首次报道了栅长为 0.12μm 的 GaN 毫米波功率器件，在 29GHz 下测得输出功率密度超过 1W/mm[1]。2004 年日本 NEC 公司制作出 1mm 的大栅宽器件，测得毫米波频段的输出功率密度为 5.8W/mm [2]。此后 GaN

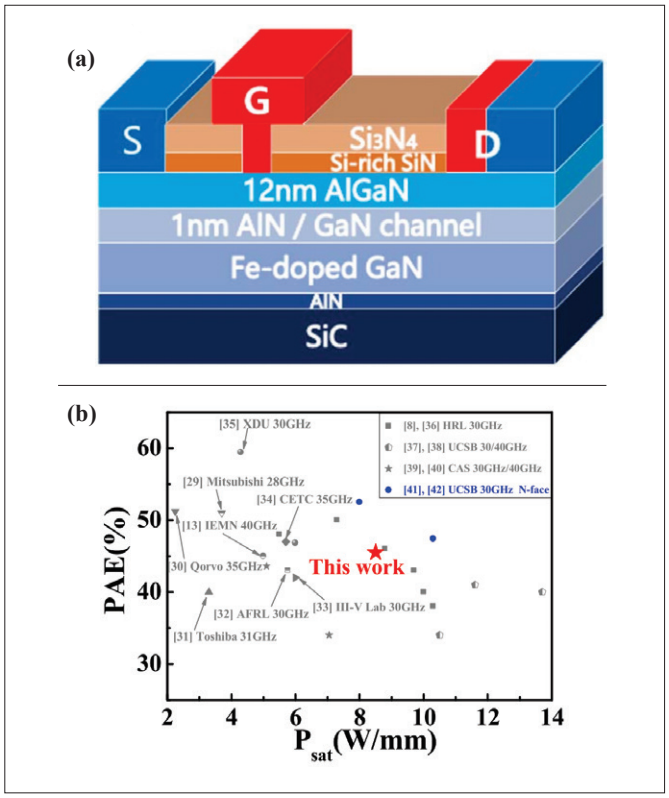


图2：(a) 器件结构示意图； (b) Ka 波段毫米波功率GaN 器件的指标对比[6]

毫米波器件从材料、工艺和器件设计等方面不断优化，其功率性能也不断得到提升。如，法国的 IEMN 研究所在 2018 年利用 C 掺杂的缓冲层技术制备了面向 Ka 波段的功率器件，在 40GHz 脉冲测试下 25V 时的饱和输出功率达到 7W/mm [3], 该单位又于 2019 年利用 3nm 左右的 AlN 势垒层，制备得到的毫米波器件在在 40GHz 脉冲测试 Vds=40V 下的输出功率密度进一步达到 8.3W/mm [4]。美国 UCSB 于 2021 年利用 N 极性 GaN 异质结，使得毫米波 GaN HEMT 的饱和输出功率密度达到 10.3W/mm。2022 年美国雷神公司采用晶格匹配的 ScAlN 势垒层结合 AlGaN 帽层钝化技术实现 40V 下 10.8W/mm@30GHz 的功率密度 [5]。国内西安电子科技大学围绕毫米波 GaN HEMT 的功率特性开展了一系列原创性研究，采用如图 2（a）所示的富硅 SiN/Si3N4 双层钝化工艺和肖特基欧姆复合漏结构，有效抑制了功率器件的电流崩塌效应以及栅脚处的峰值电场，在 30 GHz，30V 工作电压下输出功率密度达到 8.5W/mm，峰值 PAE 为 45.5% [6]，由图 2(b) 可知，其研究结果与国际先进指标达到基本同步的水平。

• 氮化镓毫米波器件效率性能提升

2010 年美国空军实验室采用晶格匹配的 InAlN 势垒材料制作出饱和电流接近 1.4A/mm 的器件，在 20V 工作电压下的峰值 PAE 达到 43.6% @ 35GHz [7]。2016 年 III-V 实验室的 R. Aubry 等人采用 6.4nm InAlGaN 势垒和 AlGaN 背势垒器件结构制作出栅长为 150nm 的毫米波器件，在 30GHz 工作频率和 Vds = 20 V 下的峰值 PAE 为 42% [8]。2019 年法国 IEMN 研究所的 K. Harrouche 等人制备了 3nm 势垒厚度的 AlN/GaN HEMT 器件，在 40GHz 脉冲测试 Vds = 10 V 下的峰值 PAE 为 65 %。2020 年 HRL 实验室的 J. S. Moon 等人采用超薄势垒加缓变沟道的结构设计，在 30GHz 工作频率，Vds = 10 V 下的峰值 PAE 达到 75%，该指标也是目前毫米波器件的效率最高值 [9]。

• 氮化镓毫米波器件线性度性能提升

随着 GaN 射频技术研究的不断深入，其非线性特性引起的信号失真问题日益凸显，考虑到系统集成度以及功耗等系列问题，器件级线性化技术成为了重要的发展趋势。目前已经有双沟道结构、缓变势垒结构、纳米线沟道结构、场板调制结构以及 MIS-HEMT 结构等线性化技术被相继提出，但考虑到毫米波频段的应用需求，鲜有以上技术在毫米波频段下的应用实例。目前，美国 UCSD 的 Woojin Choi 等人将不同宽度的 Fin 结构集成在单只晶体管上，在 30GHz 下实现 OIP3/PDC ≥ 8.2 dB，但输出功率密度只有 0.57 W/mm [10]。UCSB 在 2021 年采用 N 极性异质结，在 30 GHz 下的 OIP3/PDC 达 6.7 dB，输出功率密度达到 10.3W/mm，同时实现了高线性和大输出功率密度 [11]。西安电子科技大学基于阈值耦合技术的高线性毫米波 GaN 器件开展了多年研究，利用如图 3 所示的阈值耦合结构，使得器件的线性指标 OIP3 改善了 7.5 dB。

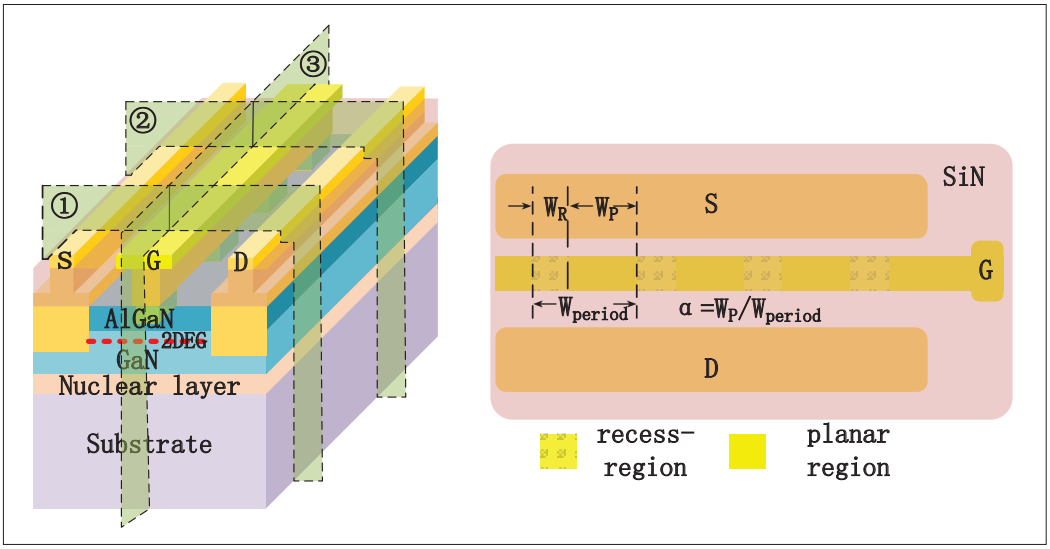


图3：阈值耦合结构氮化镓毫米波器件示意图

Si 基 GaN 毫米波器件发展趋势

氮化镓射频功放器件作为国防装备、卫星通讯、移动通信基站射频前端系统的核心器件，有力推动了电子装备信息系统和 5G 技术的发展。随着通信和感知应用向更高频率、更大带宽、更高数据传输速度方向发展，终端、微基站用射频前端系统对高性能射频芯片提出了新的需求。硅衬底上氮化镓射频技术可兼具芯片性能、架构、成本等优点，非常有利于推动氮化镓射频技术未来的大规模应用，在 5G 终端与基础设施、低轨宽带卫星通信、云计算数据中心等领域具有广阔应用前景。

面向未来高频宽带移动通信终端和基础设施对高性能硅基氮化镓毫米波芯片的需求，需突破硅基强极化异质结外延材料、CMOS 兼容的氮化镓毫米波器件工艺、低压氮化镓毫米波功放及集成芯片设计等关键技术，实现片上集成的硅基氮化镓毫米波芯片。这对于解决终端用射频前端芯片面临的带宽和效率瓶颈、功能与尺寸之间矛盾等难题具有重要意义。在移动通信基站射频前端芯片发展面临饱和的大背景下，该研究将进一步拓展氮化镓射频技术的应用潜能，并极大推动相关新兴领域的发展。

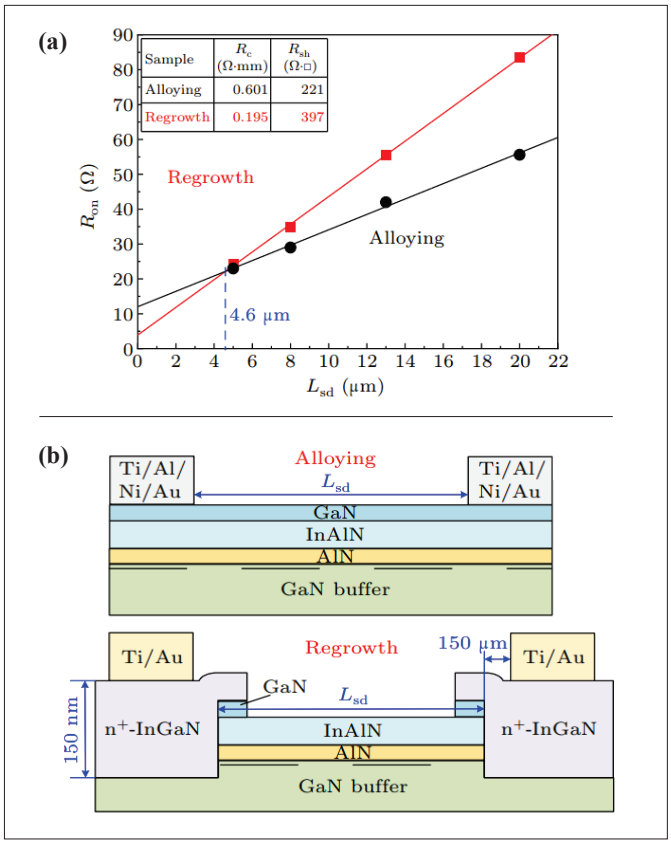


图4：(a) 利用合金欧姆接触技术和欧姆再生长接触技术的器件结构简图 (b) 利用合金欧姆接触技术和欧姆再生长接触技术器件的TLM测试结果与拟合曲线

近年来西安电子科技大学在氮化镓的 CMOS 兼容制备工艺和终端应用的低压氮化镓射频器件方面取得了一系列突破。通过采用二次外延欧姆再生长技术，可以更加精确地减小器件的源漏间距，改善常规合金欧姆接触工艺中高温退火引入的金属的横向扩散问题。2023 年，西安电子科技大学通过采用二次外延技术，利用 MOCVD 在欧姆区域再生长 n+InGaN，制备了 GaN 基 HEMT。与合金欧姆接触方式相比，该技术有效的减小了器件的欧姆接触电阻。如图 4 所示，欧姆接触电阻从 0.60 Ω·mm（高温合金欧姆）减小到 0.2 Ω·mm（欧姆再生长）。

面向终端应用的强极化异质结材料和小尺寸器件设计给实现增强型工作带来了更大的障碍，这不符合终端用射频前端芯片设计紧凑化、简易化的发展需求。实现低损伤高效率的增强型器件，是氮化镓技术在终端应用领域中面临的重要挑战。西安电子科技大学利用强极化超薄势垒材料 AlN 作为 GaN 基 HEMT 器件的势垒层。采用对栅下的势垒层进行远程低损伤氧等离子氧化以及 Fin 结构刻蚀的方式，有效的减小了栅下二维电子气浓度，增加了栅极对沟道的控制能力，提高了器件的阈值电压，实现了器件的增强。图 5 展示了通过 Fin 结构的刻蚀并利用氧等离子体氧化栅下超薄势垒材料，得到的高击穿、高效率的增强型器件的特性表征。

E-W 波段 GaN 毫米波功率器件

美国国防研究计划总局 (DARPA) 首次在其设立的 NEXT 项目中提出开发创新型的外延结构和工艺，目标是将器件尺寸缩小到极致，以推动 GaN 基毫米波功率器件逼近性能的极限[12]。这一项目的设立成功催化了大量创新型技术的诞生，也将 GaN HEMT 的工作频率推至 E-W 波段。

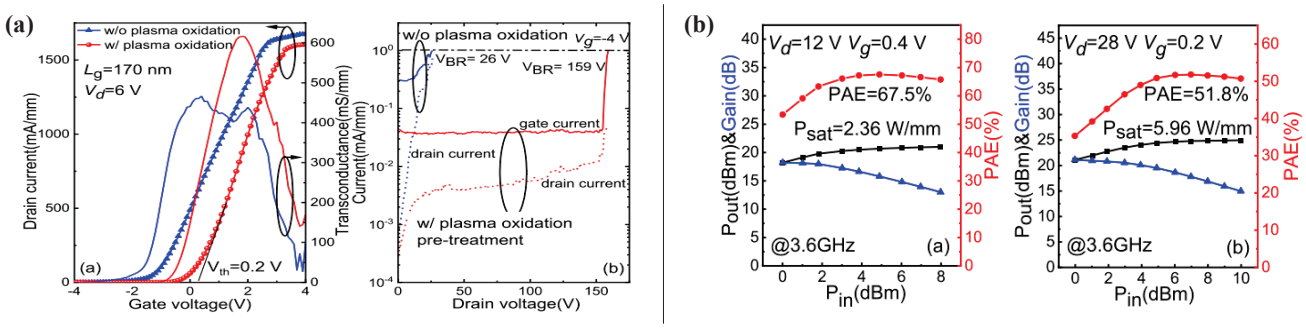


图5：(a) 三维栅AlN/GaN HEMT器件的转移和击穿特性图 (b) 三维栅AlN/GaN HEMT器件的功率特性

在 DARPA 的支持下，2010-2019 年间，美国 HRL 实验室就器件频率特性的提升开展了大量的研究，经历了三次迭代，落实了包括超薄 AlN 势垒、欧姆再生长、自对准浮空 T 型栅在内的多项关键技术。2011 年所制备器件的关键尺寸已达到栅长 20nm，源漏间距 0.1μm 的水平 [13]。2013 至 2015 年间，截止频率 (fT) 和最大振荡频率 (fmax) 分别被优化到了 454 GHz [14] 和 582GHz [15] 的水平。之后，A. Margomenos 等人报导了基于超高频器件的 MMIC 电路，在 83GHz 下实现 1.37W 的输出功率，峰值 PAE 达到 27% [16]。

在 NEXT 项目的推动下，器件的频率特性几乎已经被开发到极限，更多的关注点集中在 GaN HEMT 的功率、效率和线性度等多项关键指标的兼容与折中。在此基础上，DARPA 提出了新一阶段的 DREaM 项目。这一项目催化的较为典型的技术是 N 极性面 GaN HEMT 器件。W 波段（94GHz）下，N 极性 GaN HEMT 在功率密度和效率上的综合表现优于现有 Ga 极性 GaN HEMT。以 UCSB 为代表，2020 年，B. Romanczyk 等人报道的 N 极性 HEMT 器件实现了 8.85W/mm 的输出功率密度，相应的功率附加效率达到 27% [17]。2021 年，W. Liu 等人在 N 极性 HEMT 器件上实现了 33.8% 的效率，输出功率密度达到 6.2W/mm [18]。之后，W. Li 等人在蓝宝石衬底上制备 N 极性 GaN 实现了 2.6W/mm 的输出功率密度和 43.8% 的效率 [19]，以及 5.8W/mm 的输出功率密度和 38.5% 的效率 [20]。另一方面，HRL 实验室的 J. S. Moon 等人在 DREaM 项目中延续了对 Ga 极性 GaN HEMT 的研究，提出一种缓变沟道 GaN HEMT（GC HEMT）。较常规 AlGaN/GaN HEMT，缓变沟道层的引入使器件的线性度和效率都有了突破性进展，在 30GHz 下 OIP3 达到 36dBm, OIP3/Pdc 达到 17.5dB [21]，PAE 最高达到 78% [22]。在 W 波段应用上，GC HEMT 实现了 2.2W/mm 的输出功率密度，峰值 PAE 达到 50%。这一效率指标与 UCSB 最新报导的 PAE=50.2% [23] 的结果相媲美。

西安电子科技大学 [24] 在 2021 年报导了 fT/fmax=157/334GHz 的频率指标，采用电子束光刻技术实现半浮空 T 型栅，栅长达到 70nm，所制备的器件在 30GHz 下 PAE 最高能达到 53.8%，输出功率最大能达到 4.6W/mm。2022 年 [25]，西电报导了一款浮空倾斜场板栅器件，栅长达到了 60nm，实现 fT/fmax=177/393GHz，30GHz 下 PAE 最高能达到 52.5%，输出功率最大能达到 4.6W/mm。此外，中科院半导体所 [26-27] 在蓝宝石衬底上制备的 InAlN/GaN HEMT，先后实现了 fT/fmax=190/301GHz 和 fT/fmax=156/423GHz 的频率特性指标。

GaN 毫米波 MMIC 功放电路

受限于晶体管的物理极限和半导体的工艺限制，毫米波 GaN MMIC 难以实现和低频 RF PA 一样的高功率，高效率和大带宽特性，一些低频 PA 诸如推挽式和 E 类功放等设计方法也难以应用到毫米波 MMIC 上。同时，由于损耗的增加，GaN HEMT 的输出功率和效率在毫米波频段内降低。在毫米波频段中，无源元件的损耗也较高。因此，在毫米波频段实现高输出功率更具挑战性。以下总结了目前在毫米波频段内 GaN MMIC 功放的代表性指标。

在 40GHz 频率下，采用 100-nm GaN/Si HEMT 工艺制作的 MMIC PA，具有 12W 输出功率和 30% 的 PAE（图 6a）；在 75GHz-110GHz 频段内，采用 100-nm GaN/SiC

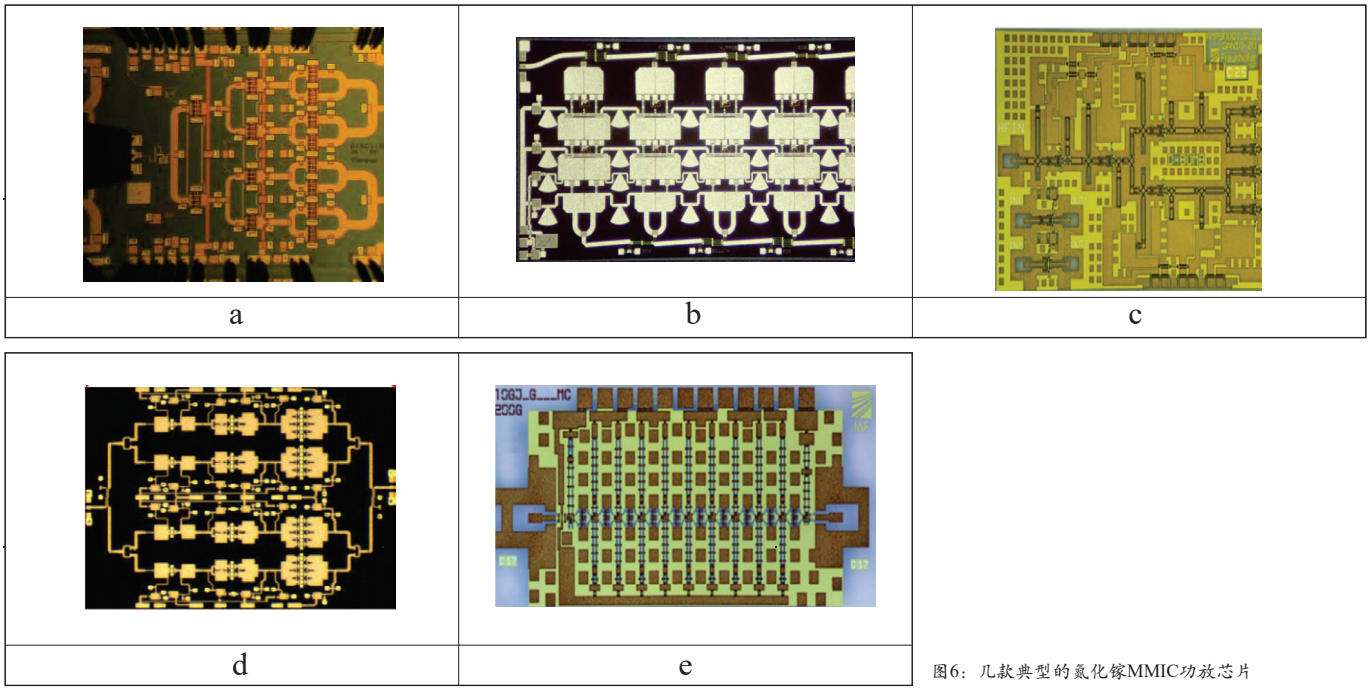


图6：几款典型的氮化镓MMIC功放芯片

HEMT 工艺制作的行波式功率放大器，该功放具有 3W 的饱和输出功率（图 6b）；在 90GHz-97GHz 频带内，采用四路威尔金森和兰格耦合器进行功率合成的功放，该功放采用 100-nm GaN/SiC HEMT 工艺制作，具有 6W 输出功率及 18% PAE（图 6c）；在 120GHz 频率下，具有 430mW 以及 16% PAE 的 100-nm GaN/SiC MMIC PA（图 6d）；以及采用更先进的 70-nmGaN/SiC HEMT 工艺所实现的 MMIC PA，其在 205GHz 具有 70mW 的饱和输出功率（图 6e）。

总结及展望

氮化镓射频功放器件兼具高频率、高功率、高效率、大带宽等多方面的优点，作为射频前端系统的核心器件，有力推动了 5G 通信、卫星通讯等技术的发展。氮化镓毫米波技术未来发展将呈现以下特点：1）面向 Ka-W 波段高性能应用，进一步提高氮化镓毫米波器件的功率、效率、线性度和可靠性；2）面向氮化镓毫米波集成和产业应用需求，重点开展低成本大尺寸的硅基氮化镓毫米波材料、器件及异质集成技术研究，终端用低压氮化镓射频器件与芯片有望成为氮化镓技术应用新的增长点；3）探索新体系材料、新结构器件、新架构电路研究，突破现有氮化镓射频技术的物理极限、工艺极限、损耗极限，继续拓展氮化镓技术应用的频谱范围。CS

扩展阅读

- [1].R. Sandhu et al., “1.6 w/mm, 26% PAE AlGaN/GaN HEMT operation at 29GHz,” International Electron Devices Meeting. Technical Digest (Cat. No.01CH37224), Washington, DC, USA, 2001, pp. 17.5.1-17.5.3, doi: 10.1109/IEDM.2001.979670.
- [2].T. Inoue et al., “30GHz-band 5.8W high-power AlGaN/GaN heterojunction-FET,” 2004 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (IEEE Cat. No.04CH37535), Fort Worth, TX, USA, 2004, pp. 1649-1652 Vol.3, doi: 10.1109/MWSYM.2004.1338902.
- [3].R. Pecheux, R. Kabouche, E. Okada, M. Zegaoui and F. Medjdoub, "C-doped AlN/GaN HEMTs for High efficiency mmW applications," 2018 International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits (INMMIC), Brive La Gaillarde, France, 2018, pp. 1-3, doi: 10.1109/INMMIC.2018.8430021.
- [4].K. Harrouche, R. Kabouche, E. Okada and F. Medjdoub, "High Performance and Highly Robust AlN/GaN HEMTs for Millimeter-Wave Operation," IEEE Journal of the Electron Devices Society, vol. 7, pp. 1145-1150, 2019, doi: 10.1109/JEDS.2019.2952314.
- [5].M. B. Tahhan et al., "Passivation Schemes for ScAlN-Barrier mm-Wave High Electron Mobility Transistors," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 69, no. 3, pp. 962-967, March 2022, doi: 10.1109/TED.2021.3140016.
- [6].J. Liu et al., "High-Performance AlGaN/GaN HEMTs With Hybrid Schottky–Ohmic Drain for Ka-Band Applications," IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 69, no. 8, pp. 4188-4193, Aug. 2022, doi: 10.1109/TED.2022.3182294.
- [7].A. Crespo et al., "High-Power Ka-Band Performance of AlInN/GaN HEMT With 9.8-nm-Thin Barrier," IEEE Electron Device Letters, vol. 31, no. 1, pp. 2-4, Jan. 2010, doi: 10.1109/LED.2009.2034875.
- [8].R. Aubry et al., "ICP-CVD SiN Passivation for High-Power RF InAlGaN/GaN/SiC HEMT," IEEE Electron Device Letters, vol. 37, no. 5, pp. 629-632, May 2016, doi: 10.1109/LED.2016.2540164.
- [9].J. S. Moon, R. Grabar, J. Wong, et al. High-speed graded-channel AlGaN/GaN HEMTs with power added efficiency >70% at 30 GHz. Electronics Letters, 2020,56(13): 578-580.
- [10].W. Choi, “Intrinsically Linear Transistor for Millimeter-Wave Low Noise Amplifiers,” Nano Lett., vol. 20, no. 4, pp. 2812-2820, Apr. 2020, doi: 10.1021/acs.nanolett.0c00522.
- [11].Romanczyk, Brian, et al. “Evaluation of linearity at 30 GHz for N-polar GaN deep recess transistors with 10.3 W/mm of output power and 47.4% PAE.” Appl. Phys. Lett., vol. 119, no.7, pp. 072105, Aug. 2022, doi: 10.1063/5.0058587.
- [12].J. D. Albrecht, T. -H. Chang, A. S. Kane and M. J. Rosker, "DARPA's Nitride Electronic NeXt Generation Technology Program," 2010 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), Monterey, CA, USA, 2010, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSICS.2010.5619581.
- [13].K. Shinohara et al., "Self-aligned-gate GaN-HEMTs with heavily-doped n+-GaN ohmic contacts to 2DEG," 2012 International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, USA, 2012, pp. 27.2.1-27.2.4, doi: 10.1109/IEDM.2012.6479113.
- [14].Y. Tang et al., "Ultrahigh-Speed GaN High-Electron-Mobility Transistors With fT/fmax of 454/444 GHz," in IEEE Electron Device Letters, vol. 36, no. 6, pp. 549-551, June 2015, doi: 10.1109/LED.2015.2421311
- [15].K. Shinohara et al., "Scaling of GaN HEMTs and Schottky Diodes for Submillimeter-Wave MMIC Applications," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 60, no. 10, pp. 2982-2996, Oct. 2013, doi: 10.1109/TED.2013.2268160.
- [16].A. Margomenos et al., "GaN Technology for E, W and G-Band Applications," 2014 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), La Jolla, CA, USA, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSICS.2014.6978559.
- [17].B. Romanczyk et al., “W-band power performance of SiN-passivated N polar GaN deep recess HEMTs,” IEEE Electron Device Lett., vol. 41, no. 3, pp. 349–352, Mar. 2020, doi: 10.1109/LED.2020.2967034.

- [18].W. Liu et al., “6.2 w/mm and record 33.8% PAE at 94 GHz from Npolar GaN deep recess MIS-HEMTs with ALD Ru gates,” IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 31, no. 6, pp. 748–751, Jun. 2021, doi: 10.1109/LMWC.2021.3067228.
- [19].W. Li et al., “Record RF power performance at 94 GHz from millimeterwave N-polar GaN-on-sapphire deep-recess HEMTs,” IEEE Trans. Electron Devices, vol. 70, no. 4, pp. 2075–2080, Apr. 2023, doi: 10.1109/TED.2023.3240683.
- [20].W. Li et al., “Record 94 GHz performance from N-polar GaN-onsapphire MIS-HEMTs: 5.8 W/mm and 38.5% PAE,” in IEDM Tech. Dig., Dec. 2022, pp. 11.2.1–11.2.4, doi: 10.1109/IEDM45625.2022. 10019475.
- [21].J. -S. Moon et al., "Highly Linear and Efficient mm-Wave GaN HEMTs and MMICs," 2022 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium - IMS 2022, Denver, CO, USA, 2022, pp. 302-304, doi: 10.1109/IMS37962.2022.9865424.
- [22].J. -S. Moon et al., "High-speed Graded-channel GaN HEMTs with Linearity and Efficiency," 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Los Angeles, CA, USA, 2020, pp. 573-575, doi: 10.1109/IMS30576.2020.9223775.
- [23].E. Akso et al., "Schottky Barrier Gate N-Polar GaN-on-Sapphire Deep Recess HEMT With Record 10.5 dB Linear Gain and 50.2% PAE at 94 GHz," in IEEE Microwave and Wireless Technology Letters, vol. 34, no. 2, pp. 183-186, Feb. 2024, doi: 10.1109/LMWT.2023.3345531.
- [24].S. Wu et al., "A High RF-Performance AlGaN/GaN HEMT With Ultrathin Barrier and Stressor In Situ SiN," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 68, no. 11, pp. 5553-5558, Nov. 2021, doi: 10.1109/TED.2021.3111140.
- [25].Peng-Fei Wang, Min-Han Mi, Meng Zhang, Qing Zhu, Jie-Jie Zhu, Yu-Wei Zhou, Jun-Wen Chen, Yi-Lin Chen, Jie-Long Liu, Ling Yang, Bin Hou, Xiao-Hua Ma and Yue Hao, “Demonstration of 16 THz V Johnson's figure-of-merit and 36 THz V fmax · VBK in ultrathin barrier AlGaN/GaN HEMTs with slant-field-plate T-gates, ” . Appl. Phys. Lett, 7 March 2022, 120 (10): 102103.
- [26].Y. He et al., "Scaled InAlN/GaN HEMT on Sapphire With fT/fmax of 190/301 GHz," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 70, no. 6, pp. 3001-3004, June 2023, doi: 10.1109/TED.2023.3269728.
- [27].J. He et al., "Demonstration of 420GHz highly scaled InAlN/GaN HEMTs by Electron Beam Lithography," 2023 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS), Lishui, Zhejiang Province, China, 2023, pp. 1-3, doi: 10.1109/IWAPS60466.2023.10366124.

CLUSTERLINE®
将增强实景等
应用实现量产

evatec
process systems

AR/VR 或近红外传感和成像技术的大众市场消费应用需要高产量的晶圆级制造方法来沉积金属，介质层和多层镀膜。

Evatec CLUSTERLINE® 系统的晶圆盒级解决方案为200mm和300mm晶圆提供非常精确的光学工艺，高重复性，低颗粒数和稳定的晶圆传输满足一切量产需求。

所以今天就联系Evatec，了解我们如何帮助您把增强实景等应用实现量产！



半导体 & 先进封装 · 化合物 & 光学 · THE THIN FILM POWERHOUSE

www.evatecnet.com/cn



利用 USACH BoulePro-200AX 为 SiC 行业制定标准

USACH BoulePro-200AX 为 SiC 衬底的扩产提供支持

作者：Jeff Gum，先进材料专家（半导体材料）；James Carl，营销专家；Hardinge 美洲地区

对SiC 日益增长的需求促使制造商不断创新和优化生产工艺。USACH BoulePro-200AX 正是帮助制造商实现这一目标的尖端系统，代表了 SiC 晶体制造技术的重大进步。

USACH BoulePro-200AX 因其革命性的 SiC 制造方法被公认为行业标准。该工具可使制造商有效满足对高品质 SiC 材料日益增长的需求。USACH BoulePro-200AX 拥有创新功能以及无与伦比的性能和可靠性，对于想在快速发展的 SiC 行业中努力保持领先地位的公司来说，它是首选解决方案。

满足不断增长的市场需求

随着 SiC 在全球各种应用领域的使用范围不断扩大，制造商们正在寻求解决方案来改进其生产设施。BoulePro-200AX 为效率和品质树立了新的标杆，为 SiC 生产商提供了优化运营并降低生产成本的综合工具。

过去几十年来，SiC 衬底的供应一直由美国及欧洲生产商主导。虽然少数几家中国 SiC 生产商参与这一市场已有相当长的时间，但在过去几年中，市场在数量、晶圆尺寸及品质方面的发展都非常迅猛。目前，中国逐渐成为 SiC 衬底供应

链中的主要参与者。意法半导体与三安光电，以及英飞凌与天科合达、天岳先进近期宣布合作，证明中国 SiC 衬底市场正在蓬勃发展。随着中国内部市场和全球市场的持续增长，有机会进一步降低 SiC 衬底的成本，并继续开拓 SiC 材料在电子领域的应用。BoulePro-200AX 就是这样一项技术，可实现更低的制造成本，并有助于促进市场转型。

商业吸引力和工厂升级

为了满足对 BoulePro-200AX 设备激增的需求，USACH 投入了大量资源来升级其位于伊利诺伊州埃尔金的工厂。改进包括新增生产空间，包括 11 个新的装配车间和超过 10,000 平方英尺的专用空间，将产量提高了约 200%。

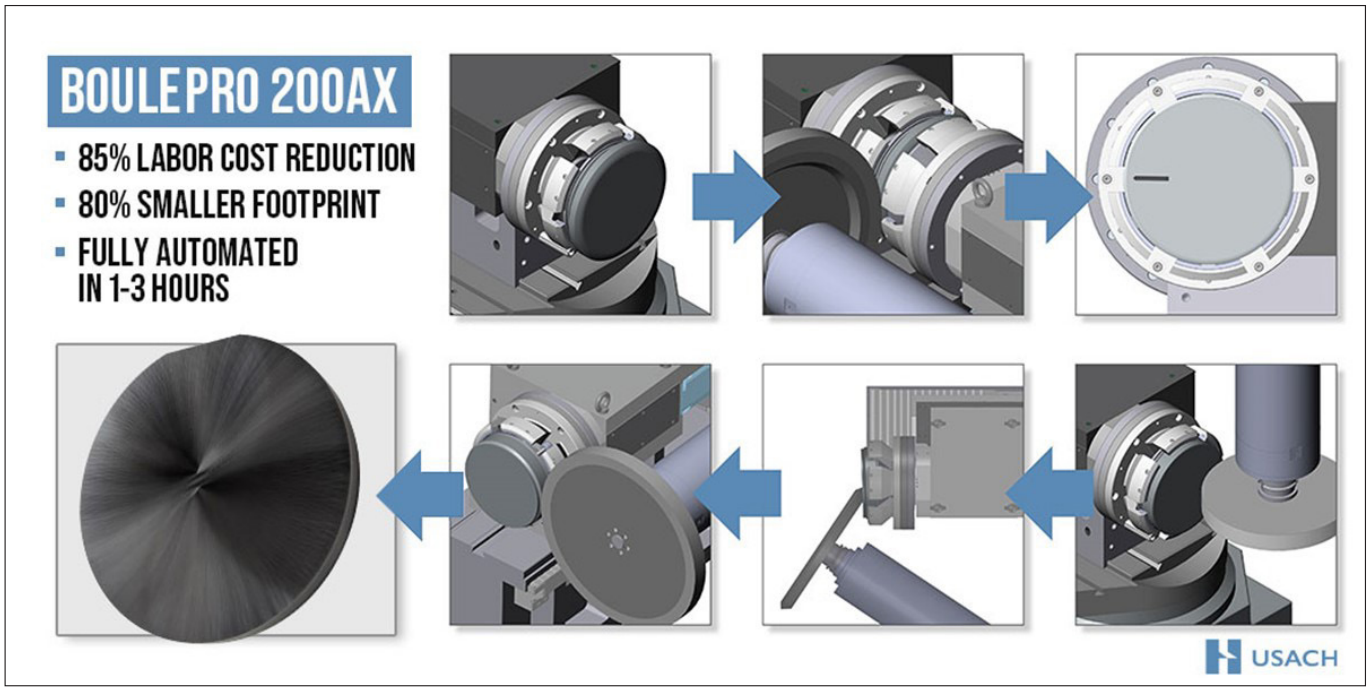
此外，USACH 还新增一个专门的 BoulePro 演示 / 测试展示厅，使客户能在工厂内部看到自己的设备，并在设备离开工厂前进行工件试运行。今年第二季度计划进行几次演示。此外，还新增了一间会议室和客户咖啡厅，以进一步提升客户体验。

针对这些升级，我们已投资 72 万美元以上，彰显了我们从订购到生产和交付整个过程的承诺，即致力于为 SiC 制造商提供尖端技术、高效订单执行、白手套服务。目前，USACH 有多台设备在现场运行经过验证的 150 mm 和 200 mm 材料工艺，这一事实推动了我们的投资。今年春季又有几家客户前来演示生产设备，USACH 已做好充分准备，以应对客户对该产品日益增长的兴趣。

工艺方法

Hardinge 的 BoulePro-200AX 凭借其制造能力，能够满足改进工艺流程的所有要求。作为一款全自动的自给式机床，BoulePro 可将原生 SiC 晶体加工成即用晶锭，无需胶合 / 固定、外部材料设置或手动干预。这台单一设置的设备取代了传统晶体制造工艺中的多台设备，从而使 SiC 衬底制造厂制造部分的工艺流程更少、更简化。在衬底制造方面，许多 SiC 生产商正在向全自动程度更高的解决方案迈进，这与半导体制造后道工艺中的自动化更为相似。BoulePro 为这些制造商提供了一个机会，将更高水平的自动化更好地集成到高度手动的工艺流程中。





通过集成 X 射线衍射（XRD）工具实现的单步双平面补偿（SSDC）功能，BoulePro 可在显著缩短的时间内完成从晶体转换为晶锭的所有工艺步骤。传统工艺需在多个位置、依靠多个操作员来使用多台设备，此工艺流程需进行工件移动，相比之下，BoulePro 的周期时间可缩短 95%，与当前解决方案相反，BoulePro 单台设备即可实现高生产率。

BoulePro 还采用了自动换刀装置，可在垂直和水平主轴上切换不同的磨削轮和配件，因而具备高度灵活性，可容纳晶体的各种初始几何形状，并满足客户对即用晶锭的任何最终要求。因此，BoulePro 可以轻松应对独特生长的 SiC 晶体，而且随着越来越多供应商开始以更创新的方式长晶，BoulePro 为不断增长的 SiC 市场提供了最高效、最灵活、最具成本效益的解决方案。

BoulePro-200AX 采用了一种独特的方法来加工生长的 SiC 晶体，该方法结合了多个工件头和先进的夹持技术，可实现精确加工。无论晶体的几何形状或生长条件如何，该方法都能确保获得一致结果。为了进一步说明加工过程中如何夹持晶体，在进行磨削操作时，晶体始终由两个装置支撑。两个工件头都利用真空技术将工件固定在卡盘上。两个工件头还都采用了外径夹爪来固定工件的外部，因此对 SiC 晶体进行端面磨削时，真空和外径夹爪都会起作用。在对 200 mm 材料进行切口加工时也是如此。对晶体进行外径或平面加工时，工件被夹在工件头的中心，一个圆顶推杆会自动装入 C2 卡盘，C1 上的真空板对工件产生拉力的同时，该推杆用柔软的顺应性材料对工件进行轴向推压。在这些不同的磨削步骤中，支撑工件的方式可使磨削以极快速度进行，而不必担心工件受损。传统方法是将工件胶合在主轴上，只能在工件一个面上的一个小位置支撑晶体。对工件进行磨削操作时，远离支撑位置处会对晶体产生作用力，这样可能会导致工件失效，因为加工过程中会对 SiC 晶体产生更大的应力。

BoulePro-200AX 的关键优势

这款开创性设备可精简自动化、提高工艺复现性、显著降低劳动力成本、减少制造占地面积、全面降低成本、达到无与伦比的精确度，对 SiC 制造商而言不可或缺。

BoulePro-200AX 是 SiC 制造商的规则改变者，具有以下关键优势：

1. **精简自动化：**这款创新型机床可在全自动框架内完成从晶体转换为晶锭的所有必要步骤，根据生长晶体的几何形状，只需一到三个小时即可完成整个过程。
2. **提高工艺复现性：**BoulePro-200AX 先进的自动化程度可确保提高工艺复现性，从而生产出一致且品质高的即用 SiC 晶锭。
3. **显著降低劳动力成本：**SiC 生产商可大幅降低 85% 的劳动力成本，不仅使生产过

程更高效，而且使其更具成本效益。

4. **减少制造占地面积：**BoulePro-200AX 一台设备即可完成从晶体到晶锭的所有步骤，因此能显著减少 80% 的制造占地面积，从而优化 SiC 生产设施的空间利用率。
5. **全面降低成本：**与业界当前的标准做法相比，BoulePro-200AX 的总成本降低近 80%，包括资本支出（CapEx）、运营支出（OpEx）和耗材。
6. **更高的精确度：**晶体在整个过程中的固定方式使得在任何时候，其准确位置都为人所知，与集成的 XRD 相结合，可进行晶体取向校正，并使平面位置的精确度比现行标准规格高出 500 倍。这样就能生成精确度更高的晶圆，并有助于改善最终晶圆上的外延层，从而生产出性能更好的器件。

全球趋势：USACH BoulePro-200AX 成为行业标准

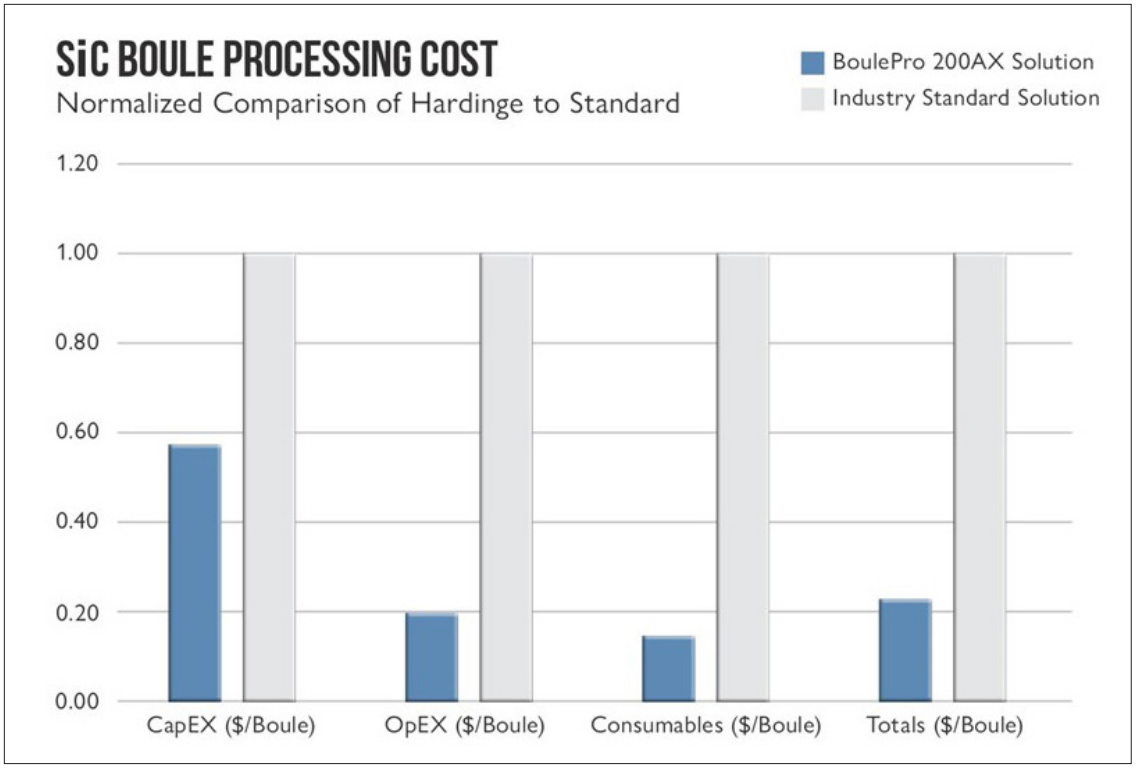
BoulePro-200AX 被全球领先的 SiC 生产商广泛采用，彰显出其作为晶体到晶锭转换卓越解决方案无可争议的地位。跨越各大洲，从北美和欧洲的成熟 SiC 制造中心到亚洲的繁荣市场，BoulePro-200AX 已成为业界标准，为效率、复现性、成本效益树立了标杆。

BoulePro-200AX 备受赞誉的关键在于其无与伦比的效率，这一点颠覆了传统的晶体到晶锭转换过程。通过无缝集成尖端自动化、精密加工、先进材料处理等能力，该系统简化了生产工作流程，显著缩短了生产周期并降低了运营成本。该系统能够始终如一地交付高品质 SiC 晶锭，并将可变性降至最低，从而使制造商能够满怀信心地满足严格的品质标准和客户需求。

此外，BoulePro-200AX 不可动摇的复现性确保了晶锭制造的均匀性和一致性，对于努力保持各批次产品完整性和性能的 SiC 生产商来说，这是至关重要的要求。通过对磨削轮速度、磨削进给速度、晶体取向等关键参数的精确控制，该系统降低了缺陷和偏差的风险，保障了 SiC 产品在市场上的声誉和可靠性。

BoulePro-200AX 不仅具有超凡的操作性能，还体现了 SiC 行业的创新和进步精神。BoulePro-200AX 的问世代表了晶体制造技术的变革性飞跃，促进了 SiC 制造工艺的进步，并为未来的创新铺平了道路。主要 SiC 生产商通过采用 BoulePro-200AX，表明他们致力于走在行业趋势的前沿，推动产品质量、效率、竞争力的不断提高。

作为卓越和独创的象征，BoulePro-200AX 不仅能满足 SiC 制造商的迫切需求，还能激发信心，促进更广泛 SiC 生态系统内的合作。BoulePro-





200AX 获得广泛应用，证明了 SiC 行业对卓越的集体追求和对创新的不懈追求，这一点证明了 SiC 行业作为半导体材料领域进步催化剂的不朽传统。

结论

Hardinge 首席执行官 Greg Knight 对 BoulePro-200AX 的变革潜力有着独到的理解，这源于他在 SiC 行业的亲身经验。他敏锐地意识到 SiC 生产商在长成晶体后的制造过程中遇到复杂挑战。虽然 SiC 生产商在晶体生长方面表现出卓越的能力，但优化后续制造工艺需要机械加工方面的专业技术，而这一领域可能超出了他们的核心竞争力。Hardinge 和 USACH 之间的战略协同效应就在于此：双方的合作完美结合了 USACH 的领先技术与 Hardinge 在磨削、车削、铣削、工件夹持等方面长达一个世纪的杰出传统。

USACH BoulePro-200AX 真正制定了 SiC 晶体制造的标准，可使制造商以无与伦比的效率满足对顶级 SiC 产品的新兴需求。BoulePro-200AX 以其无与伦比的能力和业界的普遍认可而闻名，证明了 USACH 对卓越的不懈追求，以及其在 SiC 领域无法撼动的领导地位。随着 SiC 的重要性不断迅速上升，BoulePro-200AX 不仅作为一种工具，而且作为创新的催化剂，始终站在前沿，推动制造商走向充满繁荣和希望的未来。CSc

总投资约 300 亿元，重庆三安意法半导体项目预计 8 月投产

据西永微电园官微消息，相关负责人表示，三安意法半导体项目已实现主体结构封顶，正在进行室内装修和设备采购，预计今年 8 月将实现点亮投产，比原计划提前 2 个月。

据悉，三安意法半导体项目总投资约 300 亿元，全面整合了 8 英寸车规级碳化硅的衬底、外延、芯片的研发制造，致力于建设技术先进的 8 英寸碳化硅衬底和晶圆工厂。

此前消息显示，该项目包括一家车规级功率芯片制造企业，以及为其提供碳化硅衬底的材料供应商。其中，车规级功率芯片制造企业，由国内化合物半导体龙头企业三安光电和国际半导体巨头意法半导体合资设立，规划总投资约 32 亿美元，达产后，每年能生产 48 万片 8 英寸碳化硅车规级 MOSFET 功率芯片，主要应用在新能源汽车主驱逆变、充电桩和车载充电器上。

“万能离子刀”技术为 8 英寸 SiC 提供低成本方案

工作简介

近日，上海微系统所异质集成 XOI 课题组自主研发了基于“万能离子刀”的碳化硅（SiC）复合衬底制造技术，SiC 晶圆尺寸最大达到 8 英寸，并初步通过外延验证。该技术将高质量 SiC 单晶薄膜与低成本 SiC 衬底集成在一起，在满足高质量外延需求的同时，预期将使 8 英寸 SiC 衬底制造成本降低 40% 以上。技术方案的实施有望加速 SiC 功率器件低成本化进程。

研究背景

碳化硅材料作为宽禁带半导体中的代表材料，具有高击穿场强、高导热性和高载流子饱和迁移率等优异特性。在产业应用中，4H 晶型因其优良的电学性能成为行业主要选择，是高频、高温、大功率电子及光电器件等应用的理想材料。典型的，在 800V 以上的新能源汽车应用中，SiC MOSFET 与传统的硅基相比具有更高的电子迁移率、更高的开关速度更低的开关损耗及更小的器件体积，性能优势明显，但目前瓶颈则在于 SiC 功率器件较传统 Si 器件的成本高昂，解决的关键则在于降低衬底成本。通常，采用更大尺寸晶圆能够大幅度降低单个器件的成本，然而当晶圆从 6 英寸扩径到 8 英寸时，制备难度进一步增加，“切磨抛”良率大幅下降，衬底成本不降反升，这使得 8 英寸碳化硅晶圆制造面临极大的挑战。

上海微系统所异质集成 XOI 团队基于“万能离子刀”异质集成技术，通过离子注入剥离与转移的方法可以将高质量 SiC 单晶薄膜与硅、低成本或多晶 SiC 集成在一起，进一步循环剥离高质量 SiC 衬底（“刀削面”工艺），从而使高质量 SiC 一片变多片，实现单片成本的大幅下降。团队在国内最早开展 SiC 单晶薄膜制备与异质集成技术研究，率先在国际上实现并报道了 4 英寸 Si 基 SiC 单晶薄膜异质晶圆 (SiCOI) [Optical Materials, 2020, 107: 109990]，并在高温 MEMS [IEEE Sensors Journal, 2022, 22(14): 13930-13936]、集成光子学 [Light: Science & Applications, 2021, 10: 139；Light: Science & Applications, 2022, 11: 341]、量子信息 [Applied Physics Reviews, 2022, 9: 031302] 等领域付诸应用，相关研究成果发表于 Appl. Phys. Rev.、Light Sci. Appl.、npj Quant. Inform. 等高水平期刊上 1-5。而在主流的 SiC 功率电子领域，“万能离子刀”技术预期在 SiC 晶圆成本降低及产能提升方面优势明显，预期将为行业发展高质量、低成本 8 英寸 SiC 技术提供一种创新解决方案。

作者：欧欣，伊艾伦

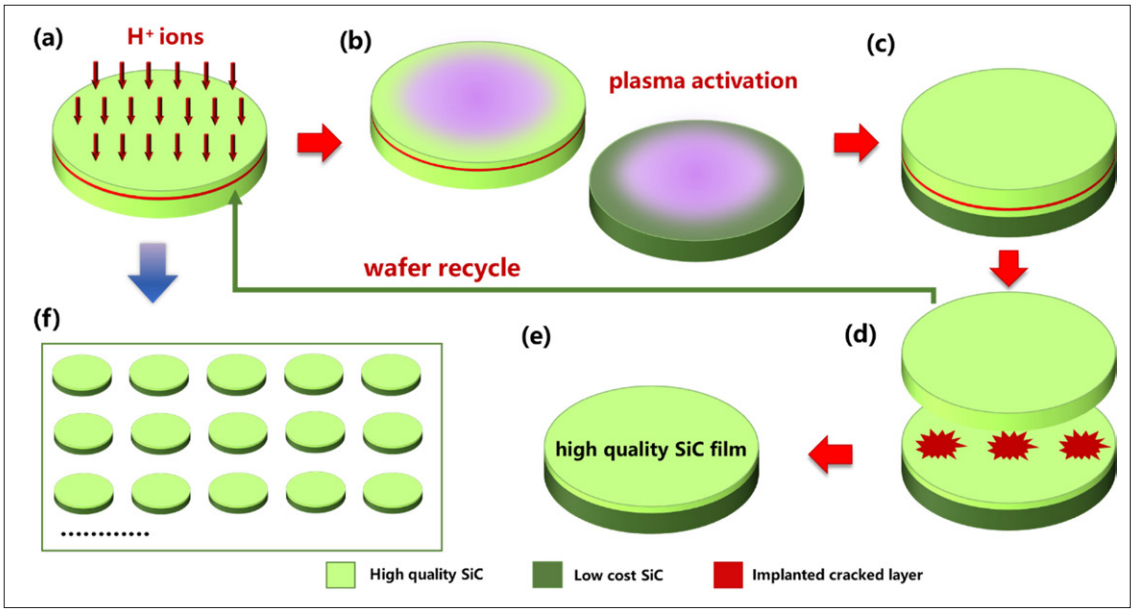


图1：SiC复合衬底制备流程图
(a) 离子注入；
(b) 表面活化处理
(c) 键合过程；
(d) 退火剥离及晶圆回收；
(e) 最终优化后处理；
(f) 单片高质量SiC产出多片复合衬底晶圆。

工作内容

异质集成 XOI 课题组基于“万能离子刀”技术实现了 SiC 复合衬底的制备。如图 1 所示为复合衬底的制备工艺流程，首先对高质量 SiC 进行离子注入，而后经过表面处理后与低成本 SiC 键合在一起，经过退火剥离后将高质量 SiC 薄膜与 SiC 衬底结合在一起。通过回收剥离后的高质量 SiC 反复利用，实现单片 SiC 成本的大幅下降。目前技术水平预期可以将 SiC 晶圆回收循环利用 10 次，预期将使 8 英寸单片制造成本降低 40%，提高回收技术水平将使单片成本进一步降低。

基于以上制备流程，团队实现了 6 英寸及 8 英寸的 SiC 复合衬底的制备，如图 2（a、b）所示，制备的 SiC 复合晶圆厚度平均值 346μm，TTV 为 1.075μm，Bow 为 8.429μm，LTV 为 0.885μm，表面粗糙度 R_q 为 0.225 nm，基本达到后续外延需求。经过瞬态热反射热阻测试，拟合计算界面热阻约为 0.01 m^2K/GW，即键合界面附近热阻与体材料基本相当。

图 3 展示了复合衬底的微观 TEM 截面情况。经过对直接键合过程的技术优化，可以看到，虽然在低分辨率下可以看出键合界面，但是从暗场 STEM 测试结果来看，键合界面并没有明显的多晶区域，薄膜与衬底是以较好单晶状态结合在一起，这为纵向器件的载流子输运提供了良好基础。

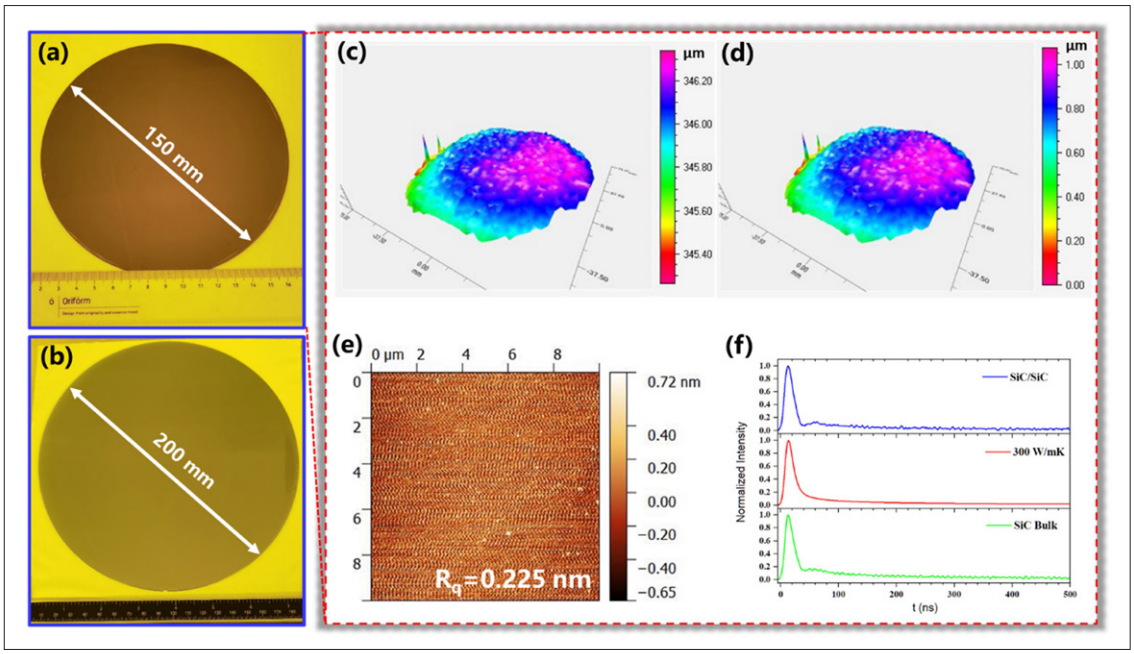


图2：SiC复合衬底及其各项性能
(a) 150 mm SiC复合衬底；
(b) 200 mm SiC复合衬底；
(c) 衬底厚度（150 mm）；
(d) 衬底TTV（150 mm）；
(e) 表面粗糙度Rq（150 mm）；
(f) 界面热阻测试（150 mm）。

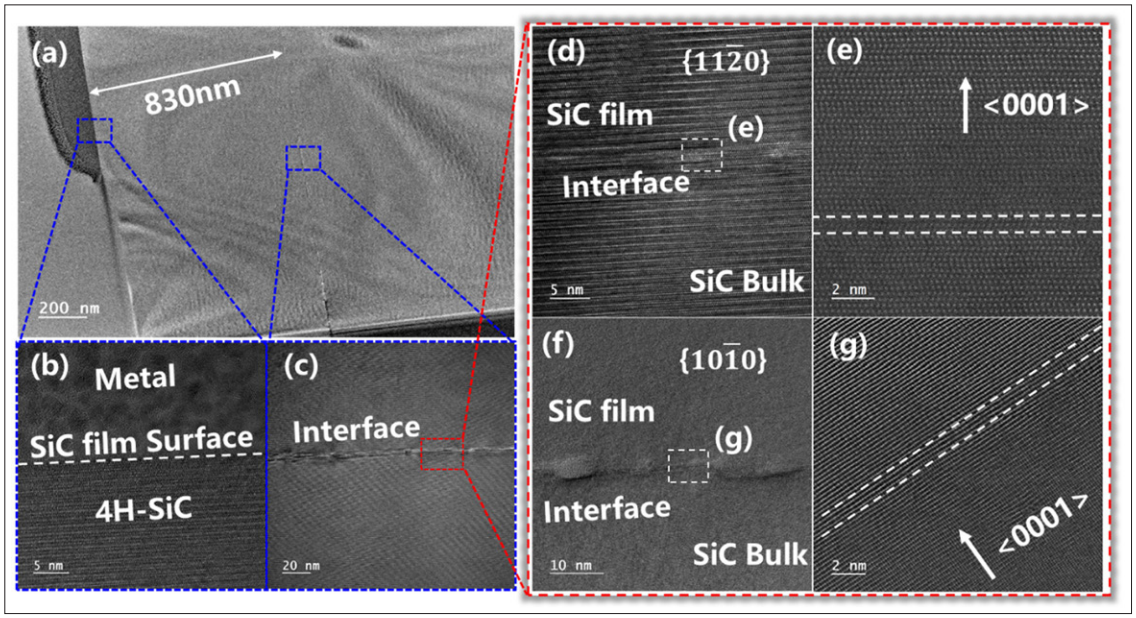


图3：SiC复合衬底TEM截面图

(a) SiC复合衬底TEM截面；
(b) 样品表面区域；
(c) 键合界面区域；
(d) {11$\bar{2}$0} 面键合界面区域HRTEM；
(e) {11$\bar{2}$0} 面键合界面区域STEM；
(f) {10$\bar{1}$0} 面键合界面区域HRTEM；
(g) {10$\bar{1}$0} 面键合界面区域STEM。

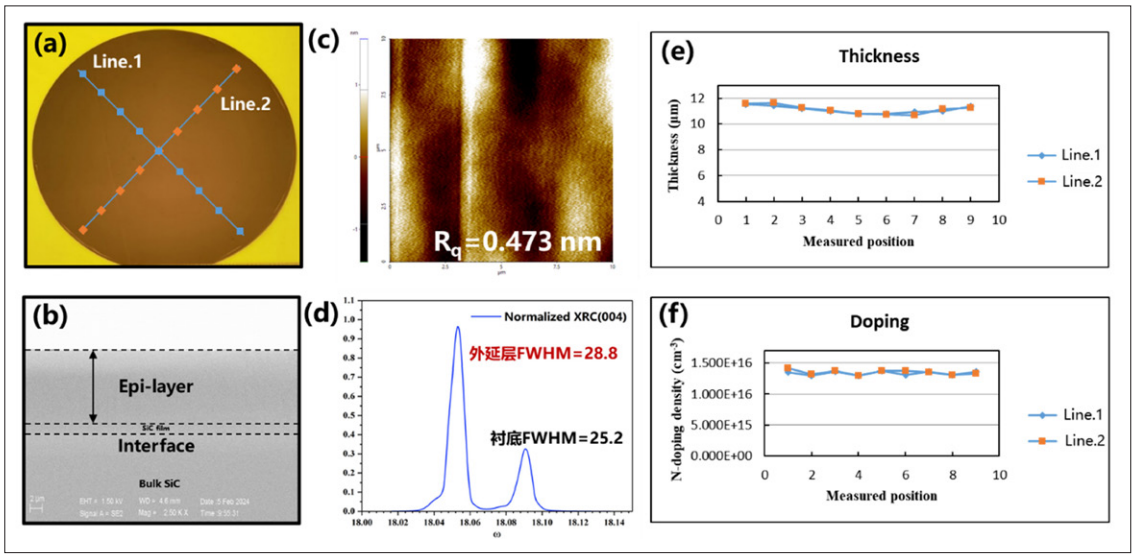


图4：150mm SiC复合衬底外延结果表征

(a) (e、f) 图测试点位示意图；
(b) 外延结构SEM截面；
(c) 外延表面粗糙度Rq；
(d) 外延结构 (004) 面XRD摇摆曲线；
(e) 外延层厚度；
(f) 外延层载流子掺杂浓度。

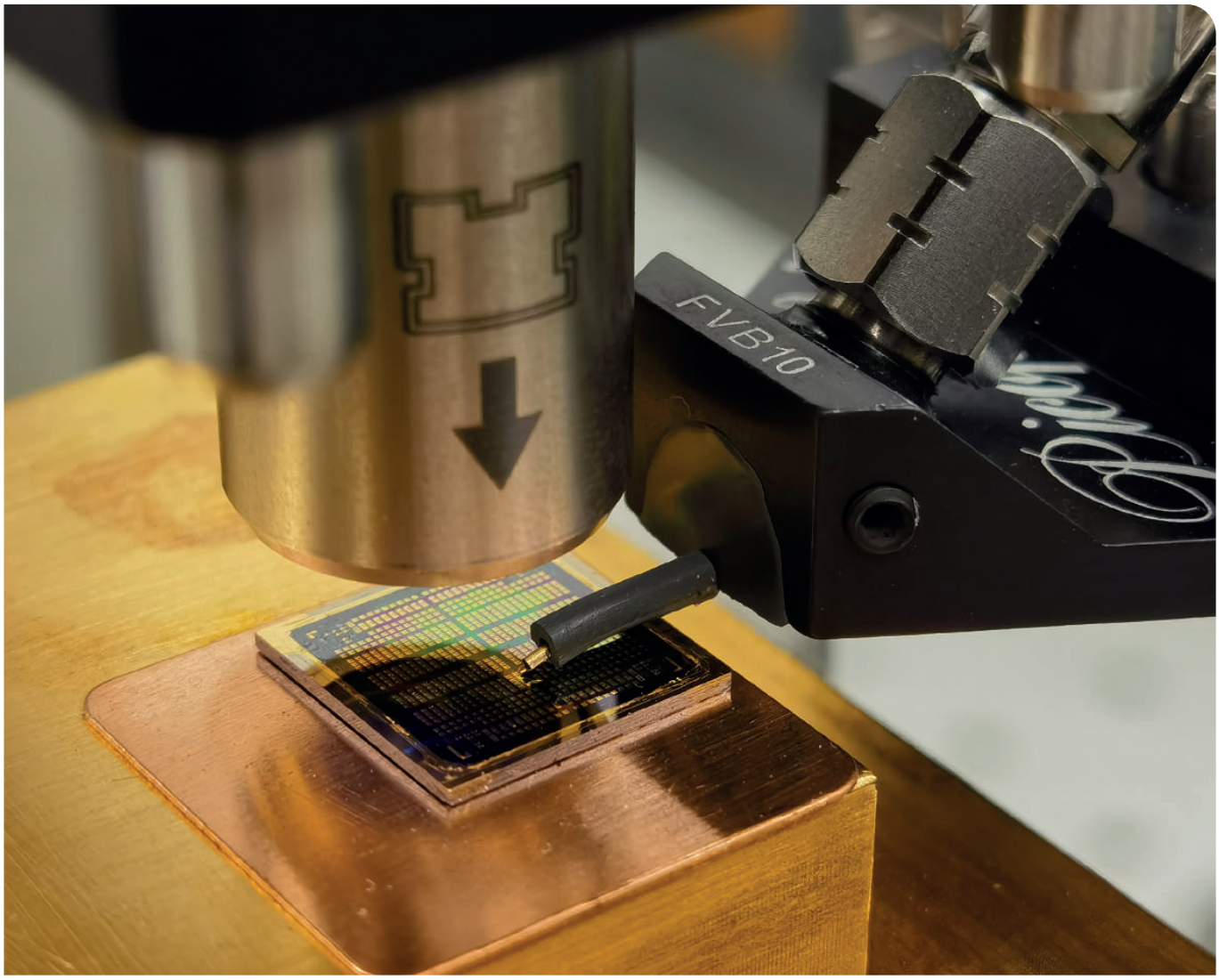
团队进一步对 SiC 复合衬底进行了外延验证，如图 4 所示。外延层表面粗糙度 Rq 为 0.473 nm。由于外延 SiC 晶格匹配决定于转移的顶层 SiC 薄膜，而与支撑衬底存在一定失配，因此在 XRC 测试中存在两个高质量单晶峰。外延层厚度 11.137μm，面内厚度均匀性 2.7%；载流子浓度 1.34×10^{16} cm^{-3}，面内载流子均匀度 2.63%。总体上，SiC 复合衬底可以支撑较高质量的同质外延生长。

未来 XOI 团队将进一步致力于高品质、低成本、大尺寸 SiC 异质集成技术的研究，为解决目前 SiC 的产业瓶颈提供可行方案。CSC

联系方式：alyi@mail.sim.ac.cn

扩展阅读

- Yi, A. et al. Silicon carbide for integrated photonics. Applied Physics Reviews 9, doi:10.1063/5.0079649 (2022).
- Yan, F.-F. et al. Room-temperature coherent control of implanted defect spins in silicon carbide. npj Quantum Information 6, doi:10.1038/s41534-020-0270-8 (2020).
- Yi, A. et al. Wafer-scale 4H-silicon carbide-on-insulator (4H–SiCOI) platform for nonlinear integrated optical devices. Opt. Mater. 107, 109990, doi:10.1016/j.optmat.2020.109990 (2020).
- Wang, C. et al. High-Q microresonators on 4H-silicon-carbide-on-insulator platform for nonlinear photonics. Light Sci Appl 10, 139, doi:10.1038/s41377-021-00584-9 (2021).
- Lv, Y. et al. MEMS Thermocouple Sensor Based on 4H-Silicon-Carbide-On-Insulator (4H-SiCOI). IEEE Sens. J. 22, 13930-13936, doi:10.1109/jsen.2022.3181046 (2022).



扩展高速 VCSEL 的应用范围

包含双孔径的单模氧化物 VCSEL 可以在 1 公里链路上以近 100 Gbit/s 的速度传输数据

Haonan Wu[1], Dufei Wu[1], Milton Feng[1] 和 xin Yu[2]
[1] 伊利诺伊大学厄巴纳 - 香槟分校、[2] 鸿腾精密科技

如今，VCSEL 最为人所知的可能是它作为智能手机中的接近传感器的广泛应用。但其首个大批量市场是数据通信，该领域持续为许多此类激光器制造商提供大量销售。

二十多年来，超低功耗、氧化局限制 VCSEL 使用氧化物孔径来限制发射，为数据中心的短距离光学互连提供了一种经济高效且可扩展的解决方案。这些器件支持不超过 100 m 左右的链路，将低功耗与紧凑的外形尺寸和高速数据传输结合在一起。其特性有助于数据中心网络高效运行。

可惜的是，传统的多模氧化物 VCSEL 无法部署在更长的光纤上传输数据。由于多模光纤中的差模延迟和色散，发射的多模性质使得该器件不适合数百米或更远距离的光学数据传输。例如，需要在这样的距离上进行传输，以将一个集线器连接到另一个集线器。

扩展传输的一种选择是转向单模 VCSEL。瑞典查尔姆斯理工大学的一个团队利用这种方法，报告了链路长度长达 2 公里的 20 Gbit/s 不归零数据传输。然而，该团队实现单模发射的方法涉及缩小氧化物孔径。但也有缺点，包括可靠性受损以及高调制带宽下激光器工作电流受到热限制。

显而易见的是，开发高性能、单模 VCSEL 十分必要，因为它们是削减新兴技术成本的关键因素，例如 5G，其中高速和低延迟数据传输对于无线回传和前传连接至关重要。这方面的成功还将创造出具有与标准单模光纤兼容的圆形光束轮廓的光源。这种互操作性简化了单模 VCSEL 与现有长距离光通信网络的集成，使其成为网络升级和扩展的实用且经济高效的选择。



图1. 所制造的单模VCSEL的集成模式选择滤波器（IMSF）台阶结构和底部氧化物孔径的横截面图。单横向模工作是通过优化顶部和底部的孔径比以及IMSF高度来实现的。扫描电子显微镜图像是由聚焦离子束切片制成的器件。

新型设计

在这方面开辟新天地的是一种带有创新集成模式选择滤波器的 VCSEL 形式，该设计由我们公司与伊利诺伊大学厄巴纳 - 香槟分校合作首创，并由鸿腾精密科技公司赞助。

在制造方面，我们的设计与传统 VCSEL 的设计之间的主要区别在于，我们的设计需要两步氧化工艺来形成顶部和底部氧化物孔径（见图 1，它提供了器件的横截面图）。除此之外，我们的设计与传统氧化物 -VCSEL 类似——它具有半波长腔，p 掺杂分布式布拉格反射镜台阶、电流 / 光学限制氧化物层和接触金属。

为了创建顶部氧化物孔径，我们氧化了分布式布拉格反射镜中的多个 p 型配对。随后形成集成模式选择滤波器台阶，其直径约为 6 mm，并通过使用反应离子和感应耦合等离子体的校准氯基干法蚀刻来定义。通过微调干法刻蚀气体的成分、调节等离子体压力、优化反应离子刻蚀与电感耦合等离子体功率的比例，实现了对台阶侧壁的精确控制。这使我们能够生产出相对于 p 型分布式布拉格反射镜台阶保持 90 度方向的光滑侧壁。请注意，由于难以控制该台阶的氧化速率，因此必须进行精确的干蚀刻工艺控制，因为这是定义顶部氧化物孔径尺寸的关键。整个样品高良率的另一个关键是准确控制顶部和底部氧化物孔径比。

由于我们的新型 VCSEL 中独特的台阶结构，该设计有利于基本模式的激光条件（或 LP01 模式，

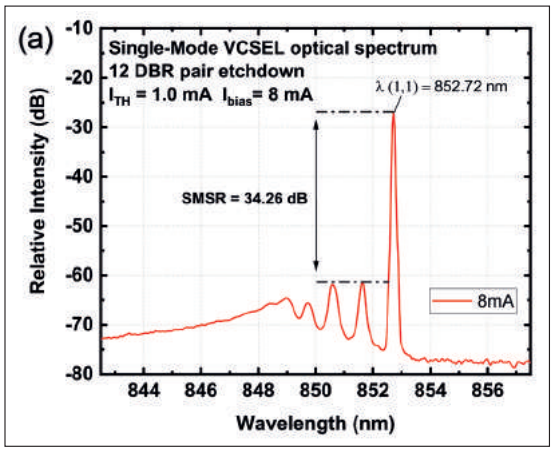
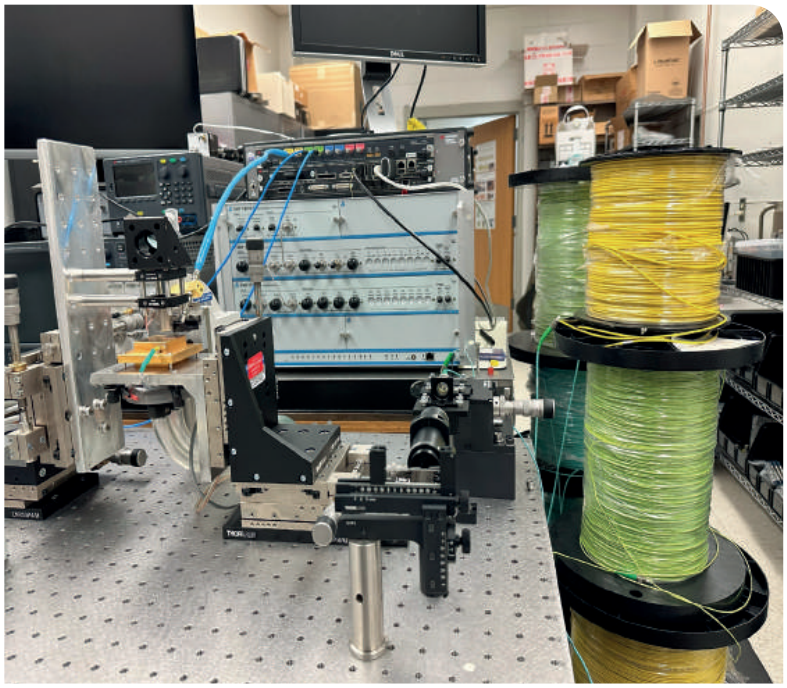


图2. 测得的单模VCSEL光谱。边模抑制比超过34dB。



用于长距离光纤数据传输测量的VCSEL自由空间光耦合装置。

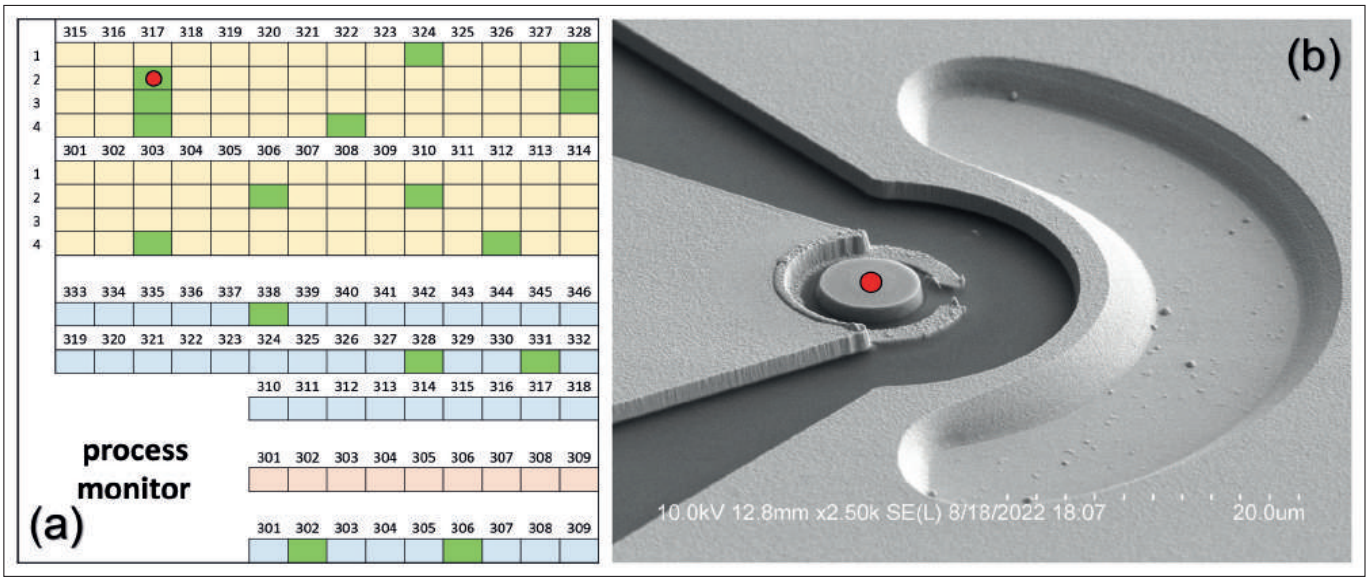


图3. (a) 1.2 × 1.2 cm^2样品上一个象限的单模VCSEL测试图。所有测试的VCSEL都标记为绿色，显示单模工作。边模抑制比超过34 dB。红点标记的单模VCSEL正在测试DC和PAM-4数据传输。(b) 被测单模VCSEL的扫描电子显微镜顶视图图像，清晰显示了集成模式选择滤波器台阶结构、顶部p接触点以及高速VCSEL布局中使用的共面波导红点显示晶圆图上的器件位置。

如果我们将 VCSEL 腔调为近似圆柱形波导)。在弱导纤芯 / 包层波导中，基模峰值出现在波导的中心，而高阶模集中在外围附近。因此，小顶部孔径降低了高阶模的品质因数，从而改变模态特性并确保仅支持基模。

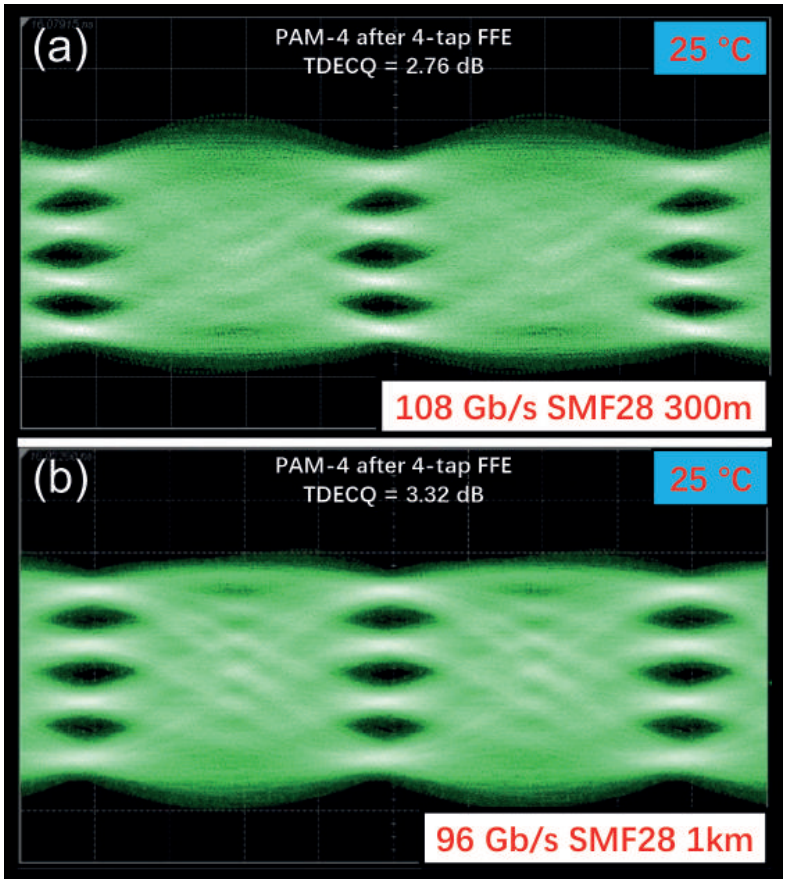


图4. 采用标准4抽头前馈均衡器的单模VCSEL PAM-4眼图，速率为(a) 108 Gbit/s (300 m SMF-28) 和 (b) 96 Gbit/s (1 km SMF-28) 。通过SHF BT65R偏置器向被测器件提供7 mA直流电流，并直接通过灰编码PRBS13 (PRBS13Q)数据模式进行调制，它由Keysight 120 GSa/s M8194A 任意波形发生器生成。所有眼图均未平均，发射机色散眼图闭合正交 (TDECQ) 值是根据 PRBS13Q模式计算的。TDECQ值的计算假设目标符号错误率为4.8×10^{-4}。

我们使用带有球透镜的光纤耦合，在室温下对我们的集成模式选择滤波器 VCSEL 进行了直流表征（典型的测量光谱见图 2)。我们发现，激光器在 8mA 电流下的光纤耦合光功率范围为 1.3mW 至 1.6mW，所有被测器件的阈值电流范围为 0.8mA 至 1.0mA。我们表征的所有 VCSEL 均表现出单模工作，基模波长接近 852nm，并且在 8mA 时单模抑制比超过 34dB，满足 IEEE 802.3 标准的规范。

为了评估一种器件与另一种器件之间的差异，我们绘制了以 8 mA 驱动的单模 VCSEL，考虑 1.2 cm × 1.2 cm 样品上的单象限（见图 3 (a)，其中包括此图上的绿色标签，代表那些经过严格检查的器件)。令人激动的是，我们发现所有器件均在热翻转时表现出单模工作。

我们在不同条件下对这些器件进行了严格测试，从室温到 70℃，使用从背对背到 2 公里的光纤线轴长度。值得注意的是，在整个检测过程中，我们没有发现任何光功率下降的迹象或激光阈值的任何变化。

加快速度

早在 2021 年，我们就使用了第一代新型 VCSEL，在 1 公里单模光纤上实现了 38 Gbit/s 的创纪录的速度性能，使用不归零配置实现无差错光学数据传输。为了实现更高的速度，基于我们器件的单模输出，我们可以切换到先进的调制方案。

一种常见的高级调制方案是脉冲幅度调制 -4。由于云服务和数据中心的快速扩张，这种形式的调制已在 IEEE 标准 802.3 中针对 400 Gbit/s 以太网进行了标准化。去年，我们利用脉冲幅度调制 -4 实现了室温下 1 公里光纤上 96 Gbit/s 的数据传输。

我们使用这种形式的调制测量了室温眼图，这种形式的数据速率高达 108 Gbit/s（详情请参见图 4）。

考虑到与碳足迹相关的问题，另一个关键指标是每比特的能源消耗。对于 330 m 和 1 km 链路，计算结果分别为每比特 175.1 fJ 和每比特 196.9 fJ。

我们的直接调制单模 VCSEL 的性能非常有前景，能够在光纤通信中发挥重要作用，是引人注目的备选者，尤其是在生产可扩展性、低制造成本、高速和长距离至关重要的场景中。其拥有性能优势和低成本的特点，是数据中心 400 GBase-DR4 光链路部署的有力竞争者。我们将继续完善它们的特性，努力优化器件拓扑，因此，这将确保更高的可靠性和固有器件带宽，数据速率超过每通道 120 Gbit/s。OSC

感谢 CNICE 对由 UIUC 杰出校友 Sidney Lu 先生领导的领先互连公司鸿腾精密科技单模 VCSEL 研究项目的赞助。还要感谢 Mike Gerhold 博士对 No. W911NF-22-1-0046 项目下微腔激光设计和 PAM-4 测试的 ARO 支持。

扩展阅读

- R. Safaisini et al. “20 Gbit/s data transmission over 2 km multimode fibre using 850 nm mode filter VCSEL,” Electron Lett. 50 40 (2014)
- J. Qiu et al. “Advanced Single-Mode 850 nm VCSELs for Record NRZ and PAM-4 Data Rate on SMF-28 Fiber up to 1 km,” in Optical Fiber Communication Conference, 2021
- M. Feng et al. “Related U.S. Application Data (60) Provisional application No. 62 / 744,” 2017
- J. Qiu et al. “85℃ Operation of Single-Mode 850 nm VCSELs for High Speed Error-Free Transmission up to 1 km in OM4 Fiber,” in Optical Fiber Communication Conference, 2019
- J. Qiu et al. “50 Gb/s VCSELs with an Integrated Mode-Selected Filter for Extending OM4 Transmission up to 1 km and 70 ℃ ,” in Optical Fiber Communication Conference
- D. Wu et al. “Single-mode 850nm VCSELs Demonstrate 96 Gb/s PAM-4 OM4 Fiber Link for Extended Reach to 1km,” in Optical Fiber Communication Conference, 2022



多维功率器件

作者：Yuhao zhang 来自 Virginia Tech

推进电力电子技术的发展不仅与新材料有关。架构真的很重要，超级结、多沟道和多栅极等为功率器件的革命性变革提供了机会

电力电子器件是在各种应用中实现高效能源转换的关键，包括数据中心、电动汽车、电网和可再生能源处理。全球功率半导体器件和模块的市场价值已经达到每年 400 亿美元，而且还在迅速增长。

许多在这个领域工作的人都认为，要推进功率器件的发展，就需要引入新材料。由硅制成的晶体管应该被由宽带隙半导体（例如 SiC 和 GaN）制成的晶体管所取代，并且总有一天会发展到超宽带隙变体，例如 Ga_2O_3、AlN 和金刚石。

但我的观点与包括剑桥大学的 Florin Udrea 和南加州大学的 Han Wang 在内的同事们的观点相同，即器件概念和架构的创新同样重要——而且这种创新与材料无关。这促使我们在去年年底发布了一份器件架构创新的路线图（有关该论文的详细信息，请参阅扩展阅读）。

历史支持我们的立场。只需跟踪宽带隙材料出现之前硅功率器件的演进。在那个时代，从 1950 年代晶闸管的商业化到 1970 年代的功率 MOSFET 和 1980 年代的绝缘栅双极晶体管 (IGBT)，器件架构的创新推动了电力电子的发展。我们相信，新一波功率器件的发展取决于多维架构的引入。

功率器件的作用是在导通状态下传导高电流，在关断状态下阻断高电压，并能够在这两种状态之间以高频率连续切换。对于传统的功率器件，如 MOSFET 和 IGBT，主电流和阻断电场沿同一方向排列，使其成为有效的一维器件。

最近，已经开发出几种创新架构，它们至少在一个额外的几何维度上引入了静电工程。这种架构包括超级结、多沟道和多栅极。如图 1 所示，这些多维器件克服了阻碍其传统同类产品性能的容量 - 频率权衡问题，使它们能够实现更低的功率

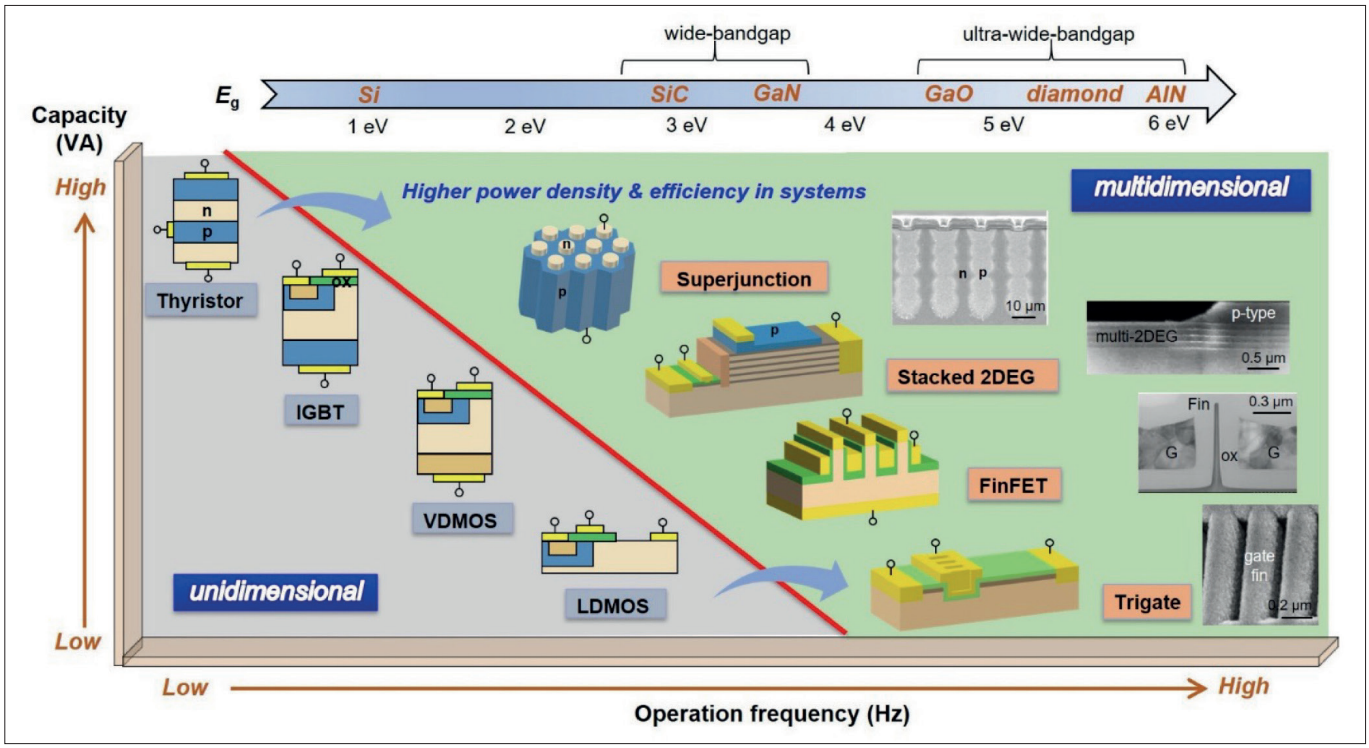


图 1：一维和多维功率器件的功率容量和频率权衡。

损耗和更高的频率。有了这些特性，设计人员可以提高电力电子系统的效率，同时减小外形尺寸。

单极功率器件还受到另一种从根本上限制其性能的权衡因素的阻碍：击穿电压与导通电阻之间的关系。如图 2 所示，当用硅、SiC 和 GaN 制造多维器件时，它们可以超越各自的一维材料极限。特别令人鼓舞的是，通过缩放某些结构参数，可以不断提高它们的性能。这产生了一个新的器件极限带，超过了每种材料的一维极限线。与之形成鲜明对比的是，大多数一维单极功率器件通过几何缩放获得的改进很少。因此，迫切需要重写多维功率器件的性能极限和品质因数。

对于超结器件，电场是在垂直于电流传导方向的平面内进行调制。这类功率器件是通过创建交替的 n 型和 p 型区域形成的。无论每个区域中的掺杂如何，电荷平衡都会导致均匀的电场和出色的阻断电压。使用这种架构，掺杂水平可以提高几个数量级，从而大幅降低导通电阻。

自从西门子（现为英飞凌）在 20 世纪 90 年代末推出 CoolMOS 以来，硅超级结在商业上取得了巨大成功。 而在 2016 年，超级结家族迎来了一位新成员，即 SiC，该器件超越了其一维性能极限。

对于 GaN 来说，新架构的引入带来的突破包括开发具有垂直于电流传导平面排列的多个二维载流子沟道的器件。在此类器件中，极化电荷以及可能的附加 p 型帽层可以在器件关闭状态下自平衡，实现类似于超级结的功能。使用这种方法，我们在弗吉尼亚理工大学、南加州大学和剑桥大学的团队已经证明了多沟道 AlGaN/GaN 器件可阻断 10 kV，其性能超过了 一维横向 GaN 器件的极限。

对于工作在千伏以下的晶体管，沟道电阻可以主导器件的导通电阻。为了降低电阻，器件设计人员可以转向多栅极架构和亚微米鳍形沟道。鳍是一个特别有吸引力的选择，因为它将载流子传输从低迁移率表面沟道转移开，从而提高了整体沟道迁移率。

这种方法是广泛适用的，在使用多种材料的各种功率晶体管（包括 MOSFET 和 HEMT）中展示了 trigates 和 FinFET。

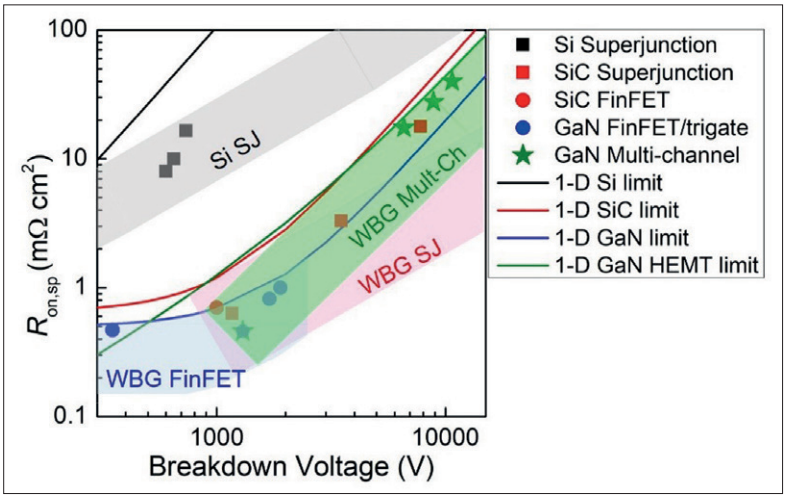


图 2：在硅和宽带隙半导体 SiC 和 GaN 中展示的一维材料极限和多维功率器件的特定导通电阻和击穿电压的权衡。

去年年底，我们的团队与其他合作者合作，取得了新的突破，推出了第一个 GaN 垂直超级结。在 2022 年国际电子器件会议上公布的这一成功，是建立在与 p 型 NiO 的异质结上的，该异质结被共形溅射在 GaN 柱的侧壁上（见图 3）。

由于 NiO 和 GaN 之间的电荷平衡，我们的超级结提供了 1100 V 的阻断电压和 0.15 mΩ cm^2 的特定导通电阻。这一性能水平超过了 GaN 的一维极限。

虽然我们已经说明了多维架构对功率器件的好处，但它们所带来的收益也可以在其他地方享受。对于射频器件，它们可以在功率、频率和动态范围方面提供改进。

请注意，我们并不是在质疑引入新半导体材料所带来的好处。但是，当您下次需要构建更好的器件时，不要只考虑切换材料——还要考虑改进架构的可能性。CS

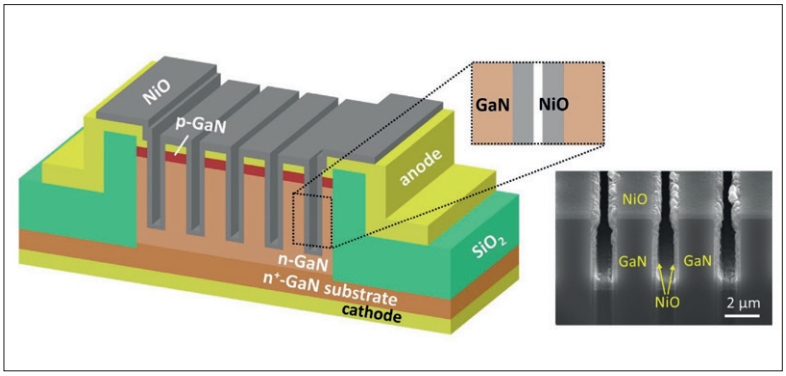
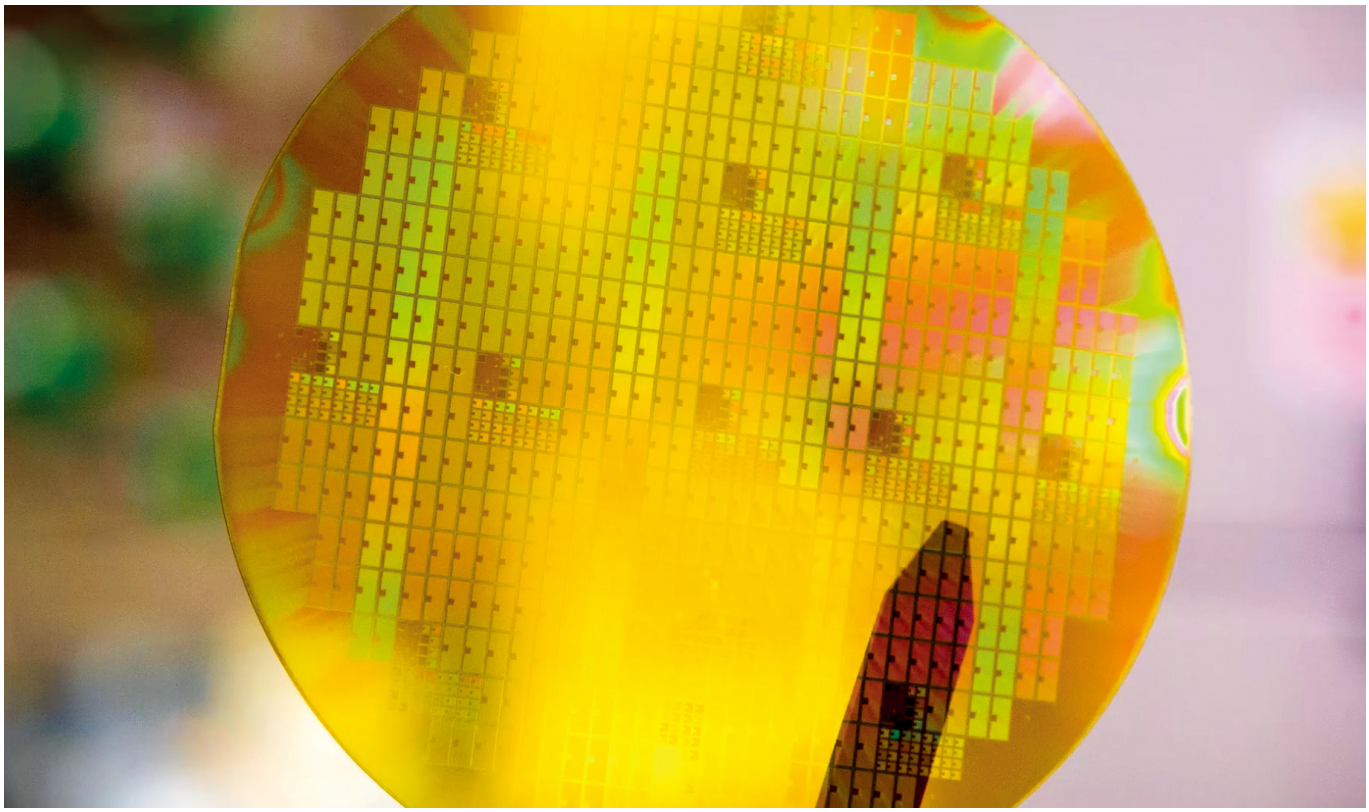


图 3：垂直 GaN 超级结二极管的三维示意图和 NiO/GaN 单元的放大图（左）。超级结区域的横截面扫描电子显微镜图像（右）。

扩展阅读

- Y. Zhang et al. “Multidimensional device architectures for efficient power electronics,” Nat. Electronic. 5 723 (2022)
- M. Xiao et al. “First demonstration of vertical superjunction diode in GaN,” 2022 International Electron Devices Meeting (IEDM), 35.6, Dec. 2022.



SiC 超结的一种卓越工艺

多轮超高能注入和外延生长能够让 SiC 超结器件阻断数千伏电压

作者：Reza Ghandi，GE Research

减少全球碳足迹，必须大力改善电力基础设施。除了需要增加可再生能源发电比例相关的优先事项以外，还需要提高从发电地到使用地的电力传输效率。

电力基础设施的关键部分是中压电力转换系统，该系统可用于风力涡轮机、太阳能装置和舰船用转换器。由于硅基固态开关和二极管的损耗，此类功率转换系统在 3.3kV 以上的电压下工作，其开关频率仅限于数百赫兹以下。而这与理想相差甚远，因为在低频下，变压器和转换器滤波器的重量可能高达数吨，增加了系统成本和安装成本并限制了设计的灵活性。因此，我们需要转向基于超高压功率半导体器件的高效、轻量、多兆瓦及多千赫功率转换系统，该类器件开关为中等频率（例如 1-20kHz）。

如果长期关注本杂志，您就会了解 SiC 器件可以解决现有硅基器件的许多局限性。而在几千伏的阻断电压下，利用此种方法取得的成功至关重要。在 3.3kV 及以上的阻断电压下，SiC 单极开关和二极管在高温下会遭受高传导损耗，而 SiC 双极器件（例如 IGBT）表现出 3V 的高正向压降，存在很大挑战，令人望而却步。由此，在这些系统中，SiC 技术相对于硅 IGBT 的优势被削弱。

SiC 超结的解决方案十分受人关注。该架构打破了单极传导限制，并在中压级应用中提供了特定导通电阻和阻断电压之间的改进权衡方案。

到目前为止，该器件已经进行了几次演示。其中包括跨度为 1.2-3.3 kV 的多外延 SiC 超结器件，器件采用了多外延方法。制造此类器件并不容易，因为使用传统工艺设备在 SiC 中注入原子的抛射深度较浅，因此需要多次进行外延再生长。另一种方法是制作沟槽再填充 SiC 超结器件。然而，尽管该器件可以处理 6.5kV 的电压，但由于复杂的再填充过程产生的晶体缺陷，器件在高阻断电压下会出现过度泄漏。

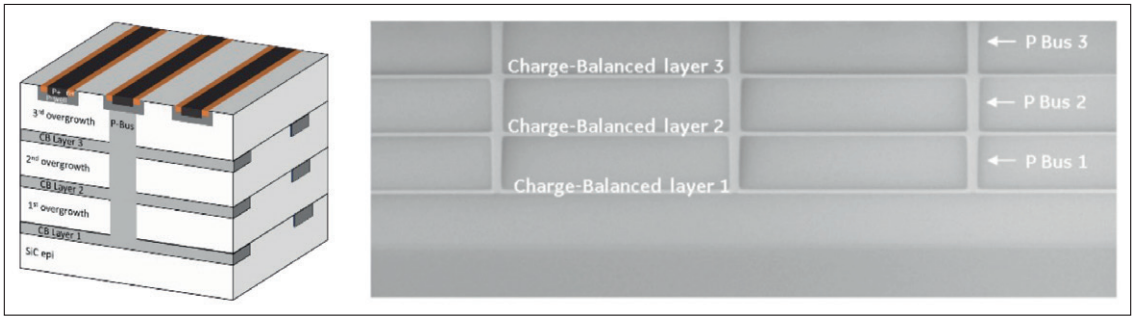


图1. GE的4.5kV SiC电荷平衡MOSFET的示意图（左）和扫描电子显微镜横截面图（右）。这类开关实现了与超结器件类似的外延再生长和高能离子注入。

GE Research 目前正在探索全新的第三种制造架构，用于生产基于超高能离子注入和外延生长的 3.3kV 以上的器件。在 ARPA-E（ARPA-E DE-AR0000674“用于突破性功率转换的 SiC 电荷平衡 FET”计划）资助的近期已完成项目中，凭借 GE Research 在 SiC 电荷平衡器件制造方面的领先能力，研发出了这项技术。在该计划中，我们研发出超结中间体电荷平衡技术（superjunction intermediate charge-balanced technology）。该技术涉及到应用一种全新的漂移层架构，用来创建埋入式电荷平衡 p 型区域，这些区域通过兆电子伏特高能注入区域，电气性连接到顶部接触区（表示为 P-Bus，如图 1 所示）。与超结柱的情况一样，如果电荷平衡区域设计有最佳注入的 p 型剂量和间距，可以在阻断期间耗尽周围区域电荷并充当电场分配器。关键的是，对于给定的击穿电压，可以使用比传统设计掺杂更高的漂移层，从而在正向导通模式下实现更低的导通电阻，并消除传统作为击穿电压函数的特定导通电阻的一维极限。

利用上述方法，我们首先生产出性能与 20μm 节距 SiC 超结相当的器件，并且其明显优于最先进的高压 SiC 方法。该研究的最新亮点包括电荷平衡 MOSFET 的首次实验演示，其微分比导通电阻为 10 mΩ cm^2，阻断电压超过 4.5kV。该比导通电阻值低于作为阻断电压函数的一维比导通电阻，并且比所报道的传统 4.5kV SiC FET 的值大约低 20%。据我们所知，这是迄今为止所展示的所有 SiC 电荷平衡器件的最高击穿电压，也是所有报道的 4.5kV 级 MOSFET 的最低通态损耗。

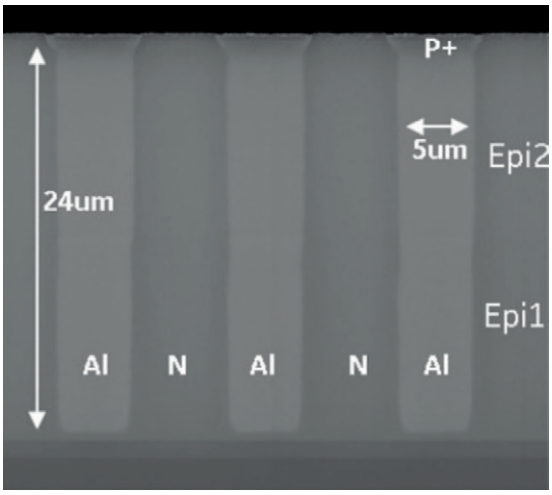


图2. 通过两轮外延生长和超高能离子注入，GE Research制造的世界上首个3.5kV深注入型SiC超结结势垒肖特基（JBS）二极管。

虽然这一成功十分震撼，但我们知道这只是一个开始。该器件有个缺点是，其用于电荷平衡的堆叠性质以及切换期间所需的电荷载流子会重新分布，存在切换延迟，并且随着每层增加而增加。当 SiC 电荷平衡器件扩展到 4.5kV 以上时，这类延迟令人望而却步。

在 ARPA（ARPA-E DE-AR0001007“具有超

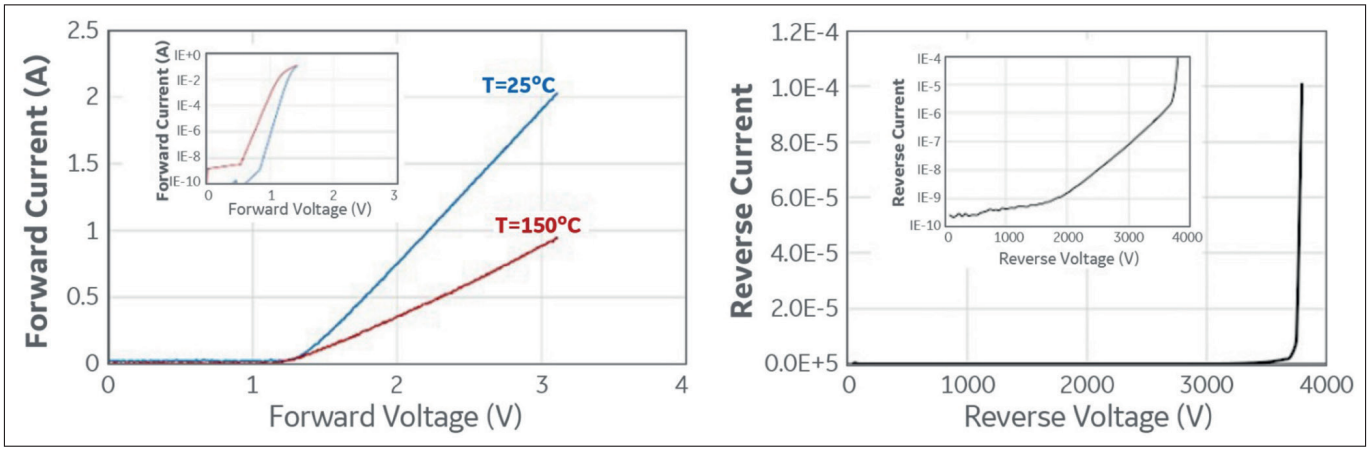


图3. 3.5kV深注入型SiC超结结势垒肖特基（SJ JBS）二极管的正向和反向电流-电压（I-V）特性。比导通电阻Ron,sp为4.5 mΩcm^2（比SiC单极极限低45%）。

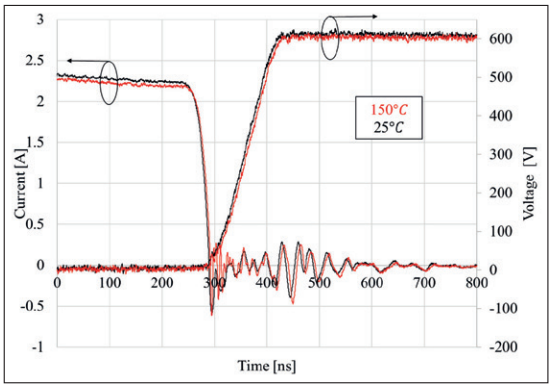


图4. 3.5kV SiC深注入型超结结势垒肖特基（SJ JBS）二极管在室温和150℃下的反向恢复特性。

低导通电阻的高级中压 SiC-SJ FET”）进一步资助的支持下，目前我们在最初的研究基础上，将电荷平衡架构扩展到全超结器件。我们的最新研究涉及基于深注入柱的全超结器件的制造，该器件是为电荷平衡器件而开发的，用来克服电荷平衡载流子分布延迟所带来的限制。

我们的团队开辟了全新领域，展示了世界上首个 3.5kV SiC 超结深注入型结势垒肖特基（JBS）二极管（见图 2）。

该类器件是 SiC 的重要里程碑，将为我们开发 3.3kV SiC SJ MOSFET 奠定基础。

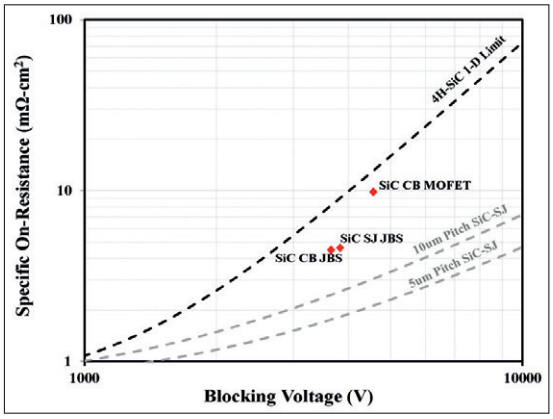


图5. GE报告的电荷平衡和深注入型超结器件之间的比较，以及4H-SiC单极和超结极限。

我们生产的深注入型超结二极管是利用两轮外延生长（每轮 12μm）形成的，产生的总漂移层厚度为 24μm。 p 掺杂和 n 掺杂柱是使用两轮高能离子注入（MeV）创建的，最大结深为 12μm。

我们还测量了超结 JBS 二极管的正向和反向电流 - 电压特性（见图 3）。该器件在 1.4V 时开启，并且在室温下具有 4.5 mΩ cm^2 的特定导通电阻，在 150℃时其电阻为 9.6 mΩ cm^2，这比 SiC 单极限大约低 45%。特定导通电阻是指在一定条件下的导通电阻。此外，其击穿电压为 3.8kV。我们观察到击穿前存在较低的漏电流，这表明高能离子注入、外延生长和 2000℃的激活退火之后缺陷很小。

利用 AGVA Technologies 的 ITC57300/57220（见图 4），我们对 SiC 超结二极管进行了反向恢复测量。当结温从常温升高到 150℃时，我们没有观察到关断电流和电压波形有任何变化。预计总电容电荷低于 700 nC/cm^2。

通过电荷平衡和超结器件与 4H-SiC 单极器件和超结极限进行基准测试，证明了我们这两种技术的有效性（见图 5）。这两种技术是制造超结器件的多外延和沟槽填充方法的有效替代方案，还为实现中压级高频固态开关提供了可扩展的解决方案。CS

本文提供的信息、数据或研究部分由美国能源部能源高级研究计划局（ARPA-E）资助，奖励编号为 DEAR0000674 和 DEAR0001007，由项目总监 Isik Kizilyalli 提供咨询。本文作者表达的观点和意见不完全代表或反映美国政府或其任何机构的观点和意见。

扩展阅读

- “IGBT and Diode chips from ABB Switzerland Ltd, semiconductors.” Available at www.abb.com
- A. Bolotnikov et al. 2015 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., pp. 2445–2452.
- L. Han et al. “A Review of SiC IGBT: Models, Fabrications, Characteristics, and Applications” IEEE Trans. Power Electron. 36 2080 (2021)
- T. Tanaka et al “First Demonstration of Dynamic Characteristics for SiC Superjunction MOSFET Realized using Multi-epitaxial Growth Method,” 2018 IEEE Int. Electron Devices Meet., p. 8.2.1-8.2.4, 2019.
- M. Baba et al. “Ultra-Low Specific on-Resistance Achieved in 3.3 kV-Class SiC Superjunction MOSFET,” 2021 33rd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2021, pp. 83-86
- R. Kosugi et al “Breaking the Theoretical Limit of 6.5 kVClass 4H-SiC Super-Junction (SJ) MOSFETs by Trench-Filling Epitaxial Growth,” in 2019 31st International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), 2019, pp. 39-42.
- P. Thieberger et al. “Novel high-energy ion implantation facility using a 15 MV Tandem Van de Graaff accelerator,” Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms 442 36 (2019)
- R. Ghandi et al. 32nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD), Sep. 2020, pp. 126–129.
- Z. Chen et al. “Effect of Annealing Conditions on Recovery of Lattice Damage in a High-Energy-Implanted 4HSiC Superjunction PIN Diode,” ECS Journal of Solid State Science and Technology 11 065003 (2022)

SEMI-e
深圳国际半导体展

第五届

第三代半导体产业高峰技术论坛

2024年6月26-27日

深圳国际会展中心 6号馆论坛区



演讲/赞助 详询：189 2743 3865 余小姐

扫码免费试听

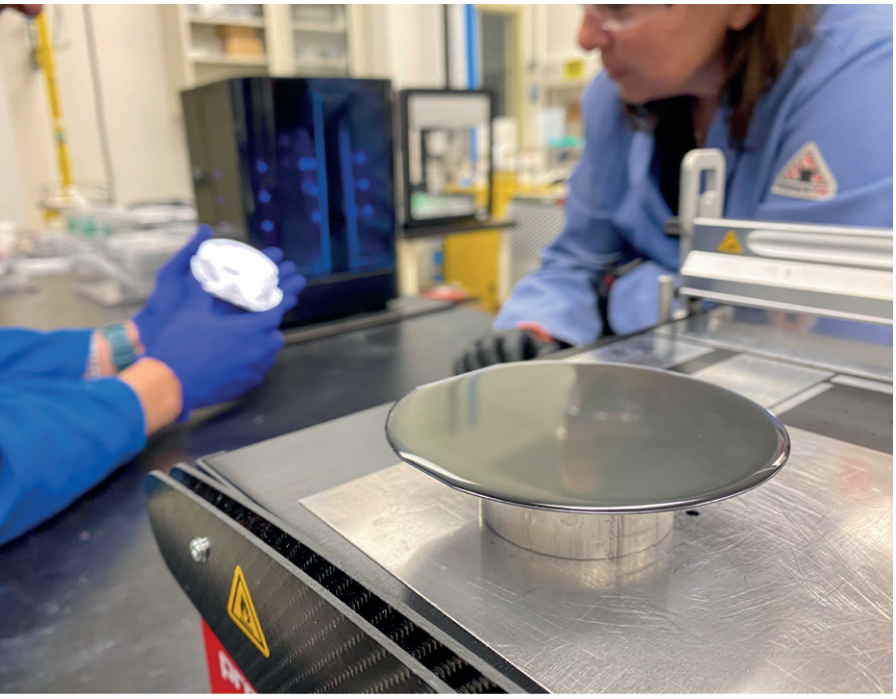
一种削减成本的合理方法

利用声能有望在宽禁带功率电力电子产品的生产过程中实现衬底的重复使用

作者：Arno Merkle，Crystal Sonic

毫无疑问，化合物半导体器件长期以来一直处于上升趋势。早在二十世纪末，化合物半导体器件就在我们的生活中发挥着许多重要作用：是电信网络的重要组成部分；为 CD 播放器提供光源；在手机中发挥着两个重要作用——照亮键盘和放大射频信号。在过去的二十年中，该类器件的销量持续攀升，部分是因为在灯泡和充电器中的应用。随着交通电气化、5G 的推出以及无数卫星的发射，其收益在不断增加，其发展也在持续。

然而，尽管巨大的性能优势推动了化合物半导体器件的成功，但其潜力尚未完全开发。制造供应链中有三个相关制约因素阻碍了开发：巨大的供需缺口，特别是基于 SiC 和 GaN 的宽禁带器件；成本高；以及浪费。我们将逐一分析这三个问题。



首先，宽禁带器件的需求与供应之间存在着巨大的且在不断扩大的鸿沟。例如，据 Canaccord Genuity Group 预计，在电动汽车、充电站、工业电机和太阳能逆变器等需求的推动下，十年内对 SiC 基功率器件的需求将导致 SiC 晶圆供应短缺约三倍。

其次，要生产有限晶体缺陷的高质量晶圆有着固有困难，因此宽禁带材料的生产成本很高。与 Si 不同，GaN 和 SiC 晶体无法从熔体中生长，需要更高的能量输入，这对工艺控制提出了更大的挑战。另一个作用因素是，生产此类材料的工业技术虽然有所增加，但仍然相对集中，特别是对于 GaN 和 AlN。因此，GaN、AlN 和 SiC 的衬底价格比硅至少高一、两个数量级也就不足为奇了。也因此，其成本约占器件制造总成本的一半，而且预计这一情况不会发生明显变化。根据 PGC Consultancy 的预测表明，宽禁带衬底仍将是制造成本的主要来源，随着晶圆产量的增加，在未来十年中，宽禁带衬底将占 SiC 芯片成本的 35-45% 左右。

最后，半导体制造过程中存在大量浪费。通常，有关此主题的讨论主要集中于水资源浪费和回收策略，或者芯片制造过程中有毒化学品、气体和其他消耗品的限制使用方法。但这忽视了一个更基本的问题：晶圆材料本身的浪费。这点确实很重要，因为在当今的传统制造工艺中浪费至少 95% 的晶圆材料并不罕见。经过大量努力，该材料在制造工艺中的两个关键步骤中实际上会被磨成粉末。这种情况首次发生是在，用线锯将大块晶圆级晶体切成晶圆的过程中，线锯本质上是另一种形式的面包切片机。在此步骤（称为“切片”）中，大约 50% 的材料会流失为锯末。浪费大量材料的第二次是将晶圆加工成芯片，通常通

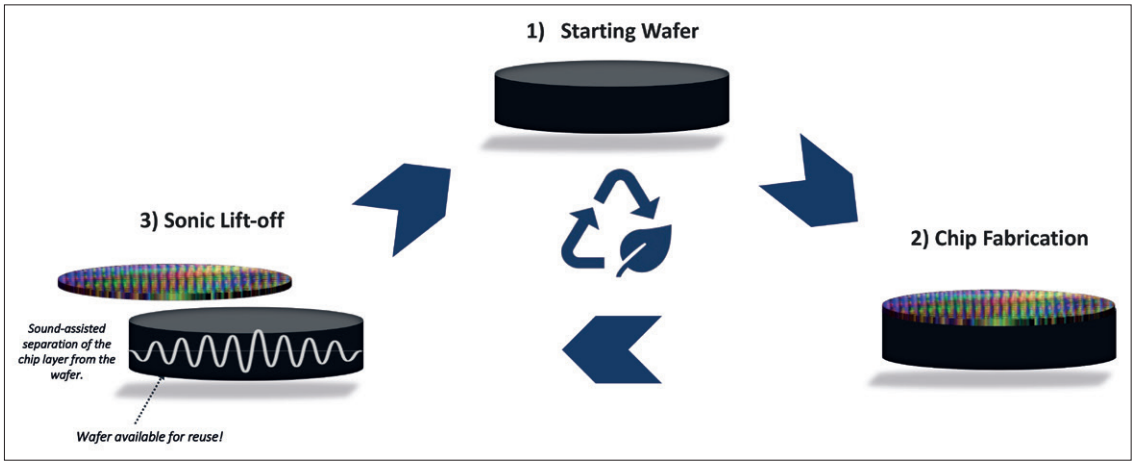


图1：声波切割工作流程，可让宽禁带材料能够重复使用衬底。

过机械背面研磨来减薄晶圆。在这种情况下，打磨设备提供了“器件减薄”功能，这一步骤会减少另外 90% 的衬底材料，再次变成尘末去除。

在过去的十年中，已经出现了替代线锯，改进切片的尝试方法。这些方法（包括涉及激光的方法）能够将与此步骤相关的浪费减少约 50%。然而，减少细化步骤中的浪费仍然具有挑战性。尽管已经进行了各种尝试，但目前还没有适合生产最高质量的块状宽禁带衬底的持久解决方案。

合理的解决方案

Crystal Sonic 位于亚利桑那州菲尼克斯市，该公司正在通过一种基于声能利用的新技术打破这一僵局。通过这种方法，我们为薄型器件切割和衬底再利用打开了大门，克服了该领域之前遇到的障碍。

该技术提供了一种简单的、多晶圆重复使用的途径，可以根据晶圆重复使用的次数成比例地降低衬底成本。为了实现节省，我们将定义切割深度的可拆卸应力源与高度可调的声源相结合（请参见图 1，说明了我们的专利技术如何利用声音的力量将薄器件与半导体衬底分离，从而实现衬底重复利用）。

该方法的一个关键优点是裂纹前沿以受控的速度平稳地穿过衬底。芯片因此可以进行后处理，同时只需最少的调节或无需调节，即可对衬底表面进行再处理。请注意，我们已经对由 Si、GaAs、SiC、GaN 和 AlN 制成的小直径晶圆进行了成功的可行性演示。

我们研发的方法称为声波切割，是热剥落的一种改进方法，是一种利用声能控制晶圆上裂纹运动的技术。在热剥落中，施加到晶圆上的应力来自加热或冷却时衬底和应力源层的热膨胀系数之间的差异。采用这种方法，裂纹萌生和裂纹扩展的耦合可能会产生不良结果。该类问题产生的原因是，与引发裂纹所需的能量相比，成功地将裂纹前沿移动穿过晶片的整个直径需要使用更多的能量。这种能量过剩可直接转化为无法控制的裂纹速度，并随后导致表面粗糙度高值和总厚度变化。而且，正如预料的那样，当过渡到更大的直径时，这个问题会更加严重。

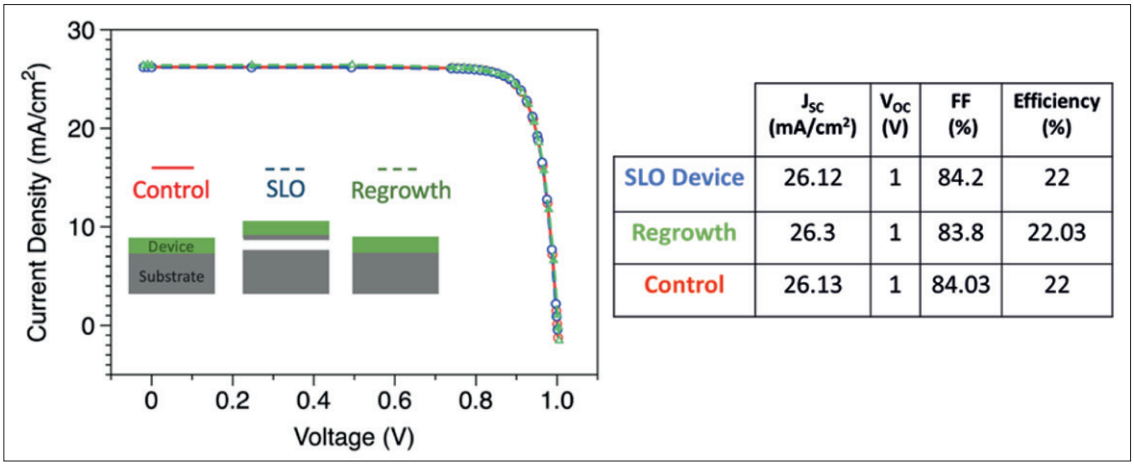
我们通过声学克服了这些问题。由于这一改进，我们成功地将裂纹萌生与裂纹扩展分离。通过引入声学，我们可以实现工艺调整，实现裂纹速度控制，从而对表面质量产生直接和积极的影响。

绝妙的切割方法

我们与美国可再生能源实验室、亚利桑那州立大学和罗彻斯特理工学院进行合作，证明了光伏器件（可被视为任何垂直光电技术的代表）在进行声波切割后仍能保持其性能。这项研究涉及



图2：在亚利桑那州菲尼克斯市的Crystal Sonic实验室，利用声波切割对4寸的GaAs晶圆进行切割。



	J_{SC} (mA/cm²)	V_{OC} (V)	FF (%)	Efficiency (%)
SLO Device	26.12	1	84.2	22
Regrowth	26.3	1	83.8	22.03
Control	26.13	1	84.03	22

图3：在2寸GaAs上生长（对照-红）、声波切割后（蓝）和在剩余衬底上重新生长（绿），器件的电流-电压（I-V）图。在原始衬底上生长（红）、声波切割器件（蓝）和在重复使用的衬底上重新生长（绿）之间的器件性能比较。所有器件的生长均由罗彻斯特理工学院完成，并由美国能源部根据合同号DE-EE0008973提供支持。

通过 MOCVD 在（100）GaAs 衬底上生长的倒置和直立器件，已确定与“对照”器件相比，切割不会导致电流或电压损失。

我们还继续研究了对剩余衬底进行适当处理，然后生长新器件。这种再生长的结果表明，这些器件与声波切割生产的对照器件和第一个光伏器件具有几乎相同的性能（见图 3）。这一发现提供了极其振奋人心的证据，证明了声波切割是切割薄型器件的最佳非破坏性技术。

值得注意的是，我们的技术不仅仅适用于 GaAs。该技术还在 SiC、GaN 和 AlN 等宽禁带半导体中发挥着重要作用，由于节能和高性能电子设备的需求不断增加，预计这些半导体在未来几年将显着增长。这些材料可广泛应用于功率电力电子领域，包括电动汽车、可再生能源系统和数据中心等。此外，还可用于高频射频 / 微波器件和光电子领域，例如：电信行业的射频功率放大器；用于表面、水和空气消毒的非常有前景的医疗保健辐射源 UVCLED 等。这些应用中的大多数都受到比 GaAs 更高的衬底成本限制，因此明显可受益于衬底再利用技术。

预计我们的声波切割技术适用于大多数（即便不是全部）单晶半导体衬底。目前正在进一步优化 SiC 和 GaN 等材料的工艺条件。开发工作分为材料兼容性和设备升级两部分。前者侧重于隔离适合每种材料类型的适当工艺参数，而后者则旨在优化所需的声学和其他与设备相关的设计元素，将切割区域扩展到 6 寸和 8 寸晶圆。

GaN 和 SiC 的早期研究工作成果富有前景，这与我们之前在 GaAs 方面的经验一致。根据我们的模型，切割厚度存在一个取决于材料的工艺窗口，范围约为 10-100μm ± 5μm（见图 4）。具体范围符合机械背面研磨的当前限制，可扩展到更薄的层。我们发现，由于存在相对少的表面损伤或微裂纹，该声波切割技术非常适合通过最小化切割层厚度来最大化衬底材料的利用率。

我们相信，声波切割技术将为衬底的再利用打开了新大门，并最终推动宽禁带半导体器件的广泛应用。这方面的成功将帮助我们所有人享受更光明、更强大、更高效的未来。CS

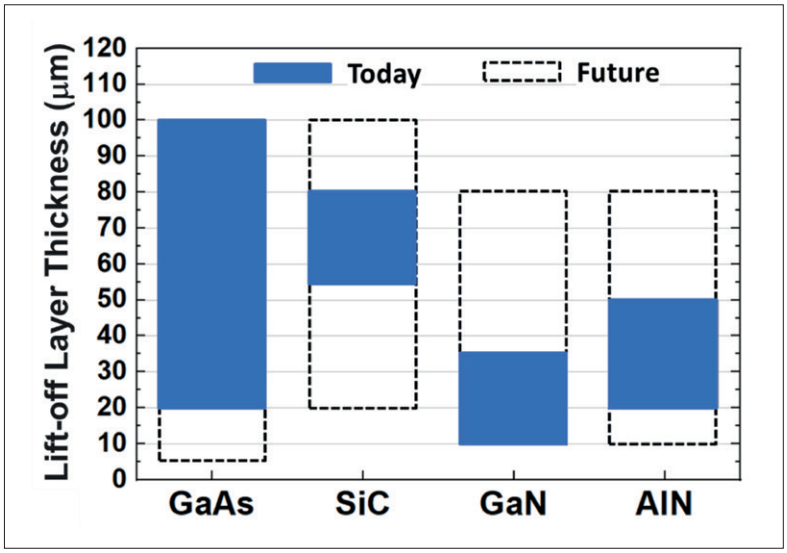


图4. 针对各种宽禁带衬底，预计当前和未来的预期切割层厚度范围。具体厚度可以控制在大约5μm以内。

扩展阅读

- https://www.electronicdesign.com/power-management/article/21238839/infineon-infineon-stacks-its-chips-on-asiliconcarbide-future
- K. Arakawa, “Relationships between fracture parameters and fracture surface roughness of brittle polymers,” Int. J. Fract. 48 103 (1991)

低温热氧化与自对准刻蚀工艺结合制备了8.7A@2V/700V 氧化镓功率半导体器件

来自中国科学技术大学的团队和中国电子科技集团公司第十三研究所的团队合作研究发现氧退火工艺具有降低表面粗糙度和位错密度的作用，根据实验结果，结合低温热氧化与自对准刻蚀工艺，成功制备了有源区尺寸为 3×43 mm^2 的器件，具有 8.7 A@2 V 的正向电流和 >700 V 的高击穿电压。这项工作为 β-Ga_2O_3 功率半导体器件的商业化提供了一种可能的解决方案。

近年来，β-Ga_2O_3 因其超宽带隙 (4.8 eV)、高 Baliga 品质因数 (3444Si) 和低成本成为下一代功率器件的候选材料。而且随着近年来卤化物气相外延（HVPE）技术的商业化应用以及新器件结构的多重发展，β-Ga_2O_3 功率器件性能得到了快速突破。在降低器件边缘电场方面，研究人员通过开发多种边缘终端结构（高阻终端、结终端拓展和台面终端等）已经取得了创新性进展，其中台面终端作为调控边缘电场的有效方式已被广泛研究，在显著提升击穿电压的同时又不会过多降低正向电流，在小面积器件中已经得到了证实。

然而，为了提高器件的功率等级以推进工程化应用，必须进行大面积尺寸的器件制备。但是大面积器件在带来大的电流密度的同时，包入更多的缺陷导致器件漏电流增大和耐压降低的问题难以平衡。因为目前大尺寸高质量的 β-Ga_2O_3 外延难以制备，表面缺陷难以控制。不过现有研究报道称，氧退火工艺有利于提高 HVPE 层的表面均匀性，可以有效减少氧空位和缺陷，改善外延质量。

因此针对上述问题，该研究团队通过结合氧退火和阳极自对准台面终端工艺，极大提高了 β-Ga_2O_3 二极管小面积器件的击穿电压，从 845 V 提升至 1532 V，而刻蚀前后器件的正向电流仅有轻微下降。而且经过热氧化处理，器件的导通电阻和击穿电压等参数的均一性也得到了显著提升。对于该现象，研究人员进行了热氧化前后外延层 AFM 表征，结果发现热氧化后外延层不仅出现明显原子台阶，而且器件表面粗糙度也从 0.435 nm 降低到了 0.245 nm。除此之外，通过对热氧化前后样品进行腐蚀坑密度和形貌测试还发现，热氧化处理后的样品表面腐蚀坑的密度和尺寸都有明显降低，这是器件击穿电压提升的根本原因。这种现象可能热氧化过程中氧气氛中氧基团加速表面原子的吸附或解吸，从而促进外延层表面重建有关。此外，基于上述工艺，研究人员成功制备了有源区面积为 3×3 mm^2 的大面积 β-Ga_2O_3 SBD 器件，实现了 8.7 A@2 V 和 Vbr > 700 V 的卓越性能。

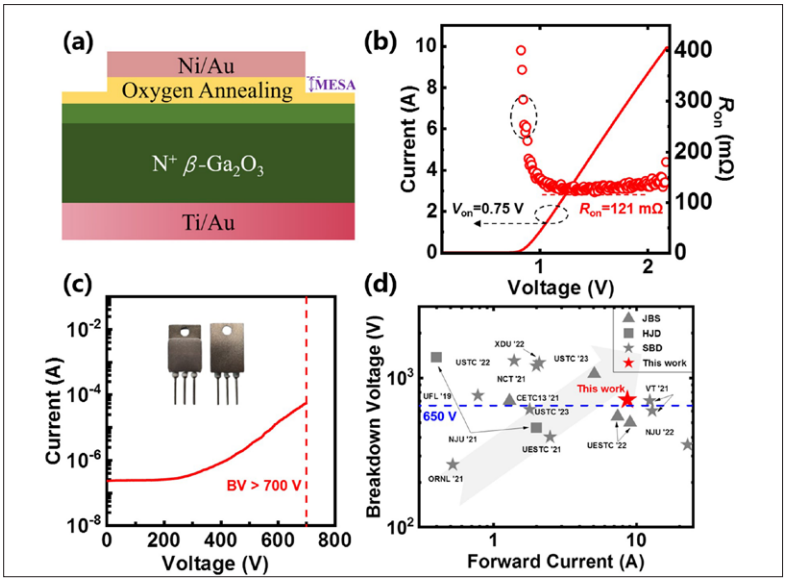


图 1：（a）热氧化和阳极自对准工艺结合制备的器件结构图；（b）大面积器件的正向导通特性及（c）反向特性（Area=3×3 mm^2）；（d）基于此工艺制备的大电流器件与当前同类器件的对比。

该工作的亮点是提出了将热氧化处理与 Mesa 终端结合的方案，同时兼顾大面积器件的电流密度和击穿电压，与已报道的复杂终端结构的器件相比，该方案具有明显的优势，使其成为商业化 β-Ga_2O_3 功率器件生产的解决方案之一。

该团队研究人员徐光伟表示，未来将进一步探究热氧化对于外延层表面缺陷的修复机理，为大尺寸、高质量、低缺陷的 β-Ga_2O_3 外延制备提供帮助，助力氧化镓功率器件商业化应用和量产。CS

参考文献

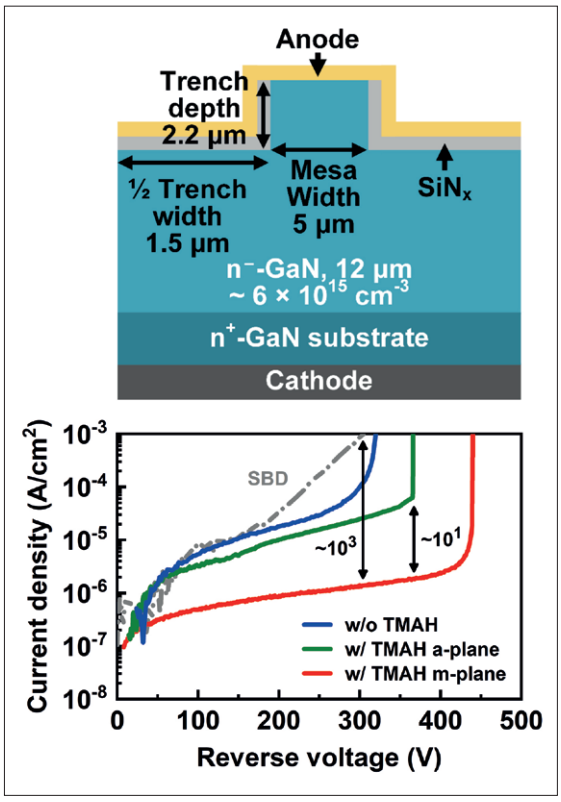
F. Wu et al., "8.7 A/700 V β-Ga2O3 Schottky barrier diode demonstrated by oxygen annealing combined with self-aligned mesa termination," Applied Physics Express, 2024. DOI: 10.35848/1882-0786/ad2d73

加深对沟槽后修复工作的理解

深入研究在制造基于沟槽的 GaN-on-GaN 功率器件期间湿法刻蚀的影响

GaN-on-GaN 功率器件以其高击穿电压、高电流能力和出色的动态性能而闻名，通常采用沟槽结构以提高性能。这些沟槽通常由感应耦合等离子体刻蚀定义，这也增加了漏电流，同时降低了沟道和阻断特性，因此通常采用四甲基氢氧化铵（TMAH）湿法刻蚀来恢复器件性能。但在这一各向异性刻蚀工艺中到底发生了什么？

中国浙江大学的一个团队声称，他们提供了对这一关键问题的最详细答案。



湿法刻蚀抑制了沟槽MOS阻挡肖特基整流器中的反向偏置漏电流。

“在之前结果的基础上，我们的工作不仅探讨了角部形态与电场分布之间的关系，还深入研究了 TMAH 处理的各向异性，包括在 a/ m- 平面侧壁上的沟槽结构和表面形态的差异，”团队发言人 Yanjun Li 说。她指出，以前的研究只关注了 TMAH 处理如何产生更平滑的沟槽底部角，从而提高了器件的击穿电压。

该团队通过感应耦合等离子体刻蚀，使用氯气和 BCl_3 的混合物以及 SiO_2 硬掩膜，制造了沟槽结构。在 10 mTorr 的腔室压力下，团队评估了在 100 W 和 20 W 的射频功率、150 W 和 250 W 的感应耦合等离子体功率、300 V、200 V 和 95 V 的直流偏置条件下，以及使用和不使用 TMAH 处理的影响。

扫描电子显微镜揭示了一些样品中微沟槽的存在，这些微沟槽是由偏转的离子轰击侧壁底部引起的。这些微沟槽可能导致垂直 GaN 功率器件中显著的电场集中，但可以通过低直流偏置来避免，通过增加感应耦合等离子体功率和降低射频功率来实现。

Li 及其同事通过在 85 °C 下用 25% 浓度的 TMAH 进行湿刻蚀 1 小时，细化了沟槽的轮廓。用扫描电子显微镜检查这些沟槽表明，所有侧壁在刻蚀后都变得更加垂直。然而，a - 平面有锋利的底部角，而 m - 平面侧壁有一个圆形的底部角。根据 Li 的说法，模拟和实验结果表明，这种各向异性抑制了沿 m- 平面侧壁的电场集中，与 a- 平面侧壁形成对比。“这突出了在设计和制造垂直 GaN 功率器件时注意晶体取向的必要性。”

TMAH 处理引入的各向异性扩展到侧壁表面形态。这个湿法刻蚀步骤并没有改善感应耦合等离子体在 a- 平面侧壁上产生的条纹状、粗糙表面，但 TMAH 处理导致 m - 平面侧壁明显更平滑。

“通常，更平滑的表面有利于减少沟道中载流子的散射，从而提高器件的导电特性，”Li 指出。

为了评估沟槽后处理对反向阻断特性的影响，Li 及其同事生产了具有 12 微米厚 n 型 GaN 漂移层的沟槽 MOS 阻挡肖特基整流器。对于这些器件，具有 2.2 微米深的沟槽、5 微米宽的台面和 3 微米宽的沟槽，电学测量突出了 TMAH 处理的好处。这种湿法刻蚀减少了漏电流，特别是沿 m - 平面（见图）。

团队的额外工作涉及制造金属 - 氧化物 - 半导体电容器，用于确定台面、沟槽底部和侧壁的电容和界面态密度。

“对于垂直 GaN 功率晶体管，刻蚀侧壁的界面态密度至关重要，因为侧壁通常用作沟道区域，”Li 说。

该团队现在计划将其沟槽后修复工艺应用于垂直 GaN 沟槽 MOSFET，其中沟槽侧壁表面作为栅极通道。CS

参考文献

Y. Li 等人，Appl. Phys. Lett. 124 092103 (2024)

CHIP China 晶芯研讨会

CS CHINA CON 2024 化合物半导体先进技术及应用大会

2024年5月22-23日

苏州·狮山国际会议中心

半导体先进技术创新发展和机遇大会

Semiconductor Advanced Technology Innovation Development And Opportunities Conference

议题范围

- 确保SiC取得巨大成功
- 加速GaN的发展
- 先进半导体材料、器件的可靠性和故障分析
- 能源变革大时代，功率器件及应用市场格局
- 超宽禁带器件：最终解决方案？
- 晶圆制造工艺：结合当地制造和产品差异化
- 先进半导体制程的创新解决方案
- 功率半导体市场竞争格局及产业机会
- 先进封装工艺和关键材料的创新
- 先进封测发展进入快车道

会议报名

会议出席嘉宾

郝跃 院士
中国科学院 院士
西安电子科技大学微电子学院 教授

刘胜 院士
中国科学院 院士
武汉大学动力与机械学院 教授/院长

沈波 副主任
北京大学 理学部副主任
长江特聘教授

徐科 副主任
国家第三代半导体技术创新中心(苏州)
副主任

马晓华 教授
西安电子科技大学
宽禁带半导体技术国家工程中心 主任

徐现刚 教授
山东大学新一代半导体材料
研究院 院长

欧欣 研究员
中科院上海微系统与信息技术研究所
研究员

刘国友 中车科学家
株洲中车时代电气股份有限公司
中车科学家

龙世兵 院长
中国科学技术大学微电子学院
执行院长/教授

孙钱 博士
中国科学院苏州纳米所
研究员

刘红超 博士
长飞先进半导体 首席科学家
高级副总裁

叶建东 教授
南京大学电子科学与工程学院

周晓阳 教授
广东芯聚能半导体有限公司
总裁

李晴洋 博士
北京智慧能源研究院
资深技术专家

李赟 博士
中国电子科技集团公司
第五十五研究所 副主任设计师

罗宁胜 博士
Cissoid中国 总经理

陈秀芳 教授
广州南砂晶圆半导体技术有限公司
教授/总经理

朱廷刚 博士
江苏能华微电子科技发展限公司
创始人兼总经理

黎子兰 博士
广东致能科技有限公司
CEO

祝锦
纳微半导体Navitas
高级技术营销经理

徐冬梅 秘书长
中国半导体行业协会封测分会 秘书长
西安交通大学微电子行业校友会 秘书长

秦宏志 博士
中芯国际深圳公司
前厂长/总经理

于大全 博士
厦门云天半导体科技有限公司
董事长

陆敏 博士
《化合物半导体》杂志主编
常州臻晶半导体有限公司 董事长

赵雪芹 主编
《半导体芯科技》杂志主编

孙鹏 博士
华进半导体封装先导技术研发
中心有限公司 总经理

潘尧波 总经理
中电化合物半导体有限公司
总经理

程凯 博士
苏州晶湛半导体有限公司
董事长/总裁

周贞宏 博士
BelGaN BV CEO

王巍 副总
河北同光半导体股份有限公司
副总经理

马康夫 总经理助理
山西烁科晶体有限公司
总经理助理

曹建武 资深工程师
CISSOID S.A Chief FAE China

许奇明 博士
苏州立琻半导体有限公司
CEO

母凤文 博士
北京青禾晶元半导体科技
有限责任公司 董事长兼总经理

孔令沂 博士
杭州海乾半导体有限公司
董事长

韩景瑞 副总经理
广东天域半导体股份有限公司
副总经理/研发总监

许照原 董事长
进化半导体 (深圳)有限公司

李顺峰 博士
苏州半导体激光创新研究院
执行院长

姚晨 资深应用专家
湖南三安半导体有限责任公司
资深SiC应用专家

黄兴 博士
派恩杰半导体(杭州)有限公司
CEO

陈彤
泰科天润半导体科技(北京)有限公司
董事长兼CEO

潘涛
Park Systems 应用总监

Aileen o' Mahony
牛津仪器科技(上海) 有限公司
产品经理

于翔
空气产品公司
亚洲区资深气体应用工程师

高冰 博士
浙江晶越半导体有限公司
董事长

李龙 经理
厦门市三安集成电路有限公司
市场产品经理

钮应喜 博士
中国科学院半导体研究所
教授级高工

王东萃 首席工程师
上汽创新研发总院
电驱业务部MCU首席工程师

朱正宇 总经理
炽芯微电子科技(苏州)
有限公司 总经理

杨继业 副总裁
上海华虹宏力半导体制造
有限公司 副总裁

*以上为部分出席嘉宾

主办单位：雅时国际商讯

承办单位：国家第三代半导体技术创新中心（苏州）、宽禁带半导体国家工程研究中心、宽禁带半导体器件与集成技术全国重点实验室、国家集成电路特色工艺及封装测试创新中心

转发享折扣 约“惠”在苏州

转发会议任意宣传信息至朋友圈及3个行业社群，即可获得会议85折门票券一张

添加客服领取

广告索引 Advertisers & Web Index

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AIXTRON SE		www.aixtron.com	BC
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
Evatec AG		www.evatecnet.com/cn	19
Hardinge, Inc.		usach.com	FC, IFC, 20-24
Park Systems		parksystems.cn/nx-wafer	1
RABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	9
Riber		www.riber.com	IBC
ULVAC	爱发科苏州	www.ulvac-china.com	5
杉岩数据		www.szsandstone.com	7
SEMI-e	第三代半导体产业高峰技术论坛	www.sz-semiconductor.com	37
3M 中国		www.3M.com.cn	31

欢迎投稿

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

本刊主要报道化合物半导体相关的材料、工艺、设备、器件、模块 / 组件、封测技术，及其发展趋势和相关厂务设施。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)
floydc@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: 86 159 0270 7275

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

Mandy Wu (吴漫)
mandyw@actintl.com.hk
Tel: 86 187 7196 7324

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)
floydc@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

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

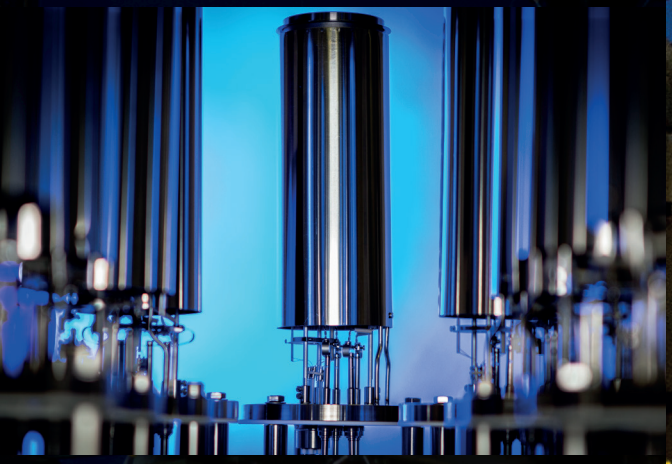
US（美国）
Janice Jenkins
jjenkins@brunmedia.com
Tel: 724-929-3550

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

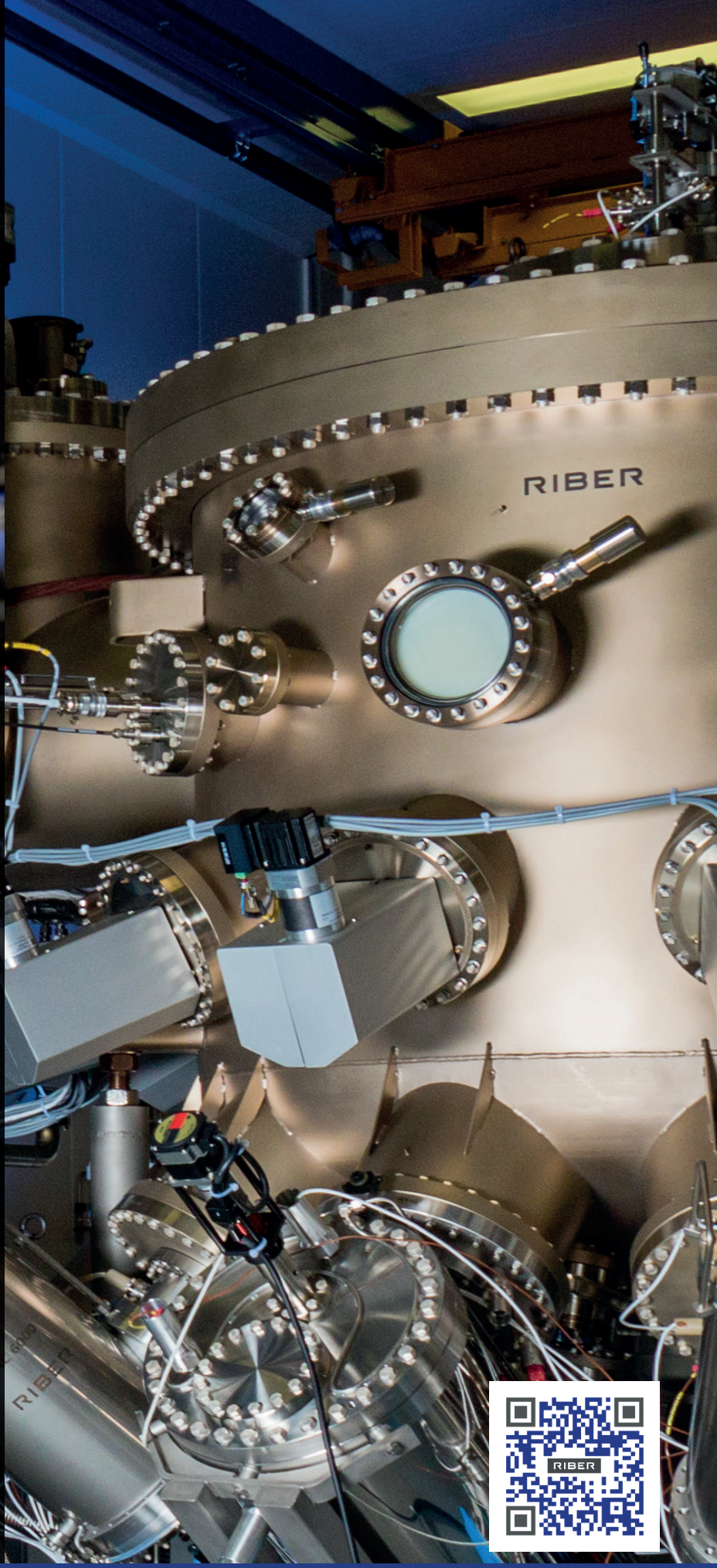
RIBER's MBE 6000



引领MBE 大规模生产

- 低真空背景
- 低原子能量
- 低外延温度
- 低晶体缺陷





RIBER

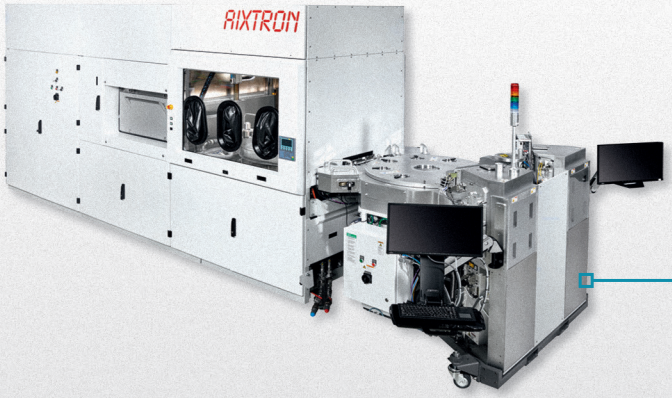
INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

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

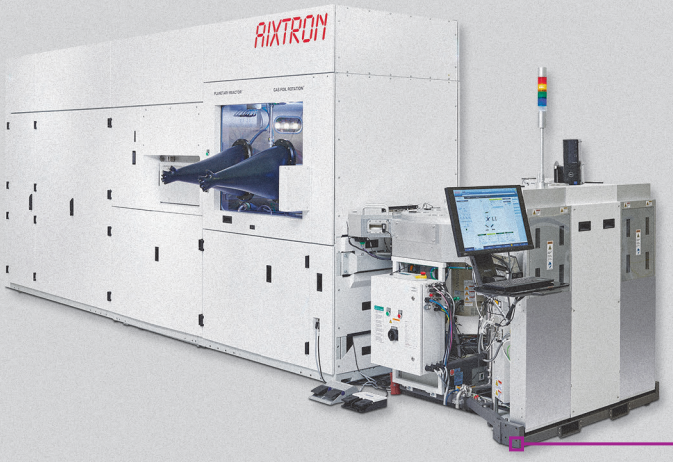
End Markets/Products:
EV inverters & charging infrastructure



G10-GaN

- 8x150 mm (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 5x200 mm (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

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