

化合物半导体



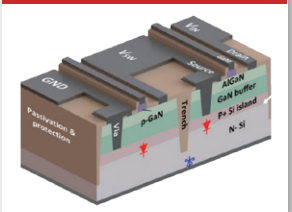
COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2024年 2/3月

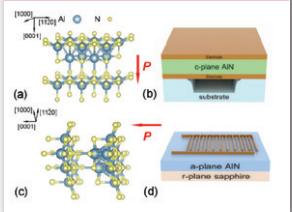
宽禁带半导体技术突飞猛进，产业蓬勃发展，未来任重道远



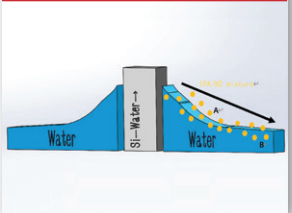
氮化镓功率集成电路技术



基于非极性氮化铝单晶薄膜的高速表面声波和横向体波谐振器



Marangoni干燥技术的新应用



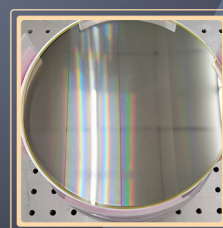
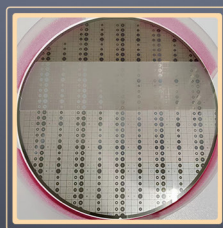
UPrecision 华卓精科

激光退火设备

Laser Anneal Equipment



8寸SiC 激光退火应用



北京华卓精科科技股份有限公司



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

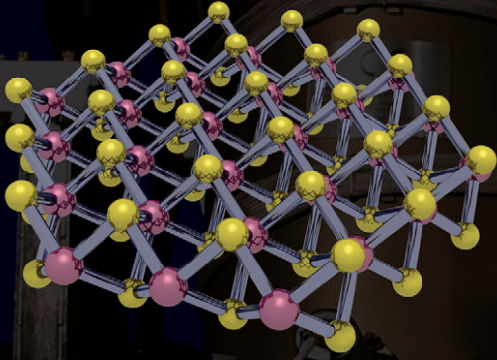
ACT INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

www.compoundsemiconductorchina.net

RIBER's COMPACT 21 SERIES



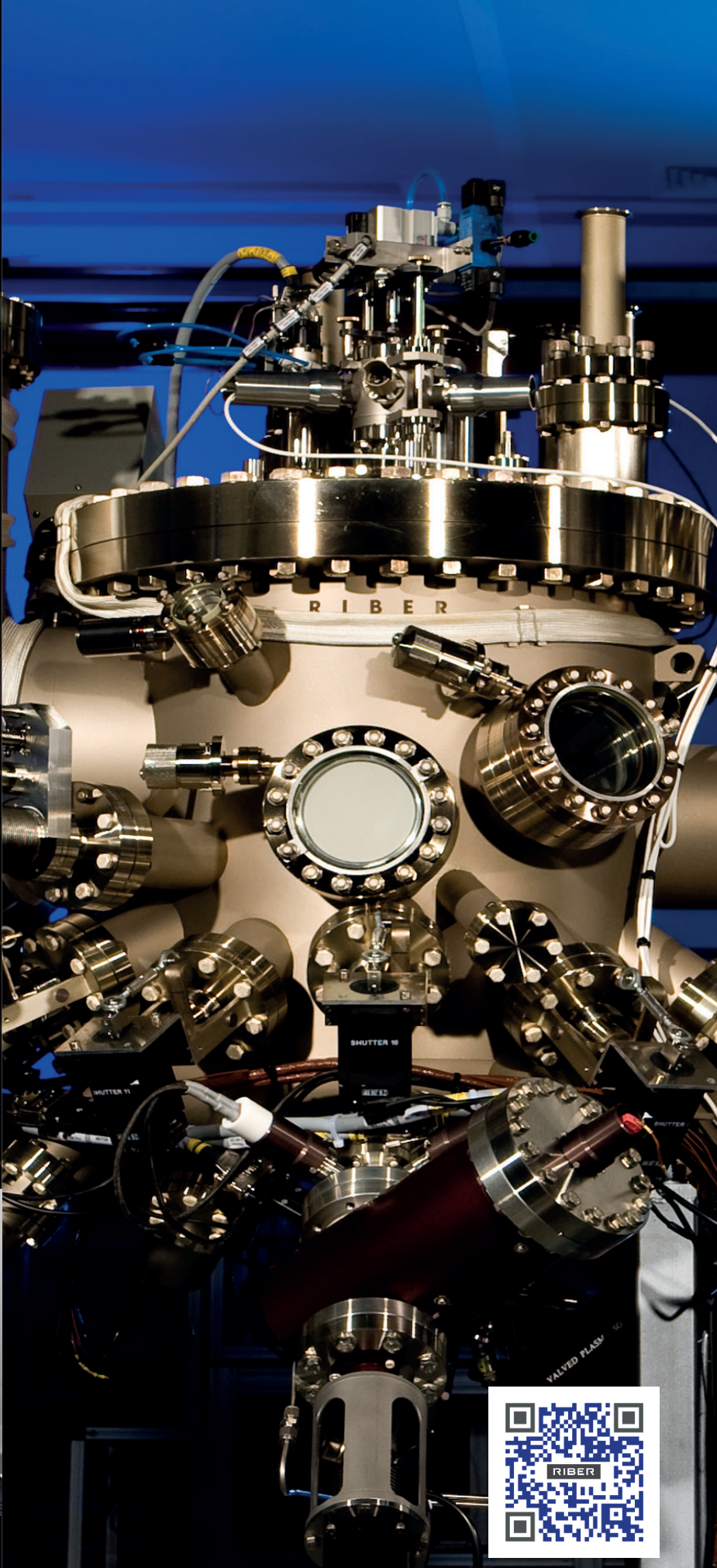
扩展您的研究 领域

小巧灵活

易于使用

高度集成

低使用成本



RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

最具挑战性的光罩缺陷修复

SEMICON CHINA

展位号 **T1-1205**



Park NX-Mask

Park NX-Mask是一款用于修复高端EUV光罩的创新型机台。Park NX-Mask 采用最新的原子力显微镜技术,配有新一代的光罩修复系统,用于解决随着器件尺寸缩小和光罩复杂性增加带来的新式挑战。从自动缺陷检测到缺陷修复再到修复验证的一站式解决方案为您提供了前所未有的修复效率,让您的研究工作事半功倍。

- 无任何类型的缺陷损坏和修复风险
- 兼容双EUV光罩盒
- 用于定位缺陷和修复后验证的多效合一型解决方案



关注公众号

parksystems.cn/nx-mask | ☎ 400-878-6829

Park
SYSTEMS

帕克
原子力显微镜

封面故事 Cover Story

44 基于非极性氮化铝单晶薄膜的高速表面声波和横向体波谐振器 High speed surface acoustic wave and laterally excited bulk wave resonator based on single-crystal non-polar AlN film

为了发挥氮化铝 (AlN) 在GHz频段的高频性能优势,人们往往需要借助氮化铝c轴的压电性能和高声速 (约11350 m/s) 特征。相对于传统的c面氮化铝薄膜,a面氮化铝薄膜的压电轴居于薄膜平面内,这种特殊的氮化铝薄膜材料有望大幅简化现有声学谐振器的构造。在本工作中,我们将物理气相沉积与高温退火技术结合,在r面蓝宝石衬底上成功获得了a面氮化铝单晶薄膜,而基于该非极性氮化铝单晶薄膜实现的声学谐振器具有优异的性能。实验表明,当施加电场方向与单晶薄膜c轴方向平行时,可在2.38 GHz与4.00 GHz频段分别激发具有高度各向异性的高性能瑞利波 (SAW) 与横向体声波 (LBAW)。其中瑞利波性能优异,品质因子高达2458,并在变温实验中表现出很强的稳定性;而仅由平面指叉电极即可激发的4.00 GHz横向体声波则是在氮化铝体系中首次报道,且无需加入任何空腔或底电极结构辅助。本工作展现了非极性面氮化铝单晶薄膜在谐振器提升性能与简化结构等应用领域的巨大优势。

- 卢同心^{1,3}, 房晓丽², 张师斌², 袁冶³, 欧欣², 王新强^{1,3}

¹ 北京大学物理学院, 北京市海淀区成府路209号, 北京

² 中科院上海微系统与信息技术研究所, 中国上海市长宁区长宁路865号, 上海

³ 松山湖材料实验室, 东莞市松山湖国际创新创业社区A1栋, 东莞

编者话 Editor's Note

04 VCSEL技术和产业化进展 The progress of VCSEL technology and industrialization

- 陆敏

业界动态 Industry

06 全球最大的SiC晶圆厂 The world's biggest SiC fab

06 X-FAB出资2250万欧元收购Xtrion的M-MOS X-FAB acquires M-MOS from Xtrion for €22.5m

07 近40万片! 天域半导体冲刺投产 Nearly 400,000 SiC wafers! TYSiC sprint into production

12 芯联集成与蔚来汽车签署碳化硅生产供货协议 UNT and NIO signed a silicon carbide production supply agreement

九峰山实验室专栏 JFS Laboratory Column

08 氮化镓功率集成电路技术 GaN Power Integration Technology

- 李思超、何俊蕾、李成果、叶刚、赵波、葛晓明、贾汉祥、卢双赞、潘磊、王瑜璞, 九峰山实验室

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 - 为跨国公司与中国企业架起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/微电子、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

宽禁带半导体国家工程研究中心专栏
WBS Column

14 国家工程中心平台介绍
Introduction of National engineering center platform

高端访谈 Top interview

17 郝跃院士专访
——宽禁带半导体技术突飞猛进，产业蓬勃发展，未来任重道远
Interview with Academician Hao Yue-- WBS technology advancing, WBS industry booming, and long way to go in future

29 展望2024
looking forward to 2024

技术 Technology

49 Marangoni干燥技术的新应用
New Applications of Marangoni Drying Technology
- 徐亚志，华斌；苏州智程半导体科技股份有限公司

科技前沿 Research Review

53 利用深紫外光推进通信的发展
Advancing communication in the deep UV

54 实现垂直型深紫外激光器
Realising vertical deep-UV lasers

55 转向单片多色microLED阵列的隧道结
Turning to tunnel-junctions for monolithic multicolour microLED arrays

56 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



高端湿法制程
设备制造商

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
Beijing CGB Technology Co., Ltd

网 址：http://www.cgbtek.com
电 话：400-650-7658

北方制造基地：河北省廊坊市.香河机器人产业港三期A栋

耿 彪 13910297918
gengbiao@cgbtek.com
牛沈军 13911271076
niushenjun@cgbtek.com
郭生钢 13911279276
sgguo@cgbtek.com



VCSEL 技术和产业化进展

近日通快光电器件，全球工业激光热处理 VCSEL 解决方案领导者，在近日举行的 Photonics West 上展示了最新的 TruHeat VCSEL 产品，它可应用于区域性加热和电子交通领域。基于 VCSEL 的激光加热系统为工业加工提供直接、均匀和区域性的可控制热处理。TruHeat VCSEL 激光加热系统基于最新一代多结 VCSEL 阵列，加热系统通过高效驱动电子设备进行热设计优化。980nm 的波长更加容易被所有电池电极材料吸收，来支持更高的干燥效率。从 2018 年苹果公司 iPhone X 智能手机采用 VCSEL 作为其人脸识别的功能器件开始，VCSEL 应用就逐步拓展进入智能手机、3D 感测、人脸辨识、车载雷达 (Li DAR) 等领域，VCSEL 市场规模就快速增长。根据 TrendForce 集邦咨询最新研报，受到消费市场疲弱影响，2023 年消费电子 3D 感测 VCSEL 市场产值虽然只有 8.5 亿美元，但受惠于苹果公司计划 2024 年导入 MetaLens 技术及采用结构光、直接式飞时测距、主动式双目视觉，加上 Sony、Meta、Microsoft、Google 等品牌厂商持续推出 AR/VR 产品，将稳定带动 3D 感测市场需求。预估至 2028 年消费电子 3D 感测 VCSEL 市场将达 14 亿美元。

1977 年，日本 K. Iga 教授首次提出面发射半导体激光器概念，1979 年实现了 InGaAsP/InP 体系电激励，标志着 VCSEL 的诞生。1991 年到 1994 年，基于 GaAs 不同波长的 VCSEL 陆续研制成功，波长为 780nm、850 nm、980 nm 的 VCSEL 受到了广泛关注，并成功产业化。2008 年实现了连续工作的 462 nm 蓝光 GaN 基 VCSEL，但是工作温度在 77K，同一年中日本 Nichia 公司制备了可以在室温下连续工作的 414nm VCSEL，2023 年厦门大学实现了室温绿光 524nm VCSEL 电激励。VCSEL 的谐振腔为圆对称结构，由量子阱有源区、上下分布布拉格反射镜和衬底三部分组成。VCSEL 与边发射激光器相比，VCSEL 增益区体积比较小，上下 DBR 具有很高的反射率，所以阈值电流很低；基于 VCSEL 的结构特点，是从一个圆形中心对称的台面出射激光，所以光斑是圆对称的，并且激光的发散角较小；VCSEL 解理前可以在片测试，故制备成本相对低廉，容易实现大规模生产；由于 VCSEL 垂直于衬底表面出光更容易实现高密度集成；VCSEL 采用高微分增益量子阱，可以实现高调制频率，可以加快互联网数据传输和空间光通信的数据传输速度。VCSEL 与发光二极管相比，VCSEL 的输出功率和功率转换效率较高；具有高的调制带宽；VCSEL 具有良好的光束质量，直接输出的圆形光斑不用经过后期光束整形和聚焦。总之 VCSEL 具有可在片测试、单纵模激励、光场圆对称分布、阈值低、调制速率高、光纤耦合效率高、功耗低、寿命长以及易二维阵列集成等优点。不过较大的激光线宽、偏振随机切换是其两大缺点。基于 VCSEL 的上述优点，VCSEL 可被广泛应用于光互连、光通信、激光引信、激光显示、光信号处理以及芯片级原子钟等领域。

VCSEL 的外延片通常使用 MBE 或者 MOCVD 生长。现今常用的衬底材料为 GaAs、InP 和 GaN，出射波长为 700 nm-1000 nm 的 VCSEL 主要采用 GaAs 为衬底，长波长 1310 nm 和 1550 nm VCSEL 通常采用 InP 为衬底，GaAs 和 InP 材料体系目前应用范围较广，发射波长在 850 nm 的 VCSEL 主要应用于多模短距离光纤通信，包括光纤到户、超级计算机中心、芯片间互联等。而发射波长在 1310 nm 和 1550 nm 的单模 VCSEL，因与单模光纤能高效的耦合，具有较小的传输损耗和色散损耗，被广泛应用于中长距离通信。目前发射波长为 850 nm 和 940 nm 的大规模集成 VCSEL 高输出功率阵列已被应用于高功率短脉冲激光雷达技术中。可见光和紫外 VCSEL 器件一般采用 GaN 衬底，受 VCSEL 的模式调控与器件研制工艺难度限制，尚未产业化。

因 VCSEL 具有较短的腔长，其线宽通常在 MHz 量级，较大的激光线宽限制了其在相干光通信领域的应用。一般而言，当光源的线宽在 MHz 量级时，基于该光源的雷达系统的最大探测范围为百米量级。所以为了使激光雷达及数据通信的性能更优，就需要提高作为光源的 VCSEL 的性能，如输出功率、线宽以及偏振态等参数。在数据通信上，采用偏振可控的窄线宽 VCSEL 或窄线宽多波长 VCSEL 阵列作为光源可降低由光纤色散引起的传输损耗以及光源器件的振幅噪声，提高通信质量；在高速图像采集中，采用窄线宽多波长 VCSEL 阵列作为光源可以加快干涉共聚焦显微镜的成像采集速度，在精密测量领域，使用偏振可控的窄线宽 VCSEL 或多波长 VCSEL 阵列作为光源，可以提高测量系统的探测精度和探测范围。随着 VCSEL 的大口径以及二维阵列的开发，VCSEL 的输出功率有了显著的提高。但由于载流子聚集效应与空间烧孔效应，会使得激光功率密度分布不均匀，对器件出光质量造成极大影响。因此，探寻合适的方法实现 VCSEL 的波谱拓宽、高功率、线宽窄化、偏振控制和更高的光束质量，成为了技术和产业领域急需解决的问题。



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




ISSN 2789-2735

© 2024 版权所有 翻印必究



聚势赋能 共赴未来

2024 九峰山论坛 暨 中国国际化合物半导体产业博览会

2024 JFS CONFERENCE AND CHINA INTERNATIONAL COMPOUND
SEMICONDUCTOR INDUSTRY EXPO

4.09-4.11

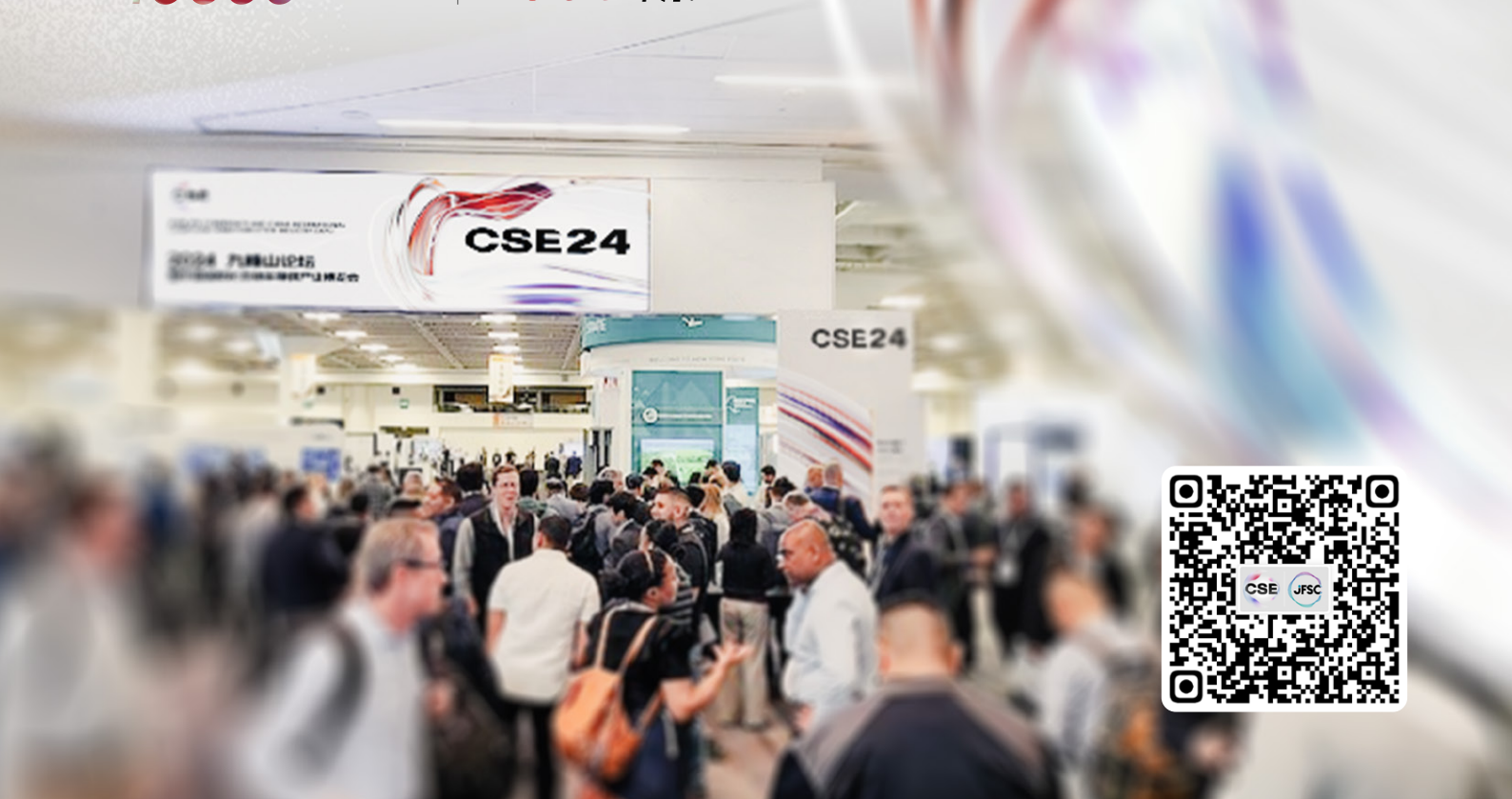
中国·湖北·武汉
光谷科技会展中心

5000⁺ 专业观众

300⁺ 行业领袖

10000^{m²} 主题展览

800⁺ 企业代表



全球最大的 SiC 晶圆厂

在 SiC 行业中，许多制造都在企业内部进行。因此，这类芯片制造商想提高产量时，往往会提高内部产能。目前，受电动汽车销量大幅增长的刺激，芯片制造商正全力提高内部产能，因为电动汽车的车载充电器和直流-直流转换器均采用了 SiC 功率器件。电力电子巨头英飞凌是因产能扩张而成为头条新闻的公司之一，该公司称正在建设全球最大的 200mm SiC 晶圆厂（规模最大、产能最大）。英飞凌在马来西亚居林的新晶圆厂计划最初获得了 20 亿欧元的内部资金支持，去年夏天又获得了 50 亿欧元的注资，用于新晶圆厂的建设和设备。英飞凌居林公司高级副总裁兼总经理 Ng Kok Tiong 表示，当时公司宣布新厂的一期建设将于 2024 年第三季度完工，目前仍在按计划进行。在接下来的五年中，二期建设将陆续完工。英飞凌的全新 SiC 功率晶圆厂（居林第三工厂）紧邻其另两个 200mm 硅晶圆厂。然而，虽然这两个工厂是 2006 年建成的，却并非英飞凌这家欧洲巨头首次在马来西亚进行离岸制造。1999 年，英飞凌从西门子脱离，而西门子在马来西亚的投资已有近 50 年历史，包括在另一个州（马六甲）建造后端组装和测试工厂。结合这几家马来西亚晶圆厂，英飞凌可在该国进行端到端生产。事实上，英飞凌在半导体制造领域的投资非常有力，以至于马来西亚的员工数量已超过德国等其他国家的员工数量。据 Ng Kok Tiong 称，英飞凌决定在居林建设第三工厂，进而扩大其 SiC 产能，其中一个原因是此举可非常快速地提升产能。部分原因是与其他国家相比，马来西亚劳动法可批准每天花更多时间进行建设。建设新厂都要面临一个困难，即获得水电供应许可。Ng Kok Tiong 认为，居林第三工厂很快就获得了批准。在现有工厂旁边建设新厂对此有所帮助，但除此之外，英飞凌还受益于其在马来西亚大规模且受欢迎的业务。Ng Kok Tiong 说道：“我们与政府、MIDA（负责投资的政府机构）的合作非常愉快。”他还补充道，他们在需要支持时会得到很多关注。Ng Kok Tiong 表示，2024 年 4 月，居林第三工厂将开始安装设备，当年下半年，计划开始生产 SiC 器件。该厂的工程师将负责前端加工的方方面面，包括利用五家供应商（两



英飞凌正在建设全球最大的 SiC 晶圆厂（面积最大、产能最大），预计今年第三季度投产。

家来自中国、两家来自美国、一家来自日本）供应的晶圆生产 SiC 衬底。2018 年，英飞凌从 Siltrix 处获取冷分割技术，而冷分割技术有助于提高与该工艺相关的利润率。Ng Kok Tiong 表示：“有了这项新技术，可以减少一些原材料损耗。”建设 200mm SiC 晶圆厂预计创造 900 个工作岗位，绝大多数岗位将雇佣当地人。为了帮助培训马来西亚工程师，英飞凌将许多马来西亚工程师派往其奥地利菲拉赫 SiC 晶圆厂。此外，那里的专家也会访问居林工厂。为了吸引当地最优秀的人才，居林工厂与当地的大学和理工学院密切合作，提供实习和毕业设计机会。Ng Kok Tiong 及其同事发现，由于需要非常独特的专业知识，即使是四年制大学毕业的工程师，也需进行 8 个月培训才能做出有意义的贡献。因此，为了避免这一延迟，他们推出了一项计划，让学生在工厂实习，并由工厂的工程师担任导师。Ng Kok Tiong 表示：“学生毕业时，就可以发挥作用了，因为他们知道统计过程控制（SPC），知道如何做实验设计（DoE），以及类似的事情。”英飞凌获得一系列设计采纳，总值 50 亿欧元，有助于其对居林第三工厂的投资承诺。其中，电动汽车领域和工业领域约各占一半，后者包括太阳能行业和存储行业。根据计划，到本十年末，居林和菲拉赫两个基地的生产将占据 SiC 功率市场 30% 的份额，届时该市场的价值将达到 200 亿欧元左右。虽然居林第三工厂最初的重点是 SiC，但也在努力开发 GaN 产品。目前正朝这个方向迈出第一步，其中包括生长工艺鉴定。根据居林的所有宽带隙半导体计划，毫无疑问，本十年及未来，英飞凌与马来西亚的长期合作关系只会更加牢固。CS

X-FAB 出资 2250 万欧元收购 Xtrion 的 M-MOS

X-FAB Silicon Foundries SE 总部位于比利时泰森德洛，是一家专注于模拟 / 数字（混合信号）集成电路、传感器、微机电系统（MEMS）、特种半导体的代工厂，其计划出资 2250 万欧元从 Xtrion NV 手中收购 M-MOS Semiconductor

Hong Kong Ltd. Xtrion 同样位于泰森德洛，曾持有 X-FAB 的多数股权，直至 2023 年 11 月中旬，Xtrion 将其所有股份出售给了 Elex NV 和 Sensinno BV（分别是 Duchâtelet 家族和 De Winter-Chombar 家族的投资工具和控股公司）。由

于 Elex 和 Sensinnovat 早已是 Xtrion 的间接股东，此次交易代表 Duchâtelet 家族和 De Winter-Chombar 家族在 X-FAB 的股权重组，这两个家族（连同 X-FAB 的同类投资者 Sarawak Technology Holdings Sdn Bhd）后续可自由实施各自独立的投资战略。M-MOS 是一家专门开发 MOSFET 技术并设计定制 MOSFET 器件的无晶圆厂公司。其 MOSFET 晶圆由 X-FAB 制造，主要销往工业、消费、汽车等市场。2022 年，M-MOS 的收入为 3200 万美元。

X-FAB 集团首席执行官 Rudi De Winter 表示：“X-FAB 于 20 多年前在德国埃尔福特开启分立器件业务，随后在马来西亚生产基地古晋为 M-MOS 生产沟槽 MOSFET。”他补充道：“从那以后，我们开发了越来越多的分立业务，例如 X-FAB Texas 的碳化硅技术和 X-FAB Dresden 的氮化镓技术。我相信，M-MOS 在工艺和产品设计及市场等方面具备专业知识，将有助于加速 X-FAB 发展分立业务。”

近 40 万片！天域半导体冲刺投产

近日，天域半导体 2 个 SiC 外延项目迎来封顶/扩建，进一步加速产能扩充。东莞生态园厂区：项目一期预计今年 5 月试产，规划年产能 17 万片；东莞松山湖厂区：第七次扩产，项目将新增 20 万片/年产能。总部及生产制造中心建设项目：拟投资 76.7 亿元，总用地面积约为 6.3 万平米，总建筑面积约为 22 万平方米，建设周期为 2023 年至 2025 年，将新建 3 座厂房及配套建筑设施用于搭建 100 万片/年的 SiC 外延片产线，项目一期将在 2024 年 5 月试产；研发中心建设

项目：拟投资 3.3 亿元，总用地面积约为 1.3 万平方米，总建筑面积约为 4.6 万平方米，建设周期为 2023 年至 2025 年，将建设科技研发中心、综合办公大楼等设施，目前正在建设中。综合来看，第七次改扩建结束后，天域半导体的松山湖厂区总投资约为 16.67 亿，总占地面积为 1.86 万平方米，总建筑面积为 2.61 万平方米，共有外延生长设备 121 台，SiC 外延片最大年产能 33.44 万片。未来，如果生态园厂区顺利投产，天域半导体的 SiC 外延片年产能将增至 133.44 万片。



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.



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

氮化镓功率集成电路技术

作者：李思超、何俊雷、李成果、叶刚、赵波、葛晓明、贾汉祥、卢双赞、潘磊、胡昌宇、王瑜璞

从分立器件到集成电路

相较于传统体硅材料制造的功率器件，以 GaN、SiC 为代表的第三代化合物半导体凭借其卓越的电流密度及击穿电压，逐渐成为下一代功率开关器件。这其中 GaN HEMT 又具备高频高速的开关能力，能大幅度缩小电容、电感、变压器等无源元件的体积，从而提升电源系统整体功率密度，并进一步促进了电力电子系统往小型化、轻量化的方向发展。GaN 正逐步被应用于各类体积紧凑型场景中，如手机充电器、便携笔记本电脑的适配器、数据中心的供电电源、无人机的电机驱动等。

在传统电力电子系统中，功率器件与周边的驱动器、控制器以及负载等均以分立元件的形式焊接在同一 PCB 板上，而功率器件与这些功能元件之间存在的传输路径会带来寄生电感，这部分寄生电感除了会抑制 GaN 高频高速开关的核心优势以外，还会带来效率降低、电磁干扰、通讯延迟以及可靠性风险等诸多问题。

为了克服分立功率元件的诸多弊端，通过将电力电子系统中各功能组件进行集成，能够最大程度发挥 GaN 器件高频高速开关特性，并能提升传输效率、保证通讯完整性、加固系统可靠性

以及增强元件间的匹配度。而不同层次的集成度将会带来不一样的收益：(1) 将功率器件与驱动、传感及控制电路集成，能增强通讯完整性与一致性，并降低电源系统设计者设计难度；(2) 将功率器件集成为单芯片功率转换电路，能降低器件过冲电压，增强系统的可靠性与鲁棒性；(3) 将功率转换电路与用电负载进行集成，能降低电能传输过程中电压降低，提升传输效率。

如同传统硅基 BCD 工艺一样，水平结构的 GaN HEMT 器件使其便于在同一颗芯片上集成多功能元件。如图 1 所示，GaN 功率开关器件与外围功能单元组合成功率单片集成电路，并可通过先进封装与其他组件实现异质集成，共同构建更高效、更紧凑、功能更全面、成本更低的下一代电力电子系统。GaN 功率器件构建的集成程度主要分四个类型：(1) 驱动电路集成，主要指功率器件与外围功能单元包括驱动、传感、保护等进行集成。(2) 功率器件集成，主要指将两个及以上功率器件，集成到单一芯片上，以实现不同拓扑结构的功率换流器，如 H 桥换流器、多相换流器、多级换流器。(3) 逻辑电路集成，主要指将控制器、界面等数字单元进行集成。(4) 负载集成，主要指将电能转换系统与负载直接进行异质集成，如将 GaN 供电模块与 CPU/GPU 核集成，构成 GaN-on-CMOS。除此以外，GaN 功率集成还可以同能量存储单元或能量收集单元进行集成，构建完整的集成电源系统。

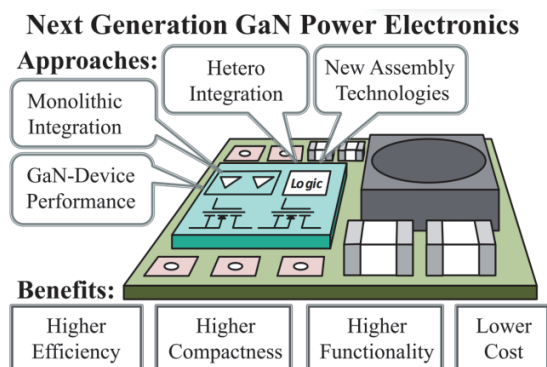


图1：下一代GaN功率集成电路，包括功率器件、驱动电路、数字电路等^[1]。

驱动单片集成

尽管 GaN HEMT 功率器件作为高频高速开关的优势明显，但当器件工作在快速开关状态时仍然存在诸多挑战：如栅极电压过冲、误导通以及检测响应延迟等。所有这些问题都阻碍了 GaN HEMT 作为高频高速开关的潜力，使其作为下一

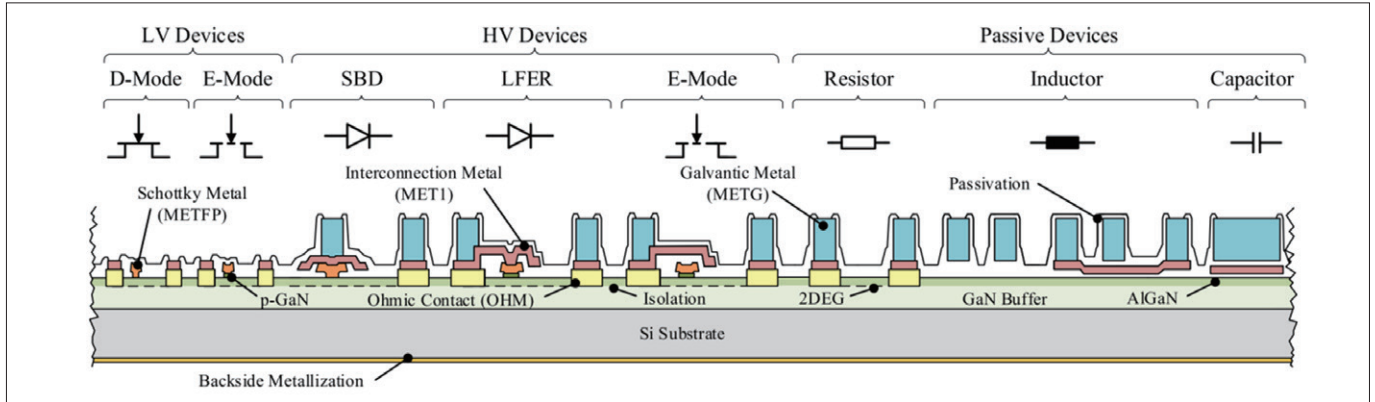


图2: 基于硅基GaN技术的功率集成电路平台的各元件的截面图^[5]。

代功率开关的优势并未发挥到极致。

2009年,香港科技大学首次基于GaN HEMT平台构建GaN智能功率集成平台^[2]。通过氟等离子体注入实现增强型GaN功率器件,并实现器件间的水平电气隔离,首次在GaN-on-Si外延上实现了高压功率器件与外围数模混合电路的集成。但是,由于基于氟负离子构建的增强型栅极稳定性较弱,无法大规模量产。如图2所示,该图为日本松下公司和德国Fraunhofer应用固态物理研究所提出的“基于p-GaN栅结构的增强型GaN功率器件实现的功率集成电路平台^[3-5]”。这种结构在工艺上更容易实现,器件特性也更加稳定可靠。

目前,商用的高压集成驱动器件主要应用在650-700V电压等级之间。Navitas的All GaN™系列,将650V GaN功率器件、驱动、dV/dt控制以及欠压保护(ULVO)等功能集成到单颗GaN功率集成电路中^[6]。此外,英国Cambridge GaN器件公司也推出其ICeGaN™平台,集成了功率器件、检测、保护电路以及用于安全快速关断的米勒钳位电路^[7]。

低压集成驱动器件则主要应用在40-100V电压等级之间,代表厂商为EPC,其推出的40-100V单片集成功率驱动电路^[8],主要包含两类系列产品:(1)半桥驱动电路ePower™系列,集成了驱动、电平位移、欠压保护等功能,最高开关频率可达3 MHz。(2)用于40-100 V激光雷达驱动的eToF™系列,与驱动电路集成,实现最高开关频率达10-200 MHz,将GaN功率开关器件的开关频率推到极致。

功率单片集成

将两个及以上功率器件,集成到单一芯片上,可以实现不同拓扑结构的功率换流器,如H桥换流器、多相换流器、多级换流器。通常,为降低成本,功率器件之间会共用同一硅材料作为衬底,这就会导致功率器件受到衬偏效应的影响,进而造成功率器件阈值电压漂移、动态电阻恶化、等效电容增加等问题。为了抑制衬偏效应,各功率器件的衬底之间需要进行电气隔离。电气隔离主要分为两个维度,横向隔离和纵向隔离。其中,横向隔离主要采用深槽刻蚀工艺,并

以填充介质的方式实现。衬底纵向隔离的方法主要有两大类:(1)使用价格便宜的硅衬底,同时对硅衬底进行工程设计,如形成PN结进行隔离,此外,也可通过增加衬底屏蔽层等方式实现衬底纵向隔离。(2)使用绝缘型衬底如SOI衬底或蓝宝石衬底,利用天然绝缘层实现衬底纵向隔离。

香港科技大学提出通过低成本的方式对硅衬底进行工程化处理(EBUS),即在n型硅衬底表面通过离子注入方式形成p型层,随后在该衬底上外延生长GaN HEMT结构,形成GaN-on-EBUS。由于硅衬底内引入了内建PN结,实现了器件间的纵向电气隔离^[9]。如图3所示,为存在PN结的硅衬底上外延GaN层,并通过深槽刻蚀工艺将每个功率器件分隔为不同的小岛,进而实现横向隔离,每个小岛的衬底电位都是相互独立,并与其余衬底电位之间形成电气隔离。

如图4所示,为北京大学提出在外延层中引入虚体屏蔽层,该结构不仅可以阻隔衬底间的串扰,还能防止电子被缓

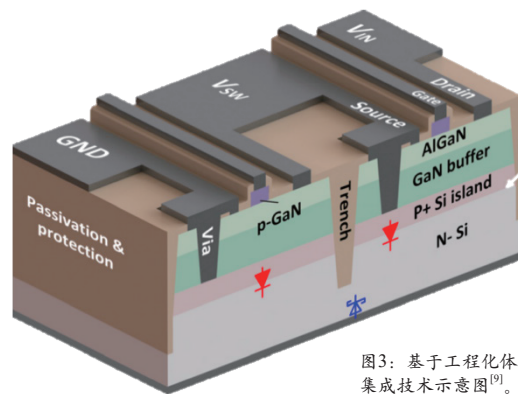


图3: 基于工程化体硅衬底的GaN功率集成技术示意图^[9]。

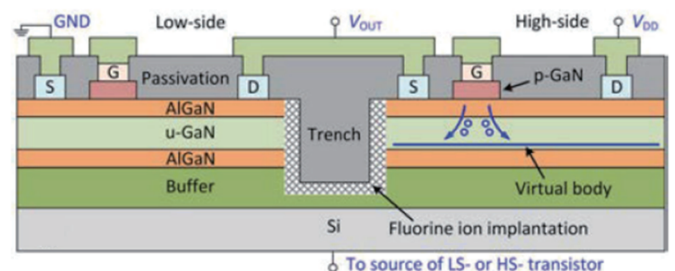


图4: 基于虚体屏蔽层的GaN功率集成技术示意图^[10]。

冲层捕获而引发动态电阻恶化^[10]。在开启状态下，p-GaN 栅极区域注入空穴到下方虚体层，并在虚体层中扩散开来形成屏蔽层。这种由空穴构建的屏蔽层，一方面可实现衬底的纵向隔离，抑制衬偏效应，另外一方面也可以与热电子进行复合，减少电子进入缓冲层而被缺陷捕获。此外空穴与电子复合后形成的光子还能加速表面缺陷的恢复。

除了上述基于 GaN-on-Si 构架下的功率集成技术，另外还有利用绝缘夹层或绝缘型衬底来实现衬底隔离。如下图 5 所示，为 IMEC 提出的基于 GaN-on-SOI 技术，利用埋层氧化硅层对衬底进行纵向隔离，并通过深槽刻蚀工艺实现功率器件间的横向隔离^[11]。尽管埋层氧化硅有效地阻隔了衬底电压的影响，但由于其热导率较低，导致功率器件工作过程中的热量较难从衬底散出。

另外一种方式是利用本身即为绝缘体的蓝宝石衬底进行功率器件间的电气隔离。如下图 6 所示，为东南大学与江苏能华微电子在基于蓝宝石衬底外延的 GaN 层上实现的功率半桥电路的单片集成示意图，耐压等级达到了 3000V 以上^[12]。相比于 SOI 衬底，蓝宝石衬底上功率器件基准化击穿电压增加了 40%。正是由于蓝宝石衬底高电压阻断特性，通常也被用来实现超高压 GaN 功率器件。然而，蓝宝石同 SOI 相似，导热率很低，约为硅的 1/6，且目前商用的蓝宝石衬底尺寸一般为 6 寸，制造成本上将会是一个挑战。

除了上述开发的各种衬底纵向隔离技术，以实现功率开关器件单片集成外，还有一部分研究集中在将反向续流二极管与功率管进行集成，主要的原因是 GaN HEMT 器件没有

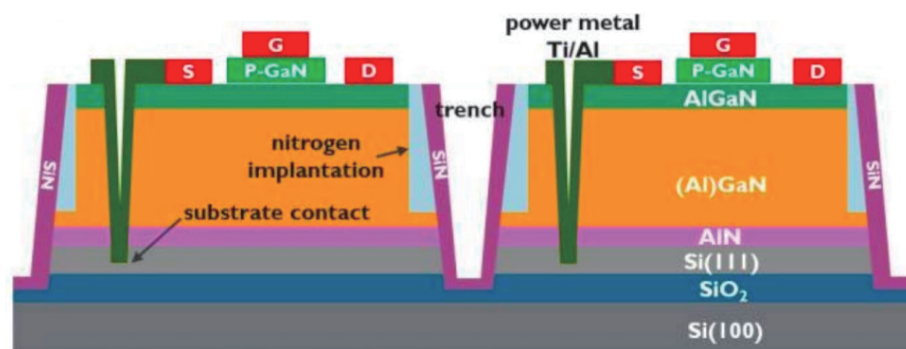


图5: GaN-on-SOI单片功率集成平台示意图^[11]。

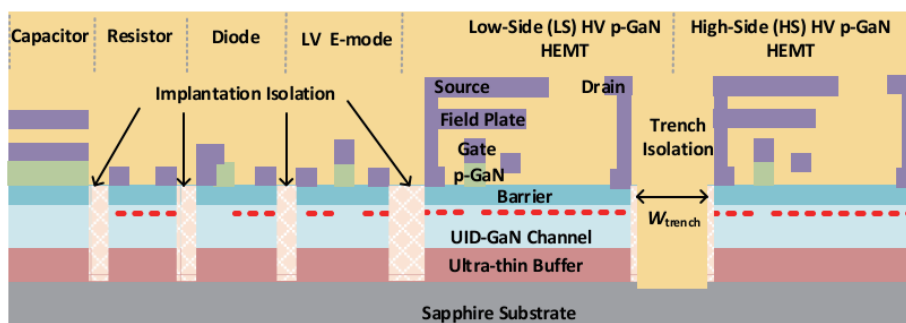


图6: GaN-on-Sapphire单片功率集成平台示意图^[12]。

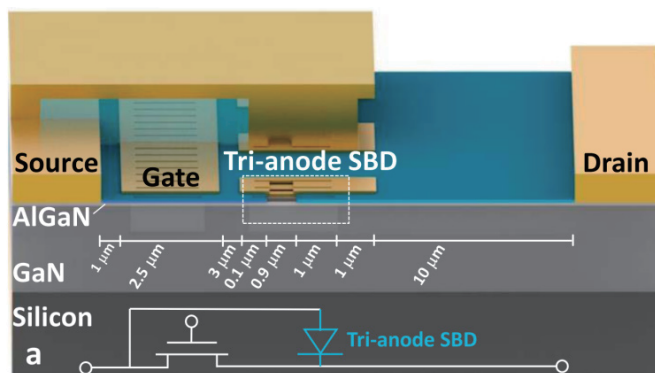


图7: GaN MOS-HEMT集成鱼鳍肖特基阳极续流二极管^[13]。

如硅 MOS 一样的内建 PN 结。如图 7 所示，为洛桑联邦理工提出了将鱼鳍肖特基阳极二极管反向并联到 MOS-HEMT 器件的栅漏之间，从而实现 GaN 器件具有反向续流能力^[13]。

逻辑电路集成

将 GaN 开发成如硅一样的 CMOS 逻辑电路一直以来都存在巨大的挑战，这主要受限于 GaN 缺少一种能同时将 p 型沟道与 n 型沟道集成到单一芯片上的构架。这是因为 GaN 材料体系中空穴迁移率 ($15 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) 与电子迁移率 ($2000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) 的悬殊较大，无法实现良好的器件尺寸匹配。

如图 8 所示，香港科技大学基于 p-GaN 栅 HEMT 外延层实现 p 型沟道，与 HEMT 中的二维电子气形成互补型逻辑电路^[14]。为更好提高 p 型沟道迁移率，研究团队利用氧等离子对 p-GaN 区域进行处理，但相较于 n 型沟道器件 (电流密度 $\sim 170 \text{ mA}/\text{mm}$)，p 型沟道器件的电流输运能力仍较弱 ($\sim 1.64 \text{ mA}/\text{mm}$)。尽管如此，基于此互补逻辑构建的单级反相器仍表现出低静态功耗、低转换时间、高电压增益、大噪声容限、高热稳定性等优势。

此外，MIT 相关研究团队提出利用 MOCVD 生长出同时存在 n 型和 p 型沟道的外延结构，并通过垂直互补形成 CMOS 电路^[15]。相比于传统 p-GaN 栅外延层，其团队加入 p 型迁移率增强层和散射屏蔽层，来提升其 p 型沟道迁移率。同时，从器件结构上通过缩短栅极长度来提升电流密度，并基于鱼鳍栅提升栅极控制能力。其 p 型沟道器件的电流密度可高达 $300 \text{ mA}/\text{mm}$ ，接近 $0.13 \mu\text{m}$ Si BCD 工艺。

Si/GaN 异质集成

尽管，上述基于不同构架实现了 GaN 功率器件与模拟电路及数字电路的

单片集成，然而基于 GaN 材料构建的大规模集成电路仍然存在静态功耗较大，芯片面积较大等问题。为充分发挥 Si CMOS 和 GaN 功率器件各自的优势，另一种方式是将 Si CMOS 和 GaN 换流器进行异质集成，其主要做法也从二维模式逐渐过渡到三维模式：(1) Si CMOS 与 GaN 功率器件之间通过基板进行水平连接。GaN 供电单元与硅器件通过封装或焊锡的方式贴在同一块 PCB 上，这种连接距离通常要到毫米甚至厘米量级，因此会引入较大的寄生参数；(2) Si CMOS 与 GaN 功率器件通过背对背的方式实现垂直堆叠。这种方式将传输距离降低到百微米级，但需要较深的硅通孔，制造工艺更为复杂，成本也更高；(3) Si CMOS 与 GaN 功率器件通过面对面的混合键合形成电气连接，如图 9 所示^[16]。这种构架下的传输距离最近，仅为几个微米，同时可用背面硅衬底进行散热。

如图 10 所示，UCLA 提出通过上述混合键合的方式将 Si 控制器或驱动电路倒装键合至 GaN 电源转换系统芯粒上 (CMOS-on-GaN)，甚至更进一步，将 GaN 电源转换芯粒与负载芯粒直接进行混合键合^[16]。这样短距离的异质集成方式，不仅降低了栅极驱动环路寄生电感和栅极振铃，也缩短了负载供电路径，避免了电压降，提高了能量转换效率。

GaN 功率集成电路技术展望

后摩尔时代下，无论是 Si CMOS，III-V 族光电器件，还是通信芯片或存储单元都朝着高能量密度的方向发展，而这些离不开与之匹配的高功率密度电能转换单元。GaN 凭借其高击穿电压和高电流密度，能够实现高功率密度输出，无论是同质单片集成，还是通过紧凑型异质集成方法，未来 GaN 功率集成电路将推动能量转换系统朝着低功耗、高效率、紧凑体积的方向发展，推动下一代电力电子器件的发展。

九峰山实验室针对现有功率技术发展方向和产业痛点，积极开展 8 寸硅基 GaN 单片集成及异质集成平台能力建设，已建成产业研发级的基础设施，布局功能全面和性能先进的设备

资源。面向硅基 GaN 功率集成电路的技术需求，开发核心技术。九峰山实验室积极拓展合作伙伴，期望与同行一起构架功率集成技术的领先。OSc

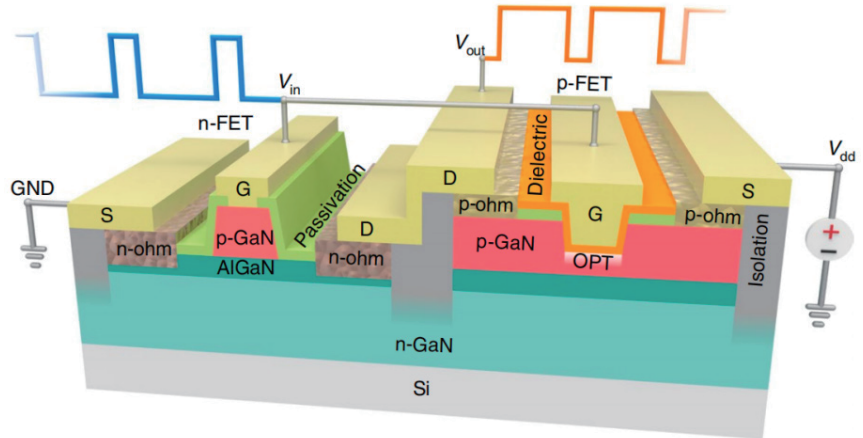


图8：基于商用p-GaN栅功率器件平台构建的GaN互补型反相器^[14]。

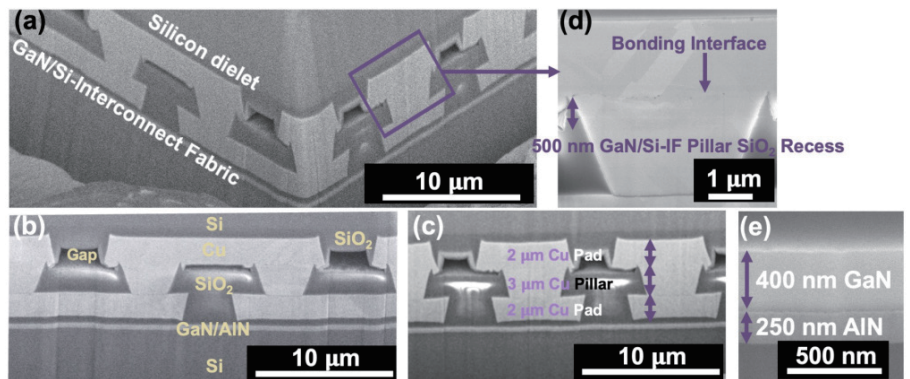


图9：Si芯粒与GaN-on-Si芯粒的混合键合的 (a) 3D截面图；(b) (c) x和y方向上±1 μm的对准精度；(d) Cu-Cu键合界面的放大图；(e) GaN/AlN外延层的放大图^[16]。

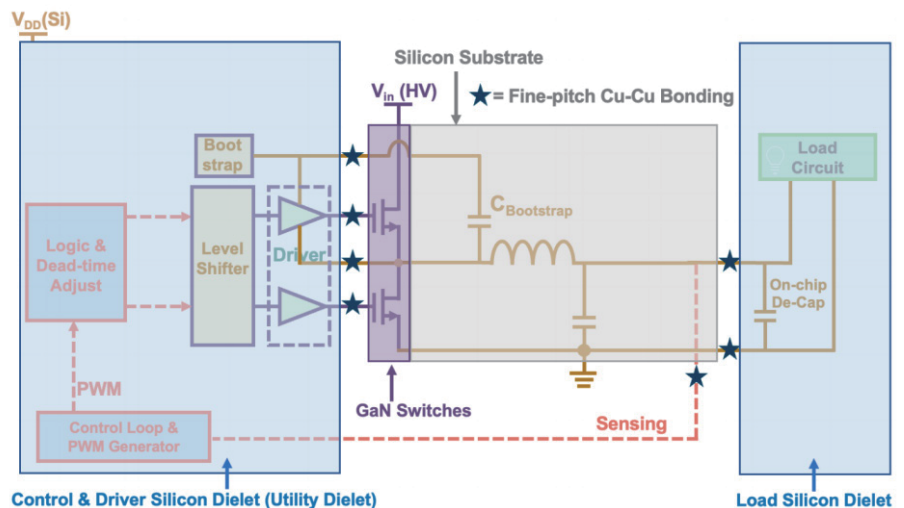


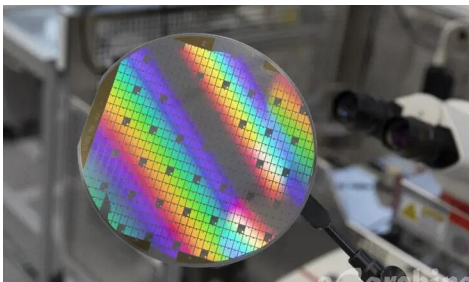
图10：通过键合实现GaN功率集成电路与Si控制/驱动/负载芯粒之间的异质集成^[16]。

扩展阅读

- [1] R. Reiner, M. Basler, S. Moench et al. Lateral GaN Power Devices and Integrated GaN Power Circuits: Status and Recent Progress. in: Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen, 2023.
- [2] K. Wong, W. Chen, K. Chen. Integrated Voltage Reference and Comparator Circuits for GaN Smart Power Chip Technology. in: IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 2009.
- [3] Y. Uemoto, T. Morita, A. Ikoshi et al. GaN Monolithic Inverter IC Using Normally-off Gate Injection Transistors with Planar Isolation on Si Substrate. in: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2009.
- [4] R. Reiner, P. Waltereit, B. Weiss et al. Monolithic Integrated Power Circuit in High-voltage GaN-on-Si Heterojunction Technology. in: IET Power Electron, 11(4), 2018.
- [5] M. Basler, R. Reiner, S. Moench et al. Building Blocks for GaN Power Integration. in: IEEE Access, 9, 2021.
- [6] D. Kinzer. Monolithic GaN Power IC Technology Drives Wide Bandgap Adoption. in: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2020.
- [7] F. Udrea, M. Arnoald, L. Efthymiou et al. The Smart ICeGaN Platform with Sensing and Protection Functions for Both Enhanced Ease of Use and Gate Reliability. in: IEEE International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD), 2022.
- [8] A. Lidow. The Path Forward for GaN Power Devices. in: IEEE Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia (WiPDA Asia), 2020.
- [9] G. Lyu, J. Wei, W. Song et al. GaN on Engineered Bulk Si (GaN-on-EBUS) Substrate for Monolithic Integration of High-/Low-Side Switches in Bridge Circuits. in: IEEE Transactions on Electron Devices, 69(8), 2022.
- [10] J. Yang, J. Wei, M. Wang et al. 650-V GaN-on-Si Power Integration Platform Using Virtual-Body p-GaN Gate HEMT to Screen Substrate-Induced Crosstalk. in: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2023.
- [11] X. Li, M. Hove, M. Zhao et al. Enhancement-Mode p-GaN HEMTs Fabricated on 200 mm GaN-on-SOI With Trench Isolation for Monolithic Integration. in: IEEE Electron Device Letters, 38(7), 2017.
- [12] S. Li, Y. Ma, W. Lu et al. 1200 V E-mode GaN Monolithic Integration Platform on Sapphire with Ultra-thin Buffer Technology. in: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2023.
- [13] T. Wang, J. Ma, E. Matioli et al. 1100 V AlGaIn/GaN MOSHEMTs With Integrated Tri-Anode Freewheeling Diodes. in: IEEE Electron Device Letters, 39(7), 2018.
- [14] Z. Zheng, L. Zhang, W. Song et al. Gallium Nitride-based Complementary Logic Integrated Circuits. in Nature Electronics, 4, 2021.
- [15] Q. Xie, M. Yuan, J. Niroula et al. Highly Scaled GaN Complementary Technology on a Silicon Substrate. in: Transactions on Electron Devices, 70(4), 2023.
- [16] H. Ren, K. Sahoo, Z. Guo et al. Heterogeneous Power Delivery for Large Chiplet-based Systems using Integrated GaN/Si-Interconnect Fabric with sub-10 um Bond Pitch. in: IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2023.

芯联集成与蔚来汽车签署碳化硅生产供货协议

1月31日消息,近日,芯联集成-U与蔚来汽车签署了碳化硅模块产品的生产供货协议,为蔚来生产供应首款自研1200V碳化硅模块,以及成为蔚来汽车全栈自研体系900V高压纯电平台的重要合作伙伴。除了合作碳化硅模块之外,双方也在传感、驱动、连接、



控制等领域进行全面的交流和合作。据了解,芯联集成SiC MOSFET产品目前已在新能源车主驱逆变器量产使用,正在建设的国内第一条8英寸的SiC器件研发产线将于2024年通线。芯联集成方面表示,持续加大研发投入并完善产业

链布局使芯联集成取得多项突破,公司大幅增加12英寸产品、SiCMOSFET方面的研发,同时持续在8英寸功率半导体、MEMS、连接等方向增加研发投入以不断迭代出具有国际竞争力的产品。同时得益于全球新能源汽车市场的持续繁荣以及国产替代需求的提升,公司整

体收入高速增长、经营性净现金流大幅提升。值得一提的是,去年下半年,芯联集成联合博世、小鹏、立讯精密、上汽、宁德时代、阳光电源等上下游企业,成立了专注于碳化硅业务的芯联动力科技(绍兴)有限公司。CS

智慧芯科技 智造芯未来

专注半导体智能仓储研发与应用

i-Stock Semi Wafer Stocker



项目	参数
规格	L4465*W2200*H2500mm (可定制)
容量	1800pcs(6寸wafer)
效率	6-12s/pcs
精度	±0.1mm
物料	6/8/12寸wafer

半导体，一个支撑全球经济发展的战略性新兴产业，正在我国快速发展，并将持续保持良好的市场前景。受国际形势影响，半导体芯片缺货、供不应求的状况还将延续甚至扩大，晶圆生产企业扩大产能、降本增效及自动化已成为行业普遍诉求。并且晶圆生产环境严苛、过程复杂、技术高新，具有较高的进入门槛。

随着产线自动化带来的产能飞速提升，企业原有的仓储容量与现有产能之间的矛盾日益突出；库容不足，而用地成本、用工成本却在不断增加，行业传统的由人工进行成品存取和搬运的方式已落后于时代发展的脚步。

艾斯达克最新推出的 i-Stock Semi-wafer stoker，突破技术壁垒，打造行业领先晶圆存储设备，以单片晶圆为单位进行精准管控，内部搭载洁净机械手臂，达到半导体行业无尘等

级要求。库内高速传递晶圆片，精准取片，库外可拓展对接 AMR/OHT 上下料。并且通过打通不同工艺流程与软件信息之间的物质流和信息流，实现晶圆物料在各个车间、机台的自动转运或自动上下料，解决人工作业带来的效率低下和产品不良率高的问题，赋能半导体晶圆库房与存储流程设备化、智慧化、无人化，提升作业效率，降低管理费用，降低库存，实现物料的最高价值，使管理标准化。

以“半导体晶圆仓”为核心的半导体智慧物流整体解决方案，将助力半导体企业实现晶圆的无人化存取及运输，同时最大程度减小无尘车间污染带来的风险，提升良品率，降低震动所致晶圆破裂风险，避免人工搬运带来的损坏问题，补充了晶圆制成末端仓储环节的作业压力，实现企业生产自动化与仓储自动化的深度集成，助力中国“芯”势力崛起。

国家工程中心平台介绍

宽禁带半导体国家工程研究中心（以下简称“中心”）于2019年由国家发改委批准，西安电子科技大学承担建设。是我国开展以碳化硅(SiC)、氮化镓(GaN)为代表的第三代新型半导体技术研究开发、成果转化、人才培养、科技合作与交流的国家科技创新基地。

中心科研工作发端于郝跃教授团队自上世纪九十年代以来引领的宽禁带半导体理论与技术研究，迄今已历经30余年的长期积累。创建了我国第三代半导体氮化镓外延生长、器件结构以及制造工艺的理论与技术体系，实现了我国在该领域从核心设备、材料到器件的重大原始创新，部分成果达到国际领先水平。

研发设施方面，建有2000平米超净实验室，以及兼容4到6英寸的宽禁带半导体器件电路研发工艺线，具备成套技术工程化和小批量试制能力。大型仪器设备近300台套。先进射频器件研发能力覆盖微波和毫米波段，接近太赫兹频段。GaN高性能射频器件功率附加效率自2011年以来持续引领世界纪录。中心设备总价值5.5亿元，主要由宽禁带半导体材料制备平台、微波毫米波器件设计和工艺平台、宽禁带半导体电力电子器件研制平台、宽禁带半导体集成电路设计与工艺平台和宽禁带半导体测试验证及可靠性分析平台组成。



1、宽禁带半导体材料制备平台

围绕 GaN、SiC 等宽禁带半导体发展面临的设备、材料等关键技术难题，以及氮化镓半导体的金属有机物化学气相外延 (MOCVD) 设备与材料等主要技术领域，开展了高质量、大尺寸宽禁带半导体材料生长工艺的开发，攻克了多项宽禁带半导体材料生长过程的核心科学难题，多项指标达到了国际先进水平，支撑了国内移动通信企业的快速发展。



图1：（超）超宽禁带半导体外延生长平台。

中心完成了低缺陷 SiC 基 GaN 外延生长技术开发，SiC 基 GaN 调制掺杂技术开发，SiC 基 AlGaIn/GaN 异质结构优化，大尺寸、低翘曲 SiC 基 GaN 外延技术开发，新型 SiC 基 GaN 异质结构生长技术研究。研究了新型强极化氮化物新材料的开发与生长，新掺杂元素替位方式调控，强极化、低方阻异质结构界面极化工程与能带工程调控方法。建设了具备6英寸准产品级外延片生产能力的 GaN、SiC 外延生长与检测平台。此外平台对外开放大尺寸 GaN、SiC 外延研究及中试实验以及检测系统，实现工艺设计、材料制备、表征检测、数据共享等外延流程服务。

2、微波毫米波器件设计和工艺平台

卫星-地面通信以及地面中继通信需要高性

能的微波毫米波器件技术。第五代移动通信 (5G) 由于传输速度快、连续广域覆盖、热点大容量、低功耗大连接、低时延高可靠等特性，因此，亟待突破 5G 移动通信用微波毫米波器件设计与制作工艺的关键技术。

以 4、6 英寸器件加工为主，购置了高效率 DUV 光刻机、电子束光刻机、离子注入机、原子层刻蚀设备等 30 台套，可实现 30 nm 以下射频芯片的工艺能力。开展宽禁带半导体器件结构、工艺、电路、芯片及应用研究，成果指标处于国际领先水平。基于传统半导体器件加工及设计平台的建设思路从器件加工和模型建立及设计两个主要方面入手，在器件加工平台针对微波毫米波器件研制关键技术工艺进行研发及整合，包括纳米级 T 型栅工艺、低温欧姆接触、高质量表面钝化、低损伤刻等关键技术。在设计平台针对毫米波器件及电路实现模型提取，在分析机理的同时完成对器件结构的优化。

通过微波毫米波器件设计及工艺平台能够研制出高性能微波器件及电路，同时实现高精度等效模型的建立以及毫米波单片电路的设计，最终实现微波毫米波核心模块的研制。以满足其在移动通信、无人驾驶、流式虚拟现实、远程医疗等领域的需求。为推动国产 5G 通信用高性能微波毫米波器件实现替代、保障 5G 的自主可控夯实核心技术基础。

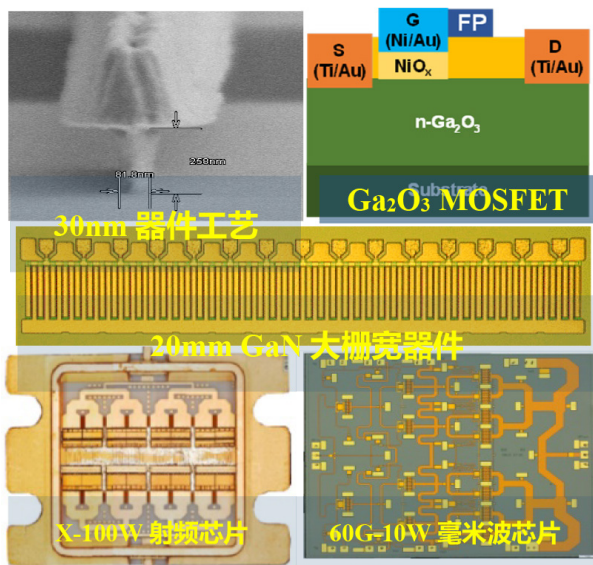


图2: (超) 宽禁带半导体射频器件芯片。

3、宽禁带半导体电力电子器件研制平台

SiC 电力电子器件是新一代电网、轨道交通、电力推进系统所需的核心功率转换器件。与硅基功率器件相比，SiC 功率器件具有更高耐压、更高功率等级和更高的转换效率。因此，SiC 功率器件技术在高压大功率领域的应用可革命性地提升转换效率、降低损耗，对于推动我国能源战略的实施具有重要的战略意义。

基于传统半导体器件加工及设计平台的建设思路从器件工艺和模型建立及设计两个主要方面入手，在器件工艺平台

对 SiC 基电力电子器件的关键工艺进行研发及整合，包括低温欧姆接触、SiC 深槽刻蚀、SiC 栅氧化等关键技术。该平台具备生长 $5\ \mu\text{m}\sim 200\ \mu\text{m}$ 、 $2\times 10^{14}\ \text{cm}^{-3}\sim 1\times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$ SiC 同质外延层和超级结外延材料的能力，可实现 MOSFET、BJT、Diode、JBS 等多种器件的研制。在设计平台针对器件进行精确仿真模型建立，实现器件结构的模拟优化。通过 SiC 基电力电子器件设计及工艺平台的建立实现精确的模拟优化，研制出高性能 SiC 基电力电子器件及集成电路。以满足其新一代电网、轨道交通、电力推进系统等领域的需求。为推动国产高效率高性能 SiC 基电力电子器件实现替代夯实核心技术基础。

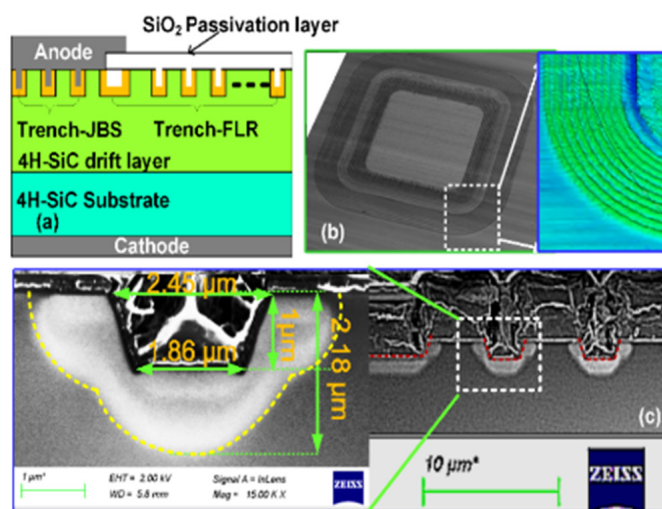


图3: 双沟槽SiC基JBS器件。

4、宽禁带半导体集成电路设计与工艺平台

宽禁带半导体具有比硅高得多的临界雪崩电场强度和载流子饱和漂移速度，具有更高的熔点；与不擅长长热的硅相比，宽禁带材料 SiC 有较高的热导率，因此，宽禁带器件比硅器件有更高的耐受高电压能力，有更好的导热性能和热稳定性，有更强的耐受高温和射线辐射能力以及更出色高频特性。

本平台的建设主要基于传统半导体器件加工及设计平台的建设思路，从器件的测试、器件的模型建立、集成电路的设计及集成电路的制作四个主要方面入手。通过器件设计、工艺平台研制出高性能器件及电路，同时在器件准确表征的基础上，开展高精度等效模型的建立以及集成电路的设计，最终实现宽禁带半导体集成电路核心模块的研制，以满足移动通信、卫星通信、远程医疗等领域的技术需求。

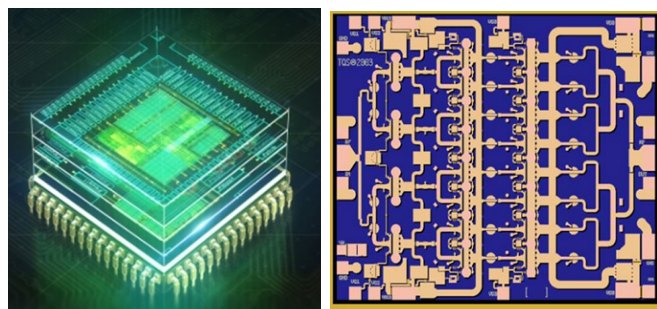


图4: 宽禁带半导体集成电路设计。

5、宽禁带半导体测试验证及可靠性分析平台

宽禁带半导体大尺寸低缺陷外延材料、核心关键器件以及集成电路系统通常在工程应用中均面临着可靠性与失效等问题，如对碳化硅高功率器件来说当器件工作在极端高温环境下，虽然 SiC 材料自身能够承受 600℃ 以上的高温，但欧姆接触的退化、器件及电路高温封装是器件及电路应用在 200℃ 以上高温所面临的关键技术瓶颈，所以对相关产品的可靠性与失效机理分析是工程产业应用布局前至关重要的步骤。工程中心针对关键技术可靠性与失效机理的理论研究作为基础，积累可靠性与失效机理分析经验，重点围绕失效机理及其数理模型、失效分析新技术、可靠性试验与评估、可靠性设计等研究方向及技术应用领域，搭建一系列宽禁带半导体测试验证及可靠性分析平台。

针对宽禁带半导体器件测试验证及可靠性分析需求，实现了包括基于 SiC、GaN、Ga₂O₃ 等材料体系器件的直流特性表征、动态特性表征、半自动测试、热应力可靠性表征、陷阱分析表征、微观结构表征等分析测试能力，保障了微波毫米波器件、电力电子器件制备过程中的工艺监测以及可靠性分析需求。

工程中心围绕国民经济重点工程 5G 通信、新能源汽车、高压输变电等领域的迫切需求，支撑开展 6 英寸氮化镓、碳



图5：陷阱分析表征系统。

化硅高质量低缺陷外延材料、面向 5G 应用氮化镓基微波毫米波射频器件及模块、大功率碳化硅基电力电子器件及模块、宽禁带半导体集成模块及芯片等技术的研发和工程化。同时，工程中心积极推动第三代半导体和集成电路成果转化，带动芜湖、广州、杭州等地依托优势产业推动第三代半导体产业高质量发展，促进了我国宽禁带半导体从“设备-材料-器件-电路-芯片”全流程基础技术体系构建，支撑我国重点装备和项目全链条国产化。推动建立全国集成电路产教融合发展联盟，协助龙头企业构建自主知识产权的基站核心芯片，实现国产器件自主保障和持续发展。目前已推动宽禁带半导体技术在 100 多项业务和产品中广泛应用，具有良好的经济和社会效益。CS



严苛标准的精密机械加工、焊接、组装、检测等多种技术工艺，拥有业内领先的 100 级洁净环境洗净能力及高等级化学洗净技术和洗净质量控制能力。当前，云德在服务国际半导体产业链的同时，打破了长期由国外厂商垄断的半导体级石英制品竞争格局，通过与国内龙头设备企业深度合

公司地址：浙江省宁波市杭州湾新区玉海东路 68 号 28 栋
 联系电话：0574-23887666
 邮箱地址：sales@ymat.com.cn

宁波云德半导体材料有限公司（下称，云德）成立于 2018 年 12 月，是一家专业从事半导体设备非金属材料精密零部件/耗材研发、生产、销售及服务的企业，产品以高纯石英、精密陶瓷、硅材质为主，广泛应用于集成电路，化合物半导体，新能源光伏领域，并可延展至医疗及航空航天军工等领域。云德是国家级专精特新“小巨人”企业、国家高新技术企业、国家科技型中小企业，并荣获多项市区级荣誉，截止目前已累计获得多项发明及实用新型专利。

云德掌握可满足大尺寸、复杂结构、高精度零部件



宽禁带半导体技术突飞猛进， 产业蓬勃发展，未来任重道远

岁首年终，中国传统龙年到来之际，本刊主编陆敏博士与宽禁带半导体国家工程研究中心创始人郝跃院士畅谈了国内外宽禁带半导体技术及产业的发展态势

陆敏博士：尊敬的郝院士，很高兴今天能够接受我们的访问。因为您实际上是在宽禁带或者超宽禁带这个领域，首先是在教育界，您当然是一个名师、一个泰斗，同时您也在积极参与产业，所以我想我们的观众在这个领域有很多困惑，因为在当前这个背景下，实际上产业会面临更大的冲击和挑战，那我想接下来会有很多问题向您请教，第一个是关于在 GaN 领域的，请问在氮化镓功率半导体领域主要还有哪些科学与技术问题等待攻克？

郝跃院士：非常高兴我们《化合物半导体》来采访，大家对宽禁带半导体，有的又称第三代半导体，都十分地关心，无论是科技的发展，还是产业的发展以及未来的一些走势，大家都很关心。

当然，宽禁带半导体目前从产业来讲最关心的一个是氮化镓，一个是碳化硅，那么它们都是属于宽禁带半导体中间最典型的代表。禁带宽度都在 3.4eV 左右，所以目前来看，这个从科技到产业到底应该怎么走？这个正是大家非常关注的。作为氮化镓来讲，应该讲它最主要的几方面的应用包括如下。

一个方面是射频，现在射频电子器件基本上已经得到了非常广泛的应用了，无论是从比如说像 L 波段、S 波段，一直到 W 波段都已经得到比较广泛的应用了。

再一个就是功率电子器件，相较于这个氮化镓的射频器件，从它的发展到应用，还是稍微滞后一点。

过去认为氮化镓的功率器件主要是在 600V 以下，亦或

1200V 以下，那么 1200V 以上主要是碳化硅来做，但现在的这个趋势呢，氮化镓也可以做。更高电压的甚至到 3300V，也有用氮化镓做的。

那么目前氮化镓功率器件碰到的，我认为最主要的几个方面挑战是，第一个是低成本，因为它的成本如果能够持续降低的话，那么对功率器件整个的发展是有很好的作用。

第二个就是高可靠。低成本就必然是硅基功率器件，那么它面临的科学和技术挑战，就是它的可靠性，它的热稳定性，这些方面都是需要持续的研究和发展。因为在硅基上外延氮化镓，无论是晶格失配还是热失配，都比碳化硅、蓝宝石要大的多。

在这种情况下，怎么能够在低成本的硅衬底上制作出高质量、高可靠的氮化镓功率器件，这就是一个很巨大的挑战。尤其到了高压，因为电压越高就意味着外延生长更厚，氮化镓的外延生长的厚度越厚，这就面临着热应力、还有各种各样的缺陷等需要抑制，这些我认为都是需要持续的攻关，这是无止境的，材料生长及器件制备优化只有更好没有最好。

陆敏博士：好的，谢谢。您刚才特别提到在目前这个阶段，碳化硅实际上在高压领域还有优势，氮化镓在低压可能也就是 650V，我们知道现在快充领域已有很好的应用。那您从长远的角度上来看，再过 5 年或者 10 年更远的这个维度上看，您觉得氮化镓和碳化硅半导体之间，将来他们的产业竞争格局会是怎么样？

郝跃院士：我觉得就是在 1200V 以下，几乎都会是氮化镓的，这主要是因为它的成本很低，所以目前大家都在攻关，关键首先是要实现好的外延生长，然后在保障器件的可靠性和稳定性以后，氮化镓的优势还应该是很明显的，那么碳化硅我认为主要是高压 / 超高压领域，所以说现在如果把碳化硅应用主要定位在低压的话，它未来的成本就是一个大问题。

陆敏博士：好的，那 1200V 实际上我们知道这个正是车上的应用系统，现在所谓的 400V 实际上就是用的 650V 是，将来 800V 也就是也就到 1200V，那您觉得这个氮化镓在车上电压感觉好像是够了，您觉得上车挑战是什么呢？

郝跃院士：车规的挑战我认为主要是可靠性。车规的可靠性，目前就氮化镓，因为我刚才说了是异质外延，碳化硅是同质的，所以异质和同质还是有很大的区别的。但是从现在的科学和技术的进展来看，还是有望在不远的将来，氮化镓能够在可靠性、稳定性方面突破以后进入车规，因为它毕竟是成本比较低，应该讲跟硅器件的成本大致差不多，会略高一点。因为无论是它的晶圆尺寸，还是后续的工艺等方面都可以沿用硅的很多 6 寸、8 寸的一些技术。

陆敏博士：好的，谢谢。那实际上它这种可靠性归根结底实际上还是要把这个异质外延的材料做好。所以呢，在这条异质外延路线当中，现在实际上也有一些不同的路线。比如说这个好像日本一直在推的那个 QST。当然我们国内也有一些人在做同质外延，当然同质外延可能以后就可以做垂直器件。当然还有这个硅基就是低成本，这个没问题，现在已可以做到 12 寸了。那您看这三条技术路线将来又会是一种怎样的格局呢？

郝跃院士：我觉得这三条技术路线呢，我比较看好的还是第三条技术路线，硅基，但是，是否一定要到 12 寸，这个很难讲，因为到 12 寸应力更大，所以这个就是有一个权衡，所以说 12 寸就不可能高压，即低压甚至射频这个 12 寸的可能性都是有的。如果 8 寸那么要到 600V、800V、甚至 1200V，我认为难度就更大，无论是对这个材料生长的难度，还是器件的难度都更大。

所以说在低压射频这种方面，尤其未来氮化镓如果可以做到进入终端的话，那么这种 12 寸是完全可以的，因为它外延的厚度比较薄，这样它的应力就没有那么大，要求低。那么同质的现在也有很多的研究，包括我们团队也在做，但是我觉得同质碰到的最大的难题。一个就是没有二维电子气了，它完全要靠体的迁移率，它就跟碳化硅的路线完全一样。那么氮化镓本身体的迁移率要做上去也不容易，当然也有做得好的，也有上千的，但是普遍来讲做的不好。因为把氮化

镓的最大优势的二维电子气体舍弃了，所以这种情况下的功率密度肯定会是有些问题。

第二个同质问题，不言而喻，成本还是高，因为到目前为止，氮化镓的衬底成本比碳化硅的成本还要高，所以在这种情况下，作为大面积使用的电力电子器件，那么必须在某些领域要有不可替代性，甚至比一般的碳化硅还要好很多，所以这个就必须要有有一个权衡。

还有一个，一般情况下垂直型器件都要求 p 型掺杂，使用两个结型场效应管来调控，但是 p 型要把浓度做高，做成很优质的结，难度也是大的，因为它还不像 LED。所以在这种情况下呢，还是有挑战，就是看未来这个氮化镓衬底的成本到底能降到多少，直径能有多大，这些都是就第二条路线的很重要的几个方面。

陆敏博士：好的，谢谢。

那总体看来，那三条路线实际上各有利弊，所以可能最终都会找到适合的应用场景，对吧。所以我觉得这个就像人一样，每个人总能找到自己用武之地，所以没有一个材料或路线是完美的。

郝跃院士：是的，各有优势。另外因为垂直型最大的优势，应该是电压更高。再一个，它的电流流向跟热的流向一样，从上到下流动，跟热的流动是一样的，这样就比横向器件的电流流动和热的流动，是相互垂直的，所以垂直器件对散热会更好一些。

陆敏博士：好的，那实际上刚才讲了，您也一直提到氮化镓将来可能用在车上，也是氮化镓从业者现在特别期盼的，因为车规市场这个蛋糕挺大，大家都是想去突破到那个领域，因为现在实际上快充市场还是很有限，很难支撑这么多氮化镓的企业。那您大胆的预测一下，氮化镓真的用在车的主逆变器，您觉得大概需要多少时间？

郝跃院士：我认为大概就是 3~4 年。

陆敏博士：那就是意味着碳化硅就 3~4 年之内还可以过得比较安稳，3~4 年后就有挑战了。

好的，谢谢。

那我们知道实际上我国曾经在氮化镓光电领域可谓是一光采照人，如 LED，我看现在整个都是中国产业在主导着，那现在实际上整个氮化镓正切换到电力电子这一赛道。当然微波射频您也可以把它理解成功率，那您觉得我国在氮化镓的功率半导体这个领域，将来在全球会是一个什么样的地位？

郝跃院士：这个问题也挺好。这个我觉得功率无非就是包括了就电力电子和射频，我认为在射频领域，我们国家肯



郝跃

中国科学院院士、西安电子科技大学教授

陆敏

《化合物半导体》杂志主编
常州臻晶半导体有限公司总经理/董事长

定在目前和未来的一段时期，一定会在国际上有很大的市场，因为无论是移动通信，还是各种各样的无线传输。

对中国来讲，市场还是比较大，尤其随着国家公布了未来从 5G 要发展到 6G，这种情况下对氮化镓的射频来讲，是一个很好的推动，我相信这个市场会很快在国际上有相当重要的主导地位。

同时在氮化镓电力电子器件方面呢，应该讲它现在还是存在一些难题，这些难题我觉得还需要持续的攻关。

如果在低压应用，应该讲很快就会形成一个主导，比方刚才说的快充这样的应用，但是高压在国际上还需要一段的时间，但是我相信目前在这个方面我们最大的优势，无论是设备，材料生长设备，功率器件制备设备、封装设备，我们的国产化率还是很高的，所以应该讲我们在氮化镓的功率器件方面，很快就会在国际上占有很重要一个地位，我不能说马上能到主导地位，因为我一再强调它跟那个照明 LED 还不完全一样。

LED 它可以非常大的批量来做，做完了以后，它的不同亮度、不同的波长，它是靠封测来筛选形成的。就是一个圆片上面它的这个亮度、波长都会有一定的不同，所以最后都是可以靠测试来把控它的亮度和均匀性，就是一致性的容忍度比较大。但是电子电力电子器件，就是我们说的功率器件就不行，如果达不到某项指标，就是完全要淘汰。

所以他俩面临的挑战是不一样的，所以这个就同对 Mini-LED 和 Micro-LED 提出了类似的挑战，就是均一性、一致性要求更高。一个片子上面不能说这个地方是这个亮度，那个地方是那个亮度，它将来贴到基板上面去就很难。

陆敏博士：所以就这个 Micro-LED 的要求可能跟功率器件要求类似。

郝跃院士：它跟过去的 LED 完全不一样，就要用微电子的思维来做 Mini-LED 和 Micro-LED，尤其是 Micro-LED 一定要成片的去做，那就要求更高。

我们筛选的过程中，我们就看到一个片子，经常看到做得再好，它的亮度都有区别，所以就靠封测，把这个自动分成各种各样的档，但是在未来的 Micro-LED 方面不大可能，不可能一个上头有些亮，有些暗。所以这个就对我们的氮化镓器件未来均匀性提出了更高的要求，实际上挑战是类似的，不行就立即淘汰，就不可能说再有一个档等着你筛选，还能够这个价格更高一点，那个价格更低一点，在一片里面就可能好几个价格，这在未来电子器件是不大可能。那么未来的 Mini-LED 和 Micro-LED 也是不大可能的。

陆敏博士：好的，谢谢。

好，那我们氮化镓先告个段落，我们再切换到现在实际上产业最热的碳化硅。我们知道碳化硅打开了电动汽车应用爆发性增长。

近年来随着各种各级政府的重视以及资本的加持，新上的产业项目有近百家。目前的进度与技术程度也参差不齐，请问碳化硅行业目前主要还有哪些产业化关键技术问题亟需突破？

郝跃院士：我认为碳化硅目前来讲分两个方面，一个是材料方面，材料方面衬底现在是 6 寸为主，那么就是这半绝缘也有一些 4 寸，导电型的就是 6 寸为主，8 寸现在也开始往外头推了，但是这个量还不是太大，质量还参差不齐，所

以从衬底的角度来讲，持续提升碳化硅衬底的量的同时，要把它的品质做好，这个方面我相信还有很多的工作可以做。

所以说大家都在做衬底，但是真正把6寸、8寸做好的还不是太多，这是第一个方面。第二个方面就是从器件方面来讲，现在碳化硅更多的还是在做SBD--肖特基。

所以说我们在肖特基二极管的这个市场上已经是非常卷了，所以说希望各位在这个方面发展过程中要适度注意。那么在高端的MOS器件方面，现在是大家竞争的热点，但是在这个热点方面有很多技术性的难题，我们也没有得到真正的突破，我认为最主要的难题还是MOS器件的界面和氧化层的质量。

因为碳化硅氧化以后，把硅部分吃掉了，那么碳就留到了氧化层里头了，残留到这个里头，无论是对界面还是氧化层的质量都是有重要关系的，就是现在的界面态。

那么在这种情况下，我们应该寻求更高质量的二氧化硅在碳化硅上面介质生长的方法，而不是一味的用最简单的办法去处理这个氧化层界面，这个提升是我认为未来碳化硅界面质量的非常重要的一个方法。

如果这些方法不解决，碳化硅的优势，也就是MOS器件的优势，就得不到更充分的发挥了。

再往上面，当然就是大家说的我们现在目前面临的，比如说一个是沟槽结构，再进一步就是超结，这些是否马上需要推进的呢？这个我觉得是高端器件，这个就需要根据各个企业的实力量力而行，在这个之后如果能够进一步的发展，就是碳化硅的IGBT，因为它的导通电阻会更小，集成量会更高。

所以现在我们要做MOS器件、做沟槽型的、做这个超结的，做IGBT的相对较少。大量的都是在做肖特基二极管，在低端的，所以我们现在就是所有的东西就是能做的就一窝蜂上，真正具有挑战性的却门庭罗雀，因为前期都不会有太大科研等方面的投入，所以说这个方面还是存在一些问题。

陆敏博士：好，谢谢。

那实际上您主要觉得现在核心的问题就是在一个衬底端、一个器件端。还都是有很多问题其实并没有解决，可能器件实际上还需要更多，因为材料一直在做。那实际上那您怎么评价外延环节？

郝跃院士：外延我认为非常重要，对碳化硅来讲外延非常重要，因为电压就完全靠外延层实现，我们经常说的一微米100V，就是要实现高压的话，就必须要把这个外延厚度提上去，那么3000V的话，最起码是要几十微米。

在这种情况下，外延的确要高度的重视。现在我们就是国内做衬底的多，做器件的多、做外延的相对少一点，做高质量的外延相对少一点。

陆敏博士：它的技术门槛您觉得相对比较低一点还是怎样？

郝跃院士：技术门槛我认为开始的时候是不高的，但是要把质量做高了，厚度做厚了，而且任意的调控它的掺杂浓度，那这个挑战还是相当大的。

陆敏博士：好的，谢谢。那实际上刚才我前面提到，实际上国内这几年不管是碳化硅衬底环节、器件环节您也说了很多。去统计一下，可能都是上百家，所以因为刚才您也谈到了很多，实际上还是有技术难点的，另外我们和国外可能也许差距还不小。

实际上现在市场已经起来了，这几年逐渐推向车上应用的也不少。那您觉得这个国内近百家的项目，他们未来的前途会怎么样？因为有人认为从它的设计产能来讲，那甚至是过剩了。

那现在又面临着国外技术领先国际龙头的竞争，而且因为去年也有一个很典型的产业事件，就是意法半导体与三安在中国建合资厂，那您觉得将这两方面联系起来，如何评价呢？我们国内如何去竞争？那国内龙头三安跟国际龙头还绑定在一起，您怎么评价这些事情？

郝跃院士：对市场这件事情我一直都持比较乐观，比较谨慎的态度。因为就是市场这件事情完全由应用来驱动的。如果没有产能，没有足够的销售，那么这个市场就不可能持续发展。

所以说企业不管有多少，最后我认为都会面临一个根据它的技术、融资、投资以及市场都会有重新组合，就跟当年我们国家做LED，蓝光LED，当时也是企业很多的。慢慢回归到最后，真正能够顶到最后的的企业就不多了。

所以这种情况下，我认为任何企业、任何产业都是这样，开始起来的时候，大家风起云涌，到最后慢慢的就会根据竞争不断的重组优化，最后回归一个非常稳定的状态，包括集成电路也是如此。

中国当年发展晶体管、发展集成电路的时候，我们也是有几百家做锗的晶体管，后来做硅的晶体管，甚至做小规模集成电路，也有几十家上百家的，后来慢慢随着竞争，优胜劣汰之后，很多公司大家都不见了。

我觉得跟国际组合，我认为从目前看来，无论是在市场方面还是在技术方面还是有必要，但是我认为这个必要性仅限于一定的阶段，最后如果你没有很强的研发能力，没有很强的自身创新能力，因为这个材料也好、器件也好，在任何阶段都有任何阶段相应的问题，都不是说解决了就一劳永逸，就跟集成电路到今天仍然是全球的难题，都共同面对的后摩尔时代的难题。

所以不可能说我就能够解决一次、合作一次，我就能保

证我永远是一种很领先的地位，所以说我认为在一定阶段是有意义的，但到最后还是要靠各自的创新，或者必须自己有实力。

陆敏博士：或者说必须自己有实力，不然人家为什么要跟你合作。

郝跃院士：是的，对。

陆敏博士：因为这两家企业也很类似，都是国内国外的IDM的龙头，所以更多的可能ST看见了中国的市场。另外我想三安有很好的国内市场的基础，ST有技术的优势，强强联合。所以我觉得这个事情其实也不容易，因为在整个国际上，尤其是在美国打压的这种情况下还能促成这种的合作。

对，实际上我觉得对碳化硅领域还是一个可喜的事件。刚才您也特别提到这个材料端有6寸、8寸，硅当然还有12寸。那我们就说碳化硅，那您觉得这个8寸，当然现在主流还是6寸。对4寸当然主要是半绝缘，对6寸半绝缘实际上还不是主流。那就是说在导电衬底而言，您觉得8寸要成为一个主流，大概还需要多长时间？

郝跃院士：8寸成为主流的话，我认为还有3~5年的时间，因为6寸跟据我们做的经验的话，从4寸到6寸就经历了相当长的时间，其实现在就6寸说，这个作为主流的话，也没有多少年的时间，所以到8寸我认为还需要3~5年的时间。

所以这种情况下，一个就是说到底我们碳化硅的市场有多大，尤其是我们大家关注的车规市场到底有多大。这个就会决定我们8寸是否会成为主流的很重要的一个方面，因为8寸的成本必然高，如果说在这种情况下你没有非常高的需求，那么发展8寸的必要性就没那么大。

所以说这个还要看市场的量有多大，就像做硅的这个功率器件，从8寸到12寸也是用了很长时间，大家都认为8寸在做硅的器件的时候，它的性价比是最高的，到了12寸，它市场的性价比就没有那么高，当然原来认为6寸也不错，现在看6寸，它的这个优势就不是太明显了。因为无论怎么讲，它的产能比8寸还要差很多，所以说这个是一个方面。

第二个方面，现在发展这种8寸也好，未来的12寸也好，还要看设备。就是说设备厂商如果说看准了8寸、12寸这个大好的时机，那么还可以。

现在的问题就是说从8寸的角度来讲，现在我们大部分还是用硅的产线，甚至国内发展的很多还以二手的为主，那么二手的现在8寸也是非常困难的，6寸还好，8寸基本上从国际上来讲很难找到这个市场，就是不做这个市场了。

实际上，相反，12寸倒是设备还比较丰富，所以说这个也是一个矛盾，就是未来8寸，要在硅的基础上做8寸，硅都没有8寸了，我们何谈碳化硅来做8寸，那么这样也

是跟设备有很大的关系。

陆敏博士：对，它这个都是一环套一环的。当然实际上我想您的核心意思就是还是要有市场驱动。

郝跃院士：市场如果不大，设备厂商没有积极性，不跟。我们就是针对硅的8寸的线，我们用它来做这个碳化硅，未来硅的8寸线就已经是非常稀少了，所以说你来发展8寸的碳化硅也是一个面临的难题，现在反而是12寸的线多得不得了。

陆敏博士：纵观化合物半导体而言，实际上碳化硅的这种尺寸的推进还是挺快的，2寸-3寸-4寸-6寸，还有8寸。实际上相对这个第二代，第二代可能现在砷化镓什么的可能还都在4寸、6寸。

郝跃院士：需求，我认为主要是需求。

砷化镓，因为现在目前剩下的给砷化镓的市场无非是两个，一个是PA，就是手机里面的PA和那个低噪放LNA，另外还有就是红光激光器LED、VCSEL，所以说这个市场不是太大，在这种情况下，何况手机里头的、终端里头的无论是低噪放和功放，还大有被硅取代的可能性，现在用锗、硅来做，低噪放也是用硅就可以拿来很好的，所以这种情况下砷化镓的市场被挤的是很小的。

陆敏博士：对，好，我们再回到碳化硅，因为功率器件毕竟是对整个半导体而言，对比IC而言还是个小的方向。这个市场体量还是小的多，那您觉得这个功率器件市场，您估计将来它大到一个什么样的程度，有可能会催生出碳化硅的12寸呢？

郝跃院士：碳化硅的12寸，我自己认为在相当长的时间内，我觉得发展的必要性暂时没有，因为就是一个成本太高，当然它有个优势，将来可以用硅的这个工艺线可能很好，能够接着硅的功率器件，包括12寸的功率器件的线，都可以兼容这个碳化硅，来做碳化硅的这个器件，这个是它的优势。

但是它最大的问题是成本，衬底的成本太高了，所以这个衬底成本高，就意味着未来的器件成本也就高，在这种情况下，它还面临着很多的技术性的难题。12寸包括因为碳化硅的生长，大部分现在目前都是靠升华的办法来做，我们说的Lely法。这种情况下要把12寸做得很均匀难度是很大的。

陆敏博士：是，我也是同意这个观点，实际上我觉得还是看市场，因为真正要到12寸，市场要非常大才有这个动力，但到了那么大的市场，实际上经历很长时间，到这么长时间，我觉得可能都有其他材料或许都能替代碳化硅了。

郝跃院士：所以说刚才问得很好，砷化镓为什么卖不到

8寸，甚至6寸都不多。为什么？就是它完全取决于一个产业有多大的市场量。像在LED目前来讲，它大量的还是6寸、4寸的蓝宝石衬底，LED为什么不发展8寸，为什么不发展12寸，还是跟市场成本有关，它有个推动问题。

如果说确实有必要，市场肯定会往8寸、12寸去发展，若它没这个必要，6寸就够了，而且它的效益是最好的。

为什么要往8寸走，为什么要12寸呢？这个不是说越大越好，就看一个市场驱动，不是技术驱动，何况后面还紧跟着硅基氮化镓，它这个竞争目前还很难讲，当然我相信更高电压的还是碳化硅，但是电压越高，它市场也越小。只在轨道交通，高压输变电等

你看车用逆变器也就最多到1000V，就一般是800V，这个就完了，所以这种情况下都没有必要说到一定要3300V，甚至到1万V，碳化硅可以，但是问题是氮化镓也可以做到，现在这个从科研的角度，我们团队也能做到1万V，最近我们氧化镓也做到1万V，反向阻断电压也到1万V的小器件。小器件也做到1万V，但是问题是在这个1万V的市场毕竟还是很小的，不大，所以说在这种情况下，可以几个器件并联就够了，我为什么一定要在器件尺寸上去下功夫呢？

陆敏博士：好的，谢谢。

好，那我们碳化硅就告一段落。实际上大家现在学界比较可能追求的一个方向，就是目前有人称超宽禁带半导体为第四代半导体，您同意这种说法吗？为什么？

郝跃院士：我觉得第三代、第四代，我当年就说了，我们还是从学术界、产业界还应该叫做宽禁带、超宽禁，这是依从国际惯例的说法。那么“第三代”这个名词，我一直讲，都是一个科普的说法，就是怎么跟老百姓说的更通俗易懂些，就把它就称为第三代。

其实现整个半导体来讲，第一代还是主流，硅还是主流。我们90%以上的还是硅，硅材料，所以说这个第三代、第四代的称呼，尤其第四代，也有些专家企业家问过我合适否，我说你要成为一代材料，你必须要有产业背景支撑。如果说这些已经到产业化了，规模化了，那么我们说成为新的一代是可以的。

现在大部分都还是处于研究阶段，而且未来产业到底在哪些方面会有更新的突破。

现在客观的讲，还有一段时期，这个可以值得等待，还有不确定性，你就叫做一代半导体，那么就意味着它已经是产业化，我认为对社会还是多多少少会产生一定的误导，误导呢因为一说第四代还以为很先进，然后呢我们的投资，政府开始在这些方面又开始关注了。

但是我认为它要真正到应用还会有相当的一段时期，所

以我自己认为还是谨慎为好。你怎么称呼比较便于沟通交流，便于老百姓理解，同时或许也是为了便于融资的需要。

陆敏博士：还是有它的价值。你怎么称呼比较便于沟通交流，便于老百姓理解。

但是一定要把这个为什么这么说的背景要给他说明清楚。

郝跃院士：但是就是说这个往你讲了，大家就觉得这个是大好时机来了。

陆敏博士：以为是第四代要替代第三代的大好时机来了。

郝跃院士：于是给大家的一种信息上面不准确的东西，所以我觉得在这个方面还需要更加严谨一些。

陆敏博士：所以需要郝跃院士多做这种科普的定义。

郝跃院士：是的，也有很多专家都给我讲，我们就要大胆的讲第四代半导体。

我说大胆是一个方面，但是你至少要看到我们有些材料，超宽禁带有些材料已经具备很强的，不是局部的，是很强的产业化的这个前景对吧？我们说在这种情况下，需要社会更多的关注，需要资本的更多的进入，这个时候我认为提出一个新的名词，这个可能有利于这个方面，但是如果说你时机不到，你提出来就可能给我们整个一个误导。

陆敏博士：就是宣传有必要，但是宣传必须要有度、有基础是吧。

郝跃院士：不是一个基础，就是时机很重要。

陆敏博士：好的，那我们知道氧化镓实际上目前在超宽禁带半导体中应该是最活跃的，实际上应该算相对比较成熟一点的。那请问目前在氧化镓这个领域主要还有哪些科学和技术问题？

郝跃院士：氧化镓因为我们团队应该讲在国内甚至国际上搞得还比较早，到现在也就已经有4~5年甚至更长的时间了。

我说氧化镓它的优点是突出的，超宽禁带，禁带宽度4.6~4.8eV。但它有它的弱点，一个它是从晶体来讲，它是个单斜晶系。不像我们氮化镓六方、碳化硅立方/六方。再加上氧化镓跟碳化硅一样，它是多型，现在这个大家普遍认为就是说β型的做起来相对稳定，像α型的也有，像碳化硅就更多了，200多种晶型吧。

这种情况下，我觉得如果说要讲哪些方面我们还比较欠缺的话，第一，我觉得这个衬底材料需要高质量的衬底材料，需要不断突破，国际上也就是有几家公司吧，日本几家公司能做，国内做的时间比较早，但是质量都一般，这是第一个方面吧。

第二个方面还要解决氧化镓导热问题，因为氧化镓的热导率太低了。

陆敏博士：好像比硅都差吧？

郝跃院士：比硅都差，甚至比很多介质都差啊。所以说它的这个热导率是必须要解决，就是散热问题要解决，散热问题如果解决不好，它的这个作用就发挥不出来，我们前期在这些方面都做了很多的工作。

然后再下来氧化镓的 p 型掺杂，氧化物半导体都有这个问题，氧化锌、IGZO 包括氧化镓 p 型掺杂都很难，当然氧化镓当年 p 型掺杂也是不容易的。因为宽禁带嘛，任何杂质进去大部分能级都太深了，所以它这个在常温情况下要电离很难，要激活很难，所以这种情况下，p 型掺杂，也是一个值得关注的。如果 p 型氧化镍拿来做一个异质结，现在目前也有这种办法，甚至 PN Junction 也是可以做，p 型就是氧化镍，n 型就是氧化镓。

陆敏博士：就是这样一个变通的方法，那性能呢？

郝跃院士：性能现在看样子还不错，有氧化镍，还有别的也可以发展更多的材料，这个都是在研发阶段，潜力还是有的，但是就是这个难度还是很大。

总的来讲，在这些方面的都是需要重点关注。

器件本身来讲，现在的进展很快，就器件现在进展的是最快的，功率密度、集成电压等，可以讲，每天都在做，都在进步。器件还主要是在学术界，paper 我都在比较关注，这个进展是很快的，全球都在关注，当时我们做的时候也没太多的关注，甚至学术界都觉得不大可能，散热是这种情况下怎么可能呢？

但是随着后来我们有些工作，觉得这个散热问题，我们把它转移到硅衬底上或者碳化硅衬底上，觉得还不错，还转移到金刚石，金刚石因为成本太高了，这个就是说即便是学术可以转移到金刚石，未来应用也是个门槛，因为成本，除非在一些特殊的超大功率的这种应用，一般的这个量大、面广的，还得需要低成本的，所以说转移到硅和碳化硅还是一个很重要的一个方面。

陆敏博士：好的。那实际上都在发展，不管是材料还是器件，当然材料肯定是需要首先解决的，那您在再往后推，在应用层面，大家实际上市场关心的就是应用。

因为现在这些应用场景实际上都有其他材料所占据着，就是您觉得这个氧化镓最有可能首先会出现在哪个应用场景，或者说对应到氧化镓是哪个功率等级，哪个电压，哪个电流的场景当中？

郝跃院士：我认为氧化镓最有可能的就是第一步肯定

是二极管，直接跟碳化硅形成竞争，就是跟碳化硅的 SBD，替代它的部分，因为它的导通电阻更低一些，所以这个直接会在很短的时间内，我估计就会有一个这个方面的市场，这个就是我相信无论是高压的还是这个低的损耗的，都会是在二极管方面。后来肯定是在电力电子的三极管方面，现在我们也尝试做微波，比如说它的这个频率也能做到几十 G 的频率，这是很好的。比如说去年我们 IDM 有篇文章就是氧化镓做的微波。

陆敏博士：它有什么（优势）？

郝跃院士：它是导通电阻低、损耗低，因为频率特性还不错，但是它目前弱点就是，它的电流还比较小，功率还做不上去，但它的损耗确实很低。

陆敏博士：损耗低，就在小功率领域

郝跃院士：对，因为微波嘛，损耗低了，就意味着它的这个效率高，所以在我们微波领域特别关注效率，到底这个转换效率能达到多少，这个是很重要的。

陆敏博士：好的，那我们知道现在的氧化镓衬底实际上业界都认为它是熔体法，可能会做得很便宜，当然实际上没那么容易吧。

郝跃院士：对，没那么容易

陆敏博士：所以在这么一个背景当中，做企业，实际上还有同质和异质外延不同的路线，那您怎么评价呢？

郝跃院士：我觉得现在做器件要真正的要把它做到产业化，要大规模的产业化，还是同质的，这个就是说在同质上面来做，异质反正就是说蓝宝石现在也可以做一点，这个质量肯定不如同质的。现在就是说用同质的衬底，然后把它剥离，然后转移到其他衬底上。

陆敏博士：因为同质毕竟它这个外延品质好。

郝跃院士：不仅是外延，就是转移来讲，也是同质的要好很多，要真正做器件，同质的质量还是好很多的。

陆敏博士：那您认为异质外延氧化镓，会有前途吗？

郝跃院士：我自己认为反正学术上可以做一做，产业上面这个有一定难度，现在很多都是 ALD、MOCVD 异质上面长了很多，主要是蓝宝石上面长了不少。都在讲质量不错，但是我就说这个质量不错，最终还是要靠器件来说明。

现在主要拿来探测器的多，就是做深紫外探测器的比较多，这个因为探测器对材料的要求就没有那么高，还属于光电，它主要是吸收，主要吸收光能够产生一个压差就完了，

那么真正要做电子器件，就是拿异质外延做器件的，做的好的比较少。

陆敏博士：好的，那实际上在超宽禁带的领域，实际上我们知道还有氮化铝，铝镓氮，金刚石，当然这三个相对滞后一点。那您也大概评估一下这三个方向。

郝跃院士：因为当氮化铝和铝镓氮，总的来讲我们都叫做 III-V 族。

其实我们现在做的氮化镓器件也都是用这个势垒层，有大部分都是用铝镓氮。那么用铝镓氮拿来当衬底，我相信你问的问题是，不是做这个势垒层，是要做沟道，叫做沟道层。

铝镓氮做沟道层，我认为学术上可以研讨，因为铝镓氮的最大优势就是它的禁带宽度宽，它比氮化镓宽。那么这个是它的优势。但它的弱势就在于它是三元，三元往往做沟道材料，它还会碰到很多的难题，比如说它的组份不均匀，这样就会形成额外的散射。

所以在这种情况下，你说铝和氮、铝和镓组分到底是零点几，其实不同的地方它就有不同的不均匀性，因为你拿来当势垒层没关系，那只是对电荷的调控，问题不大，但是你真真正正拿来当沟道，那么它就会引起这种组分不均匀带来的一些散射，所以说这个呢我认为学术界可以做，我自己认为三元的拿来直接做衬底还是有挑战，当然了，就说那么 IGZO 也可以，四元的都可以，但是我认为元越多，它的组份的不均匀性也就越复杂。

铝氮我觉得未来是可期的，但铝氮的最大好处是它的禁带宽度 6.2 eV，但是正因为那么大，碰到了很多的问题，掺杂是问题，欧姆接触是问题，另外铝的氧化也是问题。你要真正拿来当这个东西，铝的含量高了以后，它容易氧化，所以氮化铝的衬底为什么外延起来难呢？就是说天然有一层三氧化二铝，就必须要把它去掉，才能再进一步工艺。

这些都是挑战，尤其是欧姆接触，必须再生长，再生长欧姆接触层，如氮化镓，或者再生长铝镓氮，然后中间这部分做器件的这种用氮化铝，这是第一个部分。

第二氮化铝，总的来讲，它的迁移率还不够高，比氮化镓的迁移还差很多。

但它的优点，就是说它的禁带宽度越宽，损耗越低。金刚石，这几个方面我们都在做。金刚石的最大优点，散热好，所有的这个材料就是金刚石散热是最好的，热导率很高。那碰到的问题就是它原子序数太低了，所以它的键能太强，所以说它这个掺杂是很难，他不是说掺杂什么，关键要形成替位，难度比较大。

再一个就是说它无论是 n 型和 p 型进去以后，它的激活率都相当高，所以说搞体的很难。现在就是比如说用氢终端、硅终端，那么形成一个二维空穴气，现在这个是主流。现在

我们也在这个方面做了很多的工作。我们现在就希望我们能够找到一种 n 终端，就是二维电子气，那就很好。

陆敏博士：实际上金刚石反而是这个 n 型掺杂难。

郝跃院士：n 型掺杂难，p 型掺杂虽然简单，但是一般情况下也很难，硼在里头也有几百个 meV，一般 100 以下还好，几百激活率就下来了，比如三五百。所以说这个激活率就太低了。

陆敏博士：那实际上大家都说金刚石都被称为终极半导体，那您怎么评价这个？

郝跃院士：我认为是对的。因为金刚石它确实攻克以后，能解决很多问题，我只能说解决一般情况下不会用的，只会就在一些极端情况下，超大功率。这个就要求在超大功率这种情况下它的温度也不能高，我认为这个终极半导体是对的，这种情况下我还是比较期待，最后金刚石如果能突破，那么我们这个真正的这个大功率低损耗就是可以实现。

陆敏博士：那或者说终极半导体，您觉得碳替换硅，有可能延伸到微电子领域，逻辑领域吗？

郝跃院士：这个问题就是说的更敏感的话题了，一般我都不愿意讲太敏感的话题。

既然您问了，我就这么讲，我认为一个产业要把它从一种材料变为另外一种材料，尤其是大规模的这个产业，这个难度都是非常大的。就是你问我，碳能不能代替硅，对吧？那么应该讲，硅集成电路到今天已经六十几年了，到今年 66 年了。

国际上在这个里头人力、物力、财力，我认为没有任何产业投入有那么大，我要把它替换成别的材料，你一定是他确确实实走到无法再走的程度，才可能。凡有一点可能我认为都不大可能有别的材料来替代它，作为补充是可以的。

就是额外的补充，异质外延在上面，现在尤其是异质外延比较多了，那么可以在上面就是做一些补充是可以的，比如说 Memory，比如说一些 End Connection，都是有可能的。

但是要说完全全不要硅，不要硅器件，不要硅的 IC，完完全全用其他材料我认为到目前为止，这个技术路线并不明朗，未来是不是明朗的。

陆敏博士：对，因为硅现在摩尔定律还在往前推。

郝跃院士：各种办法都在完成。

陆敏博士：这个我看他们都计划到 1 纳米了。

郝跃院士：但是你要算这个东西，我经常说集成电路为什么能够器件尺寸无限的缩小，而且光的器件为什么缩不小，

就光电子的器件为什么不能缩小？大家可能觉得我光的集成电路，当然说到光集成电路，也许有些专家又觉得郝老师是不是不该多评论光的这个集成电路，但现在不是光子集成，不是也是一个很重要的硅基光子嘛。

我认为你无论哪个方面都跟它的基本粒子的波长有关系，它的尺度跟它波长是有关系的，你不能违背这个规律。

现在你用来做器件，那么光子的波长，现在比如红外波长是一点几个微米。我们当中的光通讯的一点几个微米，就即便是紫外，目前的紫外激光，比如 193 纳米，就哪怕是极紫外，你做出来 13.5 个纳米，那至少还是在十纳米级。

那么电子为什么都不考虑这个问题，所以它再集成，你不能比波长都要短。所以说器件尺寸跟波长是有关系的。电子的德布罗意波长是零点几个纳米，就物质波的波长是零点几个纳米。

好了，人类已经开始在硅上面考虑零点几个纳米了，如果说我客观讲，用别的材料也可以去算算别的材料的电子的德布罗意波长是多少，那么你就可以知道我们人类的极限是多少了。这个规律总是不能突破的，

陆敏博士：这是物理的第一性原理。

郝跃院士：所以这种情况下，光的集成 1000 多个器件，1 万个器件就是超大规模了，但是你集成电路现在是 1,000 亿个。在一个 IC 上 1,000 亿个那个 transistor。那么所以说这个差距是从 1 万到 1,000 亿个，所以说两者之间怎么来比。

陆敏博士：那这就衍生一个问题了，实际上我们现在都是讲这个微电子领域的研究或者应用的是电子，电子当然它实际上也带来另一个问题，就是功耗还是个问题。所以将来现在不都在提解决功耗的问题。解决功耗的问题就是用光子计算吧，量子计算、光子计算那背后不就是光计算机、量子计算机，它的功耗可以做下来，但是听您这么一讲它的尺寸很难做小对吧？

郝跃院士：尺寸很难做小，功能很难做得很大。

陆敏博士：所以那您怎么评价将来量子计算这条路线跟我们现在的这个传统的微电子路线？

郝跃院士：现在的量子计算的几条路，因为我不搞量子计算，所以因为在长期在基金委对这些方面也有听过很多次了。因为不做量子计算，我认为量子计算现在有几条路吧，一条路就是超导，还有一个就是用光。

因为我认为用光的这个办法，它的这个要作为产业化难度很大，就纯光的这么一个技术要做产业化，还是觉得主要是尺度的问题，那个系统大的不得了，那个做产业化难度还是很大，但是解决一些特殊问题、特殊应用还可以。

陆敏博士：特殊应用没有体积限制的大小。

郝跃院士：那么做超导量子计算，这个我认为未来还是有很重要前景，所以国际上包括 IBM、Google 反正都在做超导量子计算。国内也有做超导量子计算，超导量子计算其实主要在低温，要这个多少个 mK，实际上也很麻烦。后来我来想，如果我们电子你给它降到低温 mK 级，那不是也很好嘛。当然了不需要降到那么一个阶段。

陆敏博士：低温下那电子的波长也就降低了。

郝跃院士：对，所以我在推一个在电子方面的低温电子，就是怎么就集成电路，低温情况下，温度稍微低一点，还可以把它的极限进一步推，还可以把它 ability 再在前面再增加一点，也是一条路。

所以这个我觉得大家都在努力，未来我认为量子会和电子慢慢会替代一部分，我认为最好的方式是现在的超大型量子计算机和大型电子计算机，超算。

量子可以在一些特殊的比如说矩阵运算、向量运算方面可以去替代一些现在电子计算机，比如说现在的整个计算量占比，可以说 5% 由量子来算，95% 还是电子来算，慢慢移，就看你这边能发展的多快，慢慢移，看有多通用。

现在因为都很专用嘛，主要是向量，慢慢的最后能不能 10%、20%，这样的话一步一步的，叫做电子量子融合。

陆敏博士：这个如同材料之间的竞争一样。

郝跃院士：电子量子融合，这样来破解我们高算力、AI、大数据这些的发展，我认为这个是有可能的。

否则再搞几年量子，你老不应用，这个产业界也慢慢越来越失去耐心，所以说现在已经到了这么一个阶段。

陆敏博士：所以说没有一个通吃的，都是适合你的场景。

郝跃院士：因为一个产业，除了科学技术来讲，还有市场、还有成本、还有老百姓的这种心理承受能力。当年 LED 出来，你说你节能，老百姓说我就不买，你太贵。你再节能，我都觉得不用，跟现在汽车电子也一样，说碳化硅很好，氮化镓很好，为啥？

但是贵所以我宁可用硅的，硅的便宜，虽然它的能耗高一点，但是在老百姓的脑子里头，开车的脑子里头，这个没有直接体现，体感不太强烈，但是你要他用那么多的钱去买，他马上就能体会到，因为我用了碳化硅，我用了宽禁带半导体，所以我要提高这个价格，那老百姓就觉得那我宁肯低一点的价格也够用，跟这个 LED 当年是一样的，你必须要把它价格压下去，市场最重要还是靠成本说话。

陆敏博士：是这样。好的，谢谢。我们再说一些软的问题。

题，因为您毕竟是教育工作者，我觉得其实一个产业实际上都需要人才、政策多方面的支持，当然也需要有创业的环境。其实在这方面，这几年也是化合物半导体等高新技术领域发展的一个核心的要素，每年大学毕业生也很多，但是我们发现一个奇怪的现象，但产业需要的人才好像还不够。

这个好像人才输出了很多，但是好像招到能用的人好像又不够，所以创新创业环境，又会引导人才的不均衡流向，那可能那些发达地区，人都往那边流。很多欠发达地区或者比如说西北等等，可能就留不下人才来。

所以我们国内各地方又有这个情况，这个就像刚刚所提产业一拥而上，产业政策也是一拥而上，对各地的产业政策又好像很雷同，这个二线的学一线的，一线的学北上广的，这种产业政策出来，就导致这种同质化的项目落地非常多。

那资本的热捧又会进一步加剧这种产业风险的泡沫。

那您作为一个教育工作者又一直深耕技术开发应用，请根据您的自己的经验和经历，如何从教育研发和产业多层次平衡好人才，创新创业环境，科技政策与资本要素的关系，助力人才培养，技术创新和产业发展的良性循环。

郝跃院士：对，这个也是一个很大的题目。这个不仅是我觉得我们在这儿谈，从上到下都在谈。二十大不是把人才、教育、科技三维融合到一体，来共同发展，是吧。过去是教育管教育的，科技管科技的，人才管理这一块，现在大部分都开始调整，一个领导来分管这三块。由此可见，大家对这个怎么把科技教育人才这个融合发展非常重视。

现在我应该讲，从我们国家来讲，从上到下，都有这个想法，希望我们人才能够就是跟这个产业结合的更紧密，比如像硕士，极力推进工程硕士，专业硕士学位。博士现在也有工程博士，专业博士。

陆敏博士：噢，还有工程博士。

郝跃院士：现在新增加的博士学位学位，全都是工程类的，学术类的基本上原则上保持一个稳定的不再扩大，那你再扩大的都是工程类的，所以这个也都是要破解这个难题。

所以说我觉得就是作为我们大学来讲，方针也是有很大的变化。你比如说像我们这个电子科大，西安电子科大。现在也是在外面建了各种各样的研究院。这个广州研究院、杭州研究院、芜湖研究院、重庆研究院，就是我们这个学校搞的，原因就是希望我们尽可能把人才培养跟产业结合的更紧密。

当然这个里头会碰到就是具体的一些问题，我认为这个集成电路的人才最主要的两类，我们到现在怎么能够真正的把它破解，一个是产教协同，第二个做这个学科交叉，因为你想集成电路我们来讲有多少学科支持，物理、化学、材料、电子、半导体，另外还有甚至是一些生物。那么在这种情况下，怎么能够培养出产业真正需要的人才，他就需要广

泛的学科交叉，但是在学科交叉这个环节下面，我认为现在高校都需要努力，都需要思考。我们惯于跟原来苏联那种培养模式，咱们都是那种培养模式出来的，划分的很细。专业划分得很细。

陆敏博士：各管一块，只关注自己的一亩三分地。

郝跃院士：对，在本科阶段其实更应该更宽泛一点，所以这个教育改革一直在做，虽然这种宽泛，又不能够增加学生太多的负担，你比如加课总是可以的吧，加材料、加化学、加物理这是可以的，但是问题你加了以后他就一定能学好吗？

所以这个问题都是一个比较难破解的问题，但是关键的这个产教融合，叫产教协同和交叉，学科交叉这两个问题，就摆在我们现在集成电路、微电子和这个半导体人才培养方面，我认为这两个问题，是比较突出的。总之我们在努力，也在破解。

所以这个方面需要我们共同的努力，共同的去加大这个宣传。

因为我们老师这个大学里面过去这种模式总是培养人跟满足市场需求之间还是有些脱节，我们希望我们要培养那个第一是思想过硬，然后是基础扎实，本领高强，动手能力等，对吧？但是，是不是这种东西就一定是这个市场所需要的方面？

陆敏博士：这个还是要市场的评价，不是上面评价，

郝跃院士：对，所以这些方面我都觉得是需要我们共同努力的。

很多高等教育，反正咱们都讲了很多高等教育，其实你看我们一些课程中间，是可以有很大的调整。

陆敏博士：就还是要与时俱进，很多事情。还像以前一样停留在象牙塔里

郝跃院士：对，象牙塔现在倒不是了，这个我认为早就已经不是了，因为每个学生都面临着就业，现在象牙塔这个概念，因为量大了。改革开放我那一届，77届我是改革开放第一届，全国招了20万左右，现在一年大概八九百万。我们研究生都快上百万了。

陆敏博士：加起来快千万了。按道理不应该这么多人才，企业觉得应该很容易有需要的人了，对吧？

郝跃院士：对，所以说在这种情况下，所以这个需要我们再加上教育，现在我们一再探究，教育自身的规律，怎么能按教育规律不断的去培养人。

说实在的，您刚才提这个问题，多多少少也有一点这个

怎么说呢，这个从需求来讲，企业也有点着急。我们马上就要能用的，马上就要好用的，马上就要会用的，但大学培养他们觉得我就应该按照科学教育规律来弄，我们毕竟不是一个讲习所，不是一个人才速成班，所以这个之间也是有认识上的差距。

陆敏博士：对，刚才您说的工程硕士，工程博士他就可以跟企业之间绑定的更紧密，甚至是定向的。

郝跃院士：对，共同培养，企业有导师，学校有导师共同培养。

陆敏博士：好的，谢谢。

然后这里最后一个问题，就是对于中国化合物半导体行业，刚才我们前面聊到了很多，实际上国内在某些领域，当然已经是跟随着，但是有些领域实际上还是有差距。虽然在这个化合物半导体的领域，实际上我们已经差距不大，但是不管是材料还是器件端还都是有差距的。那我想对于中国化合物半导体行业应该如何学习国际经验，加速产业发展，请您谈一谈看法。

比如说还有在整个知识产权的纠纷及保护问题上，因为我们想中国是一个开放的国家，同时市场开放，同时我们的市场也是面向国际，所以将来刚才我们提到很多问题，我们将来是要参与国际竞争的，所以这个事情不能我们关在门里自己搞。我们还要跟国际接轨，跟国际好的经验，实际上我们要学习，要不然我们实际上前期我们知道改革开放初期，中国到国外去的时候，其实走了很多弯路，也遇到很多挫折。那我想化合物半导体实际上我们应该从国际上相对来说是在同一起跑线了，那我们如何能更顺利的进入到国际市场？请您谈谈看法。

郝跃院士：我觉得这个问题既是一个很尖锐的问题，也是一个很现实的问题。

因为科学技术如果说你不尊重它的规律，那么大家就不会去研究。如果说不尊重他的这个知识产权，那么我们很多的基础研究或者是我们开发，那这个大家动力就不大了。

作为我们国家在客观来讲，在相当长一段时期，这个问题是没有得到很好的解决的。那么包括你比如材料生长，只要有一个很好突破，几乎很短的时间内，这个很多企业就都“掌握”了，我说掌握了，这是用引号了啊。

那说明什么呢？就说明我们在这个里头确实对知识产权保护不利，但是就是我们又是在一种发展阶段，所以我也能体会，无论是国家还是各省，他对这个企业都还是有些宽容、有些保护。这个就是也是助长了我们在很大程度上对知识产权不够重视。

而且到现在来讲，仍然有这种情况。

陆敏博士：这种残余的思想。

郝跃院士：对，就是说马上发展了，拿一个现成的，不管它是从哪来的，我就把它拿来用。所以这个方面我认为不光是集成电路或者半导体界了，其他界反正也都有，通信啊，只要是发展的快的都有这个问题。

从长远来讲，我相信这种国家的法制政策越来越健全，现在因为打这种所谓的技术专利纠纷是非常难打的，甚至最后你打赢了其实得到的成效，已经不是跟一家人在打了，其实就是跟一个产业在打了。

所以在这种情况下，难度是比较大的，所以我只是告诉我们团队，我们唯有靠不断的创新，你指望说人家不用，人家尊重这个东西，难度比较大，就是所以这种情况下我认为未来国际竞争我们肯定是要不断的加大研发。

所以这种情况下，我就说还是这个不断的做吧，从大学来讲，不断的为企业产业提供一些好的方案，所以我们当时也不太注重是否我们能得到一定的回报，反正就是这么一种思想，一直在做，所以我相信在未来你真要参与国际竞争，真要加入这个国际相关的一个体系，国际生态体系，不靠这个东西是不行的。

现在我们比较弱的，在半导体方面或者企业相对来讲，国家都讲企业要成为创新的主体，但是现在我们真正在这个方面，企业作为创新主体的这个方面还有相当的差距。

你知道像国外它真正创新的主要还在企业，企业的研发投入非常高的，所以我们现在就差距在这个地方，也是一个阶段吧，你说像华为现在就已经走出这个阶段了，我相信慢慢其他的企业也会走出这个阶段，那么迎来自己就能够不断创新。

陆敏博士：发展中的问题发展中解决，靠自身发展解决。只有自己更强大了，这个问题就真的迎刃而解了。

郝跃院士：挺好，发展中的问题，靠自身发展解决。我一直说企业是创新主体，国家也希望企业是创新主体，首先你要企业是作为创新投入的主体，你看我们现在的整个半导体的投入，真正的科技投入主要还是政府。所以这个还是有很大的距离。

你像美国、日本，美国当然也有芯片法案，支持了一点，但是一直以来客观的讲，它主要是靠企业自有资金。

即便是这个芯片法案主要是给企业，日本、韩国，它的进步主要靠企业，科技进步主要是靠企业。

陆敏博士：好的，谢谢。谢谢郝跃院士接受我们深度的交流，很多答疑解惑，对行业把脉问诊，在很多问题上给了很好的建议。非常感谢郝跃院士的分享。🙏

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

四“新”齐发



新升级

汇聚化合物半导体及半导体两大
产业界力量, 两大类型论坛同频风暴



新空间

全新展览式布局
更大规模、更聚人流、更集人气



新力量

注入国内外产业界龙头企业
学术大咖、权威专家和科研院所



新功能

学术分享、商务洽谈、投融资对接
1V1专家把脉、企业专访、产品设备展

已确定入驻企业

亚舍立半导体贸易(上海)有限公司

3M中国有限公司

Park Systems

KLA Instruments

Wolfspeed

BelGaN

厦门毓茂科技有限公司

牛津仪器科技(上海)有限公司

赛默飞世尔电子技术研发(上海)有限公司

上海珅视光学精密仪器有限公司

上海贺利氏工业技术材料有限公司

钢泰科技(苏州)有限公司

广东唐古环境科技有限公司

上海谦视智能科技有限公司

苏州晶湛半导体有限公司

爱发科真空技术(苏州)有限公司

广州南砂晶圆半导体有限公司

南京百识电子科技有限公司

西安晟光硅研半导体科技有限公司

杭州海乾半导体有限公司

宁波合盛新材料有限公司

派恩杰半导体(杭州)有限公司

三星电子

安靠科技

炽芯微电子科技有限公司(苏州)有限公司

苏州锐杰微科技集团有限公司

苏州智程半导体科技股份有限公司

Compound Semiconductor

迈锐斯自动化(深圳)有限公司

青岛四方思锐智能技术有限公司

苏州芯睿科技有限公司

苏州芯澈半导体科技有限公司

深圳市纳设智能装备有限公司

杭州众硅电子科技有限公司

岱美仪器技术服务(上海)有限公司

翌颖科技(上海)有限公司(优尼康)

清软微视(杭州)科技有限公司

日立科学仪器(北京)有限公司

Aixtron

三安光电股份有限公司(待定)

国仪量子技术(合肥)有限公司

苏州新尚思自动化设备有限公司

昂坤视觉(北京)科技有限公司

江苏晶工半导体设备有限公司

浙江六方半导体科技有限公司

苏州瑞霏光电科技有限公司

苏州飞时曼精密仪器有限公司

宁波云德半导体材料有限公司

东莞晟鼎精密仪器有限公司

普雷赛斯(苏州)智能科技股份有限公司

亚科电子(香港)有限公司

迪森(常州)能源装备有限公司

北京特思迪半导体设备有限公司

上海矽卿&沉积半导体

北京华林嘉业科技有限公司

安科瑞泰科技(北京)有限公司

安徽英科医疗用品有限公司

安徽旭腾微电子设备有限公司

武汉颐光科技有限公司

速普仪器(太仓)有限公司

九域半导体

江苏南大光电材料股份有限公司

苏州佑伦真空设备科技有限公司

矽磐微电子(重庆)有限公司

北京水木梧桐创投

中兴微电子

武汉利之达科技股份有限公司

锐德热力设备(苏州)有限公司

空气化工产品(中国)投资有限公司

广东鸿浩半导体设备有限公司

中国电子科技集团公司第四十五研究所

盛美半导体设备(上海)股份有限公司

上海微电子装备(集团)股份有限公司

武汉新创元半导体有限公司

湖南栏海电气工程有限公司

晨日科技

深圳市思立康技术有限公司

苏州利亚得智能装备有限公司

基恩士(中国)有限公司

*以上信息更新至2024年2月28日

展位余量有限, 欲定从速……



主办单位: 雅时国际商讯

官方媒体: 《化合物半导体》《半导体芯科技》

支持媒体: 《激光世界》《洁净室》《一步步新技术》《视觉系统设计》《工业AI》《微波杂志》

《化合物半导体》客服 《半导体芯科技》客服

新年

2024

展望

在 2024 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？



周利民博士
迈锐斯自动化(深圳)有限公司总经理 / MRSI Systems (Mycronic 集团) 战略营销高级总监

2024 年，我们可以预期新兴应用市场强劲的需求和技术不断创新，将推动化合物半导体行业保持快速发展的趋势。在新的一年里，新兴应用市场发展将会带来一些可能的突破与创新。

新能源车应用市场的突破：毕马威会计师事务所和全球半导体联盟（GSA）进行的 2024 年全球半导体行业展望年度调查显示，半导体行业最重要的收入驱动因素方面，汽车的持续智能化和电动化，让汽车再次位居榜首。未来几年对纯电动汽车（BEV）和插电式混合动力汽车（PHEV）的需求将大幅增加，它为基于化合物半导体的电力电子器件带来了高增长的潜力，特别是其对肖特基势垒二极管、MOSFET、结栅场效应晶体管（JFET）和其他 SiC 分立器件会有显著需求。全球领先的化合物半导体供应商一直在积极布局这一巨大市场。2023 年，中国化合物半导体产业实现历史性突破。在碳化硅（SiC）晶体生长领域，中国得到了国际 IDM 的认可，导致中国制造商的产能显著提高。业界乐观预计，2024 年中国碳化硅晶圆产能，或超全球总产能的 50%。随着中国供应商的强势扩张，可以预期，2024 年 SiC 应用市场也将会迎来成本降低和产量提升。

人工智能与量子计算的创新：Lightcounting 预测 2024 年 AI 算力的光互连技术对 800G 高速光模块会继续保持强劲的需求，2024 年的出货量将比 2023 年增加一倍。化合物半导体在新的市场需求推动下将迎来新一波的技术突破和快

速发展。第二代化合物半导体砷化镓和磷化铟是 800G 光模块核心芯片的主要半导体材料，随着更多的 800G 高速光模块的快速量产，将会极大推动砷化镓和磷化铟的高速光引擎芯片技术发展，单通道 200G 光模块将有望走向市场，1.6T 和 3.2T 更高速率的光模块的研发有望在 2024 年开始实现小批量产，AI 高速光模块产品会推出更低功耗的芯片和光模块设计，特别是高速率芯片和光模块的价格将随着量产的提升有望降低。随着人工智能、大数据等领域的快速发展，高性能计算需求也在不断增加。化合物半导体材料和器件由于其优异的性能和可靠性，在高性能计算领域也可发挥重要作用。量子计算正在迅速发展，科技巨头们竞相制造最强大的机器。更多的高性能计算器件将被推出，以满足不断增长的计算需求。这场竞赛是由量子计算在医学、材料科学和人工智能等各个领域的革命性潜力推动的。2024 年也将是量子计算商业化的突破之年。



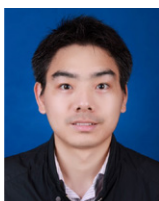
徐现刚
山东大学晶体材料国家重点实验室主任、
新一代半导体材料研究院主任

国产碳化硅材料应用中衬底成本是应用核心问题。8 英寸碳化硅衬底在降低器件单位成本、增加产能供应方面拥有巨大的潜力，成为行业重要的技术发展方向。近年来 SiC 衬底厂商加速推进 8 英寸衬底的研究和量产进度，以抢占 8 英寸先机。国内衬底产业正面临着 6 英寸到 8 英寸转化的关键节点。国产 8 英寸碳化硅衬底制备技术在过去一年取得了重要突破。特别是在 8 英寸碳

碳化硅衬底位错缺陷控制方面，山东大学和南砂晶圆报道了利用物理气相传输法（PVT）制备低位错密度 8 英寸导电型碳化硅单晶衬底的结果，其中螺位错（TSD）密度为 0.55 cm^{-2} ，基平面位错（BPD）密度为 202 cm^{-2} ，标志着国产 8 英寸碳化硅单晶衬底位错缺陷控制已经达到了国际一流水平。

在产业需求和资本支持下，极大加快了国产 8 英寸导电型碳化硅衬底的产业化进程，提高了国产衬底在国际市场竞争力。

在未来几年内，碳化硅行业的稳步发展依赖于产业链协同发展。现阶段碳化硅外延仍以 6 英寸为主，8 英寸处在小批量使用阶段。碳化硅器件方面国内现阶段的 8 英寸线均在建设中。8 英寸碳化硅衬底、外延和器件将在 5 年内全面铺开，成为增加产能供给、降低成本的重要途径之一。



周圣军 教授
武汉大学教授、博士生导师

GaN 广泛应用于发光二极管、微波射频和功率器件等领域。目前，随着新型显示、5G 通信和消费电子快速充电等领域的发展，GaN 正成为新产品中的重要组成部分。在新型显示领域，GaN 基 Micro-LED 有望带来更广阔的应用前景，诸如 AR/VR、柔性显示、抬头显示、车载显示、超大尺寸显示屏等。对于 5G 通信领域，GaN 被广泛应用于 5G 有源天线系统。由于 GaN 具有高功率密度和高频率特性，它可以提供更稳定、更高效的信号传输和接收能力，从而满足了 5G 通信对于快速数据传输和更广范围覆盖的需求。在消费电子领域，GaN 也被用于手机快充，用于提供更高效、更快速的充电能力。由于 GaN 具有高电流密度和高开关速度，它可以实现更小巧、更高效的充电器设计，从而为消费者提供更便捷、更快速的充电体验。总体来说，随着新型显示、5G 通信和消费电子快速充电等领域的迅猛发展，GaN 作为一种具有优异性能的材料，将继续在相关领域扮演重要角色，并不断推动新产品的创新和市场规模的扩张。

SiC 在功率电子、光电子和射频微波等领域均有广泛应用。SiC 的优异性能使其成为高功率和高温环境应用中的理想选择，将为各行业带来更高效、可靠和可持续的解决方案。



刘泳洋
北京特思迪半导体设备有限公司创始人和 CEO

中国化合物半导体产业正迎来战略机遇期，从材料、设备、设计、制造到终端应用，我国在化合物半导体领域相关的产业链已经较为完善，虽然欧美等国家仍在技术和产能方面具有先发优势，但中国过去几年的追赶速度也是非常惊人的。以碳化硅

为例，随着本土碳化硅厂商的技术不断突破和国内产业链的完善，国内碳化硅产业有望进一步壮大，在全球竞争中占据更有利的地位。

2024 年 8 英寸碳化硅规模化量产是行业突破的关键，尺寸的增大也带来加工方式的转折，同时对生产设备提出了更高的要求。我们前期在大尺寸晶圆加工设备的研发正好能衔接市场变化的需求。公司在研发新型产品核心零部件及相关供应链的自研能力上重点投入，成功研制出的 8 英寸碳化硅全自动减薄设备已切入市场，8 英寸双面抛光设备已通过工艺测试，进入量产阶段。该系列设备突破关键技术及工艺，进一步推进碳化硅行业制造降本增效，助推碳化硅行业向规模化、低成本方向发展。



沙伟中
苏州艾斯达克智能科技有限公司董事长

2024 年化合物半导体行业市场将复苏。自从第三代半导体写入“十四五”规划后，市场上对该半导体的需求和要求越来越高，市场规模将持续稳定升高，行业也将在市场的催化下迭代升级，产品性能功能也将不断完善。未来，在市场规模趋势方面，我国第三代半导体行业将持续保持高速增长；在细分产品发展趋势方面，SiC 需求将会增长，GaN 应用场景将进一步拓展；在技术发展趋势方面，大尺寸 Si 基 GaN 外延等问题将会有所进展。



郑毅
应用材料公司 ICAPS 事业部高级总监

我们预见到 2024 年在化合物半导体领域有两大趋势：第一是碳化硅衬底从 150 毫米向 200 毫米转变。尽管生长与 150 毫米质量相当的 200 毫米碳化硅晶圆是艰巨挑战，但全球供应链正在努力使之成为现实。目前，业界所有主流的碳化硅器件制造商都规划了 200 毫米碳化硅晶圆的技术路线，同时越来越多的碳化硅衬底制造公司开始供货并验证他们的 200 毫米晶圆。

第二个大趋势是氮化镓（GaN）器件正在被市场接受。在消费电子产品快充领域，氮化镓已充分展现出其高能效和高功率密度的特点。当前，许多公司正在攻克更高功率并更高集成度的器件。我们预计氮化镓将会进入越来越多的工业应用。最近，我们开始观察到基于氮化镓的电动车车载充电器，其体积密度仅是碳化硅方案的三分之一。我们预测，氮化镓在各种应用领域的拓展也将驱动更多投资并更广泛的应用。



杨森

西安晟光硅研半导体科技有限公司总经理

当前，全球半导体行业发展迅速、技术竞争激烈、市场前景广阔。受益于国家经济刺激政策的实施以及新能源、新技术的应用，中国的化合物半导体行业也正在迅速崛起，成为全球半导体行业中的重要参与者之一。未来，随着物联网、5G 技术、人工智能、新能源等行业的发展兴起，化合物半导体行业仍怀揣着广大的发展前景，同时也充满了机遇和挑战。

“厚积薄发，苦尽甘来，百花齐放”，我觉得是对化合物半导体行业玩家的真实写照。是这些企业数年如一日的坚持和互助，才换来现在中国化合物半导体产业的今天；再过去的一年里，化合物半导体企业都不约而同的加大研发投入，越发重视技术壁垒的层次开拓及创新方式的勇于尝试，致力于将衬底良率提高，将外延质量提升，将器件品质提度，更快的完成车规标准验证，这是行业良性发展、快速发展的最优解，也是趋于市场所需稳定产品的必经阶段；在经历过这些必修课后，满足市场最终需求的模块产品将会如雨后春笋般逐一批量化应用替代，终端产品为客户接受，必将反哺整个产业链，为全产业链稳定进步迭代提振信心。



宋超

红与蓝微电子技术有限公司战略与规划副总裁

随着科技的快速发展，化合物半导体行业正面临着前所未有的机遇与挑战。可以预见的是，化合物半导体行业的发展将更加注重高频率和低功耗。随着 5G、物联网、人工智能等技术的普及，对于更高频率和更低功耗的半导体器件需求将会持续增加。在这种背景下，氮化镓作为一种具有宽禁带特性的半导体材料，将凭借其高频率、高功率和高效率等优势，在这些领域得到广泛应用。

同时，为了满足便携式电子设备和汽车电子等领域的需要，半导体器件的尺寸将会持续变小，同时集成度也将不断提高。而化合物半导体由于具有较高的电子迁移率和热稳定性，将有利于实现更小尺寸和更高集成度的半导体器件。这将使得化合物半导体在更多领域得到应用。

另外，功率氮化镓在未来的发展中将更加注重智能和自适应的功率管理。随着电力电子技术的不断进步，对于功率管理的需求将会不断增加。而化合物半导体由于其热稳定性和电子迁移率的优势，将能够实现更加智能和自适应的功率管理，从而提高能源利用效率。

在 2024 年，我期待看到功率氮化镓能够实现更广泛的应用领域、更优异的性能表现、更完善的生态系统以及更高效的能源管理。随着宽禁带半导体材料性能的进一步提升，

预计未来将能够实现更高的功率和频率输出，从而为通信、能源、军事等领域带来更多机会。例如在电动汽车及可再生能源领域，化合物半导体有望在集成电源模块方面发挥重要作用，通过将多个电力转换器集成到单个芯片上，实现更高的能效和更小的体积。在物联网及智能家居等领域，化合物半导体也将提供更多智能功率管理方向的解决方案，包括更精确的电压控制、更高效的能源转换等。

化合物半导体在高频通信领域具有天然优势，在 5G 和 6G 通信技术的发展中可以发挥很重要的作用，其在医疗和健康领域的应用也在不断扩展，同时，随着环保意识的提高，化合物半导体作为一种低功耗、高效率的材料，有望在实现可持续能源和环保方面发挥重要作用。

目前，化合物半导体的应用主要集中在电力电子、微波器件、光电器件等领域。未来，随着技术的不断进步和应用需求的不断扩大，化合物半导体的应用领域有望进一步扩展，包括但不限于传感器、逻辑电路、存储器等领域。

总之，随着技术的不断进步和应用需求的不断扩大，化合物半导体在未来的发展中有望实现更多的突破和创新。这些创新将为通信、能源、医疗、环保等领域的未来发展带来更多机会和挑战。



叶国光

无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

2024 年可能是一个最难预测的一年，尤其是半导体产业，我用几个区块来预测化合物半导体的方向吧。

碳化硅与新能源汽车紧密相连，我认为 2024 年国内投资会趋于缓和，有些碳化硅厂家会因为没有新的投资而处于停滞状态，少数几家资本雄厚与技术突破的公司会继续扩产，但是整体而言整个碳化硅跟以前相比投资热度是降低的，会有少数两到三家公司有较大的技术突破，成为替代进口的国内车规级功率半导体供应商，算是明年碳化硅比较令人激动的好消息。

至于氮化镓，砷化镓与激光 LD，VCSEL 都跟消费性电子产业息息相关，2024 年消费性电子跟 2023 年相比增长有限，所以砷化镓与氮化镓产业要继续过苦日子，LD 与 VCSEL 跟辅助驾驶，数据中心与 AI 关系密切，有一定的增长，但是产值不大，无法提振大家对消费性电子应用的信心。LED 产业会因为裸眼 3D 大屏技术有不错的增长，尤其是小间距技术，但是产能消化有限，大家也许会比较期待苹果 2024 年最新的 iwatch 问世来提振大家对 Micro LED 技术的信心，至于用于 AR 眼镜的 micro LED，可能还要再等等。



沈健威
东莞市晟鼎精密仪器有限公司副总经理、
技术总监

自化合物半导体写入“十四五”规划后，市场上对化合物半导体的需求和要求越来越高，市场规模将持续稳定升高，行业也将在市场的催化下迭代升级。另外，在 5G、人工智能、信息通信等新兴技术的迅猛发展下，化合物半导体在通信和传感器领域有着广泛的应用，具有非常高的市场价值。

半导体设备是整个半导体产业的重要支撑，近年来，半

导体产业的快速发展不断推动着半导体设备市场规模的扩大，随着半导体制造国产化势必带动设备国产化，国产设备进口替代趋势明显。与此同时，受益于国内大厂的带动，部分关键芯片的国产供应链配套能力得到提升，为我国半导体赛道生态建设打开新格局。晟鼎在研发新型设备和技术攻关方面重点投入，公司已自主研发并推出适用于化合物半导体退火的快速退火炉，且能兼容 12 寸及以下晶圆，实现了国产化替代，填补了国内空白。关键技术的研发和突破，进一步推进设备国产化，助推国产设备加速导入，在全球竞争中突出重围，提高整体市占率。

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



周利民 博士
迈锐斯自动化(深圳)有限公司总经理 / MRSI
Systems (Mycronic 集团) 战略营销高级总监

过去的一年里，化合物半导体领域发生了很多事件，其中一些给我留下了深刻的印象。以下是令我记忆犹新且可能对行业产生影响的事件：

人工智能 (AI) 应用：今年以 ChatGPT 为代表的人工智能软件成为了迄今为止增长速度最快的应用软件。而该软件是需要强大的 AI 大模型和强大的算力支撑的，AI 对算力的需求越来越大，算力将成为制约 AI 发展的重要因素。做为全球领先的人工智能技术提供商 NVIDIA，为各行各业的创新者和用户提供强大的计算能力、工具和算法。NVIDIA 的高性能计算能力需要高带宽的光连接，这就推动了光模块的高速化 / 高端化进程。AI 的快速发展要求算力性能不断提高，2023 年下半年开始 AI 应用的 800G 光模块出货量快速增长。据预测，800G 为代表的 AI 高速光模块需求今后的几年将会持续增长，这一趋势将加速 1.6T、3.2T 等新方案的研发、落地与放量，驱动高速光模块产品性能不断提升。这也将推动更高速率 GaAs VCSEL 和 InP 光芯片技术的进步和量产。目前整体来看，在新一轮 AI 浪潮的背景下，以 800G 为代表的高速率光模块将迎来高速发展阶段。我们 MRSI, Mycronic 正好处在 800G 高速光模块产业链上，今年也为 AI 高速光模块的快速上量做出了贡献，我们产品将会不断创新迭代，与 AI 产业共同发展。

中美贸易战升级：美国 2022 年禁售 NVIDIA、AMD 高端 GPU，出台《芯片与科学法案》，禁售 14NM 半导体设备，禁售 GAAFET EDA 等。意在限制中国提升半导体制造能力。中国 2023 年 8 月 1 日起对化合物半导体行业广泛使用的材料实施出口管制，包括 GaAs、GaN、Ga2O3、GaP、GaSe、InGaAs 和金属镓。目的在于保护国家安全和利益。出口商若想获得出口许可，需走相应程序。随后美国能源部 (DOE)

发布了《2023 年关键材料评估》，重点介绍了清洁能源技术不可或缺的供应中断高风险材料，面临供应中断风险的材料包括镓和碳化硅。2023 年 10 月 17 日，根据美国商务部公布的对华半导体出口管制最终规则，美国政府计划停止向中国出口由英伟达设计公司设计的先进人工智能芯片——英伟达推出的中国版芯片“不再合规”。中美贸易战的升级将对半导体行业发展格局产生许多不确定性，但确定的是无论技术的进步和发展将不会停步。

碳化硅 (SiC) 上车：特斯拉在 2018 年率先在 model3 主驱逆变器上使用碳化硅，开启了碳化硅规模应用的先河，也使碳化硅产业发展进入了快车道。而在 2023 年初特斯拉年度投资者日上，特斯拉公布了一些让业界震撼的消息，特别是有关碳化硅的消息，震撼了整个碳化硅产业界，特斯拉却宣布“减少 75% 碳化硅用量”，引发了业界对碳化硅产业前景的担忧。但是 2023 年主要 SiC 器件制造商意法半导体、英飞凌、安森美、WolfSpeed 和 Rohm 则一直忙于和主要原始设备制造商建立设计双赢的合作伙伴关系。今年意法半导体宣布与三安光电合作，将在中国重庆成立一家合资公司，专注于制造 SiC 器件。三安光电也将在当地独资建立一个 8 英寸碳化硅衬底工厂作为配套。英飞凌今年与中国碳化硅供应商天岳先进签订一项新的晶圆和晶锭供应协议。该协议不仅可以使英飞凌多元化其碳化硅 (SiC) 材料供应商体系，还能够确保获得更多具有竞争力的碳化硅材料供应。今年早期英飞凌还宣布了与 Resonac Corporation (前身为昭和电工株式会社) 签署了一项新的多年供应与长期合作协议，将深化 SiC 材料的长期合作关系。比较突出的是安森美，在与汽车制造商建立合作伙伴关系时非常有效率，几个月已签署了几项协议，包括与现代 (韩国)、极氪 (中国)、蔚来 (中国)、德国的大众和宝马签署了协议。SiC 行业大量的合作、协作、收购等行为表明，长期来看功率 SiC 行业的前景还是看好的。10 月，三安光电宣布，旗下湖南三安在碳化硅产品上再取

得阶段性进展，实现了 8 英寸衬底准量产，部分产品已进入主流新能源汽车企业供应链。



郑毅
应用材料公司 ICAPS 事业部高级总监

对应用材料公司而言，2023 年是我们化合物半导体业务发展里程碑式的一年，我们针对氮化镓 (GaN)、砷化镓 (GaAs)，特别是碳化硅 (SiC) 的解决方案取得了更多客户的良好反响。我们推出了深受市场欢迎的产品，包括用于检测碳化硅器件晶圆的 VeritySEM® 6C 系统。以及专为碳化硅衬底设计的化学机械抛光 (CMP)，物理气相沉积 (PVD)，化学气相沉积 / 原子层沉积 (CVD/ALD)，独特的 PECVD 非晶碳膜，刻蚀，测量和检测工具。此外，在光电和功率及射频氮化镓器件技术方面，我们正在与多家中国的领军器件制造商合作。



宋超
红与蓝微电子有限公司战略与规划副总裁

2023 年，随着氮化镓技术的进步和成本的下降，这种新型半导体材料逐渐成为消费电子产品的明星技术，特别是在充电领域，氮化镓充电器已经逐渐普及。同时，氮化镓功率器件的性能和应用范围也得到了进一步的提升。例如，Power Integrations 和 Transphorm 公司都发布了 900V 的氮化镓功率产品，以满足汽车、工业及家电类应用市场的需求。英诺赛科作为氮化镓产业的代表，也表示随着技术的成熟和成本的下降，氮化镓材料已成为消费电子充电器的“明星技术”。

此外，根据 Yole 的预测，到 2027 年，功率 GaN 器件市场规模有望达到 20 亿美元。这一趋势预示着氮化镓市场将持续增长，值得行业期待。特别是随着新能源汽车、数据中心等领域的快速发展，氮化镓功率器件的应用前景更加广阔。

在电动汽车领域中，SiC 器件的应用与发展也大放异彩。Wolfspeed 宣布其 SiC 器件将被整合到梅赛德斯 - 奔驰多款车型的下一代动力总成系统中。这标志着 SiC 在高端电动汽车市场的进一步渗透。其次，博世集团在中国的投资也

在增加，他们选择在苏州建设新的汽车 SiC 项目，投资金额高达 10 亿美元。这一行动反映了全球汽车零部件厂商对 SiC 市场的重视和期待。此外，芯聚能与广汽埃安、博世签署三方战略合作协议，启动在 SiC 电驱系统业务上的全面战略合作。这种深度合作将进一步推动 SiC 在电动汽车行业的应用和发展。

同时，德国大众与安森美签署了一项战略协议，安森美的 SiC 产品将用于大众下一代平台系列的车辆牵引逆变器解决方案。这一消息进一步证实了 SiC 在电动汽车行业的广泛应用前景。

总的来说，2023 年是碳化硅功率器件在电动汽车行业取得重大突破的一年。随着技术的不断进步和应用的进一步扩大，预计 SiC 在未来的电动汽车市场中将发挥更加重要的作用。

化合物半导体在高频通信领域的应用也得到了广泛关注，例如在 5G 和 6G 通信技术中，化合物半导体能够提供更高的频率和更快的传输速度。

这些事件对化合物半导体行业产生了深远的影响，推动了行业的发展和创新。例如，氮化镓功率器件在消费电子领域的应用，碳化硅在电动汽车和可再生能源领域的应用，化合物半导体在高频通信领域的应用等，都在推动相关功率器件的研发和生产的同时，也促进了相关产业链的发展。



叶国光
无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

应该是 ST Micro 与三安集成在重庆合资碳化硅工厂吧，这个新闻也许可以算是美国打压中国半导体产业的大环境里，西方的科技公司依然对中国半导体产业投资环境与市场的肯定，不会因为美国的胁迫而改变投资的一个比较好的消息吧，如果这个项目能够成功，后续国际上的化合物半导体巨头应该会继续加大对中国的投资，抢占中国巨大的市场，而国内的功率半导体厂家未来的竞争压力也将越来越大，在这样的压力下，我觉得未来中国将会有一到两家可以跟国际巨头竞争的功率半导体公司，五年后会揭晓，世界前五大碳化硅厂家应该有两家中国公司，至于那两家，我还是卖个关子吧！

碳化硅在电动汽车、光伏等领域的大规模应用势不可挡，国内碳化硅行业还有哪些亟待克服的难点？比如技术、产业链协同、市场、资本等方面。



李小天
深圳市纳设智能装备股份有限公司副总经理、首席营销官

随着近年来降碳减碳运动和可再生能源的兴起，碳化硅大规模应用势不可挡，如今

6 英寸商业化规模量产，8 英寸指日可待。作为新兴的半导体材料，国内碳化硅产业上有数个环节依然有亟待攻克的技术难题。

技术方面：在碳化硅长晶环节，碳化硅独特的物理化学性质导致其晶体生长，晶片加工都很困难。提高碳化硅

晶体生长技术，扩大尺寸，降低缺陷密度以及良率提升是一个漫长的过程。这些年市场出现许多新技术包括液相法，HTCVD 技术，激光切割技术等，但是工业化应用有一段长路要走；

在碳化硅外延环节，除了常规的检测手段以外，目前外延产品的真正的合格与否还需要送样下游流片，并且时常需要通过一些破坏性测试来检测其相关性能是否最终达标，产品的有效性可靠性检测在产业环节的把控至关重要，因此需要优化检测手段来提升对产品质量的把控。

在碳化硅器件制造环节，其工艺成熟度没有传统的硅器件高，需要针对碳化硅的性质和器件的设计要求，优化制造工艺流程，包括氧化、沉积、刻蚀、电极制备等环节。批量生产车规级的 MOSFET 器件的良率有待进一步提升。

产业链协同方面：碳化硅产业链涵盖衬底材料、外延生长，器件模组、应用等多个环节，可靠性提高和成本控制需要原材料供应商、设备厂商、芯片制造商、模块集成商等之间的紧密合作。国内产业链的完善和自主可控是个长期过程。

市场方面：碳化硅因为其优异的物理和电气性能获得市场的广泛认可，但是其推广需要更有竞争力的成本。性价比提升的同时开发更多应用场景，丰富碳化硅的产品和解决方案，与下游应用端深度结合，增加碳化硅器件的使用场景，提升碳化硅的市场接受度。

资本问题：半导体行业的发展离不开政策的推动和资本的扶持，碳化硅项目从研发到量产通常周期较长，有长期的验证流片工作需要落实，且碳化硅的原材料单价和研发生产设备单价成本高，这使得企业对资本的支持有很大依赖，需要持续的资金投入。

综上所述，国内碳化硅产业的发展还需要在技术研发创新、产业链构建联系、市场开拓、资本投入等方面进行综合性的突破和优化。随着全球节能减排大环境的推动，国内外市场对高效节能器件需求必将持续增加，碳化硅作为宽禁带半导体材料的代表之一，未来必将在新能源产业中占据重要地位。



刘泳洋

北京特思迪半导体设备有限公司创始人和 CEO

碳化硅本土厂商尺寸、良率相对落后，这导致了国内碳化硅功率半导体器件的价格较高，市场渗透率也较低，成为制约行业发展的关键因素。

根据 Yole 的数据，目前碳化硅产业以 6 英寸为主流，占据近 80% 市场份额，8 英寸则不到 1%。若达到成熟阶段，有望大幅降低碳化硅器件的成本，国内已有十余家企业将 8 英寸碳化硅晶圆量产提上日程，但大部分还处于样品或小规模量产的阶段。8 英寸碳化硅晶圆的制备过程相对复杂，技

术难度较大，并且设备投资和产能建设所需成本较高，同时国内碳化硅衬底的良品率相对海外企业仍有一大段差距。

2024 年，碳化硅行业整体市场预计将进入高度竞争阶段，不断提升研发能力、提高设备质量和稳定性、优化生产工艺和管理才能在市场竞争中取得优势。产业上下游共同研发新工艺、共享设备和技术资源，协同合作，才能快速推动碳化硅产业的发展和良品率的提高。



郑毅

应用材料公司 ICAPS 事业部高级总监

随着整个行业的飞速进步，国内外衬底供应链发展迅猛。中国碳化硅器件方兴未艾，虽在性能和可靠性上仍存在差距，但我们相信中国速度将会迅速缩小并弥补这方面的差距。此外，我们注意到业界对大规模量产（HVM）化合物半导体设备的需求显著增加，而且客户需要设备厂商在产能爬坡和产出时间方面的大力支持。应用材料公司的产品是业界最可靠的选择。我们专注支持客户实现新器件设计的量产、提升碳化硅 MOSFET 性能以及实现更高良率。



杨森

西安晟光硅研半导体科技有限公司总经理

SiC 产业的上游原始材料衬底生产，是该行业发展的关键环节，直接影响着 SiC 器件的最终成本。当前国内生产主要集中在 4 英寸到 6 英寸阶段，相较于 6 英寸，8 英寸 SiC 仍存在许多需要克服的工艺和成本上的难题。如何使其衬底成本进一步降低，这是目前国内碳化硅行业亟待克服的难点，也是国内 SiC 产业发展的必然趋势。通过发展长晶工艺助力衬底良率的提升，这也是源头解决企业发展乃至行业发展的重中之重，长晶良率不达标的话就根本不用往后道工序进行，所以长晶工艺是衬底企业的独门秘籍，同时也是影响后续外延生长及器件良率的头道关卡，同时优化切磨抛效率，减少因为多道工序诱发的潜在崩片风险，提高成片率是衬底企业的第二个目标；器件端企业优化结构设计，提升器件制造、封装工艺，尽快的拿到车规级验证进而上车应用，是器件企业当务之急；整个产业链也就是按照这个节奏在加速前进。

行业的应用需求迫切，反馈到上游材料供给不足，这个是必然现象。结合 2023 年全年中国衬底的供给量，与 2025 年预测的市场需求量差的还比较多，所以扩张扩产是企业建立市场供需壁垒的重要方式，量变同时也会催生质变；整个行业各个环节都有各自的挑战，如何将现有的技术优化，建立公司自己的护城河，如何解决工艺再进一步提升的难点，都是各个企业当下考虑的问题。我们觉得资本加持助力企业

快速发展是一方面，进一步重视研发、加大研发人员的人力物力投入也是核心举措，最后就是新技术的勇于尝试可能是固有思维破局的一个选择。中国现在技术是百花齐放的状态，各个环节都有专门的创新性技术公司愿意给产业链企业助力，能否拥抱创新永远是拉开企业行业身位的触点。



叶国光
无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

我觉得目前的碳化硅行业有点像 15 年前的 LED 行业，大而不强，但是因为有很大的终端市场的喂养与海内外技术人才的回

归参与，我还是比较乐观的，我觉得目前这个行业需要克服的难点有两个，一是国产碳化硅材料的质量，二是关键设备的国产化。我觉得碳化硅未来发展的轨迹会跟以前中国发展 LED 的轨迹很类似，但是时间会压缩的较短，我估计大约十年吧，你现在看到的国内 LED 产业在国际上的竞争力，十年后碳化硅也会复制，不论是规模还是技术实力，还有进入 IPO 资本市场的公司数目，都会很类似，但是我还是希望碳化硅未来的发展不要像 LED 一样这么内卷与产能过剩，这点还是需要中央政府与头部企业来控制的。

氮化镓微波射频的 5G 应用已成主流，未来在物联网、白色家电甚至消费电子领域是潜在的市场，我们应该做好哪些工作推动市场发展？



宋超
红与蓝微电子有限公司战略与规划副总裁

首先需要了解物联网、白色家电和消费电子领域对氮化镓功率器件的需求，包括性能、可靠性、效率和成本等方面的要求。通过与行业内的企业和研究机构合作，可以更深入地了解市场需求和趋势，为产品开发提供指导；其次就是要专注于提升氮化镓功率器件的技术水平，持续关注氮化镓功率器件的技术进展，了解最新的研究成果和专利技术，并在此基础上进行技术创新。同时，还需要与芯片设计、制造工艺和封装测试等环节的工程师密切合作，共同提升氮化镓功率器件的技术水平。针对不同的应用场景，需要设计不同的氮化镓功率器件型号和规格，并与其他元器件进行优化组合，实现系统的高效、可靠运行。同时，还需要关注系统的可维护性、可扩展性和安全性等方面的问题。同时也需要积极与产业内的企业和研究机构合作，共同推动氮化镓功率器件产业的发展。通过合作，可以共享资源、降低成本、加快技术研发和市场推广的进程。

氮化镓功率器件领域需要具备丰富经验和专业技能的人才，关注人才培养和人才引进工作将成为夯实实力的重点工作，通过与高校和研究机构合作，培养更多的专业人才，进而提升整个产业的竞争力。

总之，市场需求、技术进展、技术水平的提升和创新，系统设计的优化、产业合作和人才培养，都是推动氮化镓功率器件在物联网、白色家电和消费电子领域的应用和发展不可或缺的部分。



叶国光
无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

氮化镓射频器件在国内我不是很看好，因为市场不是很大，而且已经饱和，国内做氮化镓射频器件的公司相对较少，目前这些公司大部分都使用进口设备，也许未来如何让这些公司能够将产线设备国产化，进行进口替代，除了可以降低他们使用设备被制裁的风险，还可以增加射频器件的国产芯片竞争力，我想这应该是我们公司跟这些客户合作的重点。

氮化镓电力电子的消费电子应用日渐普及，未来在数据中心、工业甚至汽车应用领域是潜在的市场，我们应该做好哪些工作推动市场发展？



郝茂盛
上海芯元基半导体科技有限公司董事长

氮化镓电力电子功率器件当前以基于 Si 基衬底的氮化镓横向水平结构的设计器件为主，由于耐压比较低，同时功率密度也比较低，多数应用于类似手机快充等消费电子领域，无法应用于高端大功率的应用场景，比如未来的数据中心和汽车等领

域。究其原因主要是基于 Si 基衬底的氮化镓外延材料缺陷密度高和器件横向水平设计功率受限所导致，因此要推动氮化镓电力电子在高端大功率应用领域的市场发展，首要解决氮化镓缺陷密度高和采用垂直结构的器件设计，低缺陷密度的氮化镓外延材料需要基于非硅基的衬底和更先进的外延技术，而垂直结构的器件设计需要无损的氮化镓外延材料和衬底的分离技术。

针对以上两个问题，国内仅有我们上海芯元基半导体通过首创 DPSS 衬底和更先进的外延技术实现了低缺陷密度的氮化镓外延材料，同时基于我们的 DPSS 衬底完成了全球独创的无损化学剥离技术，可以实现氮化镓材料和衬底的无损剥离。

国际上我们看到日本的冲电气和信越化学合作，冲电气利用其 CFB（晶体薄膜键合）技术，可从信越化学的 QST（Qromis Substrate Technology, Qromis 衬底技术）衬底上仅剥离氮化镓（GaN）功能层，同时其 QST 衬底对降低氮化镓缺陷也有帮助，但据报道此技术 2024 年才能推向市场。

当前我们芯元基在氮化镓电力电子方向上也在积极推进，一方面积极进行专利布局及前期技术准备，另一方面已经和国内知名的电子功率器件团队建立合作关系，在合适的时间启动项目。



黎子兰
广东致能科技有限公司 CEO

据我们了解到，基本上 95% 以上的服务器、工业电源、通讯电源的客户都已经立项导入氮化镓项目，以提升效率并降低成本。尤其随着 AI、云算力需求的提升，基于氮化镓的新的数据中心系统架构已经陆续显现出来。双碳背景下降本增效的要求日益增加。举例来说，如果全球数据中心采用氮化镓技术，那么每年可以节省超过 15TWh。

汽车行业里，目前国内主流的车厂以及 Tier1 已经有大量的厂商在预研下一代系统平台，提升效率，降低成本，这部分需求主要体现在 900V/1200V 以上的需求。国外已有车厂导入氮化镓器件，我们预计国内厂商很快会跟进。

针对上述市场，致能在多个方向努力提升以满足客户需求：1、器件、应用端可靠性，致能在常规的器件可靠性评估以外，特别地开发了系统级的老化设备，同时自主开发了 DHTOL 等系统级可靠性评估平台。这些评估手段，大幅地提升了器件与应用的可可靠性，为氮化镓走向更主流的应用扫清了障碍；2 持续降低成本，随着我们产品的面积效率改善、规模与良率的提升，氮化镓器件已经与传统的硅功率器件成本持平甚至更低；3 拓展更宽的电压范围，更低的 Rdson，以适应更多的应用场景。目前，氮化镓器件的电压还基本局限于 650V。致能国内首家推出 1200V 器件，同时提供 35 毫欧等大功率产品，可以更好的满足工业和汽车的需求。



郑毅
应用材料公司 ICAPS 事业部高级总监

氮化镓（GaN）功率器件现在已经达到突破消费电子“天花板”，进入工业和汽车领域的阶段了。许多公司正在把氮化

镓器件导入创新的电路设计，以取得更高的功率和更优化的效率。在功率和可靠性方面，氮化镓技术略逊于碳化硅（SiC）技术，但正在迎头追赶，并已开始送样 1200V 的器件。我们认为，氮化镓技术与硅和碳化硅竞争的关键是高质量的制程设备，应用材料公司的产品以世界领先的高质量大规模量产的制程设备将支持客户实现精密可靠的器件设计（如：解决电流崩溃问题，提高器件的可靠性，实现 GaN 基集成电路）。



朱廷刚
江苏能华微电子科技发展有限公司总经理

氮化镓作为第三代半导体宽禁带材料的代表，凭借其独特的开关性能，在电力电子领域展现出巨大的应用潜力：更节能、更小体积，能够助力实现更绿色的电能转换系统。氮化镓材料的下游应用包括消费电子的快充、电源适配器，通信领域的射频前端功率放大、工业领域的数据中心电源、储能、光伏逆变、充电桩和新能源车上的充电和功率系统。目前，虽然氮化镓的技术优势已经得到了整个行业的认可，并且氮化镓器件已经被广泛应用，但是市场向上发展的空间依然十分巨大。由于氮化镓器件在上述消费电子、工业领域和汽车领域面对的客户、目前所处的技术阶段都有所不同，所以我们需要不同的推广策略。

在氮化镓快充领域，我们面对的最终客户是购买消费电子终端的个体消费者。为了提高这些个体消费者对于氮化镓快充的认知度，生产销售氮化镓快充的厂家需要在不同的媒体上面做更多的市场推广。同时，我们能华作为氮化镓器件的制造商，正在利用自身对于器件性能的把控和对于系统的深刻理解，协助生产销售氮化镓快充器的厂家推出不同形式不同功率的多样化的产品来吸引个体消费者。

在同样属于消费电子的电源适配器细分领域，氮化镓功率器件也大有可为。电源适配器是专门用来给电子设备供电的电源，应用领域非常广泛，比如：各种家用电器，办公设备等，这些设备都需要电源适配器来转换电源来给它们供电，我们面对的客户是电源适配器供应商。这些客户使用氮化镓功率器件的驱动力就是产品升级。能华正在利用公司的 D mode 器件，TO 封装的产品优势（更大的功率，更高的可靠性）帮助这些客户把适配器体积变小，提升效率，同时还可以降低系统成本。在这一细分领域做推广，同时需要公司的技术团队对各个适配器系统的应用有深刻的了解，这样才能给客户推荐合适的产品规格和整体方案。

在通信、工业和汽车领域推广氮化镓的应用，需要我们加倍付出努力。在通信领域和工业领域，氮化镓器件同样可以给客户带来更高效节能体积更小的电源系统，但是客户需要模块

化的设计，更长的可靠性验证周期，这样氮化镓器件供应商就需要和一家或者几家大的客户做深度的战略合作，一起开发一起验证，由一家标杆客户来带动其他客户做市场推广。

此外，我们还需要加强与产业链上下游的合作，比如和封装测试等企业建立紧密的合作关系，共同推动氮化镓技术的产业化进程。这也是目前能华正在做的工作。

最后，我想说的是人才总是最重要的因素，我们公司非常重视持续的人才培养。这个对于推动氮化镓的应用和创新非常重要。



宋超

红与蓝微电子有限公司战略与规划副总裁

首先，为提高氮化镓功率器件的性能、可靠性和寿命，我们将不断优化设计，关注能效、热设计、可靠性和安全性等方面，以满足不同应用场景的需求。同时，我们致力于将氮化镓功率器件的应用领域扩展到更多市场，如数据中心、工业和汽车等。

为确保公司的产品和技术符合相关标准和认证要求，我们将更加关注行业标准和认证的进展，并积极参与行业

标准和认证的制定过程，推动氮化镓电力电子行业的健康发展。

此外，我们还将密切关注市场趋势和技术发展动态，预测未来的市场变化和竞争格局。根据市场变化及时调整产品策略、市场策略和研发方向，保持公司的竞争优势。



叶国光

无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

氮化镓电力电子突破的关键在技术，尤其是新领域的应用渗透，目前手机快充市场接近饱和，其它更高端的市场亟待打开，尤其是数据中心与工业领域；汽车市场还需要时间，因为目前的氮化镓器件结构要进入这个市场难度极大。电力电子的氮化镓 HEMT 产线，对国产化设备接受度较高，我们对这块市场的策略是，将关键设备打入国内的头部企业，再扶持国内有发展潜力的公司做强做大，目前氮化镓客户我们重点推广 ALD 薄膜设备与 ICP-RIE 刻蚀设备，也不排除开发 ALE 原子层刻蚀新工艺设备来帮助国内氮化镓厂家进行产品升级，加快我们客户产品往高端市场的渗透率。

砷化镓 / 磷化铟一直是光电通信领域应用的主要半导体材料，接近传感、3D 传感等消费类电子市场及 6G 新兴市场或许是磷化铟的延伸应用场景，我们如何拓展这一新兴应用的技术优势？



叶国光

无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

砷化镓与磷化铟有机会增长是因为数据中心，我觉得消费性电子市场增长有限，不过整体上还是增长的，但是市场体量小，对

我们这些设备公司而言，这块市场挑战度大，但是回报不大，薄膜与刻蚀的砷化镓工艺设备相对成熟，磷化铟我们还在论证这块市场，尤其是刻蚀工艺设备的开发。

氮化镓衬底的制造一直是本行业发展的瓶颈，国内企业在氮化镓衬底、垂直结构器件方面取得了哪些长足的进步？还有哪些有待攻克的技术难题？



杨森

西安晟光硅研半导体科技有限公司总经理

随着碳化硅材料的发展趋势来看，同为三代半导体的另一种优秀材料氮化镓也逐步崭露头角。同比碳化硅材料发展周期及爆发拐点，氮化镓材料像极了 5 年前的碳化硅发展状态。在业内广泛探究氮化镓应用关键点和需求点的同时，整个材料端也在迅速地进行技术迭代和良率的提升，从早期的异质衬底材料外延氮化镓，逐步发展同质氮化镓单晶，以达到更高良率的器件需求。自 2022 年 6 月份开始，晟光硅研就已经与国内头部氮化镓单晶材料厂进行材料端的切片技术的联合开发，

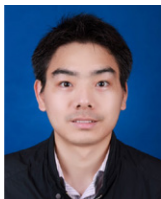
较比于碳化硅材料发展速度，氮化镓单晶材料目前还主要集中在 2 寸为主，4 寸研发优化阶段，材料质量与扩径同步进行的状态，且材料厚度不高，外径端缺陷较大。那么如何将有限厚度的材料提升出片率、以及将缺陷部分定向去除是微射流激光一直研究的方向；再加上本身氮化镓材料元素特性，除了材料本身硬脆属性之外，微射流激光技术能够很好的进行温度控制，避免镓离子因高温液化附着材料难以去除的常规加工弊端，特定加工工艺的定型，我们也顺势在 2023 年完成典型氮化镓客户的设备交付，算是为氮化镓行业成片其中一环尽了一点绵薄之力，作为产业链降本提效的一个环节，助力氮化镓产业加速发展。



叶国光
无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理
不看好氮化镓衬底 2024 年有机会突破，目前这个技术还是掌握在日本手上，国内有点的突破，但是成本依旧是硬伤，这样的成

本，应用产品有限，除了蓝色激光器，我看不到还会有什么新的应用，除非氮化镓衬底的价格可以接近碳化硅，否则很难有什么大增长与大突破。

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



周圣军 教授
武汉大学教授、博士生导师
紫外光根据波长可分为三个波段：长波紫外光（400 nm-320 nm, UVA），中波紫外光（320 nm-280 nm, UVB）和短波深紫外光（280 nm-100 nm, UVC）。UV-LED 是一种能将电能直接装换为紫外光能的光电器件，具有节能、环保、体积小、寿命长等优点。UV-LED 根据发光波长的不同会有不同的用途，UVA 和 UVB 波段被广泛应用于紫外光刻、生物医疗、植物照明、3D 打印等领域，UVC 波段则被广泛应用于表面杀菌消毒、水净化、空气净化、非视距通信、气体传感等领域。目前，UV-LED 的发展仍然受限于光电转化效率低、稳定性差、寿命短等问题，此外，制造成本高也限制了 UV-LED 的大规模应用。解决这些技术挑战需要全产业链、科研院所和企业的深度合作，相信随着技术的不断进步和成本的降低，UV-LED 技术将逐渐走向成熟并得到更广泛的应用。

如 8 英寸、12 英寸片；设备厂商正在推出可对 Micro-LED 进行更大批量生产和检测的设备。中游方面，多家芯片厂商发布了小尺寸、高分辨率、高亮度的单色或全彩的微显示器和显示模组，以满足 XR 等穿戴设备的应用需求。下游与终端方面，以 AR 眼镜为代表的智能眼镜产品不断涌现。

Micro-LED 微显示屏如何实现单片全彩化是当下的热门话题之一。由于外延生长的限制，高效的单层氮化镓外延只能发出某一波长的单色光，因此过去 Micro-LED 微显示芯片也多为单色显示。2023 年，斩获诺贝尔奖的量子点把 LED 显示推上了热搜。量子点可为显示产品实现精准的色彩和更完美的色域。在 Micro LED 应用中，通过 QD 色转换能有效减少制程复杂度，推动技术的发展。

Micro-LED 显示技术是将 LED 的尺寸微缩（芯片尺寸 <math><50 \mu\text{m}</math>），每一个 LED 都可作为发光像素，可定向寻址、单独驱动且像素间距为微米级。与 LCD 和 OLED 技术相比，Micro-LED 显示技术具有高对比度、高分辨率、高可靠性和寿命长等优点。目前 Micro-LED 在技术领域仍然面临着多方面的挑战。首先，巨量转移是 Micro-LED 商业化应用的主要技术瓶颈。其次，Micro-LED 大规模制造过程中需要解决检测与修复等技术问题。此外，Micro-LED 显示屏需要确保芯片之间的亮度和色彩的一致性，以实现良好的图像质量。随着关键技术瓶颈不断突破、制造工艺的改进以及生产成本逐渐下降，Micro-LED 的商业应用将逐渐实现，并在未来的显示领域如 AR、VR、车载显示等显示领域发挥重要作用。

UV LED（紫外 LED）或蓝光 LED+ 量子点的方法可以在单个显示屏上实现彩色化。其中若使用 UV Micro-LED，则需激发红绿蓝三色量子点以实现 RGB 三色配比，但 UV LED 和蓝色量子点的光效较低，导致此方案整体较为低效。如使用蓝光 Micro-LED，则需要搭配红色和绿色量子点即可，由此结合了高光效的蓝光 Micro-LED 和红绿量子点，从而实现高光效的全彩显示。

使用量子点实现全彩化的途径主要有量子点喷墨打印及量子点光刻技术。

量子点喷墨打印是利用喷头和气流喷出溶于有机溶剂的量子点材料于 UV 或者蓝光 Micro-LED 之上，通过控制量子点材料的剂量和液滴大小等参数来决定打印的线宽。在大尺寸器件上是可能量产的技术，但是不适用于小尺寸，量子点打印严重依赖于打印设备，对于量产性和良率都会有很大的挑战；当芯片的分辨率提高的时候，喷涂效率会进一步的降低；当像素的尺寸逐渐减小后，会小于喷头的物理极限，导致喷涂的对准难度增高，喷涂的线宽线距极难控制；另外，有机溶剂的扩散导致量子点材料的打印图形精度低，串扰严重，影响显示效果。



庄永漳
镭昱光电科技（苏州）有限公司 CEO
近年 Micro-LED 微显示产业在技术研发、产品推出、投资融资等方面均有源源不断的好消息传来，Micro-LED 商业化发展再一次加速。

另一种途径为量子点光刻技术，以镭昱为代表，其开发出的量子点光刻胶方案可以将标准的量子点材料和标准的光刻胶材料通过创新性的技术整合到一起，在保证高转换光效的同时，保留了高分辨率的光刻胶特性，实现了厚度在 2 微

上游方面，晶圆厂商正在研发更大尺寸 Micro-LED 晶圆，

米以下的量子点光刻胶。该方案既能匹配 Micro-LED 对超小像素尺寸的要求，又能保证高吸收效率，可以把蓝光充分转化成绿光和红光，从而实现芯片全彩化。通过量子点色转换的方案可以避免原生红光的光效问题。此外，光刻是标准的半导体制程，精度更高，效率更高，具备极高量产可行性。镭昱目前已经基于 8 英寸半导体工艺开发出多款全彩微显示产品，包括于 2023 年美国 SID 显示周上发布的像素密度高达 7200ppi 的 0.11 英寸和 0.22 英寸全彩微显示屏，实现了超过 10 万尼特的亮度和 98% 的 DCI-P3 色域覆盖率，得到了业界高度认可和广泛关注。

虽然研发 Micro-LED 的厂商不在少数，也有部分公司已实现全彩 Micro-LED 微显示器的样机展示，但现阶段尚无能真正实现全彩 Micro-LED 芯片量产的企业。Micro-LED 全彩化的多种技术路径正在接受业界和市场的验证，每项技术路线面临的难点及挑战虽各有不同，但在各个环节所面临的技术瓶颈是共性的，归结起来就是：精度、良率、效率、成本的问题。这几个问题是逐层递进，且具有因果关系。Micro-LED 显示技术成立的前提就是精度，如果精度低，就难以实现高性能的 Micro-LED 显示；在保证精度的前提下，良率和效率是降低成本的最重要因素，也是 Micro-LED 技术大规模产业化的前提。目前 Micro-LED 全彩化的各环节基本处于提升精度的阶段，距离良率和效率提升阶段仍有一段距离。

可以预见，Micro-LED 在 AR 显示领域的应用前景是美好的，但立足当下，Micro-LED 在达到 AR 追求的理想效果之前，还需要跨越许多技术障碍。随着镭昱等国产 Micro-LED 微显示芯片玩家在市场上初露头角，这个市场将进入下一个成长阶段。



郝茂盛
上海芯元基半导体科技有限公司董事长

MicroLED 作为下一代显示技术，相比当前的主流显示技术具备很多的优点，我们知道 MicroLED 作为显示技术主要有两个方面的应用，第一个是玻璃基 TFT 驱动的商业显示，包括电视，手机，手表和各种车载显示等，此类应用需要巨量转移技术对 microled 芯片重排至 TFT 驱动板上；第二个是 Si 基 CMOS 驱动的微显示，包括 AR/VR，HUD 和像素车灯等，此类应用采用晶圆级或 Die 键合至 CMOS 驱动电路上。

由于备受产业和资本的关注，加上众多初创公司和新技术的出现，Microled 经过多年的发展，技术和应用也逐渐成熟，Microled 电视和采用 Microled 微显示的 AR 眼镜已经出现在市场，随着行业的进一步发展成本居高不下是当前行业急需解决的问题，针对成本的解决我们认为是下一阶段 Microled 发展的重要方向。

结合 Microled 降低成本的发展方向谈谈我们芯元基技术布局，在玻璃基 TFT 驱动的商业应用方面，巨量转移不够成熟是影响成本的重要因素，我们芯元基基于自己独有的化学剥离技术完成了晶圆级印章巨量转移的技术验证，实现了印章巨量转移位置 0 偏差，同时成本非常低，无需专用的巨量转移设备，此技术当前还在不断完善中，待完全成熟后对巨量转移的成本会带来巨大的下降；在 Si 基 CMOS 驱动的微显示方面，良率低是影响成本最重要的因素，通过对业界主流技术路线的分析，我们发现键合工艺和 CMOS 的利用率是影响其良率和成本的关键因素，因此基于我们芯元基的大面积 GaN 外延层化学剥离技术提出了 Die to wafer 重构的键合方式，通过更优化的键合工艺和 CMOS 100% 的利用率可以大大提升 Microled 微显示的良率。

新技术的出现，通过不断的发展降低成本是技术能持续扩大应用市场的不二原则，当然 Microled 技术也不例外，下一阶段 Microled 已经来到了降低成本的路口，具有更先进技术，成本更低和能持续创新的公司在下一个阶段会脱颖而出，而我们芯元基已经进行了提前布局。



裴小明
深圳市思坦科技有限公司副总经理兼首席科学家
Micro-LED 之新年展望

市场应用方面：硅基 CMOS+Micro-LED 的微显示模组在 AR 眼镜的应用开始上量（以单色信息显示功能化应用为主），国内企业开始在微投影、3D 打印和车载像素化车灯等应用需求上做产品研发投入；以 TFT+ Micro-LED 为显示单元的智能手表商业化样品推出；Micro-LED 大尺寸电视方面，国内主要是基于 MIP 和 COB 技术的量产，基于 TFT 技术的方案将继续完善，主打 To B 和市场高端私人定制，成本价格进一步下降。

产业链方面：大尺寸应用的上下游战略协同基本定局，中小尺寸应用的上下游战略协同将持续组队，硅基 CMOS 的设计能力和流片资源将成为微显示板块的核心竞争力之一；随着主技术路线和工艺方案、检测方案的逐步确认，原材料、生产设备和检测设备供应商的配合力度将进一步加大；微显示应用将分别有三到五家企业领头量产，产品良率是最大的挑战；2024 年是产品应用之市场验证的关键年，也将是投融资的小年。

研发方面：不同技术路线会在一段时间里并行，但主技术路线将在 2024 年得到进一步的确认（包括但不限于：巨量转移、键合、全彩化）；外延片的性能一致性、缺陷率和 Particle 管控水平基本能满足量产应用要求；影响 Micro-LED 芯片效率的尺寸效应、侧壁缺陷等问题将在设计和制备工艺、材料等方面找到有效的解决方案；关键物料（如 QD、焊料）

和关键设备（如键合机、巨量转移等）将出现适用量产的解决方案；微显示方面，分辨率 > 10000PPI 的产品将正式面世，单色亮度将达到 5KKnits，全彩亮度有望达到 1KKnits；行业的产品技术标准和产品可靠性开始得到关注。



叶国光
无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

UV LED 在新冠疫情期间火了一把，后来就趋于沉静，主要原因是光电效率与价格还无法达到消毒杀菌领域大批量应用的临界点，我认为 UV LED 大批量用在消杀市场可能需要再等等，

应该还要三年吧。

Mini LED 我比较看好直显大屏与中大尺寸背光，中小尺寸背光受到 OLED 面板与折叠手机冲击太大，对 mini LED 背光造成不小的伤害，2024 年我看好直接显示大屏，尤其是裸眼 3D 大屏会开始在影院与演唱会场景出现。

Micro LED 在 2024 年会有好消息，也会有坏消息，好消息可能是苹果或三星与华为有可能会出一款 Micro LED 手表，可能可以缓解 Micro LED 不出产品的尴尬局面，但是价格可能会巨贵，坏消息可能是 Micro LED 在 AR 全彩眼镜的技术还是要再等等，单色也许可能趋于成熟，但是全彩的产品还需要时间来酝酿。

近年来氧化镓、氮化铝、金刚石作为超宽禁带材料，备受学界关注，并在中国、日本产业界也得到极大的青睐，请问如何看待超宽禁带材料相关技术和未来产业化发展？

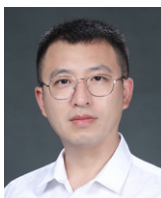


徐现刚
山东大学晶体材料国家重点实验室主任、
新一代半导体材料研究院主任

超宽禁带相关技术是现阶段研究的热点，国内的整体研发水平和国际持平。超宽禁带材料相关技术仍面临诸多的技术问题，包括高质量大尺寸材料制备、可控 n/p 掺杂以及稳定可靠的器件工艺这几大技术仍在研发中。这几个技术问题研发进度与其未来产业化进程密切相关。

借鉴较为成熟的第三代半导体材料研发和产业历程看，英寸级别材料制备技术的突破是应用和产业的开端。2022 年日本研究团队报道的 2 寸蓝宝石异质外延金刚石单晶，2023 年美国培育钻石生产企业 Diamond Foundry 展示其 4 英寸单晶金刚石晶圆，标志着金刚石制备技术取得突破性进展。

在日、美、欧等国家纷纷投入巨资成立相关产学研机构推进金刚石材料及其电子器件的研发与应用的大背景下，我国应该积极布局研发工作和推进产业发展，进一步加速我国在超宽禁带半导体行业领先地位。



袁冶
松山湖材料实验室副研究员

随着近年来材料制备技术的不断发展与优化，高质量的新型超宽禁带半导体材料例如氮化硼、氮化铝、金刚石等逐渐进入人们视线。其所具备的优异材料性质一方面能够促使某些现有成熟应用的技术升级，从而实现更高的器件性能，诸如金刚石具有的高热导率使其成为了高功率器件最理想的衬底材料，能够大幅提高现有功率器件的性能与可靠性；另一方面上述超宽禁带半导体材料所具备的新物理性质更为诸多原创新技术的出

现奠定了理论基础，例如瑞士 Qzabre 公司、国仪量子等高科技企业通过在金刚石中精准调控点缺陷，已经成功实现基于金刚石 N-V 色心的超分辨量子磁学显微镜并实现商业化。

对于新型超宽禁带半导体的产业化，从上游优异性能至下游应用的推进固然重要，也会产生巨额的回报，但真正的规模产业化仍需要下游应用端的有效反馈与不断拉动，就像智能手机的不断更新向射频通讯器件提出了反馈和更高的需求，才使得一系列上游技术具有正确的方向并得以发展；正是新能源汽车的普及使得半导体功率器件找到正确的优化方向；因此优先发展新型超宽禁带半导体在 to C 端的应用，对其寻找到最佳的发展方向将起到至关重要的作用。



沙伟中
苏州艾斯达克智能科技有限公司董事长

超宽禁带半导体以其恰好弥补硅 / 宽禁带半导体的不足而逐步受到半导体行业青睐，成为继硅 / 宽禁带半导体之后极具前景的半导体材料。随着 5G、汽车等新市场出现，超宽禁带半导体不可替代的优势使得相关产品的研发与应用加速；随着制备技术的进步，超宽禁带半导体器件与模块在成本上已经可以纳入备选方案内，需求拉动叠加成本降低，超宽禁带半导体的时代即将迎来。



刘泳洋
北京特思迪半导体设备有限公司创始人和 CEO

氧化镓、氮化铝、金刚石作为超宽禁带的新兴材料，应用前景和市场潜力是毋庸置疑的，虽然目前仍处于不断发展和完善的阶段，但未来将有更多的技术创新和突破，随着技术的进步和

产业化的推进，终端市场对超宽禁带材料的需求有望增加，相关产业也将迎来发展机遇。氧化镓、氮化铝和金刚石作为超宽禁带材料具有与碳化硅类似的特性和潜力，未来的研究和应用可以借鉴碳化硅在材料制备和工艺控制方面的经验，特思迪围绕化合物半导体，在设备研发和工艺研究上也在同步布局，与超宽禁带材料企业深度合作，以设备导入为该领域材料进行产业化，形成强链补链作用，满足国内更多的重点应用领域突破和发展。



叶国光

无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

我只能说，这一块领域，研发有机会，量产还需要等待，氧化镓产业化时间可能会快一点，氮化铝与金刚石目前可能还是在发表论文与研发新材料阶段。

无损高效的加工，是提升产量的关键。微射流激光设备由于其独特的加工方式，能够有效避免传统干激光行业加工带来的锥度和热损伤，这就给后续锥面平磨减少了大量的作业时间及材料的无端浪费，2023年我们已经完成三家金刚石客户设备的交付，除了解决小尺寸金刚石加工效率问题之外，也为企业能够进行大尺寸金刚石生长带来了加工转化信心。2024年我们也计划推出特定功率的金刚石加工专用设备，控制设备售价的同时，能够为更多的金刚石客户带来客观的降本增效体验，这也是我司明年重点的行业应用客户之一；氧化镓材料的加工也得益于微射流激光技术的非接触式特点，在通过特定水压作为激光传输介质，减少材料受压范围，能够几乎无损的完成氧化镓材料的滚圆、切片、器件切片应用，目前也一直在和两个研究院所及两所高校进行项目合作，希望明年可以带着这一成果技术，推进氧化镓产业公司，进行技术赋能。



杨森

西安晟光硅研半导体科技有限公司总经理

近年来随着后摩尔时代的到来，大家在新材料领域的研发投入不断增长，也加快了金刚石、氧化镓等超宽禁带半导体材料的开发。以氧化镓、氮化铝、金刚石为代表的新兴超宽禁带半导体材料，具有禁带宽度大、耐击穿、载流子迁移率高、热导率极高、抗辐照等优点。在热沉、大功率、高频器件、光学窗口、量子信息等领域具有极大应用潜力。但目前金刚石仍处于基础研究尚待突破阶段，在材料、器件等方面都有大量科学问题尚需攻克，金刚石材料的高成本和小尺寸是制约金刚石功率电子学发展的主要障碍，距离实现商业应用尚有较大距离。氧化镓由于其材料脆属性明显，极易在接触式加工状态下发生解离，所以除材料长晶工艺难点待突破之外，如何加工也一直是行业难题。

其实这三种材料我们微射流激光技术都有尝试，并且取得了相当不错的加工效果，金刚石材料长得慢、尺寸小、厚度薄是目前的行业发展瓶颈，那么如何在有限材料尺寸下



沈健威

东莞市晟鼎精密仪器有限公司副总经理、技术总监

超宽禁带材料如碳化硅、氮化镓、氧化锌、金刚石等，在高温、高频、抗辐射及大功率器件等领域具有广泛的应用前景和产业化发展潜力。此外，新能源等领域的发展也将为超宽禁带半导体提供更多的应用机会，超宽禁带半导体的高温、高功率特性有望提高电池的效率 and 寿命。

首先，超宽禁带半导体的研究仍需解决许多技术难题，如晶体生长、掺杂、表面处理等，晟鼎精密围绕化合物半导体，在设备方面不断深入研发，如 RTP 快速退火炉应用于氧化物、氮化物生长、晶圆退火，微波等离子去胶机应用于晶圆光刻胶去除，微波等离子清洗机应用于晶圆封测段等，同时与超宽禁带材料企业深度合作，以半导体行业为核心进行产业布局，持续进行技术改造和升级，满足市场需求抓住政策机遇，以关键设备为切入点满足化合物半导体应用领域的突破和发展。

化合物半导体国产设备一直在迭代追赶中，对比国际竞品产品或技术我们还有哪些提升空间？

(可以就某一类型设备具体陈述)



周利民 博士

迈锐斯自动化(深圳)有限公司总经理 / MRSI Systems (Mycronic 集团) 战略营销高级总监

化合物半导体国产设备在前后道几乎所有工序的设备均有国内公司在开发，一些设备也在不断迭代，与行业领先设备的差距在缩小。以化合物

半导体芯片封装设备为例，设备的技术水平与行业国际先进水平差距在迅速缩小，已经占据了绝大多数的中低端市场份额，但是国产芯片封装设备在行业中领先还有很长的路要走。国产化化合物半导体芯片封装设备与国际竞品相比的提升空间主要有三个方面：

第一，是在自主创新性方面：国产芯片封装设备还处于

对标国际行业领先设备，抄袭和仿制是目前快速发展的主要手段。做为国际领先化合物半导体封装设备供应商，国内抄袭我们和侵犯我们知识产权的企业就有不少。国内企业在自主研发、技术积累和人才培养的投入相对较少，这些芯片封装设备公司在发展初期发展速度还是挺快的，但是发展到一定阶段，企业和产品会出现难以逾越的瓶颈。而且企业还有知识产权方面的巨大风险。如果需要提升就必须加大自主创新的研发和人才投入，摒弃发展初期抄袭跟随的老路。创新是产品领先和企业长期健康发展的唯一途径。

第二，是在可靠性和稳定性方面：国产设备采用低成本和低价格策略来抢占市场份额，这对中低端芯片封装市场是具有一定吸引力。但是这种模式会降低芯片封装设备的可靠性和稳定性。市场普遍的反映是国产芯片封装设备在长时间运行后，可能会出现一些性能衰减的问题。这主要是由于设备中使用的材料、工艺和设计等方面存在一些不足。在高端芯片封装设备方面国际竞品依然具有绝对领先的市场占有率，主要是因为这些竞品具有更高的可靠性和更广泛的应用验证。我个人认为价廉物美是一个伪命题。要提升产品的可靠性和稳定性，必须要在提升芯片封装设备的基础材料、基础工艺、和设计等各方面进行不断的提升和验证，这方面的投入很大，提升空间也很大。靠低价策略是有可能改善设备性能和可靠性。

第三，是设备进入国际市场方面：目前我国产的芯片封装设备在国内中低端市场占据了较大的份额，但是出口比例非常少。这有多方面的原因，设备的性能、质量、可靠性和稳定性肯定是主要的原因，此外设备出口需要有国际贸易和国际技术服务的人才，国内的芯片封装设备企业在这些方面还比较弱，甚至是零。国产芯片封装设备想在国际舞台与国际竞品同台竞争，需要提升自身产品的性能，包括产品可靠性和稳定性，同时在国际人才培养等方面也都有很大的提升空间。

总而言之，化合物半导体国产设备的进步很快，但可提升的空间也很大。



李小天

深圳市纳设智能装备股份有限公司副总经理、首席营销官

中国在化合物半导体国产设备方面的迭代升级是一个全方位的过程，涉及技术创新、产业链协同、品质控制等多个层面。

纳设智能主营碳化硅外延设备，就外延设备而言，根据InSemi的碳化硅设备市场报告，国内碳化硅外延市场仅国产设备市场存量已超370台，对比碳化硅全产业链所需设备的国产替代现状，碳化硅外延设备的国产化率“遥遥领先”。

在碳化硅外延设备方面，纳设智能持续围绕提升工艺指标、降低耗材成本、降低维护频次方面进行迭代优化，在23年推出更大尺寸的具备更多创新技术的外延设备，兼容6&8英寸的外延生长，具备独特的气路设计与反应室结构，更好地提高均匀性，降低缺陷与耗材成本。

作为设备厂商，我们觉得产业需要加强对国产设备关键零部件的自主研发设计能力，减少对进口零部件的依赖，提高技术独立性和设备的可持续发展能力；再者，稳定性和重复性是确保设备可靠的关键因素，国产设备需要从机械结构设计、传感精度、控制算法等多方面着手，围绕设备的整机性能不断的优化迭代，确保设备稳定可靠；最后，国产设备厂商还需进一步优化技术支持和售后服务体系，快速有效响应客户需求，提升客户满意度。



杨森

西安晟光硅研半导体科技有限公司总经理

应用落地是最终评价一个产业的结果标准，碳化硅器件上车、替换到光伏领域应用是终极目标，只有终端客户用得上、用得起、用得好，才是整个产业链的成功。公司一直秉承的就是跟环节客户降本增效，衬底价格降下来了、良率上来了、供货充足了，外延厂家乃至器件厂家能够低成本的做出终端器件，这样会加速应用端的快速验证，同时能够将问题迅速的回馈给上游，各环节厂家再根据用户反馈整改优化，才能形成最迅捷的论证闭环。所以公司的技术一直致力于衬底环节乃至器件环节的高效率、低损伤、节约成本，加速产业闭环验证周期；在化合物半导体的衬底加工领域，晟光硅研全球首创提出了用微射流激光技术解决化合物半导体的加工难题，以全新的方案为化合物半导体加工行业带来技术变革，摒弃了金刚砂轮、金刚线等传统机械加工导致的效率低、损耗大、良品率差等缺陷，微射流激光技术以更高的加工效率、更低的材料损耗及更优的加工精度备受产业和市场的认可。相较于国内及国际上传统的化合物半导体切割设备，微射流激光设备开辟了一条全新的技术路径，用来解决传统半导体切割设备的痛点问题，并得到了碳化硅、氮化镓等领域头部客户的高度认可。未来，我们也将进一步加大研发的人力物力投入，不断优化工艺参数，使得微射流激光技术延伸至高精尖领域难点攻克。



沙伟中

苏州艾斯达克智能科技有限公司董事长

以半导体晶圆仓储为例，存储芯片的制造过程中，晶圆的存放方法至关重要，能直接影响到晶圆的质量和产能。正确的晶圆存

放方法可以保证晶圆的完整性和稳定性，从而确保芯片的质量和性能。目前，国内对于晶圆的存储基本上是以晶圆盒为载体来运输及存储，很少有对单片晶圆的存储与管理。因为晶圆必须存放在干燥和无尘的环境中，湿度和灰尘会对晶圆的表面造成损害，导致芯片的性能下降。所以晶圆仓要确保湿度和温度在适宜的范围内，并且仓内要保证很高的洁净度。而与国际竞品这一块相比，国内的半导体晶圆仓在洁净度及设备精度这方面还是有待进一步的优化。

艾斯达克作为国内半导体晶圆仓研发制造的领军企业，突破技术壁垒，打造了行业领先的晶圆存储设备，推出了以单片晶圆为单位进行精准管控的半导体晶圆仓——i-Stock Semi-wafer stocker，设备内部搭载洁净机械手臂，达到半导体行业无尘等级要求。库内可高速传递晶圆片，精准取片，库外可拓展对接 AMR 上下料，便捷高效，打造智能化、可视化的半导体晶圆存储设备。

该设备还通过打通不同工艺流程与软件信息之间的物质流和信息流，实现晶圆物料在各个车间、机台的自动转运或自动上下料，解决人工作业带来的效率低下和产品不良率低的问题。赋能半导体晶圆库房与存储流程设备化、智慧化、无人化，提升作业效率，降低库存，实现物料的最高价值使管理标准化，从而降低企业运作成本为己任。



王煜宇
厦门煜茂科技有限公司 CTO

在第三代半导体外延设备范畴里不管是氮化镓或碳化硅功率组件，外延片都存在着掺杂不均匀的问题，进而导致制程后组件良率下降，氮化镓功率组件常见的掺杂源 (dopant) 有镁、铁和碳，碳化硅功率组件的掺杂源为氮，掺杂不均匀的原因如下：1. 反应腔内外延片表面温度分布不均；2. 芯片翘曲，温度不均和芯片翘曲可以藉由优化反应腔加热器和芯片载台来解决，还有一个最主要的原因是掺杂源其扩散曲线 (diffusion curve) 不同于镓源、氮源、硅源和碳源，要解决掺杂源扩散曲线不一致问题，必须设计新颖反应腔的进气口设计，加大各种源的调整窗口，如此才可超越垂直式进气或水平式进气的国际竞品外延设备。



叶国光
无锡邑文微电子科技股份有限公司副总经理

我们一直在努力追赶国际品牌设备，尤其是化合物半导体设备的国际设备公司，我们发现这些公司大部分都是欧美日的品牌，由于没有牵扯到 12 寸的先进制程，美国也比较没有限制他们在中国大陆地区的销售，所以这个领域的竞争，国产与进

口反而比较激烈，而这个领域的设备也是国产化最重要的一步，所以挑战度极高。还好，相比几年前芯片公司对国产设备的不理不睬，甚至有时候国产设备公司还要求客户免费使用他们的设备。但是，转折点来了，还是要感谢美国特朗普的贸易战与拜登的科技战，出于避开风险与国产设备质量慢慢的提升，国内化合物半导体芯片公司的领导与技术人员对国产设备接受度越来越高了，只要是国产能做出来的，而且经过头部企业验证通过，大部分客户都会很支持的。

当然国产设备还是有一些不足之处，我列举三个吧！

第一，与国外设备相比，国产最大的短板就是缺乏客户大量的使用经验，客户会用比较高的要求来验证国产设备，所以小问题会比较多，还好国产设备公司的客户服务补了这个短板。

第二，国内设备公司对工艺的理解比较薄弱，投入工艺验证的资源较少，我以前工作的国外公司，投入非常大的人力（至少 5 个博士）与设备来验证设备的工艺与服务客户打样，国内这方面的投入就比较少了。

第三，这是我在日本的经验吧！日本的设备公司投入产学研的资源非常巨大，很多学校的设备都是设备商无偿送的，而且是最前沿与最新的设备，而且学校与设备公司在科研合作上都是实质的，技术成果共享。以前国内的产学研合作比较流于形式，现在有很大的改善，但是相比我在 20 年前的日本，还是不足，这点还是值得国内设备公司参考与学习的。



沈健威
东莞市晟鼎精密仪器有限公司副总经理、
技术总监

以半导体晶圆退火为例，在晶圆制造过程中，通过控制加热和冷却速度，晶圆退火可以改善晶体结构，修复晶格损伤，消除或减轻晶体应力，从而确保晶体质量。

晟鼎突破技术壁垒，紧跟市场动向，推出了可兼容 4-12 英寸的晶圆退火炉，利用卤素红外灯作为热源，通过极快的升温速率，将材料在极短的时间内从室温加热到 300℃ - 1250℃，具有稳定的温度重现性和超高温场均匀性，能够满足 SIC 量产化制程需求。该设备还可用于氧化物、氮化物生长、硅化物合金退火、欧姆接触快速合金等。

随着化合物半导体的应用领域不断扩大，对半导体的性能和可靠性要求也越来越高。因此，退火炉需要具备高效率和高稳定性的特点，以确保化合物半导体的质量和性能。退火炉作为关键设备之一，需要对其加强技术研发和创新，以适应市场需求和技术发展的要求。同时，还需要加强产业合作和协同创新，推动产业的快速发展和升级。☑

基于非极性氮化铝单晶薄膜的高速表面声波和横向体波谐振器

摘要

为了发挥氮化铝 (AlN) 在 GHz 频段的高频性能优势, 人们往往需要借助氮化铝 c 轴的压电性能和高声速 (约 11350 m/s) 特征。相对于传统的 c 面氮化铝薄膜, a 面氮化铝薄膜的压电轴居于薄膜平面内, 这种特殊的氮化铝薄膜材料有望大幅简化现有声学谐振器的构造。在本工作中, 我们将物理气相沉积与高温退火技术结合, 在 r 面蓝宝石衬底上成功获得了 a 面氮化铝单晶薄膜, 而基于该非极性氮化铝单晶薄膜实现的声学谐振器具有优异的性能。实验表明, 当施加电场方向与单晶薄膜 c 轴方向平行时, 可在 2.38 GHz 与 4.00 GHz 频段分别激发具有高度各向异性的高性能瑞利波 (SAW) 与横向体声波 (LBAW)。其中瑞利波性能优异, 品质因子高达 2458, 并在变温实验中表现出很强的稳定性; 而仅由平面指叉电极即可激发的 4.00 GHz 横向体声波则是在氮化铝体系中首次报道, 且无需加入任何空腔或底电极结构辅助。本工作展现了非极性面氮化铝单晶薄膜在谐振器提升性能与简化结构等应用领域的巨大优势。

作者: 卢同心^{1,3}, 房晓丽², 张师斌², 袁冶³, 欧欣², 王新强^{1,3}

1 北京大学物理学院, 北京市海淀区成府路 209 号, 北京

2 中科院上海微系统与信息技术研究所, 中国上海市长宁区长宁路 865 号, 上海

3 松山湖材料实验室, 东莞市松山湖国际创新创业社区 A1 栋, 东莞

氮化铝薄膜材料以其出色的高频压电性能、高声速特性 (约 11,350 m/s) 以及与 CMOS 工艺的兼容性, 在体声波谐振器 (BAW) 制备领域备受青睐, 特别其具有的高声速特性更是保证了其在高频 GHz 范围具备突出的工作能力。上述优异的声学性质也使得氮化铝成为射频前端模组中高频滤波器材料的不二首选。众所周知, 为了充分利用氮化铝材料中 c 轴的高频压电特性, 我们需要施加与氮化铝压电 c 轴平行的电压来激发体声波, 因此传统体声波谐振器采用了金属电极/c-面氮化铝薄膜/金属电极的三明治器件结构。为了增强声学性能, 人们往往需要在器件下方引入特定的空腔或布拉格反射结构增强声波反射, 这些复杂的器件结构为芯片制备工艺增加难度, 进而阻碍器件性能的优化提升。与体声波谐振器相比, 表面声波谐振器具有更简单的器件结构 (无需底电极或者声学增强结构, 只采用平面指叉电极), 但氮化铝材料的 d_{31} 压电系数偏低, 因此传统的 c-面氮化铝薄膜制备的表面声波谐振器无法

发挥材料优势。为解决氮化铝材料性质与表面声波器件匹配度低的技术瓶颈, 行业中已经采用诸多方法, 例如利用铈元素掺杂提升材料的 d_{31} 压电系数等。虽然上述技术方案能够使得氮化铝基表面声波谐振器的品质因子 (Bode_ Q_{max}) 或共振频率得到提升, 但难以同时保证器件具有较高的共振频率和品质因子。

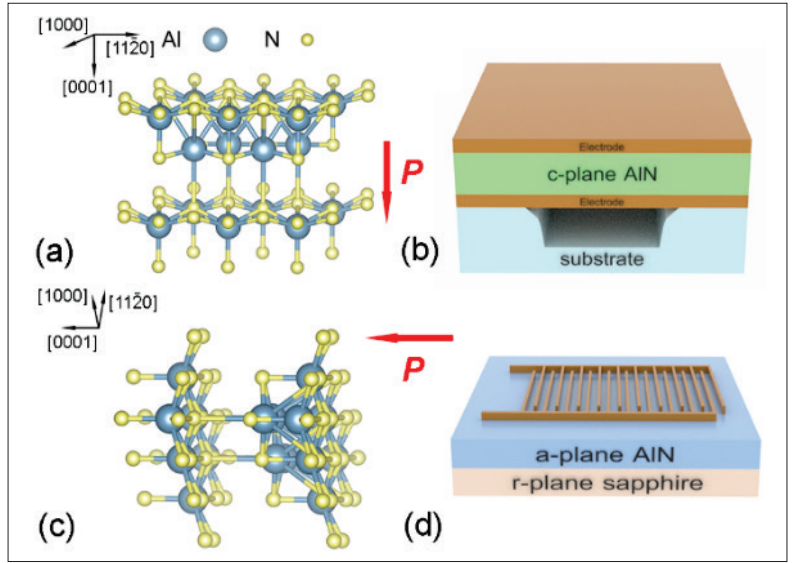
为了解决上述问题, 利用非极性氮化铝薄膜是一种切实可行的方案。当施加电场方向与非极性氮化铝薄膜面内的压电 c 轴方向一致时, 我们有望实现高性能的声学响应。图 1 中对比了传统 c 面氮化铝薄膜与非极性氮化铝薄膜的晶格结构以及基于二者制备的谐振器的基本构造: 对于传统 c 面氮化铝薄膜, 其压电 c 轴与薄膜法线方向平行, 而非极性氮化铝薄膜的压电轴则位于薄膜面内; 传统的体声波谐振器结构需要施加平行于薄膜法线方向的电场, 因此谐振器件为电容结构, 即 c 面氮化铝薄膜被上下层金属电极夹在中间, 通过施加电场激发氮化铝薄膜内的体声波。而非

极性氮化铝薄膜的压电轴位于薄膜平面内，只需沿平面内压电轴方向施加激励电场，便可激发体声波，此过程仅需平面指叉电极即可完成。在此前的研究中，由于非极性氮化铝薄膜的结晶质量尚不理想，这种方案并没有带来显著的性能提升。因此，获得高质量的非极性氮化铝薄膜是实现上述技术方案的先决条件。

在本工作中，我们利用物理气相沉积的方法，结合高温退火技术在 *r* 面蓝宝石衬底上获得了高质量 *a* 面氮化铝单晶薄膜，并以其为基础制备了仅具备平面指叉电极结构的高性能声学谐振器。我们通过精确调整指叉电极与氮化铝面内 *c* 轴之间的角度验证谐振腔的性能，而导纳测试结果显示我们的声学谐振腔具有面内的强各向异性。当通过调整电极角度使施加电场沿氮化铝压电 *c* 轴（即 [0001] 方向）时，谐振腔激发了共振频率为 2.38 GHz 性能优异的表面声波，其品质因子（Bode_ Q_{\max} ）高达 2458，有效机电耦合系数 K_t^2 为 0.587%，品质因数（FOM）为 14.4。不仅如此，我们在 4.00 GHz 的共振频率附近观察到了高速横向体声波（LBAW），这是首次在 AlN 体系中仅通过平面指叉电极激发的体声波。上述结果表现出高温退火非极性氮化铝单晶薄膜在声学谐振器制备中具有极大潜力。

a 面氮化铝单晶薄膜通过物理气相沉积（PVD）结合高温退火技术制备，衬底材料为 2 英寸 *r* 面蓝宝石，通过物理气相沉积获得的氮化铝薄膜厚度为 1 μm 。薄膜制备过程中，PVD 工作气体为氩气和氮气的混合气氛，二者体积比为 1:4，腔体压力约为 9×10^{-1} Pa。随后将制备好的氮化铝薄膜在氮气环境下进行 1700°C 的高温退火处理，退火时间为 5 小时。我们使用 Panalytical Empyrean 公司生产的 X-射线衍射仪，通过 Φ 扫描和倒易空间（RSMs）测试对退火后样品的结晶质量进行了系统研究，并利用原子力显微镜（AFM）对氮化铝薄膜的微观表面形貌进行观察。

基于上述氮化铝薄膜，我们制备了在不同方向指叉电极但结构相同的一组表面声波谐振器，相邻两个谐振器之间指叉电极方向差为 5°，用以评估施加电场方向与压电 *c* 轴的夹角对谐振器性能的影响。我们采用电子束曝光技术在氮化铝薄膜上制备电极图案，随后通过电子束蒸镀实现电极的组装制备。谐振器结构参数如下：每个谐振器具有 120 对指叉电极和 20 对反射电



极，指叉电极和反射电极均由厚度为 120nm 的铝薄膜制成，电极间距 λ 为 2.4 μm ，孔径长度为 20 λ ，金属化比例为 0.5。最终，我们使用矢量网络分析仪（Keysight E5071C）通过测量 S 参数对谐振器进行性能评估。

我们通过原子力显微镜和 X 射线衍射技术对高温退火 *a* 面氮化铝薄膜的结构进行了系统研究，结果如图 2 所示。利用原子力显微镜所观察到的表面形貌如图 2 (a) 所示：与此前报道的 *c* 面蓝宝石衬底上的 *c* 面氮化铝薄膜情况不同，该样品在 5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 测量范围内的粗糙度为 7.08 nm，

图1: (a) 传统c面氮化铝薄膜晶体结构; (b) 基于c面氮化铝薄膜的体声波谐振器结构; (c) a面氮化铝单晶薄膜晶体结构; (d) 基于a面氮化铝薄膜的的表面声波谐振器结构。(其中箭头P指向为压电轴化方向)。

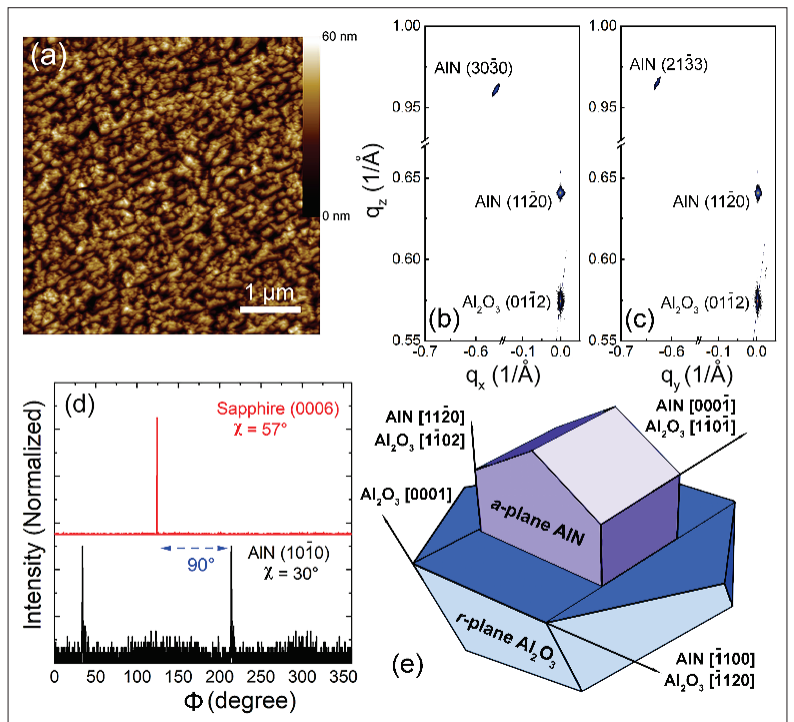


图2 (a) 高温退火后的a面氮化铝薄膜的原子力显微镜形貌图; 沿氮化铝 (b) [1100]和 (c) [1100]*方向的X射线衍射倒空间结果; (d) 蓝宝石(0006)衍射晶面和氮化铝(1010)衍射晶面的X射线衍射扫描; (e) r面蓝宝石衬底上a面氮化铝的结构示意图。

表面粗糙度较大。图 2 (b) - (d) 展示了 X 射线衍射测试得到的衍射结果，从图中可以系统地分析氮化铝薄膜与蓝宝石衬底的外延关系。我们分别沿氮化铝的 $[\bar{1}100]$ 和 $(\bar{1}10\bar{6})^*$ 方向测试了倒空间衍射图谱，选择 $(\bar{1}10\bar{6})^*$ 方向是由于该晶向具有较大的结构因子和合适的衍射角，衍射信号较强。如图可知，氮化铝 $(11\bar{2}0)$ 衍射晶面沿着上述两个测试方向均具有较强的衍射信号，同时其与蓝宝石 $(011\bar{2})$ 衍射斑具有相同的 q_x/q_y ，表明氮化铝 $[11\bar{2}0]$ 和蓝宝石 $[011\bar{2}]$ 晶向均平行于薄膜法线方向。除了氮化铝 $(11\bar{2}0)$ 衍射斑，沿氮化铝 $[\bar{1}100]$ 和 $(\bar{1}10\bar{6})^*$ 方向还出现了另外两个衍射斑，它们分别来自氮化铝 $(30\bar{3}0)$ 和 $(21\bar{3}3)$ 晶面。这是因为氮化铝 $[\bar{1}100]$ 和 $(\bar{1}10\bar{6})^*$ 晶向之间的夹角与氮化铝 $[30\bar{3}0]$ 和 $[21\bar{3}3]$ 晶向之间的夹角相同，均为 72.9° ，该结果再次证实了氮化铝薄膜的单晶特性。图 2 (d) 中采用 Φ 扫描的方式分别扫描了氮化铝和蓝宝石具有面内衍射分量的晶面，进一步确认了氮化铝在蓝宝石上的外延关系。通过在薄膜平面内旋转角度 Φ ，我们观察到氮化铝 $[10\bar{1}0]$ 晶向在薄膜面内的分量与蓝宝石 $[0001]$ 晶向在薄膜面内的分量相互垂直。换言之，氮化铝的 c 轴与蓝宝石 c 轴具有相同的面内投影方向。图 2 (e) 显示了氮化铝和蓝宝石之间的外延关系。蓝宝石的 r 平面是一个具有 $15.34 \times 4.75 \text{ \AA}^2$ 单位晶胞尺寸的矩形平面，而 AlN 的 a 平面是一个具有

$4.98 \times 5.39 \text{ \AA}^2$ 单位晶胞尺寸的矩形平面，为实现共格结构，三个单位晶胞的 a 面 AlN ($14.94 \times 5.39 \text{ \AA}^2$) 恰好匹配一个单位晶胞的 r 面蓝宝石晶胞。以上结果揭示了 a 面 AlN 在 r 面蓝宝石上的外延关系，证明了我们的 a 面 AlN 薄膜具有单晶特性，且压电 c 轴位于薄膜平面内。

氮化铝材料所具有的高声速与 c 轴的高频压电特性使其成为制备高频滤波器件（例如体声波谐振器）最具优势的材料。然而体声波谐振器复杂的器件结构带来较大的技术门槛，这使人们将注意力投向结构更加简单的表面声波谐振器。而基于上述非极性面氮化铝单晶薄膜，我们可以同时发挥氮化铝 c 轴的优异的压电特性与表面声波谐振器结构简单的优势，制备高性能、更利于产业化的声波谐振器。

图 3 (a) 展示了基于高温退火 a 面氮化铝单晶薄膜的谐振器结构示意图。为了研究谐振腔在薄膜平面内的各向异性，我们制备了一组具有不同夹角 θ 的谐振器，相邻谐振器之间的 θ 以 5° 为步进进行渐变。实验结果表明，当平面内指叉电极施加电场方向沿氮化铝 c 轴方向时 ($\theta = 0^\circ$)，可以获得最佳的谐振器性能。我们用 COMSOL Multiphysics 软件模拟了指叉电极平行和垂直于氮化铝 c 轴时的谐振器性能。如图 3 (b) 和 3 (c) 所示，在 2.35 GHz 和 4.00 GHz 频段分别存在瑞利波和体波对应的共振信号，上述两种声学响应在

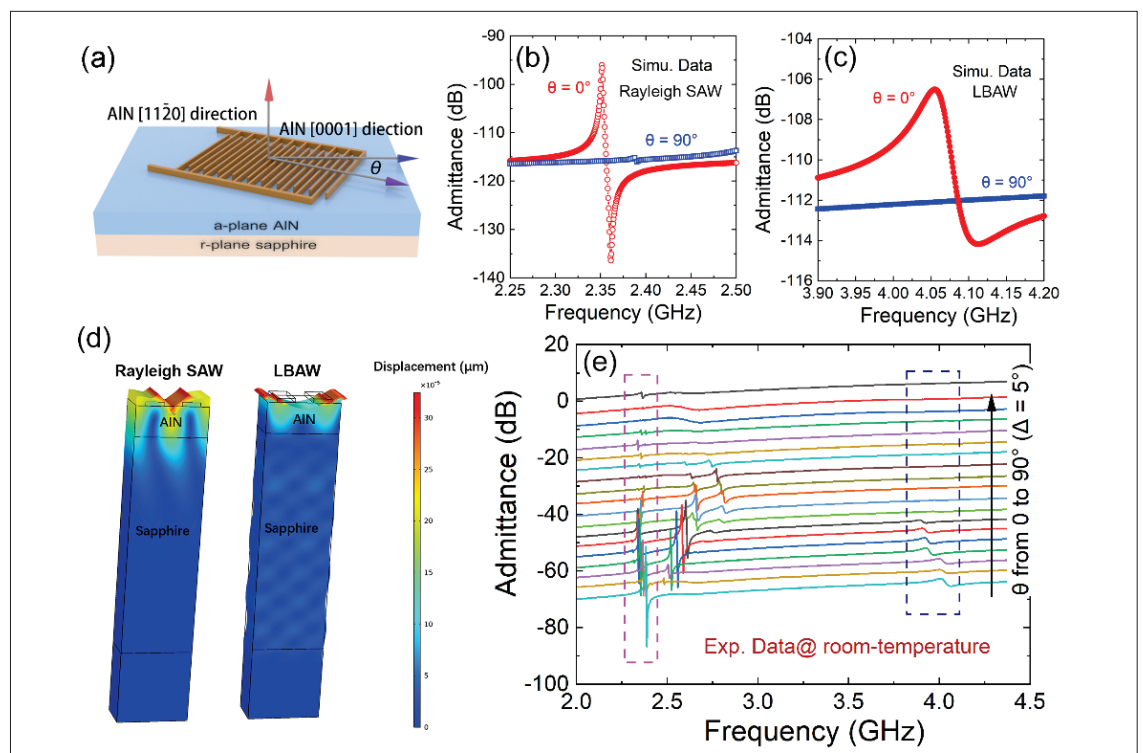


图3: (a) 基于 a 面氮化铝单晶薄膜的高性能谐振器结构示意图，可通过调整谐振器指叉电极与氮化铝单晶薄膜 c 轴的角度对谐振器性能进行调控；基于 COMSOL Multiphysics 模拟所绘制的 (b) 瑞利波与 (c) 横向体波模型的导纳特性 ($\theta = 0^\circ$ 或 90°)；(d) $\theta = 0^\circ$ 时，谐振器中激发的瑞利波和横向体波的模拟结果示意图；(e) 室温条件下， θ 从 0° 以 5° 为步进到 90° 逐步变化时，谐振器的导纳特性实验结果。

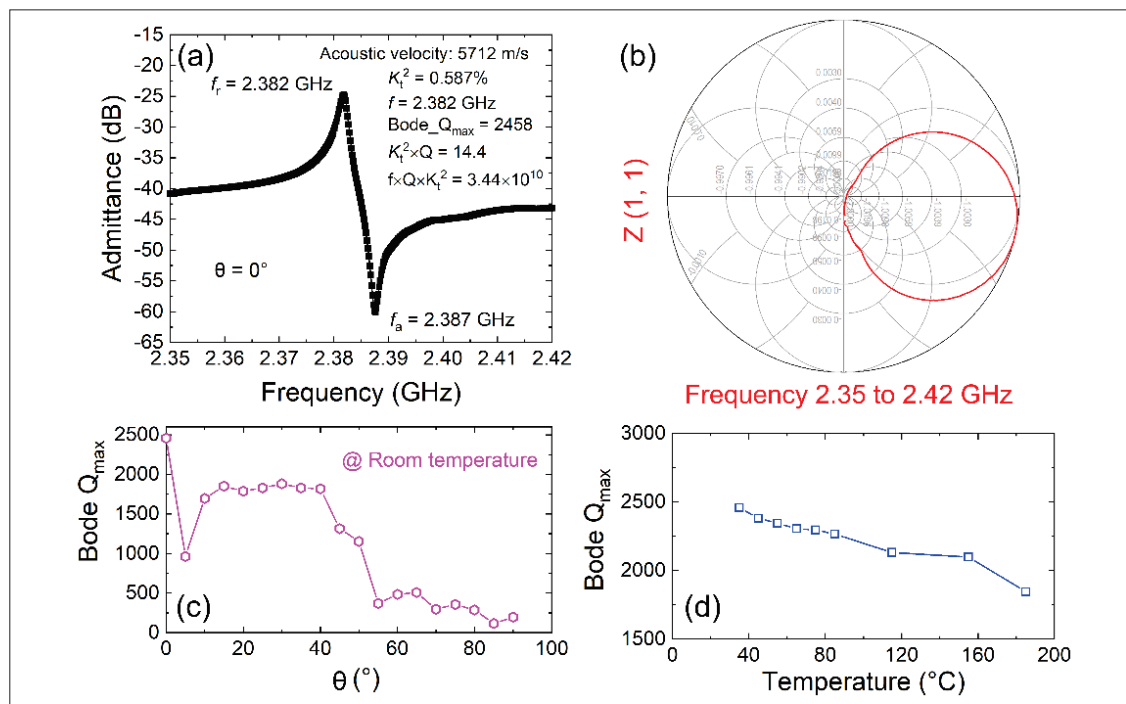


图4: (a) 室温条件下谐振器的导纳特性曲线 ($\theta = 0^\circ$); (b) 谐振器阻抗的 Smith图; (c) 谐振器品质因子 $Bode-Q_{max}$ 随 θ 变化规律; (d) 谐振器品质因子 $Bode-Q_{max}$ 随温度变化测试曲线。

薄膜中的具体传播模式如图 3 (d) 所示。当 $\theta = 0^\circ$ ，即施加电场与氧化铝压电 c 轴方向重合时，计算结果显示导纳曲线在 2.3 GHz 处出现尖锐的谐振信号，其谐振频率 (f_r) 和反谐振频率 (f_a) 分别为 2.35 GHz 和 2.36 GHz。然而，当激励电场方向与氧化铝 c 轴垂直 ($\theta = 90^\circ$) 时，导纳曲线只在 2.38 GHz 处具有一个微小的谐振信号。体声波的模拟结果与瑞利波类似，呈现出一致的面内各向异性。当 $\theta = 0^\circ$ 时，体声波的 f_r 和 f_a 分别为 4.06 GHz 和 4.11 GHz，而当 $\theta = 90^\circ$ 时几乎无体声波激发。通过 COMSOL 的模拟结果，我们预测基于非极性氧化铝薄膜制备的谐振腔具有较强的面内各向异性。

为验证上述模拟结果，我们制作了一系列基于非极性氧化铝薄膜的谐振器，夹角 θ 以 5° 为区间由 0° 逐渐变为 90° ，而导纳特性测试结果如图 3 (e) 所示。由图可见，所有夹角 θ 对应的谐振频谱都在 2.38 GHz 频段出现瑞利谐振峰。此外，我们可以通过调整叉指电极的结构，使谐振频率得到进一步提升。除了瑞利共振，当 θ 在 5° 到 70° 范围内变化时，出现了另外两组谐振频率的响应，其中频率较低的谐振峰随着 θ 的增大逐渐从 2.46 GHz 移动到 2.63 GHz，符合水平剪切波的特性。而另一个共振信号则从 2.75 GHz 逐渐移动到 2.79 GHz，其来源尚不清楚。除了 3 GHz 以下的谐振信号，谐振器在 4.00 GHz 左右出现了另一个重要的激发模式，这与图 3 (c) 中的理论预测一致，该共振信号代表沿着压电轴传播的高速体

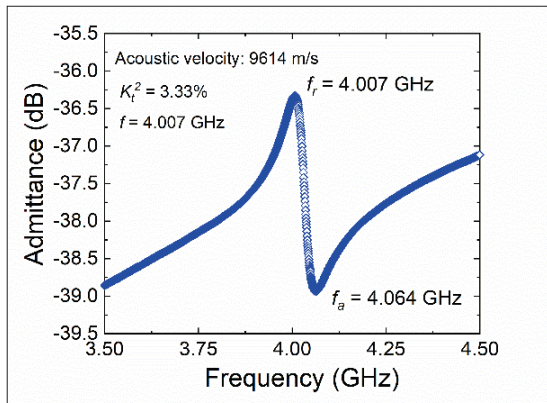
波模式。如图所示，体波具有与瑞利波具有类似的面内各向异性特征，并且在 $\theta = 0^\circ$ 时出现最大谐振幅度。

为了研究关于瑞利波共振的更多细节，我们对 2.38 GHz 处的导纳实验结果 ($\theta = 0^\circ$) 进行放大展示，如图 4 (a) 所示。并通过进一步定量计算评估谐振器的综合性能。谐振器的 f_r 和 f_a 分别为 2.382 和 2.387 GHz，与模拟结果基本一致。谐振器的有效机电耦合系数 (K_t^2) 由以下公式得出：

$$K_t^2 = \frac{\pi f_r}{2 f_a} \left[\tan \left(\frac{\pi f_r}{2 f_a} \right) \right]^{-1}$$

通过带入 f_r 和 f_a 测试数据计算可得 $K_t^2 = 0.587\%$ 。众所周知，品质因子 ($Bode-Q_{max}$) 这一重要的评价指标是由 Feld 等人提出，用以评价谐振器的响应能力。经计算，该谐振器在 2.3 GHz 频段的品质因子值高达 2458。进而通过 $K_t^2 \times Q$ 计算得到的谐振器的品质因数 (FOM) 为 14.4。评估谐振器性能的另一个重要指标为 FQ (即产品 $f \times Q$ 的值)，常规基于 c 面氧化铝或铝钽氮的表面声波谐振器的谐振频率基本在 MHz 区域，因此 FQ 值一般偏低，而本谐振器的谐振频率在 GHz 区域，其 FQ 的值为 5.85×10^{12} ，高于常规氧化铝表面声波谐振器。谐振器的阻抗特性 Smith 图如图 4 (b) 所示。为了定量研究谐振器瑞利共振的各向异性，我们计算了并绘制了品质因子随 θ 的变化曲线，结果如图 4 (c) 所示。在排除测量误差后，几乎所有 $\theta < 40^\circ$ 的器件的

图5 基于a面氮化铝单晶薄膜谐振器激发横向体波的导纳曲线 ($\theta = 0^\circ$)。



品质因子均大于 1500，展现出优异的性能。而当 θ 从 40° 增加到 50° 时，品质因子急剧下降，并在 θ 从 50° 增加到 90° 时继续缓慢下降。这个结果证实了非极性面氮化铝谐振器中瑞利共振所存在的面内各向异性，也体现了非极性面氮化铝单晶薄膜中位于薄膜平面内的压电轴所带来的巨大优势。此前，诸多研究人员曾对基于 c 面氮化铝薄膜的表面声波谐振器的各向异性展开研究，并发现沿氮化铝 a 轴方向的谐振频率、品质因数、电机耦合系数、插入损耗和带外抑制均高于沿氮化铝 m 轴方向的上述性质。然而，该研究仅关注了氮化铝六角 c 面上的各向异性特征，而本研究结果使得对氮化铝表面声波各向异性的认识更加完整。我们通过改变环境温度来研究谐振器的温度稳定性，结果如图 4 (d) 所示。随着温度的升高，品质因子逐渐下降，并大致与温度呈准线性关系，在最高测试温度 185°C 条件下，谐振器的品质因子仍然高达 1847，证明 a 面氮化铝谐振器具有良好的高温工作能力。

此前诸多研究人员曾基于常规的 c 面氮化铝薄膜实现了表面声波谐振器，但由于氮化铝材料的 d_{31} 有限，因此谐振器的瑞利波激发频率大多低于 900 MHz。最近，有工作借助氧化锌缓冲层制备了基于 a 面氮化铝薄膜的表面声波谐振器，使其共振频率提高到了约 1.5 GHz。为进一步提高谐振频率，另一种方案则是使用单晶 c 面氮化铝或铈掺杂的氮化铝薄膜。然而，上述方法很难保证共振频率、 K_t^2 和品质因子同时具有较高的值。使用金刚石衬底可以有效地增加了谐振频率和 $f \times Q$ ，但其昂贵的成本和复杂的制备过程严重阻碍了工业应用。本工作采用相对简单且低成本的方式制备了表面声波谐振器，同时保证了器件具有较高的

共振频率、 K_t^2 和品质因子，展现出巨大的应用潜力。

如上所述，基于 a 面氮化铝单晶薄膜的谐振器成功在 4 GHz 频段激发了横向体声波，并且共振强度随 θ 发生变化，也呈现了明显的各向异性。图 5 展示了室温下体波频段内的导纳测试结果。可以看到， f_r 和 f_s 的频率分别为 4.007 和 4.064 GHz。计算其对应的 K_t^2 值为 3.33%，远高于瑞利波，甚至可与 AlN 基体声波谐振器相媲美。通过计算得到声速为 9614 m/s，接近理论值。横向高频体波方案已经在铈酸锂、钽酸锂与氮化铝等多种材料体系中使用，目的在于提高谐振性能。然而，由于氧化物体系声速有限，为利用并且加强 Lamb 波实现 XBAW 等新型器件结构，往往需要沉积底电极或利用空腔结构，也同时增加了流片的复杂性。而本工作通过利用非极性面氮化铝单晶薄膜采用一种简单的器件结构激发高速体波，对声学谐振器发展与应用具有重要意义。

事实上，非极性单晶薄膜已经广泛应用于 GaN 基光电器件领域，如发光二极管、激光二极管和光电探测器等。而光电器件主要包含 n-/p- 型掺杂区域或多量子阱区域，因此器件的制造工艺与声学谐振器有根本区别。非极性氮化物半导体薄膜在声学应用领域的报道结果非常少，我们的工作为进一步研究非极性氮化物半导体在声学领域的应用开辟了一条全新道路。

我们将物理气相沉积与高温退火技术结合，在 r 面蓝宝石衬底上成功实现了高质量的 a 面氮化铝单晶薄膜。基于该材料，我们制作了一种同时激发瑞利波与横向体波的谐振器。当调整谐振器平面叉指电极的角度时，两种谐振信号都表现出明显的各向异性特征。当施加电场方向与氮化铝 c 轴平行时，瑞利波谐振模式表现出优异的性能：谐振器在 2.38 GHz 波段的品质因子高达 2458，有效机电耦合系数与品质因数分别为 0.587% 和 14.4，优于常规基于 c 面氮化铝的表面声波谐振器。即使温度升至 185°C ，品质因子仍然高达 1847，证实了谐振器在高温环境下的应用潜力；此外，基于非极性面氮化铝的谐振器，基于非极性面氮化铝的谐振器首次在仅凭借平面叉指电极的条件下，激发了频率为 4.007 GHz 的横向体波，且有效机电耦合系数 K_t^2 为 3.33%。上述结果凸显了非极性面氮化铝单晶薄膜在声学谐振器中的巨大应用前景，为新型声学谐振腔的技术发展提供了一条全新路线。[15]

扩展阅读

► Tongxin Lu et al., Appl. Phys. Lett., 123, 252105 (2023)

Marangoni 干燥技术的新应用

作者：徐亚志、华斌
苏州智程半导体科技股份有限公司

半导体干燥技术广泛应用于半导体制造的各个环节。在半导体材料的切割、研磨和清洗过程中，都需要使用半导体干燥技术来去除材料表面的水分。此外，在半导体器件的制作过程中，也需要使用半导体干燥技术来确保材料的洁净度和稳定性。

Marangoni 干燥技术是由飞利浦研究实验室基于马兰戈尼效应开发的一种新的晶片干燥技术。由于 IPA 的表面张力比水小得多（25℃下，IPA 表面张力为 20.9×10^{-3} N/m；水的表面张力为 72.8×10^{-3} N/m），所以会在坡状水流表层形成表面张力梯度，产生 Marangoni 对流，水被“吸回”水面，从而实现晶片干燥的效果。（如图 1 所示）

马兰戈尼效应（Marangoni effect）——由于两种表面张力不同的液体界面之间存在张力的梯度而使质量移动的现象，称为马兰戈尼效应。

相比于其他干燥技术，Marangoni 干燥技术具有 IPA 用量少、能够克服深窄沟渠的脱水困难、比较适合直径 150 mm（6 英寸）以上晶片的干燥等优点。然而 Marangoni 效应的产生条件较为苛刻，需要精确控制各种环境因素，如压力、浓度、温度、湿度和表面活性剂等，这些都增加了该技术的实施难度和成本。

在半导体湿制程工艺中晶片干燥问题一直是影响清洗工艺的关键点。

ZSE 自主开发的 JKM Marangoni 干燥技术，已经在大量湿制程设备产品上应用，并在客户端通过验证，完全可以满足 Particle:<20ea@45nm 的要求，实现 Watermark free, Wafer breakage < 100 ppm。（图 2 是 JKM Marangoni 干燥的基本流程）

由于化合物半导体的多样性，不同材料需要采用不同的湿制程工艺和技术。因此，国产湿制程设备企业需要开发多样化的设备，以满足不同材料和工艺的需求。针对一些非标准产品，如薄片，ZSE 自主开发了 SWM Marangoni 干燥技术，解决了传统 Marangoni 干燥时容易碎片及水渍残

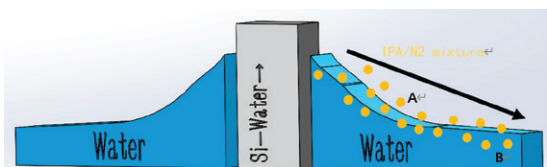


图1: Marangoni干燥原理

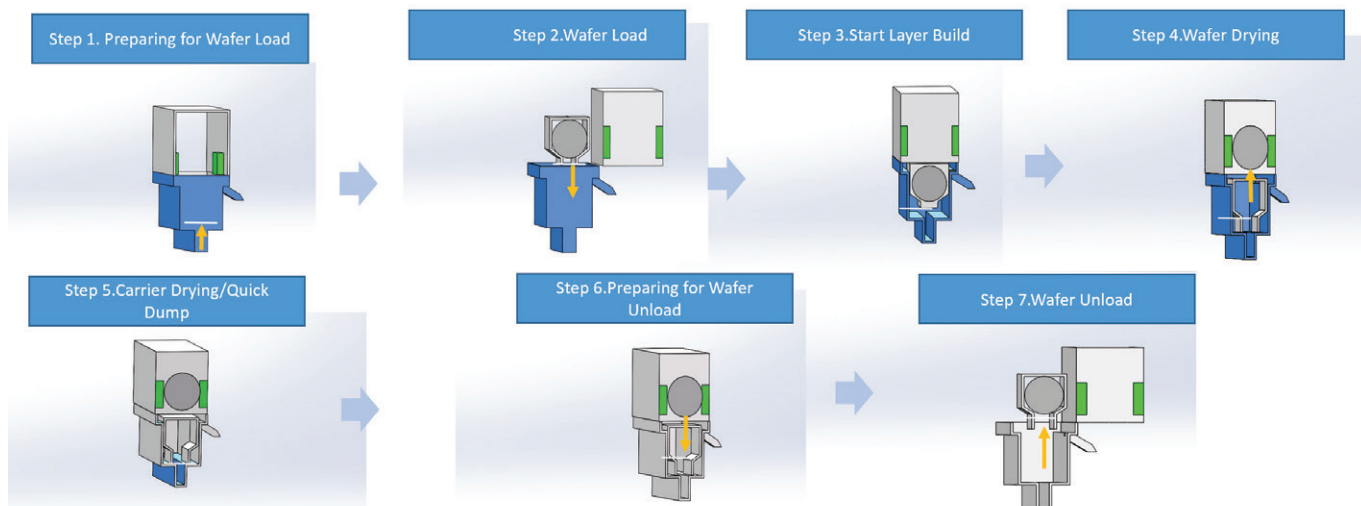


图2: JKM Marangoni干燥工艺流程示意图

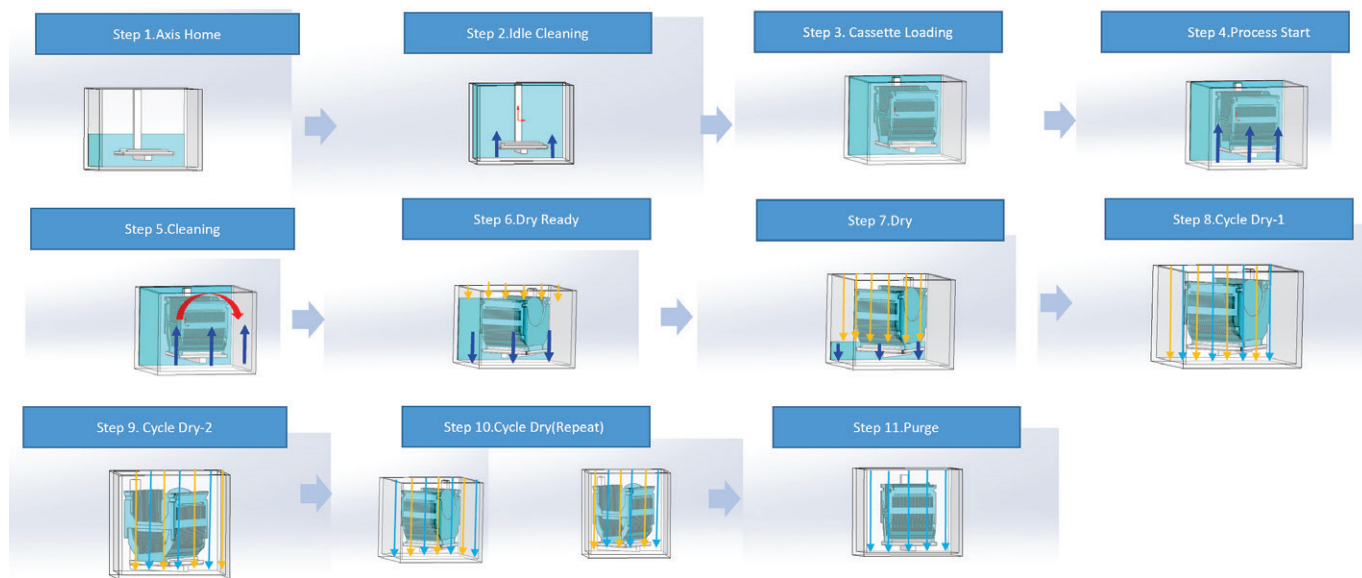


图3: SWM Marangoni干燥工艺流程示意图

留的问题。同时具备兼容多种尺寸规格的产品，满足用户一机多用的使用要求。（图3是SWM Marangoni干燥流程）

根据国内一些客户需求开发的8寸Open Cassette内嵌6寸Open Cassette的清洗干燥方案，优化槽内流体效应，经过验证已经达到清洗干燥目标，后续可以填补业内清洗工艺的空白。

在新形势下，用技术创新驱动半导体设备发展是关键。工艺路线创新、设备架构创新、最新技术加持是技术创新的三个路径。同样的问题采

取不同的解决路径，就会涉及一些基础科学应用层面的知识。如果不在应用程度上创新，采用同样的解决路径也有很多创新空间，例如从设备设计、架构方面着手。从任何一个设备和解决方案去分析会发现有很多可以进行创新的机会。

随着科技的进步和产业的发展，半导体干燥技术也在不断发展和优化。近年来，一些新的技术和方法逐渐应用于半导体干燥领域。

目前，ZSE在Marangoni干燥技术的应用方面有了新的突破。

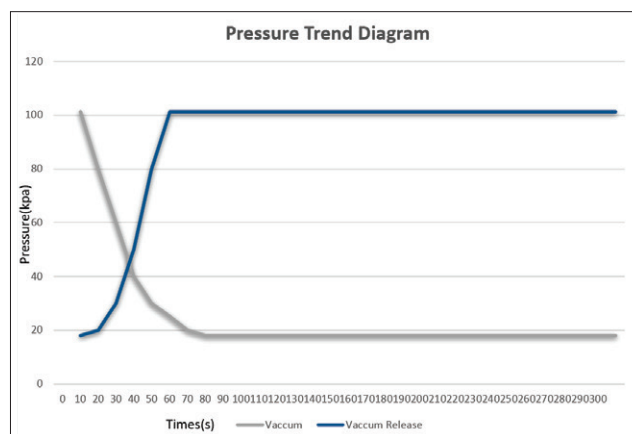
1. 真空低压技术的应用

Marangoni干燥和真空低压技术可以结合使用，以实现更高效的晶片干燥。

传统的Marangoni干燥在处理一些复杂图形的晶片时，尤其是深沟槽，一旦某些参数出现波动后，难免发生无法彻底干燥的情况。在真空低压的环境下可以有效改善这种情况。基本方法如下：首先使用Marangoni干燥技术将晶片进行初步干燥，然后启动真空装置使整个腔体内压力从

Vaccum		Vaccum Release	
Time (s)	Pressure(kpa)	Time (s)	Pressure(kpa)
0	101.3	0	18
10	80	10	20
20	60	20	30
30	40	30	50
40	30	40	80
50	25	50	101.3
60	20	60	101.3
70	18	70	101.3
80	18	80	101.3
90	18	90	101.3
100	18	100	101.3
110	18	110	101.3
120	18	120	101.3
130	18	130	101.3
140	18	140	101.3
150	18	150	101.3
160	18	160	101.3
170	18	170	101.3
180	18	180	101.3
190	18	190	101.3
200	18	200	101.3
210	18	210	101.3
220	18	220	101.3
230	18	230	101.3
240	18	240	101.3
250	18	250	101.3
260	18	260	101.3
270	18	270	101.3
280	18	280	101.3
290	18	290	101.3
300	18	300	101.3

表 1: 干燥腔内的压力变化



正压转变成负压 (从 101.3kpa 降到 20kpa 以下), 并持续稳定一段时间 (约 200 秒)。同时在低压环境下使用 Hot N₂ (50°C ~60°C, 实际温度会根据流量大小发生一定变化) 进行进一步干燥, 在停止真空装置后, 使腔体恢复到大气压状态 (下表 1 是腔体内压力变化的趋势)。这种方法可以利用 Marangoni 效应将水分拉回表面, 并利用真空低压技术促进沟槽深处的水分被吸出并蒸发。

使用 Hot N₂ 的原因: 常温 N₂ 在气化 IPA 及吹进腔体时, IPA 的气化转化率比较低, 使用 HOT N₂ 可以有效提高转化率, 同时腔体内温度可以从常温提高到 50°C 左右, 可以加速 IPA 的挥发, 也提高了晶片的干燥效果。

2. 更合理的结构优化

Marangoni 干燥技术还需要使用大量的异丙醇 (IPA) 气体, 这可能会增加生产成本和环保负担。原先的设计, IPA/N₂ 需要覆盖整个干燥腔体, 但是能影响到干燥效果的仅是晶片所接触的空间, 通过增加 Shield Plate 的设计, 可以有效缩小干燥空间, 减少 IPA/N₂ 的用量, 提高干燥的效果 (见图 4 示意图)。通常在槽式清洗中, 干燥槽往往都是产能的瓶颈, 通过结构的优化, 也减少了干燥槽的作业时间 (原先设计干燥过程耗时超过 10 分钟, 在结构优化后, 干燥时间可以缩短到 8 分钟), 整机的产能可以提高约 30%。

3. 更全面的工艺参数控制

Marangoni 干燥的关键在于控制水层和异丙醇气体层在硅片表面的移动速度。这种控制可以通过调整工艺参数, 如温度、压力、流速等来实现。原先的设计对管路中 IPA 浓度的控制是有所欠缺的。IPA 的浓度是由 IPA 蒸发量, N₂ 的流量及压力所决定的, IPA 浓度的变化会直接影响到最后的干燥效果。如果能准确的控制 IPA 的浓度, 就等于控制了影响干燥效果的最大变量。在管路设计中增加 IPA 浓度的监测, 控制制程中 IPA 的蒸发量, 将影响工艺的参数进行有效控制后, 可进一步提高干燥的效果。异丙醇 (IPA), 是一种易燃易爆的有机化合物, 其蒸气与空气可形成爆炸性混合物, 遇明火、高热能引起燃烧爆炸。IPA 爆炸极限 % (V/V) 为 2.0%—12.7%, 在使用过程中需要严格控制 IPA 浓度。通过干燥腔体内增加氧浓度的检测, 控制腔体内氧气的含量 (当氧含量低于 10% 时, IPA 不会爆炸, 但是这并不是一个绝对数值, 因为具体的爆炸阈值取决于多种

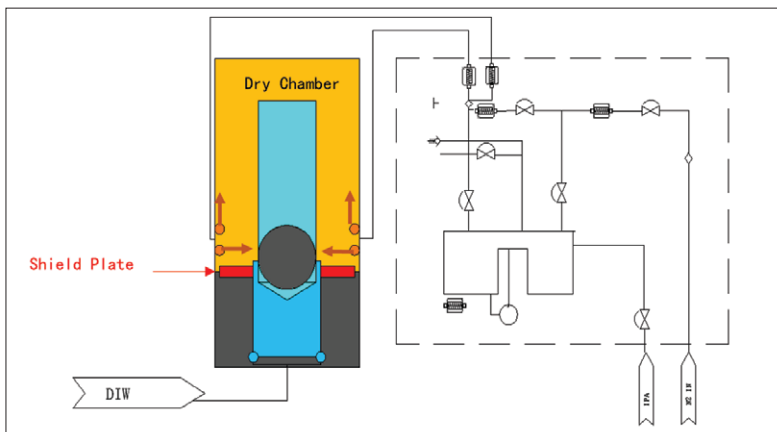


图4：干燥腔结构示意图

因素, 包括 IPA 的浓度、温度、压力等。因此, 为了确保安全, 最好将氧含量控制在更低的水平 (5%), 可以有效的规避这种风险。

半导体干燥技术是半导体制造过程中不可或缺的一环, 对于提高半导体的性能和稳定性具有重要意义。随着科技的不断进步和产业的发展, 半导体干燥技术也在不断发展和优化。未来, 随着新材料和新工艺的不断涌现, 半导体干燥技术将面临更多的挑战和机遇。相信在不断的研究和创新中, 半导体干燥技术将会得到更广泛的应用和发展。

苏州智程半导体科技股份有限公司 (ZSE) 是一家致力于为国内半导体、泛半导体行业提供可靠精良和具有竞争优势的湿制程设备的装备制造企业。ZSE 在传统的中小尺寸硅衬底、LED 的蓝宝石衬底、玻璃衬底等应用场合有着丰富的经验。随着半导体行业的蓬勃发展, 化合物半导体衬底和 12 寸硅衬底, 也已经成为衬底领域里新的增长点。ZSE 基于成熟的 ZCAB 系列槽式清洗刻蚀设备, 针对宽禁带半导体领域快速增长的市场需求, 配合碳化硅和氮化镓等材料的物理和化学特性, 发展出了涵盖宽禁带半导体器件制造湿法工艺 (热制程前清洗、金属镀膜前清洗、有机去光刻胶、场 / 栅氧化层腐蚀、铝镍腐蚀和金属剥离等) 的多种清洗 / 刻蚀设备。针对半导体化合物的制程及工艺的多样性, ZSE 开发了模块化的生产模式, 可以灵活根据客户需求配置不同的湿法工艺。CS



SEMICON[®] CHINA

FPDCHINA 跨界全球·心芯相联

SEMICON / FPD China 2024 将于2024年3月20日-22日
在上海新国际博览中心N1—N5、E7、T0-T3馆盛大举行。



扫码预注册

产品创新奖

PRODUCT INNOVATION

“新产品、新技术和新势力”的舞台

■ 第二届产品创新奖

SEMICON / FPD China 2024衍生项目——“产品创新奖”投票通道正式开启！
(扫码进入右侧小程序即刻报名投票)

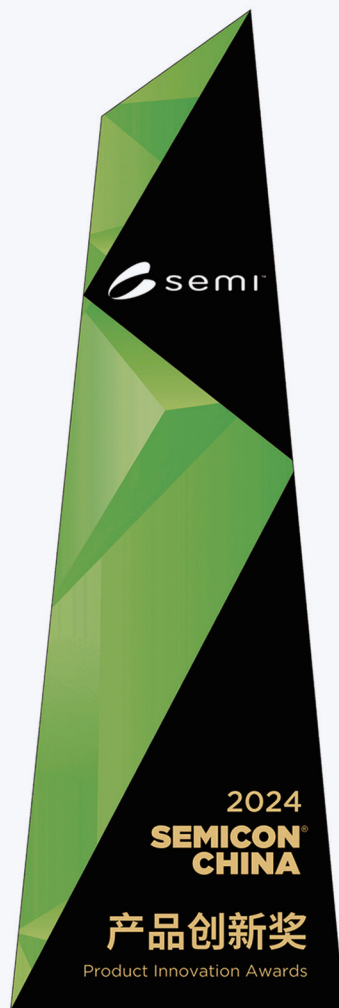


■ 投票时间

2024年1月1日-2024年3月8日 (上午10:00前截止投票)

■ 投票规则

每日10票/人，同公司每日限投1次每成功完成1次投票即可获得1次抽奖机会，中奖礼品于2024年3月20日-22日在SEMICON/FPD China 2024展会现场礼品兑换处领取。



免费自助发产品

7000⁺公司 26万⁺专业观众

利用深紫外光推进通信的发展

在为多用户间的连接提供 10 Mbit/s 速度的网络中，深紫外 LED 是核心部分

利用深紫外光进行无线光通信具有很大的吸引力：深紫外光具备不可见性，因此安全性很高；大气层的滤光作用较强，因此光源的背景噪声很低；对深紫外光的吸收不像红外光那么严重，有助于延长传输距离。

在这些优势的推动下，过去几十年来，人们对深紫外通信产生了浓厚的兴趣。直到最近，发射器和探测器方面的进步才推动了离线深紫外光通信系统的发展，而现在，据中国一团队称，已将这项技术带入了一个新时代，他们首个通信系统在深紫外光谱范围内运行，可为所有用户提供多种服务。

该团队来自南京邮电大学和苏州亮芯光电技术有限公司 (Suzhou Lighting Chip Monolithic Optoelectronics Technology)，他们提出、制造、鉴定了一种日盲全双工光通信系统，该系统采用 275 nm LED 作为光源。

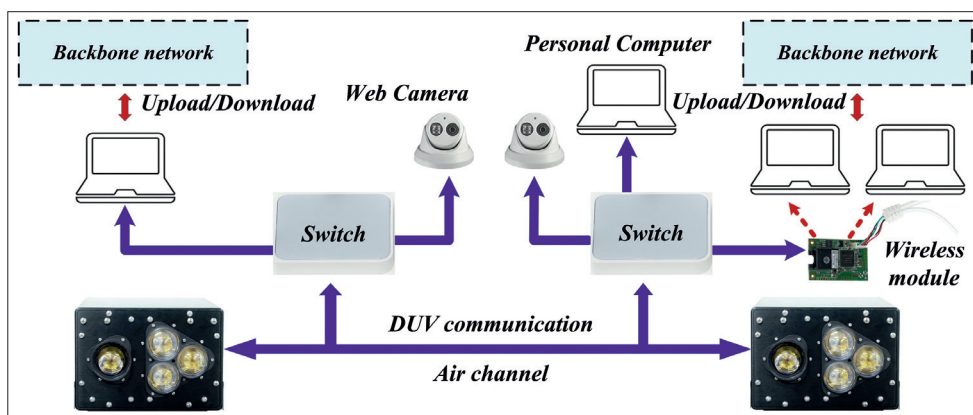
这项研究演示了阳光下的实时视频通信，建立了一个含有集成无线模块的深紫外通信网络，可为 46 m² 区域内的用户提供接入服务。

研究团队发言人王永进就职于南京邮电大学及苏州亮芯光电技术有限公司，他认为此研究的亮点之一是在阳光下以 10 Mbit/s 的速度进行无太阳噪声传输。据他描述，另一个亮点是使用了 TCP/IP，为联网提供了先决条件。

王永进及其同事在深紫外 LED 技术方面拥有专业知识，曾于 2022 年开发出一款基于 AlGaIn 的垂直深紫外 LED，其发光波长为 272 nm。不过，在此次的最新研究中，他们采用的是商用器件，构建了三个发射器单元，每个单元有四个 LED。

王永进认为：“这种设计大大增加了发射器的发射光功率，从而提高了两个深紫外收发器之间的点对点传输距离。”

研究团队采用的深紫外 LED 使用薄膜倒装芯片结构，以降低正向电压并提高光提取率，这些



深紫外光网络的结构

LED 与印刷电路板上的焊盘相连接。发射器单元由四个 LED 串联而成，驱动电压为 24 V，输出功率为 34 mW。主要发射波长为 275 nm，与此峰值相关的半宽仅为 10 nm。

为了传输数据，深紫外 LED 上使用了由关键控制调制解调器调制的晶体管—晶体管逻辑信号。

传输信号的检测由 Hamamatsu S14124-20 雪崩光电二极管实现。在 266 nm 波长下，其量子效率为 87%。

王永进及其同事已经确定，这一实时全双工通信系统的最大传输速率为 10 Mbit/s。他们在海拔 82 m 的露天阳台上进行日盲实验并实现这一传输速率时，确定双向丢包率分别为 1.28% 和 1.58%。

研究团队的下一个目标是解决深紫外光通信中的另一大问题：将高速和远距结合起来。王永进表示：“在我们未来的工作中，光电倍增管将充当核心接收设备，以大幅提高传输距离。”

他们计划解决的另一个问题是与移动无线光通信相关的对准困难。据王永进介绍，将引入自动对准功能，以提高系统的实用性。

工程师们的第三个研究方向是将他们的技术与其他通信系统相结合，如水下蓝光通信技术。这样，研究团队就可以建立一个空间—空气—海洋通信网络。☞

参考文献

Z. Qi et al. Appl. Phys. Lett. 123 161109 (2023)

实现垂直型深紫外激光器

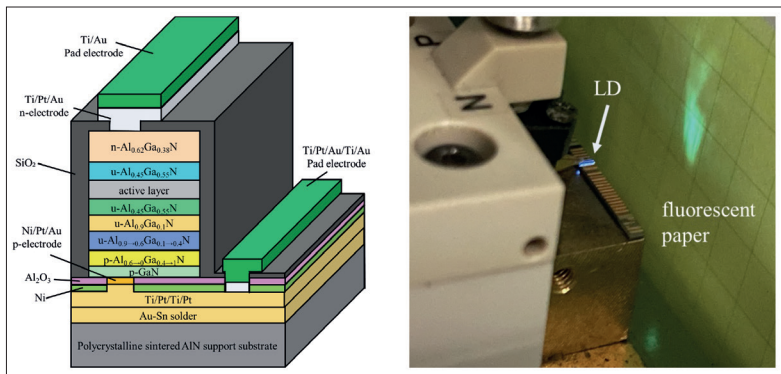
具有垂直结构的深紫外激光器有望解决电流注入相关问题

日本工程师称已在深紫外半导体激光器上取得新突破，其几何结构是垂直的，而不是水平的。

名城大学研究团队发言人 Motoaki Iwaya 表示：“这是一项关键技术，可提高基于 AlGaIn 的深紫外激光二极管的光输出功率。”

根据 Motoaki Iwaya 的说法，大多数基于 AlGaIn 的器件都生长在蓝宝石和 AlN 等半绝缘材料上，以确保晶体有较高的品质，这类器件的主要缺点是其横向几何结构限制了电流的流动。其对载流子传输的限制源于较难进行 p 型掺杂，而较难进行 p 型掺杂不利于实现可均匀传导电流的大型 p 型电极。

为了克服这一瓶颈，来自名城大学、Ushio、Seishin Trading 的团队正在研究垂直型器件结构。这种几何结构已经在基于 InGaIn 的可见光 LED 和激光二极管中取得了成功。



利用荧光涂料纸可以观察到298nm激光的发射图样。

对于基于 AlGaIn 的垂直器件，需要去除绝缘的 AlN 或蓝宝石，可通过激光剥离、电化学蚀刻或研磨抛光来完成这项工作。

Motoaki Iwaya 及其同事利用一种基于激光剥离的剥离方式，来提取大小约 1 cm^2 的材料。研究人员首先在 AlGaIn 模板上生长器件结构，并以纳米压印和电感耦合等离子体蚀刻定义的 AlN 纳米柱为基础。该团队曾用这种方法制造过基于 AlGaIn 的 UVB LED。

激光结构是在 2 英寸 c 平面蓝宝石衬底上生长的，衬底上 AlN 纳米柱的平台宽度为 400 nm，

高 300 nm，以间距 $1 \mu\text{m}$ 的三角晶格图案排列。在这些纳米柱上，工程师们使用 MOCVD 技术添加了 $5 \mu\text{m}$ 厚的未掺杂 $\text{Al}_{0.68}\text{Ga}_{0.32}\text{N}$ 模板、170 nm 厚的未掺杂 $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{N}$ 层（在剥离工艺中吸收激光）、器件异质结构（详见图）。

继续进行器件制造，将外延片分割为多个 1 cm^2 的方形，加入多晶烧结 AlN 作为结构支撑（使用 Au-Sn 焊料与异质结构键合），然后使用波长为 257 nm、光密度为 0.53 J cm^{-2} 的脉冲激光进行激光剥离。后续的加工，包括添加电极和划片，制造出了腔长在 500 nm 到 $1.2 \mu\text{m}$ 之间的激光器。

由于 p 型电极脱落，研究团队制造的激光器中只有约三分之二能够有效运行。Motoaki Iwaya 及其同事认为，产量损失是因为与支撑衬底的键合强度不够、晶体生长过程中衬底翘曲、所选的电介质薄膜和其他元件都不够理想。改进材料和工艺的选择应该能解决这些问题。

使用 50 ns 脉冲驱动腔长为 1200 nm、孔宽为 $5 \mu\text{m}$ 的激光器，电流密度为 25 kA cm^{-2} 时，可在 298.1 nm 波长处产生极其尖锐的发光峰。电流密度更大时，会产生多个发光峰，输出功率也增至数毫瓦。

Motoaki Iwaya 并未对额外发光峰的出现感到惊讶。“设计光腔时，没有考虑横向和纵向光学约束，因此该激光器是以多模振荡的。”他表示，可采用用于可见光激光二极管的腔体控制技术，进而改善模式约束。

研究团队接下来有多个目标，其中一个就是解决激光器工作电压过高的问题，这一问题源于 n 型电极的肖特基接触。“我们的目标是形成电阻较低的 n 型欧姆电极，进而降低工作电压，然后扩大器件的尺寸，进而演示单个芯片上光输出功率达到瓦级的深紫外激光二极管的运行。”

参考文献

T. Nishibayashi et al. Appl. Phys Express 16 104001 (2023)

转向单片多色 microLED 阵列的隧道结

隧道结解决了在等离子蚀刻 p 型表面上产生欧姆接触的挑战

由于采用 microLED 显示器生产中的取放方法所涉及的良率和吞吐量问题，单片技术引发了广泛关注。

在这方面，名城大学和阿卜杜拉国王科技大学 (KAUST) 的工程师之间进行合作，正在取得实质性进展。他们表示已经生产出首个基于 GaN 并通过隧道结连接的红色、绿色和蓝色 (RGB) 单片 microLED 阵列。

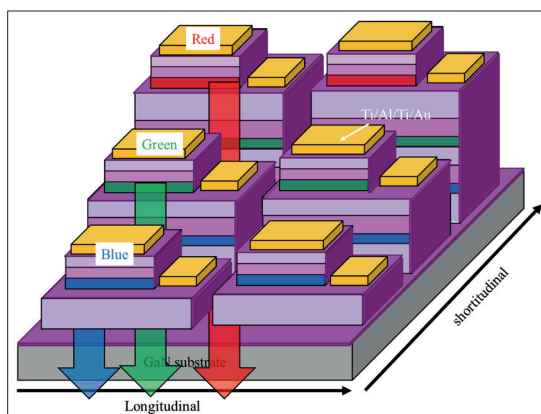
名城大学的团队发言人 Motoaki Iwaya 表示：“我们还成功地通过使用隧道结，最大限度地减少了因蚀刻损坏而导致的电压升高。我们认为这种方法对于实现采用 microLED 的单片显示器极为有效。”

名城大学的工程师们生产出一种外延结构，其中包括一个发蓝光的双量子阱区域，后面是一个隧道结，然后是一个发绿光的双量子阱区域，后面也有一个隧道结。在将该外延结构送到阿卜杜拉国王科技大学后，该团队添加了一个红光发射结构，其特点是在蓝色单量子阱顶部生长红色单量子阱，以提高发射效率。

采用多个步骤在外延片形成每英寸 330 像素的 microLED 阵列。首先通过溅射添加 ITO，然后用氯气进行感应耦合等离子体反应离子蚀刻以形成台阶结构。随后退火激活隧道结中的 p 型 GaN，然后用 SiO₂ 层钝化并通过电子束沉积添加 n 型电极。

通过该工艺生产的 microLED 器件尺寸为 73 μm × 20 μm，台阶面积为 35 μm × 15 μm。然而，Motoaki Iwaya 表示，缩小到更小的尺寸是有可能的，他透露，他们已经从边长约为 3 μm 的方形单个元件中实现了高效发光。Motoaki Iwaya 补充说，团队尚未掌握实现 3 μm 器件的技术，不过一旦掌握了可用的组装技术，他们希望能够展示出比 2000 ppi 更精细的显示器。

在 50 mA 驱动下，阵列中的蓝色、绿色和红色 microLED 产生峰值发射在 486 nm、514 nm 和 604 nm。蓝色 microLED 在 380 nm 时还产生一个额外的弱峰值，可以通过应用 AlN 覆盖层，将



由于采用了隧道结，一对 n 型电极可以驱动红色、绿色和蓝色 microLED。

n 型 AlGaIn 层的生长温度降低到蓝色 LED 有源层的生长温度来消除该峰值。另一个问题是红色 LED 的宽条纹发射，发生在 450 nm 左右，可能是由于非最佳生长条件造成的。

蓝色、绿色和红色 LED 的开启电压分别为 2.8 V、3.2 V 和 3.2 V。对于绿色和红色 LED，这些值比理想 LED 的值高 0.5 V 和 1 V。绿色 MicroLED 的发光受阻被认为是因为阳极在生长界面形成了电屏障，而红色 MicroLED 可能受到 p 型 GaN 与电极间高接触电阻以及电极面积小的影响，这些因素共同导致其发光受阻。

光学测量表明，绿色 microLED 的发射强度远远高于其蓝色和红色同类产品的发射强度。

Motoaki Iwaya 表示：“对于蓝色 microLED，如果热效应得到抑制，则可以将亮度提高约一个数量级并控制波长。”他预计红色 microLED 的改进将更难实现。他承认，生产在更长波长下发出更高亮度的红色 microLED 将是一项挑战。“不过，其亮度已经比 OLED 高出大约一个数量级，所以我认为将其提升到实用水平是有可能的。”

参考文献

T. Saito et. al. Appl. Phys. Express 16 084001 (2023)

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
华卓精科		www.u-precision.com	FC
JFS Laboratory		www.jfsc.org.cn	5
Park Systems		parksystems.cn/nx-wafer	1
RABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	7
Riber		www.riber.com	IFC
SEMICON China 2024		www.semiconchina.org	52
苏州艾斯达克		www.intelligent-stock.com	13
YMAT	宁波云德半导体材料有限公司		16
2024 慕尼黑上海光博会		www.world-of-photonics-china.com.cn	IBC

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: sunniez@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 Building,
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)
phobey@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



MESSE
MÜNCHEN

观众预登记

火热进行中

五大专题

激光器与光电子
检测和质量控制

激光智能制造
光学与光学制造

红外技术及应用



扫码免费参观

2024年3月20-22日，上海新国际博览中心

慕尼黑上海光博会

LASER World of PHOTONICS CHINA

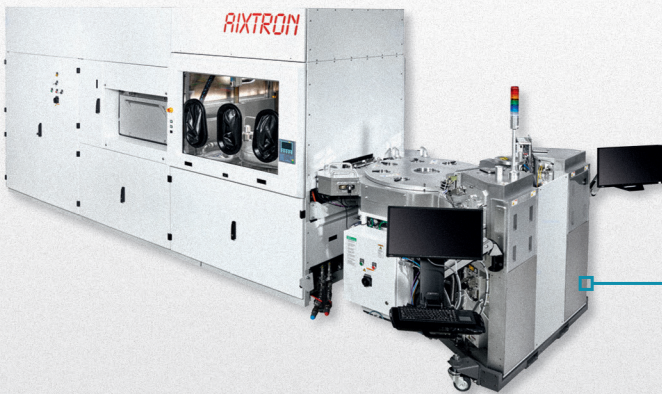
world-of-photonics-china.com.cn
world-of-photonics-china.com



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

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

End Markets/Products:

Power Electronics & Wireless communication



G10-AsP

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

End Markets/Products:

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

