

化合物半导体

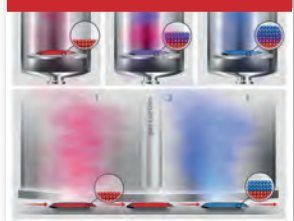
CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2023年 4/5月

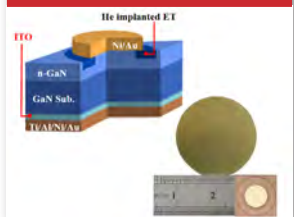
立方SiC：电力电子行业的明日冠军



降低III-V族外延成本



采用超薄ITO界面层在N极性面上获得低接触电阻率的垂直氮化镓肖特基势垒二极管



现在是把GaN IC商业化的时候了



IPrecision 华卓精科

激光退火设备

Laser Anneal Equipment



晶圆键合设备

Wafer Bonding Equipment



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



化合物半 导体钝化

ZnSe
SiN
Oxide

RIBER's **CPS**
钝化工具

超高真空阻
止氧化

激光表面钝化

台面侧壁钝化

化合物半导体钝化

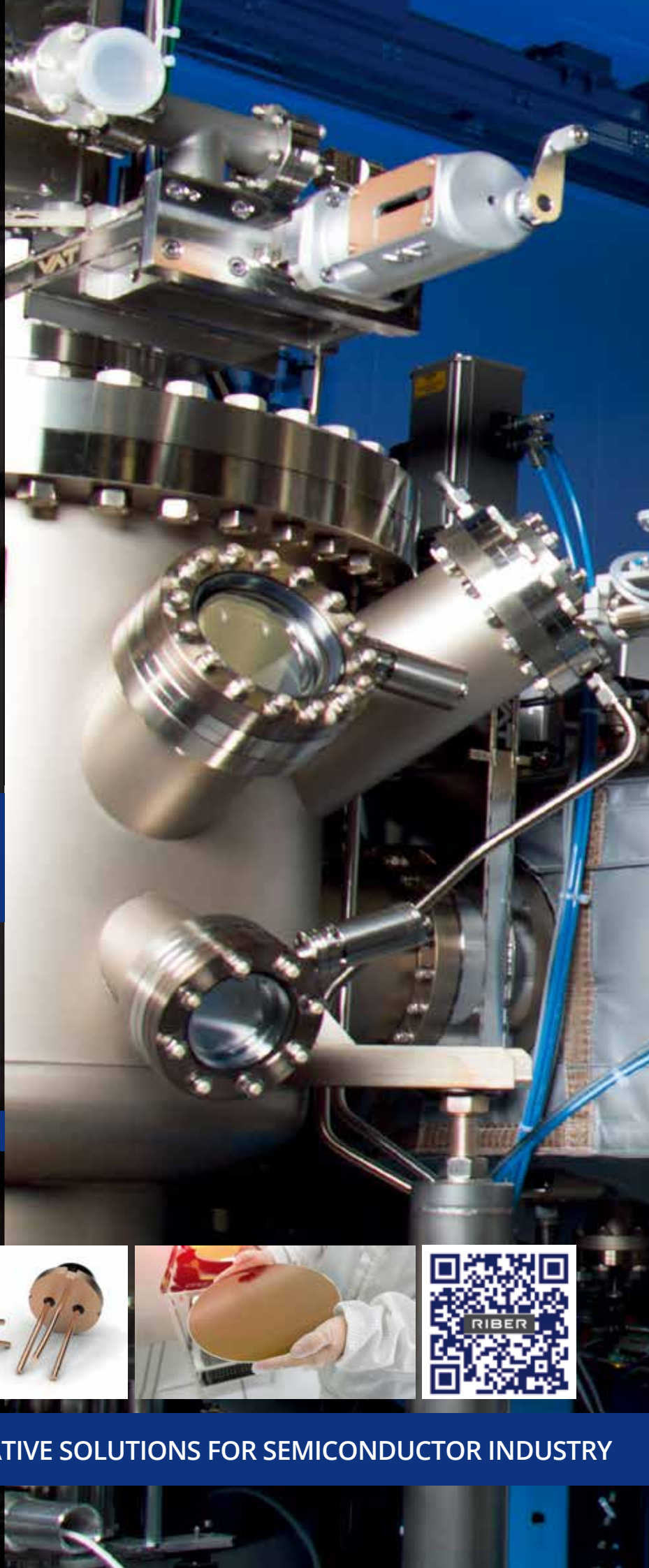
合作单位



RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com



2023 半导体先进技术 创新发展和机遇大会

5月23-24日 苏州·狮山国际会议中心

扫码 预报 报名



大会议题范围

CHIP China晶芯研讨会

- 晶圆制造工艺: 结合当地制造和产品差异化
- 先进半导体制程工艺的创新解决方案
- 半导体智能制造系统与产业链协同
- 先进封测发展进入快车道
- 当SiP遇上汽车电子
- 功率半导体市场竞争格局及产业机会

化合物半导体先进技术及应用大会

- 从硅中获取能量
- 超快通信: 6G和太比特收发器
- Micro-LED取得的进展
- VCSEL的新应用
- 超宽禁带器件: 最终解决方案?



*该信息最后更新于2023.4.13, 具体信息以会议实际为准

商务咨询

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

会务咨询

肖鑫鑫 Star Xiao
+86 (136) 6718 8375
starx@actintl.com.hk

郭媛媛 Joanna Guo
+86 (131) 0064 9536
joannag@actintl.com.hk



SiSC 公众号



CSC 公众号



封面故事 Cover Story

10 立方SiC：电力电子行业的明日冠军

Cubic SiC: Tomorrow's champion for power electronics

3C-SiC, 这是一种令人兴奋的材料, 有望成为“可靠先生”! 但这种晶型材料还有很多工作要做, 因为晶圆和外延层处于非常早期的阶段, 因此缺陷较多。然而, 最近在块状材料和硅上3C-SiC的生长方面取得了巨大进展--意大利卡塔尼亚的微电子和微系统研究所的Francesco La Via在本杂志的较早期中详细介绍了这些进展。具有立方结构和 2.36 eV 的低能带隙的 3C-SiC 比宽带隙家族的其他产品更接近硅。在将 3C-SiC 加工成器件时, 这些特性提供了许多好处。

- MIKE JENNINGS, SWANSEA 大学

编者话 Editor's Note

04 半导体材料武林外传

Our own swordsmen of Semiconductor materials

- 陆敏

业界动态 Industry

05 江苏晶工倒角机顺利通过国内碳化硅、蓝宝石及硅晶圆厂家批量验证, 已签订订单100多台

Jiangsu JingGong edge grinding machines have been successfully passed the batch verification of domestic silicon carbide, sapphire and silicon wafer manufacturers, and more than 100 orders have been signed

06 英诺赛科推出高性价比120W氮化镓方案, 采用TO封装, 效率达94.6%

Innoscence offers a cost-effective 120W gallium nitride package with an efficiency of 94.6%

06 能讯半导体微波能2.4-2.5GHz 600W氮化镓射频功率放大器

Dynax Semiconductor releases microwave energy 2.4-2.5GHz 600W gallium nitride RF power amplifier

07 Vector将为下一代数据中心实现PCSEL商业化

Vector to commercialise PCSEL for next-gen data centres

07 三菱将建设碳化硅晶圆厂

Mitsubishi to build SiC fab

08 荔园定律：消费类氮化镓快充的发展趋势

Liyuan's Law: The development trend of consumer gallium nitride fast charging

08 扬杰科技拟10亿元投建6英寸碳化硅晶圆生产线

Yangjie Electronic Technology plans to invest 1 billion yuan to build a 6-inch silicon carbide power electronic device production line

关于雅时国际商讯 (ACT International)



雅时国际商讯 (ACT International) 成立于1998年, 为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品—包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动—为跨国公司及中国企业架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/光电子、射频/微波、化合物半导体、半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约二十多万专业读者及与会者。ACT亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT总部在香港, 在北京、上海、深圳和武汉设有联络处。www.actintl.com.hk

关于《化合物半导体》

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



扫一扫
免费下载电子书

技术 Technology

- 14 采用超薄ITO界面层在N极性面上获得低接触电阻率的垂直氮化镓肖特基势垒二极管
Vertical GaN Schottky Barrier Diode With Record Low Contact Resistivity on N-Polarity Using Ultrathin ITO Interfacial Layer
- 深圳大学: 刘新科, 王灏帆, 吴钧焯, 邹革, 陈少军, 熊信柏, 钟泽;
深圳大学微纳光电子研究所: 屠宇迪;
深圳信息技术研究所: 王新中;
东莞中镓半导体有限公司: 韩甲俊, 庄文荣;
东莞南方半导体技术有限公司: 阳志超;
晶瑞(深圳)科技创新中心有限公司: 邱峰;
台湾长庚大学: 邱显钦
- 21 降低III-V族外延成本
Bringing down the cost of III-V epitaxy
- AARON PTAK, JOHN SIMON 和 KEVIN SCHULTE, NREL公司
- 28 展示MBE大批量生产的资质
Showcasing MBE's credentials for high-volume production
- 理查德·史蒂文森, 《CS Magazine》
- 32 现在是将GaN IC商业化的时候了
Now's the time to commercialise the GaN IC
- GERALD AUGUSTONI, PLINIO BAU, DOMINIQUE BERGOGNE, FLORIAN COUVIN AND RYM HAMOUMOU, WISE INTEGRATION

科技前沿 Research Review

- 36 北京大学团队实现全氮化物Mini-LED全彩显示
The Peking University team realized Full-Color Nitride Mini-LED Displays
- 37 退火AlN模板有助于远紫外线LED的发展
Annealed AlN templates aid far-UVC LEDs
- 38 MXene范德华接触在氮化镓高电子迁移率晶体管中的应用
Ti₃C₂T_x MXene van der Waals Gate Contact for GaN High Electron Mobility Transistors
- 40 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
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
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
武良文博士 台湾国立成功大学微电子工程研究所 博士、SEMI中国HB-LED标准技术委员会 核心委员
钮应喜博士 中国科学院半导体研究所, 教授级高级工程师
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
李顺峰博士 苏州半导体激光创新研究院 执行院长
佟存柱教授 中科院长春光学精密机械与物理研究所 常务副主任/研究员
陈明祥教授 华中科技大学/武汉利之达科技 教授/首席专家
周贞宏博士 BelGaN CEO
王新强教授 北京大学博雅特聘教授
程 凯博士 苏州晶湛半导体有限公司 董事长
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

华林嘉业
Hualin Jiaye

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-期C3栋

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

半导体材料武林外传

话说半导体材料武林纵横近百年，各路门派林立显威。霸主硅材料，以第一代门派雄踞武林久矣，其武功实在高强，几乎无所不能，擅长 IC “神机妙算”、光电探测“火眼金睛”、电力电子“力大拔山”、微波射频“穿墙走壁”、MEMS “微机关妙手”、光伏 PV “神功盖世”等等，尤其以 IC 及 PV 二独门绝技称霸武林，不过发光“变脸易容术”不足是他最大的软肋。该门派中因为硅材料太拔尖了，其他兄弟就几乎是处在默默无闻状态，如锗材料、硒材料等，其实从辈分上讲，硒、锗材料还要高些。虽然硅也带锗秀了秀，不过锗、硅锗联手一直都是很小众的存在。既然发光是硅的软肋，砷化镓及磷化铟这两位第二代门派的“双子座”就在发光上发展壮大起来了，后来又发现霸主硅在微波射频高频上也有难言之隐，因此这哥俩就趁虚而入，在微波射频高频上又拓展了一席之地。氮化镓和碳化硅这两位武林“才子双雄”创立了第三代门派，氮化镓因看准了第二代门派在蓝光以下短波长发光的软肋，而一战成名，而今在白光固态照明领域一统天下；碳化硅则看准了第一代在电力电子高频高功率上的吃紧而大举推进，如今在电动汽车上大出风头；同时“才子双雄”也关注到第二代在微波射频高频高功率上的乏力而强势闯入，如今在 5G 基站应用上珠联璧合，势不可挡。如今三代门派格局已基本形成，彼此地盘还在互相渗透，最终格局尚未落定。

半导体材料武林终究是个江湖，江湖特点就是变幻莫测。如今新门派频出，最具人气的莫过于第四代门派，此门派大旗很多材料都想扛起，但尚未有众望所归者，其中以氧化镓最为心急迫切，因为他兼具氮化镓的短波长光电性能及碳化硅的高频高功率性能，在第三代如日中天之际，他的出现可谓是借势而起，不飞才怪呢！并且他是直击碳化硅的命门--太贵，而揭竿而起的，不过氧化镓固然勇气可嘉，但真要练就这个金刚钻也极非易事。氮化铝本来应该属于氮化物第三代家族，不过在第三代中一直也没啥地位，故出走江湖想在第四代中另立门户，不过毕竟产业链上跟随者不多，因此在第四代中声望还在氧化镓之下。金刚石因其拥有第一代的 IV 族基因，其发展潜力巨大，虽然目前还很幼小，暂时没有能力，也没有人气扛起第四代大旗，但笔者认为第四代大旗终将且必定是金刚石的囊中之物。铋化物也时常进入第四代中来蹭热度说，‘我也想扛一扛这面大旗’，不过因能力局限至多也就是举下旗，合个影，留个念而已。

其他还有各种小门派层出不穷，如有机半导体，但主要局限在光电应用，其主打口号--就是便宜，气死你！如 OLED 柔性显示，有机无机杂化钙钛矿光伏等，前者已经在先进显示领域有名有号，后者正在撼动硅基光伏的大本营，看来小门派也不能小觑啊！在半导体材料武林中，还有更多的是一些游兵散将型材料，属于自娱自乐，尚未形成体系和门派，如低维半导体材料、氮化硼、砷化硼、铜铟镓硒和碲化镉（两种没有发展起来的 PV 老材料）、碲镉汞 / 碲锌镉（红外夜视材料）、硒化铟、氧化锌（仍然处在研究阶段的老牌宽禁带材料）等。所有这些小门派及无门派半导体材料恰恰构成了半导体材料武林的生态多样性，这是维持半导体材料武林丰富性与创造性的源泉，也是武林生态成长，生生不息的根本保障。

半导体武林该往何处去，他们的未来将在何处？江湖规则，武林争霸，华山论剑，门派划分固然需要，这便于在竞争的驱动下聚焦门派深度发展，但也必须用武林联盟来制衡，即结盟切磋，合作发展，才不至于落入单一霸主寡头的独裁恶治陷阱。当下尤以硅基联盟最为流行，如基于硅基的异质集成，硅光子集成 PIC，硅基氮化镓单片集成，硅基 micro-LED。硅老大已经带了个好头了，其他门派也当效法推行之，如碳化硅基氮化镓混合晶体管，硅与碳化硅电力电子异质集成，第二代与第三代在微波射频领域的宽频异质集成，或许将来与第四代的异质集成（尤其是金刚石基高温异质集成大有前途），这些合作将实现强强联合，创造出超级新型器件，催生新的门派，直指武林巅峰！

社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak

adonism@actintl.com.hk

主编 Editor in Chief

陆敏 Min Lu

MinL@actintl.com.hk

出版社 Publishing House

雅时国际通讯 ACT International

香港九龙 B, 13/F, Por Yen Bldg,

长沙湾青山道478号 478 Castle Peak Road,

百欣大厦 Cheung Sha Wan,

13楼B室 Kowloon, Hong Kong

Tel: (852) 2838 6298

Fax: (852) 2838 2766

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200

Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 25988573

Fax: 86 755 25988567

武汉 Wuhan

Tel: 86 27 59233884

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

© 2023 版权所有 翻印必究

江苏晶工倒角机顺利通过国内碳化硅、蓝宝石及硅晶圆厂家批量验证，已签订订单 100 多台。

江苏晶工半导体设备有限公司（以下简称“江苏晶工”）近日宣布与国内多家 8 英寸碳化硅、硅及蓝宝石龙头晶圆厂家签订采购合同，此次合作意味着倒角机正式打破日本厂家垄断现状，大力推进了设备国产化进程。江苏晶工将于 6 月 29 日在上海举办的 SEMICON CHINA 2023 展示 12 寸倒角机。（展位：T2 展馆 T2125）

近年我国半导体产业面临着技术和国际政治的双重挑战，从晶圆到高端芯片、从零部件到整机设备，国外对中国的出口管制处处制约着中国半导体行业的发展，“国产替代”迫在眉睫。在晶圆制造端，倒角是一道不可或缺的工序，需要使用倒角机对晶圆的边缘进行边角抛光，倒角机的技术难点在于倒角主轴高速精密旋转和激光圆心采集算法以及 13 轴联动运动，设备开发难度巨大，这正是造成中国倒角机市场长期被日本两大厂家占据的原因。

江苏晶工从 2008 年开始自主研发倒角机，经过 15 年的技术沉淀，成功量产 MET-5600 双工位全自动晶圆倒角机，可适用于硅、碳化硅、蓝宝石、氮化镓、磷化铟和砷化镓等晶圆倒角。通过配合精密主轴带动砂轮，对晶圆进行边缘倒角及抛光，具有高精度，高质量磨削面，极小料损，晶向定位准确，运行状态稳定等特点，基于模块化的设计，具有高度的灵活性和维护的便利性。

江苏晶工使用自主研发的图像识别传感器系统，采用了控制器和电机驱动器集成到设备本体内部的一体化设计。可以根据晶圆的材质和尺寸更改 Spindle 的直径，形状和材质可以使用伯努利吸附方式。对于不符合 SEMI 标准的缺口，缺边形状也可以提供定制化设计。能够为 Spindle 增加 Z 轴以满足对晶圆进行升降的需求。

MET-5600 倒角机由机械手、校正部、搬送部、研磨部、移出部、清洗部组成，具有丰富的可选功能，主要特点如下：

1、机械手部分中的三轴机械手、电气和机械控制程序均由江苏晶工自主研发，手臂可动范围为 340mm，平均搬运速度为 610mm/sec，最大搬运速度可达 1220mm/sec，重复性精度到达 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内。

2、校正部中的位置精度将晶圆中心控制在 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内，晶圆缺边在 ± 0.1 度以内，位置确定仅需 3 秒，真空



吸附晶圆，采用 LED 灯照明和图像识别传感器的方式对晶圆边缘进行检测。可适用于多种晶圆的新型 Aligner，全自动调整功能软件能够完成多种不同用途的校准功能。

3、研磨部中的 X、Y、Z 轴精度都在 $\pm 1\mu\text{m}$ 以内，陶瓷吸盘平面精度为 $\pm 1\mu\text{m}$ ，吸盘轴、砂轮轴径向精度均为 $\pm 1\mu\text{m}$ 。研磨损伤程度低，晶圆表面光洁度高。

江苏晶工倒角机结合国际先进技术和国产化优势，通过与国内龙头材料企业的相互合作，彻底打破国外倒角机的垄断局面。在未来，江苏晶工将持续以科技创新为导向，专注半导体技术，助力半导体设备国产化。

江苏晶工主要生产设备有：

- 自动倒角机、
- 单片清洗机、
- 轮廓仪、
- 全自动上蜡下蜡机一体机等。

联系方式：

Christine Wang 159 9656 5255

英诺赛科推出高性价比 120W 氮化镓方案，采用 TO 封装，效率达 94.6%

随着终端产品对氮化镓的加速应用，氮化镓市场规模进一步扩大。相较于硅，氮化镓高频率、小体积的优势不言而喻，但价格却仍然让许多方案厂商犹豫不决。英诺赛科坐拥全球最大的 8 英寸硅基氮化镓晶圆制造基地，规模化量产使氮化镓成本在行业中具备较强的竞争优势。

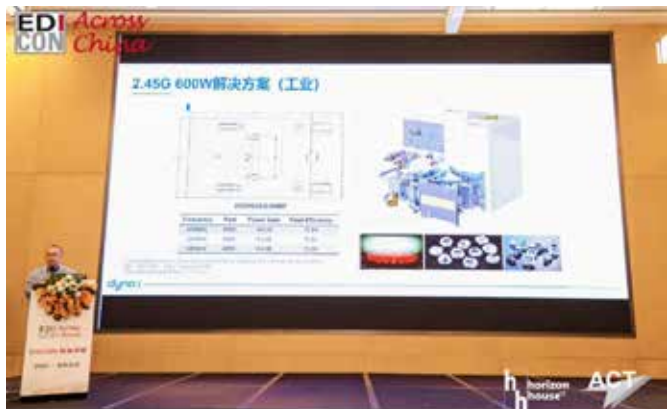
近期还推出了采用 TO252 / TO220 封装的氮化镓新品，并将其应用在 120W 双面板适配器方案中，将高效率、高功率密度和高性价比三项特性发挥到极致。借助于 InnoGaN 平面结构的特点，TO252 封装散热 PAD 可连接大面积散热铜箔，TO 220 封装散热片加装更加简单；相比 Si MOS，TO 封装的 GaN 能够使 Cpe 减小 5/6，共模噪音减小 5/6；InnoGaN TO 封装的驱动回路 G-S 与功率回路 D-S 天然解耦，能将 layout 设计达到更优。在相同功率方案的测试对比下，采用 TO 封装的 INN700TJ240A 温升表现比 Si MOS 更优，最大温度收益可达到 18℃。方案优势：1. 无 PFC 架构，输入低压器件损耗大，充分利用 GaN Source 接散热 PAD 结



构及优化系统设计，使得 Demo 功率密度和效率达到业界最优，输入 90Vac 带满载 6 分钟工况下温升问题也得以解决；2. 开拓了 E-mode GaN TO 封装参考设计，将效率和功率密度发挥到极致，为客户提供了应用指导。采用 TO 封装的氮化镓 120W 大功率方案为手机充电厂商提供了高效率、小体积、高性价比的参考设计，是手机、平板、笔记本电脑等消费类电子产品快充的绝佳选择。CS

能讯半导体微波能 2.4-2.5GHz 600W 氮化镓射频功率放大器

近日，能讯半导体受邀参展 2022 EDICON 跨越中国·深圳大会，活动现场能讯半导体重磅推出基于 GaN 的射频微波能 2.4-2.5GHz 600W 产品解决方案。过去十余年来，固态射频微波能 (Solid-state RF Energy) 技术创新正为烹饪、CVD、医疗、高能物理、半导体、照明、汽车点火等众多应用带来巨大变革。相较于传统的磁控管方案，GaN 以优越的特性支撑实现应用端的小型化和系统控制精准性与稳定性的



提高，而高效高可靠性的表现也为整机系统带来更长的运行寿命以及更可观的节能效应。能讯半导体致力于为行业客户提供领先的 GaN 方案和技术支持，全力与合作伙伴共同打造基于 GaN 技术的 Solid-state RF Energy 生态环境。

基于 2022 年已发布的 DOD1H2425-320EF (2.4-2.5G 300W)，能讯半导体继续推出新一代的 DOD1H2425-600EF (2.4-2.5G 600W)，实现高效、高功率和高可靠性的完美组合，进一步为合作伙伴在技术和成本上提供更具竞争力的解决方案。DOD1H2425-320EF、DOD1H2425-600EF 在 200℃ 结温下，其 MTTF 达到 10⁷ 小时，10 倍于正常标准下的 10⁶ 小时，极大的提升了系统长期运行可靠性。依托于自有晶圆厂以及完整的设计与封测能力，能讯半导体将继续发挥综合优势，持续推出包括 2.4-2.5G 更高功率、低频 (Sub-1.5GHz) 高效超高功率系列在内的新一代产品。CS



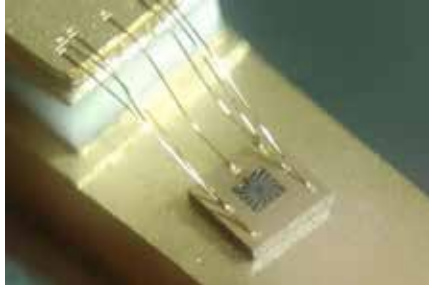
DOD1H2425-320EF



DOD1H2425-600EF

Vector 将为下一代数据中心实现 PCSEL 商业化

Vector Photonics 将开始商业化非制冷、1 瓦、1310nm、CW PCSEL。数据通信 PCSEL 适用于下一代云数据中心应用中的互连、硅光子学和 CPO。与现有的 DFB 技术相比，1 瓦激光器的光功率显著增加，具有数不清的制造和节能优势。1 瓦激光器建立在 Vector Photonics 现有的 PCSEL 商业化工作之上。Vector Photonics 首席技术官 Richard Taylor 表示：“非制冷的 1 瓦 PCSEL 是云数据通信应用的游戏规则改变者。目前，下一代数据中心互连必须提供 800Gbps，在未来十年内增加到 1.6 Tbps，然后增加到 3.2 Tbps。1 瓦 PCSEL 实现了这一发展，与 DFB 技术相比，所需的激光器数量大大减少。”“互连，硅光子学芯片和 CPO 系



统，在使用它们的地方，变得更容易制造，有可能提高产量和可靠性。此外，1 瓦 PCSEL 具有一个对称的远场，需要较少的运行功率即可实现必要的性能。”“1 瓦 PCSEL 的全部影响尚未被量化。然而，这些高功率激光器将改变数据通信芯片和系统的整个架构。此外，显著的好处包括降低功耗、热量、延迟和制造成本。”

三菱将建设碳化硅晶圆厂

三菱电机宣布计划建立一个新的晶圆工厂，以增加 SiC 功率半导体的产量。该公司正在应对电动汽车对 SiC 芯片日益增长的需求，以及需要低能量损耗、高温操作或高速开关的应用市场的扩大。这一宣布意味着该公司现在将在截至 2026 年 3 月的五年内投资约 20 亿美元 (2600 亿日元)，这是其之前宣布的投资计划的两倍。7.56 亿美元 (1000 亿日元) 将用于建设



一个新的 8 英寸 SiC 晶圆厂并加强相关生产设施。新工厂将纳入熊本县 (Kumamoto Prefecture) 紫水 (Shisui) 区的一家工厂，生产大直径 8 英寸 SiC 晶圆，引进具有最先进能源效率和高水平自动化生产效率的洁净室。此外，该公司还将加强其 6 英寸 SiC 晶圆的生产设施，以满足该领域不断增长的需求。三菱还将投资约 7500 万美元 (100 亿日元) 建设一个新工厂，该工厂将整合目前分散在福冈地区的现有业务，用于功率半导体的组装和检测。该公司表示，设计、开发和生产技术验证的整合将大大增强公司的开发能力，并有助于及时批量生产以响应市场需求。剩余的 1.5 亿美元 (200 亿日元) 全部是新投资，将用于设备改进、环境安排和相关运营。



临时键合设备



半自动机型
Semi-Auto Module

产品特点

- 适用于 2"-12" 晶圆，衬底等
- 高温键合设计适用于多种键合材料，包含各种天然树脂与人造树脂、液态蜡与胶水等
- 优异的键合 TTV < 3.0um
- 临时键合精度可达 < 25um，永久键合精度可达 < 2.0um
- 主要应用于先进封装，如 WLP、2.5D 封装 (Interposer)，3D 封装 (TSV)，功率半导体器件 (如 GaN、SiC 等)，MEMS 等
- 量产型全自动整合设备 (整合 coater 及 hot Plate)

热解键合设备



全自动机型
Auto Module
整合 EFEM 及 Coater System

产品特点

- 适用于 2"-8" 晶圆，衬底等
- 设计适用于多种键合材料热滑移，包括天然树脂与人造树脂、液态蜡与胶水等
- 破片率：自动机 (< 1/10000)
- 可根据客户需求提供定制化服务
- 主要应用于先进封装，如 WLP、2.5D 封装 (Interposer)，3D 封装 (TSV)，功率半导体器件 (如 GaN、SiC 等)，MEMS 等
- 量产型全自动整合设备 (整合 cleaner，可选配 SiC carrier 吸附平台)

苏州芯睿科技有限公司

地址：江苏省苏州市工业园区杏林街78号
新兴工业坊4号厂房1楼2楼A单元
电话：0512-69881908
邮箱：xinrui@iwiseetec.com
网址：www.iwiseetec.com



微信公众号

荔园定律：消费类氮化镓快充的发展趋势

华南师范大学、红与蓝微电子（上海）有限公司、深圳市信思科技有限公司、国家第三代半导体技术创新中心深圳综合平台、浙江大学、深圳大学的研究人员对近五年消费类氮化镓快充产品进行了调研，并且发现了规律性趋势。根据产品3C报告得到氮化镓快充产品参数（见图1）。可以看到随着产品的深入研究，各大品牌的氮化镓快充输出功率也是逐年上升。2019年氮化镓快充产品技术不成熟，市场上普遍的快充功率在20~30W左右，且体积较大，这使得氮化镓快

充的功率密度普遍在1W/cm³以下。而2021年市场技术成熟，利用氮化镓器件的特性成功缩小快充体积，使市场氮化镓快充功率密度普遍超越1W/cm³。随后各大品牌氮化镓快充研发竞争激烈，其中Realme在2023年发布240W氮化镓快充更是只有102cm³，成功使功率密度达到2.36W/cm³成为市场上功率密度最大的氮化镓快充。通过整理近五年的数据，可以发现一个规律性趋势“荔园定律”：① 每间隔9~12个月商用氮化镓快充的输出功率提升60%。② 平均每间隔6~9个月商用氮化镓快充的输出功率密度提高30%。③ 平均每间隔20~24个月商用氮化镓快充的输出功率密度提高50%。这个规律性的趋势我称之为“荔园定律”。之所以叫这个名字，是因为研究人员汇聚在深圳大学荔枝校园的荔枝树下，闻着3月的荔枝花香，探讨科技发展，一起对消费类氮化镓快充产品的发展趋势进行了讨论并得出以上三点规律。

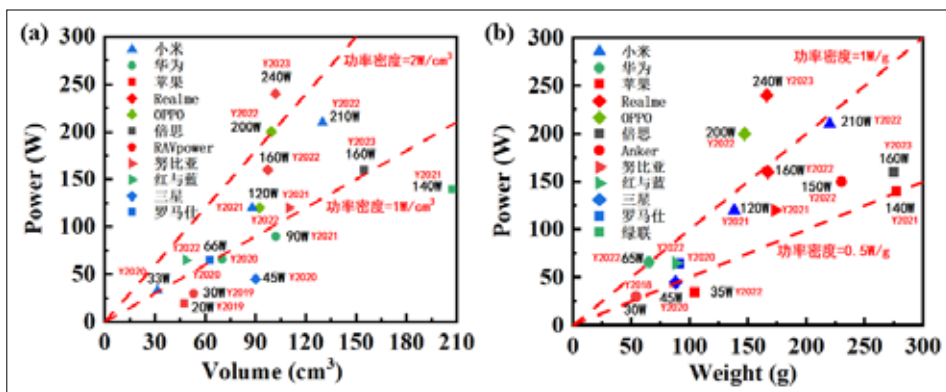


图1: (a) 氮化镓快充输出功率—产品体积图; (b) 氮化镓快充输出功率—产品质量图。

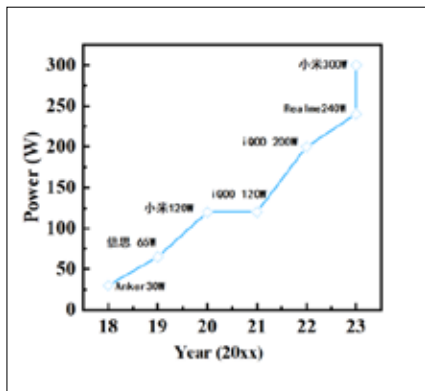


图2: 近五年氮化镓快充功率迅速增长。

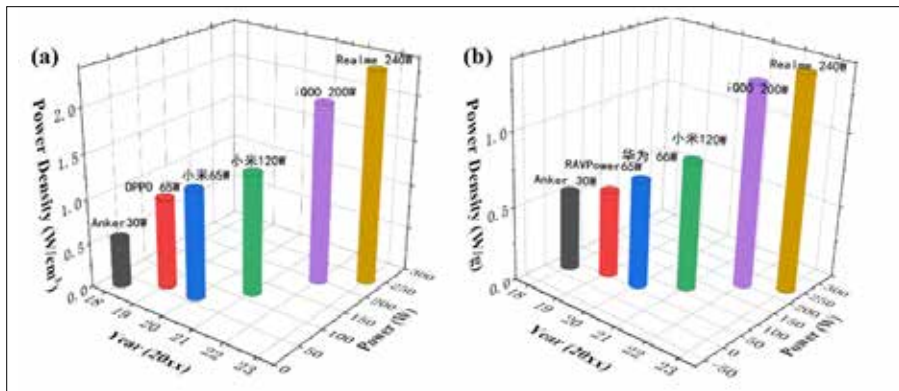


图3: (a) 氮化镓快充产品功率密度近五年发展; (b) 功率密度 (质量) 增长情况。

扬杰科技拟 10 亿元投建 6 英寸碳化硅晶圆生产线

大半导体产业网消息，扬杰科技4月20日发布晚间公告称，因战略发展需要，公司与扬州市邗江区人民政府签署了《6英寸碳化硅晶圆项目入园框架合同》，拟在扬州市邗江区人民政府辖区投资新建6英寸碳化硅晶圆生产线项目，总投资约10亿元。公告显示，项目总投资约10亿元，分两期实施建设，项目全部建成投产后，形成碳化硅6英寸晶圆产能5000片/月。扬杰科技表示，碳化硅与传统的硅半导体相比，具有宽禁带、高饱和漂移速度、高临界击穿电场等

突出优点，在汽车、工业、IT及消费电子等多个领域的应用中有替代硅基器件的潜力，未来前景广阔。公司已涉足碳化硅产品研发设计多年，形成了多项专利等知识产权，并成功开发并向市场推出相关产品。此次合作框架合同实施落地后，可加速提升公司碳化硅产品的技术水平和实现产品升级，有助于将公司打造成为碳化硅领域具有行业影响力的上市公司，推动公司积极转型升级向高端制造业迈进，为功率器件国产化贡献力量。

聚焦光电技术在 半导体加工中的应用

展品范围

激光切割/打标/钻孔/焊接/清洗等加工设备、激光器、光学镜头及摄像模组、自动化及高端智能设备、机器视觉系统及应用、光学镀膜技术及设备、光电传感器、太赫兹光谱技术等；

同期展会

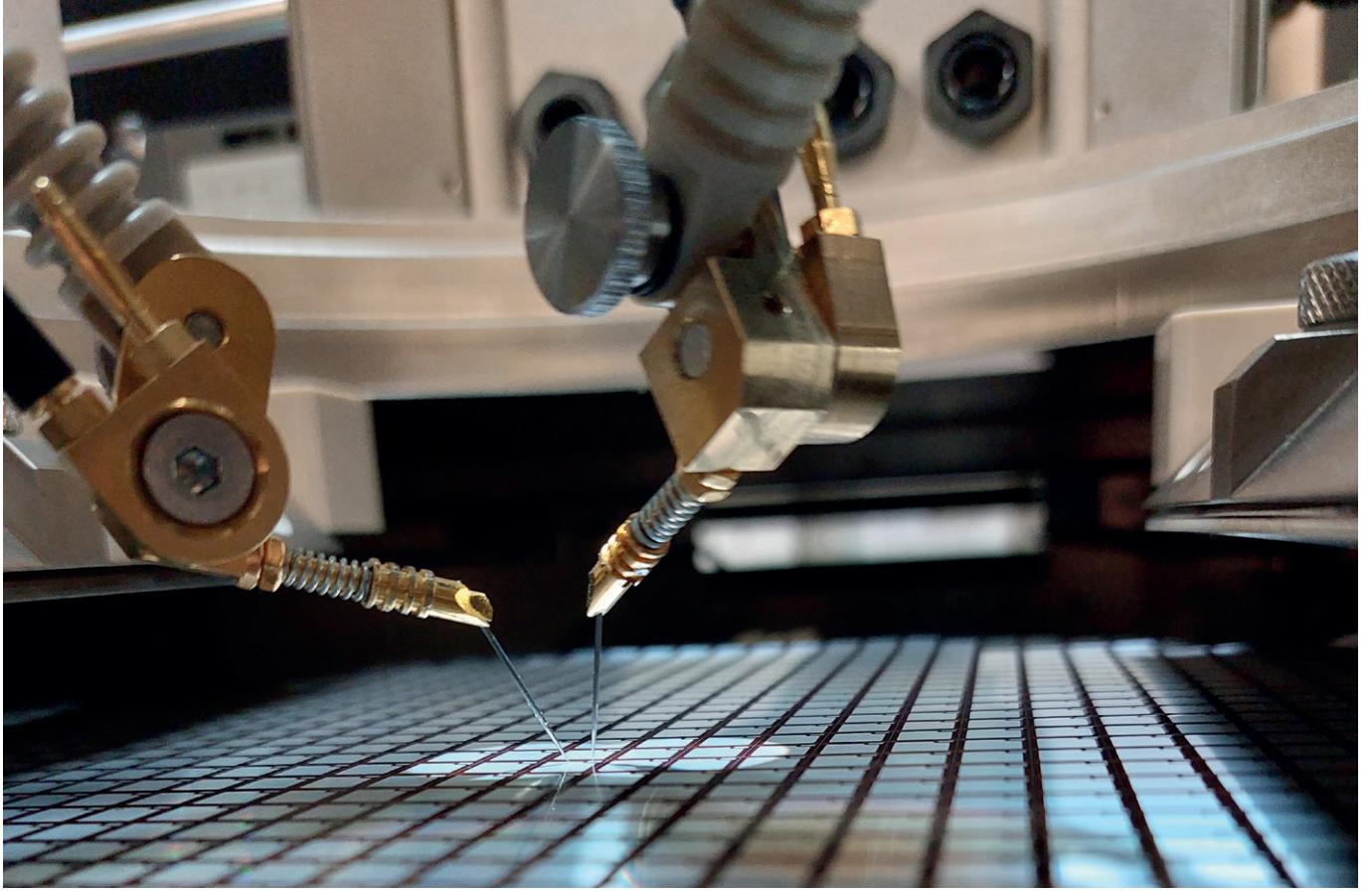


第24届中国国际光电博览会

240,000M²展示面积 | 100,000+专业观众 | 3,000+参展企业



扫码登记免费参观



立方 SiC : 电力电子行业的明日冠军

立方 SiC 具有与硅相同的晶体结构，同时具有更宽的带隙和高可靠性的潜力，是什么能阻止立方 SiC 在未来的电力电子行业中发挥重要作用呢？

作者：MIKE JENNINGS, SWANSEA 大学

特斯拉的崛起在许多方面都受到欢迎。它没有内燃机，有助于减少碳排放；由于电池供电，它相对安静；而且，对于化合物半导体行业的人来说更亲切，正是特斯拉早期采用 SiC 电力电子器件，推动了这些器件的销售。

特斯拉领先的地方，其它电动汽车制造商肯定会效仿。他们也将在其动力系统中使用 SiC 器件，从而扩大这些宽带隙器件的销售。由于需求如此强劲，这些器件的四个主要制造商 --Wolfspeed、Infineon、STMicroelectronics 和 Onsemi-- 预测到这十年的中期，这类器件的年销

售额将达到数十亿美元。鉴于 SiC 功率器件将获得巨大成功，人们会认为它们没有任何缺陷。但实际情况并非如此。事实上，它存在着与可靠性有关的重大问题，主要集中在栅极氧化物上。

SiC 功率器件在电动汽车中的主要作用是将电池的输出生（通常为 400V 或 800 V 直流）转换为驱动电机的交流形式—产生高达 数百 kW 左右的功率。电压要求没有问题，因为它在大多数传统 4H-SiC 器件的范围内，650 V 至 1.7 kV。

由于 4H-SiC 晶体管与硅的同类产品一样，是基于垂直 MOSFET 设计的，因此围绕着栅极氧

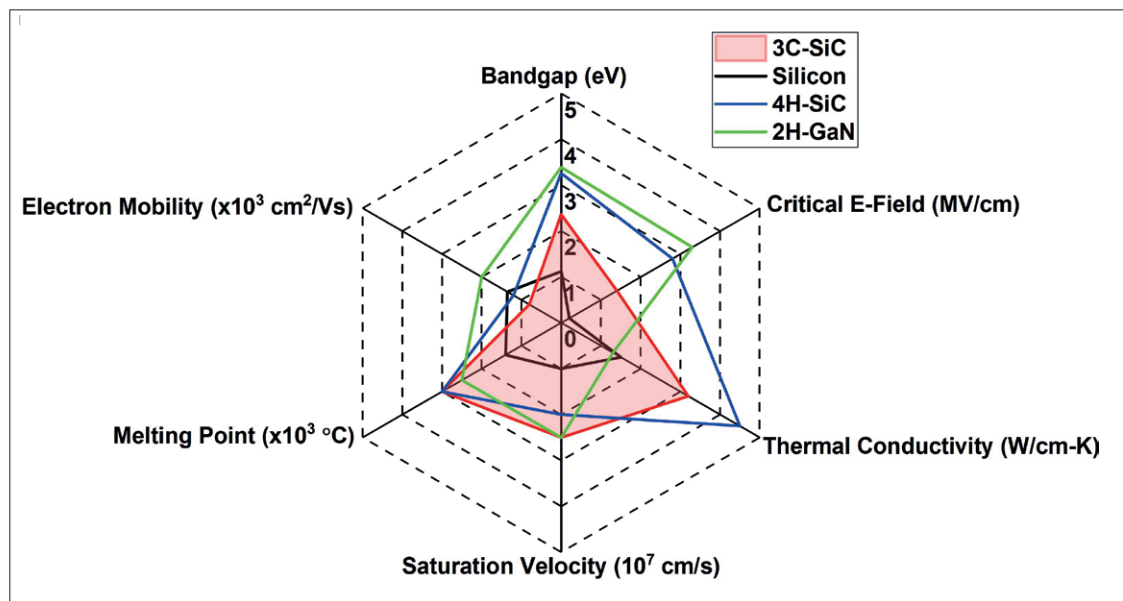


图1: 立方SiC 与硅和其他商用宽带隙材料的电气和材料特性雷达图。此图表显示了电力电子应用的主要半导体材料参数。

化物存在一些问题。在这种结构下，栅极氧化物在高温下的失效是一个主要的弱点。这并不奇怪，因为这种形式的 MOSFET 中使用的栅极氧化物要比硅的同类产品薄得多，以保持可接受的低阈值电压。不幸的是，这种较薄的氧化物会产生两个不良后果：氧化物-半导体界面的重要性增加，以及氧化物内固有的电场，通常是 SiC 表面电场的 2.5 倍。

这两个问题在沟槽 MOSFET 架构中都特别麻烦，因为它们会因沟槽拐角而加剧。为了解决这个问题，那些设计最新沟槽 MOSFET 器件的人员降低了它们的阻断电压能力，以保护脆弱的栅极氧化物。

解决与可靠性相关的问题的另一种选择是效仿 GaN 器件所采用的方法。采取这种策略使一些设计者主张采用级联共封装的器件，例如将 4H-SiC JFET 与硅 MOSFET 配对。但这种组合会限制其性能，尤其是在高温下。

立方 SiC：长寿堡垒

进入立方 SiC，也称为 3C-SiC，这是一种令人兴奋的材料，有望成为“可靠先生”！但这种晶型材料还有很多工作要做，因为晶圆和外延层处于非常早期的阶段，因此缺陷较多。然而，最近在块状材料和硅上 3C-SiC 的生长方面取得了巨大进展 -- 意大利卡塔尼亚的微电子和微系统研究所的 Francesco La Via 在本杂志的较早期中详细介绍了这些进展。

你可能想知道为什么 3C-SiC 如此令人兴奋。

毕竟，与 GaN 和 4H-SiC 相比，它具有较低的带隙、较小的临界电场、适中的电子迁移率和较低的热导率（见图 1）。当然，这表明 3C-SiC 不如这两种宽带隙巨头 GaN 和 4H-SiC。

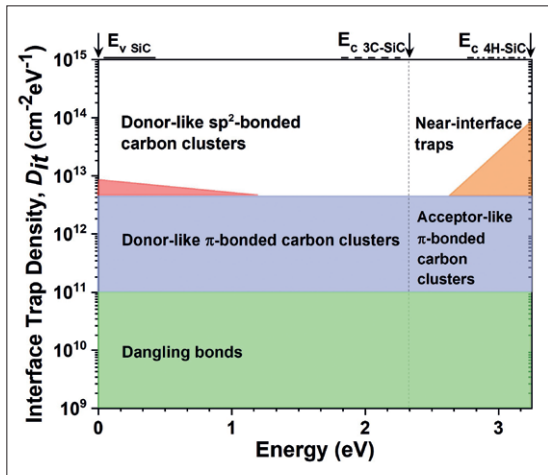
虽然所有这些指标都是有效的，但它们忽略了半导体材料特性列表中未涵盖的两个关键因素：加工工艺，包括界面质量及可靠性，这可能涉及金属或绝缘体。这些因素显然很重要。毕竟，如果宽带隙材料不能用于制造器件或只能持续一个开关周期的器件，那么它有什么用呢。

当然，这些担忧不适用于商用的 4H-SiC 和 GaN——但是这些材料的加工，尤其是 GaN，与传统硅的加工完全不同且更具挑战性。相比之下，具有立方结构和 2.36 eV 的低能带隙的 3C-SiC 比宽带隙家族的其他产品更接近硅。在将 3C-SiC 加工成器件时，这些特性提供了许多好处。

让我们首先考虑 MOS 界面。电力电子应用工程师往往需要高阻抗栅极，例如 MOS 栅极。事实证明，这对 4H-SiC 器件的开发者来说，这是难以实现的，他们在 30 年的时间里一直在努力解决 MOS 界面不佳的问题 -- 即使在今天，这仍然是它的致命弱点。在



图2: 立方 (3C-) SiC 和商用 (4H-) SiC 的界面陷阱密度比较图。由于不存在 4H 系统中普遍存在的近界面陷阱, 3C-SiC 显示出有利的 (或大大降低的) 陷阱密度。改编自: R. Esteve, "Fabrication and Characterization of 3C and 4H-SiC MOSFETs," Doctoral thesis, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 2011.



4H-SiC MOSFET 的早期, 沟道迁移率非常低——通常只有 $5 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ——以至于沟道电阻占器件总电阻的 90% 以上。从电力电子转换器的使用情况来看, 这是一个不可接受的高值, 也是不可行的。尽管如前所述, 4H-SiC 中的低迁移率现已得到控制, 但仍存在与沟槽结构迁移相关的问题, 主要是高温可靠性问题。

对 MOS 界面产生不利影响的陷阱主要有三种类型: 近界面陷阱; 受主状碳簇; 以及发生在界面上的悬挂键 (有关陷阱类型的说明, 以及 4H-SiC 和 3C-SiC MOS 界面的对比, 请参见图 2)。对于 4H-SiC, 导带边缘被所有类型的陷阱机制所淹没, 包括最主要的近界面陷阱。与此形成鲜明对比的是, 3C-SiC 不受这些近界面陷阱的影响。当然, 它仍然受到类受主碳簇的阻碍, 其影响远大于悬挂键。这三种形式的陷阱的一个关键结果是, 通常需要采用氢退火的方法来钝化 SiC MOS 界面。

从所有这些考虑中得出的重要结论是什么? 这意味着, 就 3C-SiC MOSFET 而言, 实现更高的沟道迁移率并因此降低导通电阻所需的努力要少得多。事实上, 开发 3C-SiC MOSFET 的努力已经

图 4: 不同电场下 3C-SiC MOS 电容器的故障分布 (a) 和相应的 Weibull 分布 (b), 摘自: F. Li et al. Materials 14 (2021)。在电场值为 $6 - 9 \text{ MV cm}^{-1}$ 时, 进行了随时间变化的电介质击穿分析。当电场强度达到 8.5 MV cm^{-1} 时, 故障率稳步增加, 超过该值时, 故障数迅速增加至 100%。

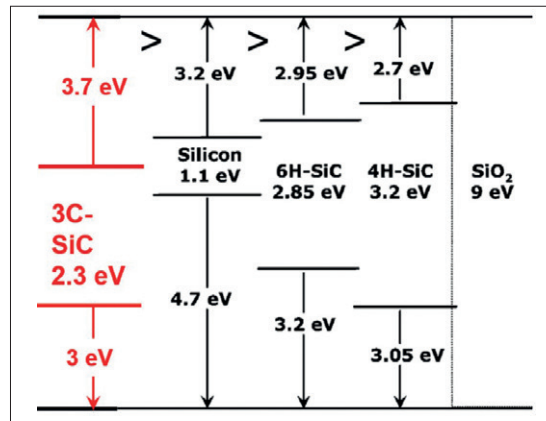
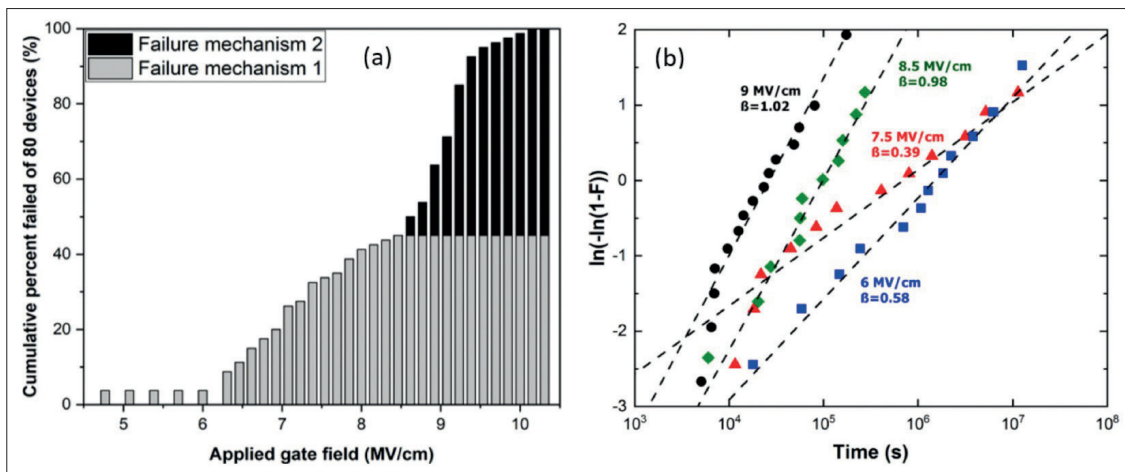


图3: 与立方 (3C) SiC 相比, 其他宽带隙材料的半导体 SiO_2 带偏移, 摘自: F. Li et al. Materials 14 (2021)

取得成果, 其迁移率超过 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。值得注意的是, 除了硅基 3C-SiC 的这些结果外, 还有一些与块状 3C-SiC 相关的研究表明, p-n 二极管的性能和商业可行性有所提高。相对于硅基 3C-SiC 的异质外延, 块状 3C-SiC 的潜在优点包括易于处理离子注入和金属化的加工技术。此外, 还有希望通过调整层厚来缩放电压, 从商业角度来看, 这是一个有吸引力的特性。这一特性在超过 650 V 的电压下尤其受欢迎, 超过 650 V 电压时, 相互竞争的器件有: 硅 MOSFET、硅超级结器件、硅 IGBT、4H-SiC MOSFET 和 GaN HEMT。

在 Swansea 大学, 我们团队正在努力证明这些新材料可用于汽车应用。众所周知, 汽车和航空航天行业坚持最高的可靠性标准, 同时将成本降到最低。这意味着要在高温下测试栅极氧化物, 并在芯片级进行加速寿命分析。物理方面的考虑表明, 3C-SiC 可以提供出色的可靠性。它与 SiO_2 栅极氧化物的带状偏移为 3.7 eV, 该值远大于硅和 4H-SiC (见图 3)。这是一项重要的优势, 因为对于给定的电介质临界电场, 通过该氧化物的隧道电流与带偏移呈指数关系, 带偏移有时称为

势垒高度。该优势的一个结果是，对于进入栅极驱动电路的相同漏电流，3C-SiC MOS 系统内的电场可以比 4H-SiC 高两到三倍。因此，3C-SiC 沟槽功率 MOSFET 的降额要求远没有 4H-SiC 同类产品严格。

3C-SiC MOS 界面还保证了高水平的栅氧化层可靠性和长寿命。Swansea 大学与华威大学合作，对具有基于 N_2O 的栅极氧化工艺形成的界面结构进行了测量，显示出稳定的漏电流和大约 8 MV/cm 的临界电场强度，这是观察到的 3C-SiC MOS 结构的最高值。即使是在具有固有高缺陷密度的外延材料上形成的初步 3C-SiC MOS 电容，也能提供 8

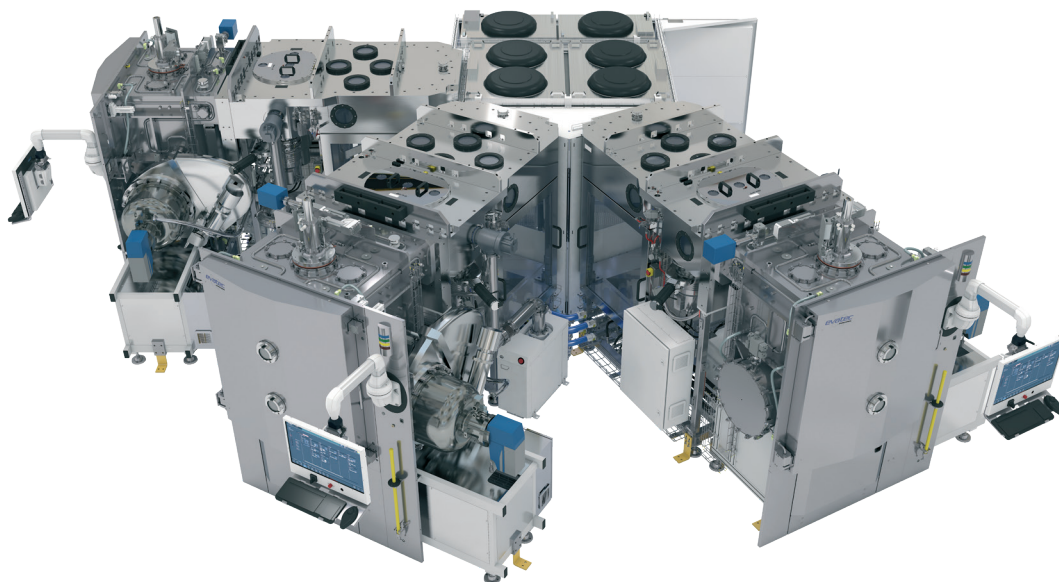
MV/cm 的击穿场强，接近 4H-SiC 的典型值 9 - 11 MV/cm。

我们团队最近对 3C-SiC MOS 电容进行了时间依赖性介电击穿分析（参见图 4）。我们将它们的低故障归因于 3C-SiC 衬底中的晶体缺陷，这会影局部材料性能。对于高场故障——即超过 8.5 MV/cm 的场强——故障是由于高临界电场导致的泄漏电流增加或冲击电离引起的。

这项工作的主要结论是，即使在超过 8.5 MV/cm 的高电场下，3C-SiC 的加速斜率仍然很低。这些斜率比 4H-SiC 低一个数量级，表明外在缺陷仍然是总体上的主要失效机制。CS

扩展阅读

- F. Blaabjerg and S. Round. "Power Electronics: Revolutionizing the world's future energy systems"
- <https://www.hitachienergy.com/uk-ie/en/news/perspectives/2021/08/power-electronicsrevolutionizing-the-world-s-future-energy-systems>.
- "Automotive Council UK and Advanced Propulsion Centre UK Roadmap 2020 Power Electronics," https://www.apcuk.co.uk/app/uploads/2021/09/https___www.apcuk_co_uk_app_uploads_2020_11_Technology-Roadmap-Power-Electronics.pdf
- F. Iannuzzo. "Reliability Challenges of Automotive-grade Silicon Carbide Power MOSFETs," <https://eepower.com/technical-articles/reliability-challenges-of-automotive-grade-silicon-carbide-powermosfets/#>.
- J. O. Gonzalez et al. "Performance and Reliability Review of 650 V and 900 V Silicon and SiC Devices: MOSFETs, Cascode JFETs and IGBTs," IEEE Trans. Ind. Electron. 67 7375 (2020)
- F. Li et al. "Status and Prospects of Cubic Silicon Carbide Power Electronics Device Technology," Materials 14 (2021)



MULTI BAK – 颠覆传统的半导体蒸镀科技

想象一个全自动机台，它可以使您的每个工艺腔的产量翻倍¹，跟踪每一个晶圆的工艺，并将您在 6 或 8 寸衬底上的量产应用使用成本 CoO 降低多达 40%。MULTI BAK 将 Evatec 在蒸发台方面成熟的专业知识，用于消除昂贵手动上片问题的自动化，以及高性能真空预抽腔结合在一起，组成最多 4 个工艺腔的集群式机台。现在就联系我们，了解如何彻底改变包括下一代无线通信技术等工艺的产能和良率。

先进封装 · 半导体 · 光电 · 光学 · THE THIN FILM POWERHOUSE

www.evatecnet.com/cn

Footnote: 实际产量依据工艺决定

采用超薄 ITO 界面层在 N 极性面上获得低接触电阻率的垂直氮化镓肖特基势垒二极管

摘要—本文首次研究了一种基于氧化铟锡 (ITO) /Ti/Al/Ni/Au 的高性能氮化镓肖特基势垒二极管 (SBD) 的欧姆接触结构。由于超薄的氧化铟锡 (ITO) 界面层, 可以减轻金属-半导体接触界面中的费米钉扎 (FLP) 效应, 在相同的测试条件下, N 极性面上的比接触电阻率 (ρ_c) 从 3.32×10^{-3} 降低到 $7.36 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, 器件的导通电阻 ($R_{ON,sp}$) 从 3.14 降低到 $1.17 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。采用氮离子注入技术, 实现了高击穿电压 V_{BR} 为 1100 V, 低开启电压 V_{ON} 为 0.63 V, 品质因子 ($V_{BR}^2/R_{ON,sp}$) 为 $1.04 \text{ GW}/\text{cm}^2$ 。本研究中制备的带有 ITO 界面层的垂直 GaN SBD 在报道的具有指定阳极尺寸的 GaN-GaN SBD 中达到了最低的 ρ_c 。

关键词: GaN-GaN, 垂直SBD, 氧化铟锡, 界面层, 欧姆接触, N极性面。

深圳大学: 刘新科, 王灏帆, 吴钧烨, 邹苹, 陈少军, 熊信柏, 钟泽
 深圳大学微纳光子研究所: 屠宇迪
 深圳信息技术研究所: 王新中
 东莞中镓半导体有限公司: 韩甲俊, 庄文荣
 东莞南方半导体技术有限公司: 阳志超
 晶瑞(深圳)科技创新中心有限公司: 邱峰
 台湾长庚大学: 邱显钦

引言

GaN 因其宽带隙、高击穿电压、高热导率、高电子饱和速度和电子迁移率而被广泛应用于射频和功率电子器件。随着 GaN 材料生长技术不断发展, GaN 器件性能也在不断提高。在电力电子设备中, 垂直 GaN SBD 由于低晶格失配和热膨胀失配、表面缺陷密度较低、器件面积较小而受到越来越多的关注。对于垂直功率二极管, 高击穿电压 (V_{BR}) 和低电阻 ($R_{ON,sp}$) 是必不可少的。目前, 已经提出了几种提高垂直 GaN SBD V_{BR} 的方法, 如场板、等离子体处理、离子注入终端 (ET) 和保护环。虽然 V_{BR} 已经达到了一个较高的水平, 但由于其 $R_{ON,sp}$ 值较高, 仍没有达到 GaN 材料的

理论极限。与 Ga 极性面 n-GaN 相比, 由于其不同的表面性质, N 极性面上的欧姆接触更难实现低 ρ_c 。N 极性面 GaN 有着更为复杂的表面态, 这也导致更高的肖特基势垒高度 (SBH), 同时也使电极的制备成为挑战。目前已经提出了几种方法来优化垂直 GaN 器件的欧姆接触, 如等离子体处理去除表面氧化物, 减少氮空位 (V_N), 得到约 $3 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的比接触电阻率 (ρ_c), 用功函数低的金属 TiN 取代 Ti 接触层, 达到 $6 \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 的 ρ_c ; 通过激光辅助掺杂引入重掺杂区, 使 ρ_c 降至 $8.72 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。然而, 这些方法并没有很好地在垂直 GaN SBD 上得到很好地实现, $R_{ON,sp}$ 也没有得到有效降低。

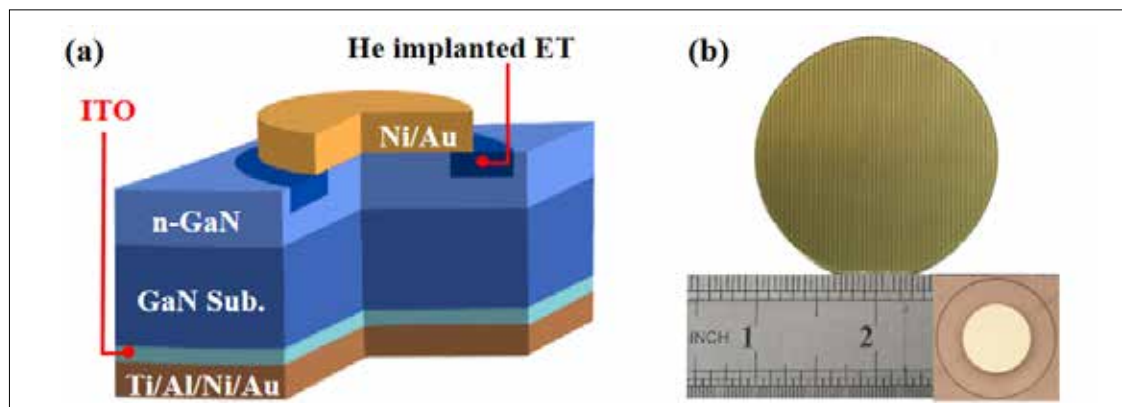


图1: (a) ITO界面层欧姆接触的垂直GaN SBD的三维示意图。(b)制备的器件在2英寸独立 (FS) -GaN晶片上的光学图像。

在本研究中，我们首次在 GaN 和 Ti/Al/Ni/Au 之间植入超薄的氧化铟锡 (ITO) 界面层，制备了一种性能优良的器件。这种结构很可能直接屏蔽金属波函数直接隧穿进入半导体，有效地减轻费米能级钉扎 (FLP) 效应。最后，在 N 极性面上实现了高质量的欧姆接触，并降低了 $R_{ON,sp}$ 。同时，通过引入 He 离子注入终端结构来改善 V_{BR} ，我们在目前已报道的 GaN SBD 中实现了最低的 ρ_c ，为 $7.36 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

器件制备

图 1(a) 为在形成欧姆接触时，具有 ITO 界面层的垂直 GaN-on-GaN SBD 的结构示意图。图 1(b) 显示了 2 英寸独立 (FS) 晶片上的光学图像。它由掺杂 Si 的 $300 \mu\text{m}$ 厚 GaN 衬底和轻掺杂的 $20 \mu\text{m}$ 漂移层组成，掺杂浓度为 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ (SINO Nitride, China)。

首先，晶圆经过预清洗过程，过程包括 5 分钟丙酮、5 分钟异丙醇脱脂步骤和 10 分钟食人鱼溶液 ($\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{SO}_4 = 1:3$) 浸渍步骤，以去除有机残留物。然后，用 MOCVD 法在清洗后的衬底上生长 n-GaN 漂移层。用 BCl_3/Cl_2 等离子体蚀刻了深度为 $1 \mu\text{m}$ 的台阶结构作为隔离区和标记区域。然后在室温下注入 He 离子，浓度为 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ ，入射角为 7° ，注入能量分别为 150 keV 和 50 keV，最终形成 $0.8 \mu\text{m}$ 深的箱状轮廓。随后采用圆形传输线模型 (CTLM) 测量了欧姆接触点的比接触电阻率。CTLM 法内径和外径间隙间隔分别为 (15、20、30、40、50、60 μm)，内径固定在 $200 \mu\text{m}$ ，采用光刻技术 (SUSS-MA6) 形成图案。然后，用磁控溅射法沉积了 ITO 界面层。ITO 溅射参数为衬底温度 25°C ，55 sccm 的 Ar_2 氛围，等离子体功率为 70 W。步长测量表明，沉积的 ITO 界

面层厚度为 10 \AA 。样品在 540°C 下通过快速热退火 (RTA) 退火 5 min。此外，用真空蒸镀仪 (ASB-EPIC6) 在 ITO 界面层上沉积金属 Ti/Al/Ni/Au (25 nm/100 nm/20 nm/60 nm)，然后在 800°C 、 N_2 氛围下退火 60 s。最后，沉积直径 $100 \mu\text{m}$ 的 Ni/Au (20/100 nm) 形成阳极。同时，我们制作了不含 ITO 界面层的垂直 GaN 器件进行比较。

结果与讨论

如图 2(a)-(g) 所示，退火前 ITO 界面层和铟 (In)、锡 (Sn)、镓 (Ga)、氮 (N)、钛 (Ti) 的 EDS 映射信号，Ti 层与氮化镓之间可见均匀的 1 nm 厚的 ITO 界面层。经过 800°C 退火后，N 原子扩散到 Ti 层中，形成 TiN 层，如图 2(h)、2(i) 和 2(m) 所示。同时，金属 In 和 Sn 的高温扩散耗尽了 ITO 层，因此不能作为界面层被清晰地观察到。In 和 Sn，可能扩散进入金属/GaN 层，且 ITO 界面层在退火后以自我牺牲的方式修复半导体与金属之间的界面，进一步减轻了费米能级钉扎效应。能带图如图 2(n) 所示，可以看作是金属诱导的间隙态 (MIGs)，金属波函数直接渗透到半导体中，增强了 FLP 效应，增加了 SBH。相比之下，ITO 扩散到金属/GaN 层中可以有效地避免波函数的穿透。如图 2(o) 和 2(p) 所示，退火后的 ITO 扩散到金属/GaN 中，修复了界面，使 FLP 效应减轻，界面之间的 SBH 值降低。用开尔文探针力显微镜 (KPFM) 测量开尔文探针和样品之间的电位差，见图 2(q) 和 2(r)。当两种具有不同功函数的金属相互接触时，电子将从功函数较低一侧传输到功函数较高的一侧，从而使它们的费米能级再次对齐，因此产生了接触电位差。当在两个金属板之间施加直流补偿电压 V_{DC} 时，可以通过调整 V_{DC} 使 $V_{DC} = V_{CPD}$ 。如果已知一个金属板的功函

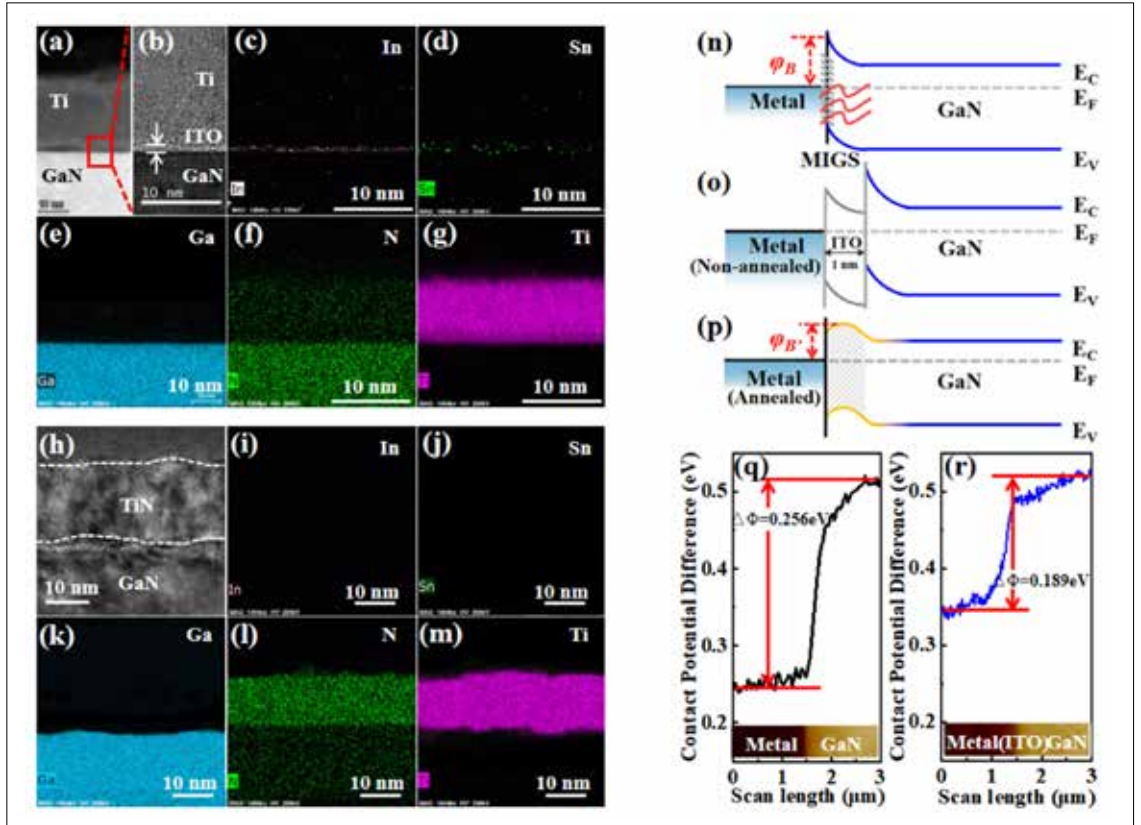


图2: (a)-(g)退火前在ITO界面层区域拍摄了高分辨率的TEM图像和每个元素的EDS映射信号, 以及退火后的图像(h)-(m)。(n)在半导体和金属之间由MIGS引起的费米能级钉扎引起的肖特基势垒形成的能带图。(o)退火前与ITO界面层的能带图。(p)退火后的ITO能带图。基于开尔文法, (q)在有ITO的器件和(r)无ITO的器件的情况下测量电位差。

数为 Φ_1 , 则另一金属板的功函数可以表示为 $\Phi_2 = \Phi_1 - eV_{CPD}$, 因此可以计算出 SBH 分别为 $\Delta\Phi = 0.256 \text{ eV}$ 和 $\Delta\Phi = 0.189 \text{ eV}$ 。可见, 含 ITO 的样品的 SBH 比不含 ITO 的样品低 0.067 eV 。这可能是由于退火后在电极的界面上形成了一层功函数较低的物质。引入纳米级 ITO 自牺牲层缓解费米能级钉扎效应, 使 GaN 与金属电极之间的欧姆接触特性可以被金属的功函数调制, 功函数较低的金属可以降低有效 SBH, 从而在 n-GaN 上建立更好的欧姆接触。

图 3(a) 显示了具有 1 nm ITO 界面层的 N 极性面 GaN 上的欧姆接触点的 I-V 特性和相应的接触电阻率。I-V 曲线的斜率随着间隙间距的增加而减小, 插图显示了环间距与总电阻 (R_T) 之间的拟合线性图。图 3(b) 为通过 CTLM 测试的不同厚度 ITO 界面层的 R_T 和间隙间距的拟合线性图, 其中拟合线的斜率为方块电阻 (R_{sh}), 截距为接触电阻 (R_c)。其中, CTLM 的相关参数可以通过以下公式提取:

$$R_T = \frac{R_{sh}}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{r+n}{r}\right) + L_r \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r+n} \right) \right] \quad (1)$$

其中, R_{sh} 是金属电极与半导体材料接触之间

的方块电阻; L_r 是传输线长度。r 为内径, n 为间隙间距。然后, 拟合 R_T 为纵坐标, 为横坐标, 得到的拟合线的截距为 R_c , 斜率为 R_{sh} , 由下式可以得到 ρ_c :

$$\rho_c = R_{sh} \cdot L_r^2 \quad (2)$$

从图中可以看出, 随着 ITO 厚度的逐渐减小, 拟合截距也逐渐减小, 说明相应的接触电阻也在减小。拟合线的线性度表明了所制备器件的稳定性良好。为了进行比较, 每种条件下至少测试了 8 个样品, 可以发现在溅射 1 nm 的 ITO 界面层后, 得到了最佳的欧姆接触性能。ITO 层各厚度的退火温度为 800°C , 温度选择是基于实验数据。退火前后见图 3(e) 插入的光学图像, 顶部为未退火 CTLM 样品图像, 底部为 800°C 退火后图像。

图 3(c) 和 (d) 中, 1 nm 的最低 $R_c \sim 1.22 \Omega \cdot \text{mm}$, $\rho_c \sim 7.36 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。图 3(e) 主要显示了近年来对 N 极性面欧姆接触的这种结构和比接触电阻率的研究。这也反映了在本工作中制备的欧姆接触的巨大潜力。两种器件的开启电压 (V_{ON}) 如图 4(a) 中均为 0.63 V , 表明 ITO 界面层对 SBD 器件的开启性能没有副作用。此外, 我们还发现, 在低电流水平下, 电流的主要传导机制是热电子

发射 (TE)。基于 TE 模型, SBD 的正 J-V 性质描述如下公式:

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3)$$

式中, J 为饱和电流密度, A^* 为理查森常数 ($26.4 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$), T 为绝对温度, q 为电子电荷, Φ_B 为势垒高度, V 为正向偏置电压, k 为玻尔兹曼常数, n 为理想因子。有 ITO 界面层和无 ITO 界面层的样品的 $R_{\text{ON,sp}}$ 分别为 $1.17 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $3.12 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。如图 4(b) 所示, $R_{\text{ON,sp}}$ 主要可分为以下三部分公式:

$$R_{\text{ON}} = R_{\text{sub}} + R_{\text{drift}} + R_c \quad (4)$$

其中 R_{sub} 是衬底的电阻, R_{drift} 是轻掺杂漂移层的电阻, R_c 是接触电阻。漂移层可以用以下公式来估计:

$$R = \frac{t}{qN_d\mu} \quad (5)$$

其中, t 、 μ 和 N_d 分别为厚度、载流子迁移率和净载流子浓度。基于掺杂浓度 ($\sim 2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) 和载流子迁移率 ($850 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 和衬底电阻率 ($\sim 0.01 \Omega \cdot \text{cm}$), 理论上, 有 ITO 界面层的器件 R_{drift} 和 R_{sub} 分别计算为 $0.71 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 和

$0.29 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。根据 $\rho_c \sim 7.36 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$, R_c 可为 $0.17 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 。因此, R_{drift} 、 R_{sub} 和 R_c 分别占总 $R_{\text{ON,sp}}$ 的 $\sim 63\%$ 、 $\sim 25\%$ 和 $\sim 12\%$ 。同理可得, 无 ITO 界面层的器件的 R_{drift} 、 R_{sub} 和 R_c 分别为 $0.75 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 、 $0.31 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $2.06 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 分别占总 $R_{\text{ON,sp}}$ 的 $\sim 24\%$ 、 $\sim 10\%$ 和 $\sim 66\%$ 。图 4(c) 分别显示了有和没有 ITO 界面层的垂直 GaN SBD 的反向 J-V 特征。有 ITO 界面层的器件击穿电压为 1100 V , 没有 ITO 的器件的 V_{BR} 保持在 1000 V , 击穿电场强度约为 0.6 MV/cm , 与先进水平 ($0.4\sim 1.5 \text{ MV/cm}$) 相当, 说明 V_{BR} 和击穿电场强度主要受 He 离子注入终端的影响, ITO 界面层对其影响不大。如图 4(d) 所示, 制备的氮化镓 SBD 器件也表现出良好的电学特性, 有 ITO 界面层的器件开关比高达 1.1×10^9 , 无 ITO 界面层的器件开关比为 3.7×10^8 , 其中开关比定义为器件在电压为 1.5 和 -1.5 V 时对应电流的比值。图 4(e) 和 4(f) 显示了在 2 英寸晶片上制备的有 ITO 界面层器件沿 X 轴和 Y 轴的 25 点测试图。其中, V_{BR} 的实测值符合正态分布, 表明制备工艺的均匀性和稳定性较好。

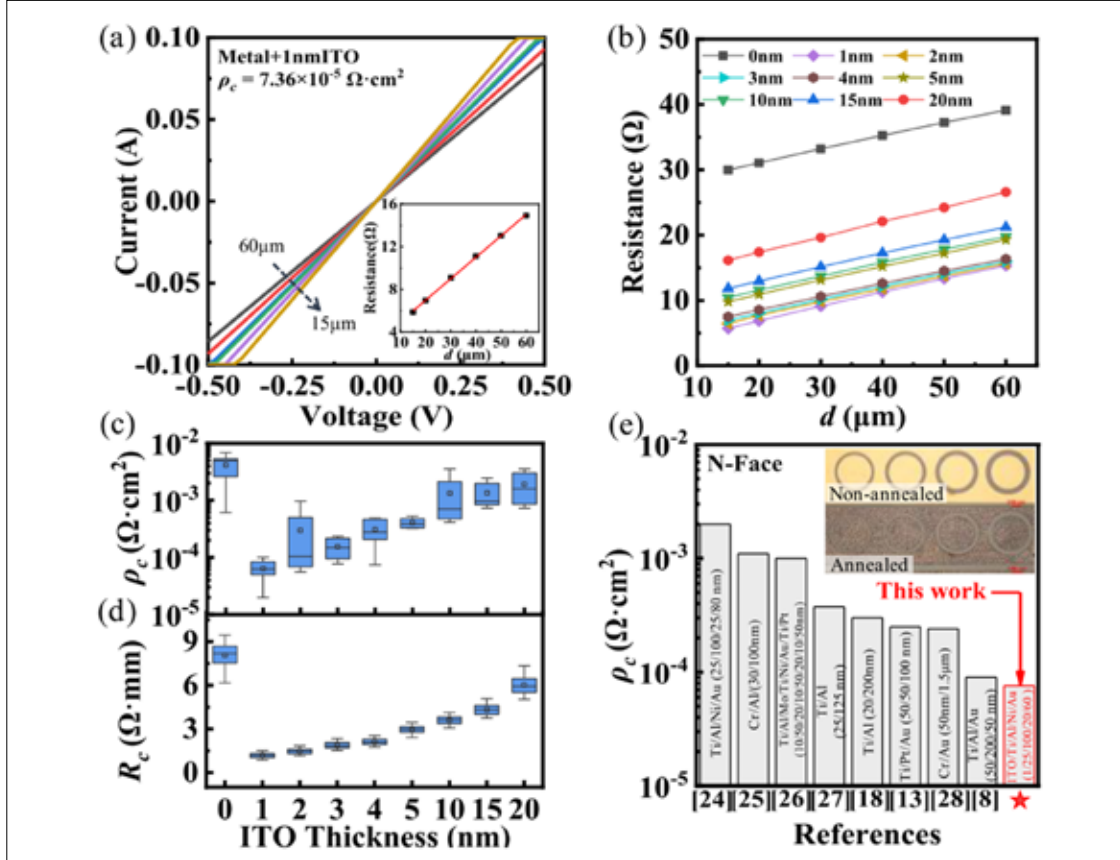


图3: (a)用CTLM法在1 nm ITO/Ti/Al/Ni/Au接触N极性面GaN的I-V特性, 插入图显示了 R_c 和间隙间距的拟合线图。(b)通过CTLM测试了不同厚度的ITO界面层的 R_c 和间隙间距的拟合线性图。(c)最低可达到的 ρ_c 和(d) R_c 随ITO厚度的不同而变化, 每种条件下至少测量了8个样品。(e)对N面欧姆接触的结构和比接触电阻率的调研, 插图显示了退火前(顶部)和退火后(底部)的CTLM光学图像。

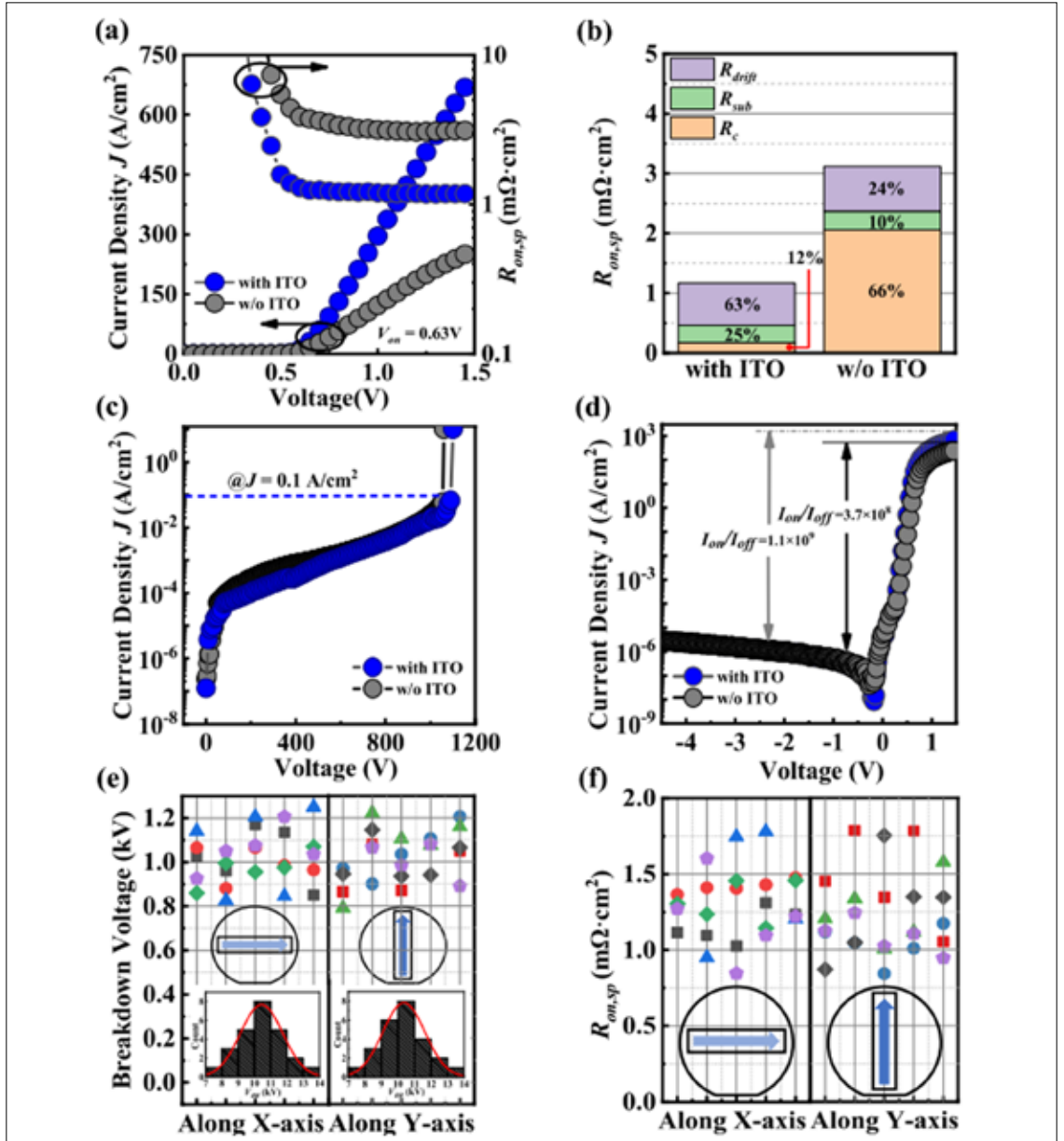


图4: (a)两种器件的正向 J-V 特性和 $R_{ON,sp}$ 图。(b)每个器件导电电阻及其组成部分。(c)分别给出了有和没有ITO界面层的垂直GaN二极管的反向J-V特性。(d)两种器件的J-V开关比。(e)具有ITO界面层的器件在2英寸晶圆上沿X轴和Y轴的25点的击穿电压,插图显示BV的正态分布趋势。(f)具有ITO界面层的器件在2英寸晶圆上沿X轴和Y轴25点的特定导电电阻。

图 5(a) 和 5(b) 分别显示了从 298 K 到 473 K 的 GaN SBD 的正向 J-V 特性。随着温度的升高, 两种器件的理想因子 n 随温度的升高而降低, 电阻 $R_{ON,sp}$ 增大。计算得到的肖特基势垒高度作为温度 T 的函数如图 5(c) 所示, 有 ITO 的器件在 298-473 K 之间测量了与温度相关的反向 J-V 特性。随着温度的升高, 电子获得了更高的能量, 并且更容易克服 SBH, 因此器件的反向漏电流逐渐增加, 说明 TE 模型主导了漏电流。该器件在 298-473 K 的温度范围内表现出很强的稳定性。在低电流水平下, 两种器件的电流传导机制都遵循 TE 模型。两个二极管的理想因子 n 和 $R_{ON,sp}$ 作

为温度 T 的函数如图 5(d) 所示, 可以清楚地看到 $R_{ON,sp}$ 随着温度的升高而逐渐增大, 理想因子 n 随着温度的升高而逐渐趋于 1。这个受到 TE 模型的影响。 n 值越接近 1, 越证明 TE 是低电流水平下的主要导电机理。Fu 等人为 TE 模型提供了 SBD 的正向 J-V 关系。

图 6(a) 显示了垂直的 GaN SBD 的 V_{BR} 与 $R_{ON,sp}$ 基准图。与其他报道的垂直 GaN SBD 相比, 本工作中使用 ITO 界面层制备的器件更接近 GaN 材料的理论极限, 同时表现出低 $R_{ON,sp}$ 和高 V_{BR} 。图 6(b) 显示了本工作中的 V_{BR} 与 FOM ($V_{BR}^2/R_{ON,sp}$) 以及其他先进的 GaN SBD 对比。本

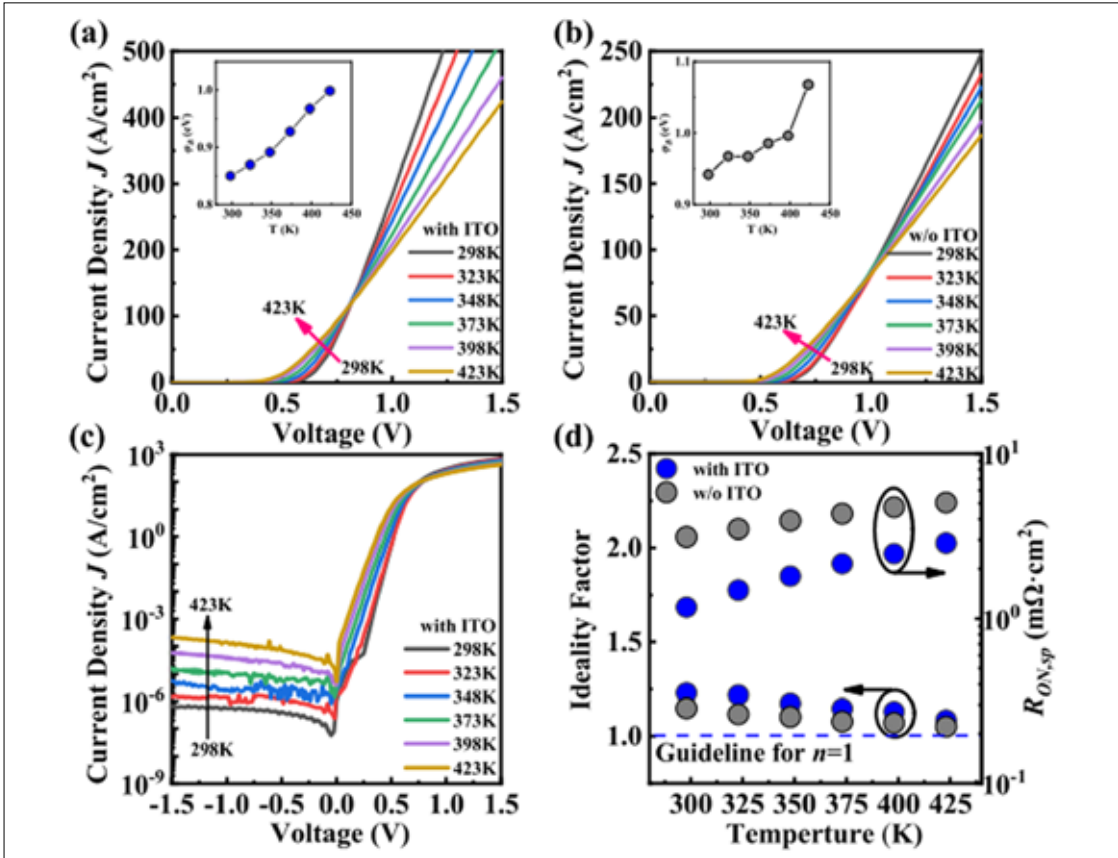


图5: (a)显示了变温下(温度从298 K到473 K)有ITO界面层和(b)无ITO界面层器件的正向J-V特性曲线,插图为计算出的肖特基势垒高度与温度T的函数。(c)显示了变温下(温度从298 K到473 K)有ITO界面层器件的反向J-V特性曲线。(d)理想因子n和 $R_{ON,sp}$ 与温度T的函数。

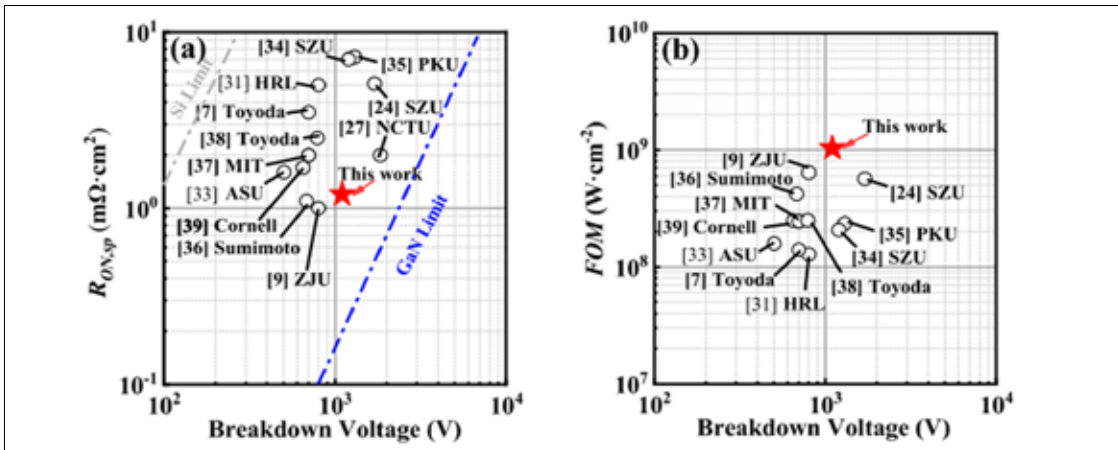


图6: (a)垂直GaN SBD的 V_{BR} 和 $R_{ON,sp}$ 的基准图。(b)垂直GaN SBD的 V_{BR} 和FOM的基准图。

研究中报道的 GaN SBD 的 FOM 为 1.04×10^9 , 在已知阳极尺寸下, 该工作报道了最低的 ρ_c 和最高的 FOM $\sim 1.04 \times 10^9$ 。

结论

综上所述, 我们首次制备了具有超薄 ITO 界面层的垂直 GaN SBD。ITO 界面层可以有效地缓解 FLP 效应, 并在界面处实现了较低的功函数。这样, 在 N 极性面 GaN 实现了高质量的欧姆接

触, 有效地降低了 $R_{ON,sp}$ 。这项工作报道了在已知阳极尺寸下最低的 $\rho_c \sim 7.36 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和最高的 FOM $\sim 1.04 \times 10^9$, 该技术也显示出了垂直 GaN SBD 的发展的巨大潜力。

- 该项目获得国家自然科学基金资助 (61974144 和 62004127)、广东省重点研发项目 (2020B01010174003)、广东省杰出青年科学基金 (2022B1515020073)、深圳科技基础研究项目 (GJHS20190808112201662)。

SEMICON[®] CHINA

FPDCHINA 跨界全球·心芯相联

2023年6月29-7月1日 | 上海新国际博览中心



展会注册抽大奖
赚取积分换好礼
参赛拉票忙推广



降低 III-V 族外延成本

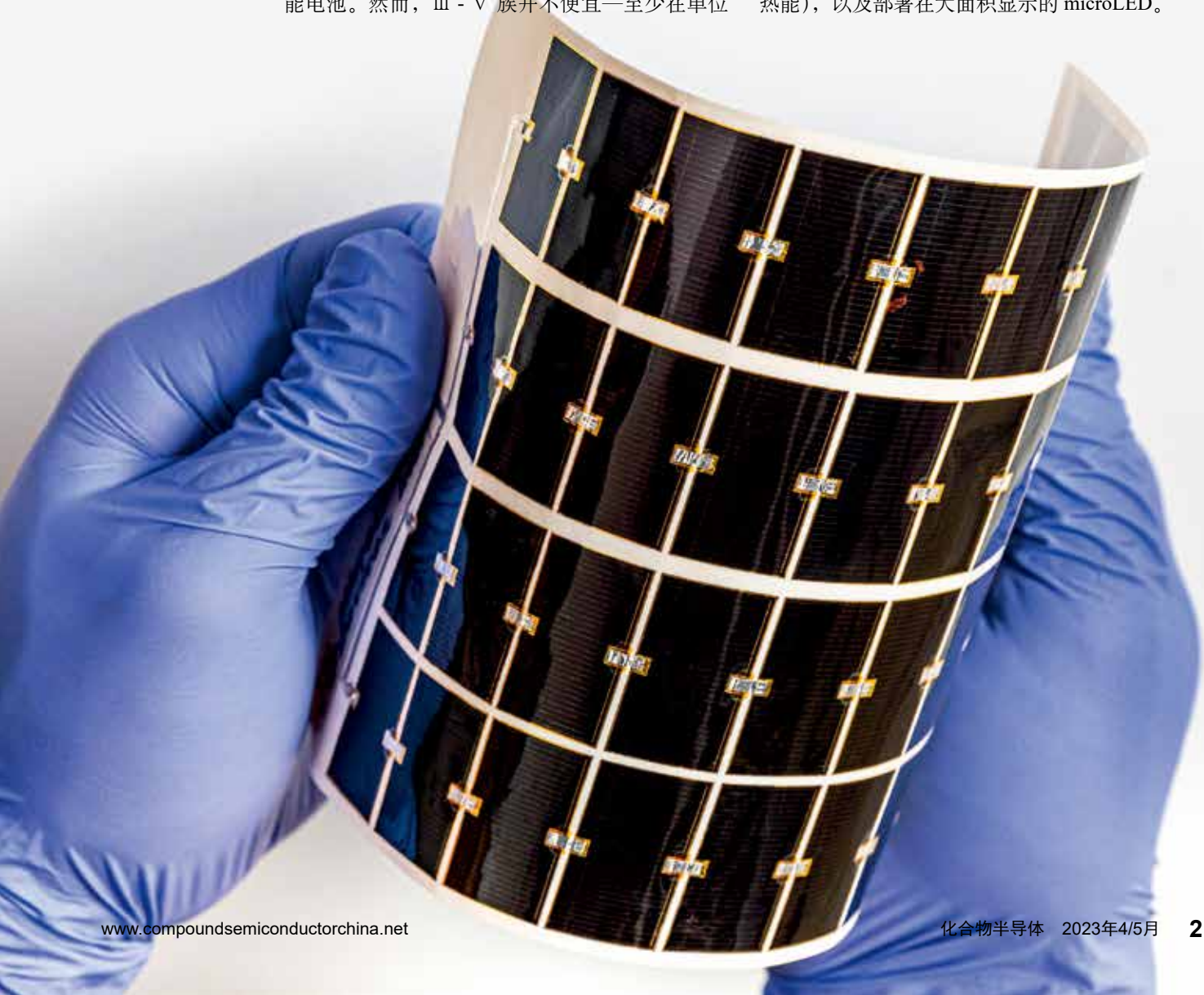
一种加速生长、确保高质量界面并允许包含铝合金的 HVPE 的激进形式将彻底改变 III-V 器件的生产

作者：AARON PTAK、JOHN SIMON 和 KEVIN SCHULTE，NREL 公司

III-V 族半导体是许多器件的黄金标准。它们是激光和 LED、高速和大功率电子器件以及空间光伏 (PV) 的核心。如由 III - V 制成的 PV 已证明了在任何材料系统中具有最高的能量转换效率和比功率，并且可以非常轻、薄、灵活，以及非常稳定——这是任何人都想要的太阳能电池。然而，III - V 族并不便宜——至少在单位

面积的成本是如此——因为缺乏使它们如此便宜的驱动力。

对于包括晶体管在内的许多器件，单位面积成本并不是主要问题。这是因为高成本是通过从每块晶圆生产成千上万个器件而分摊的。然而，有些应用没有这种奢望，包括 PV（包括太阳能和热能），以及部署在大面积显示的 microLED。



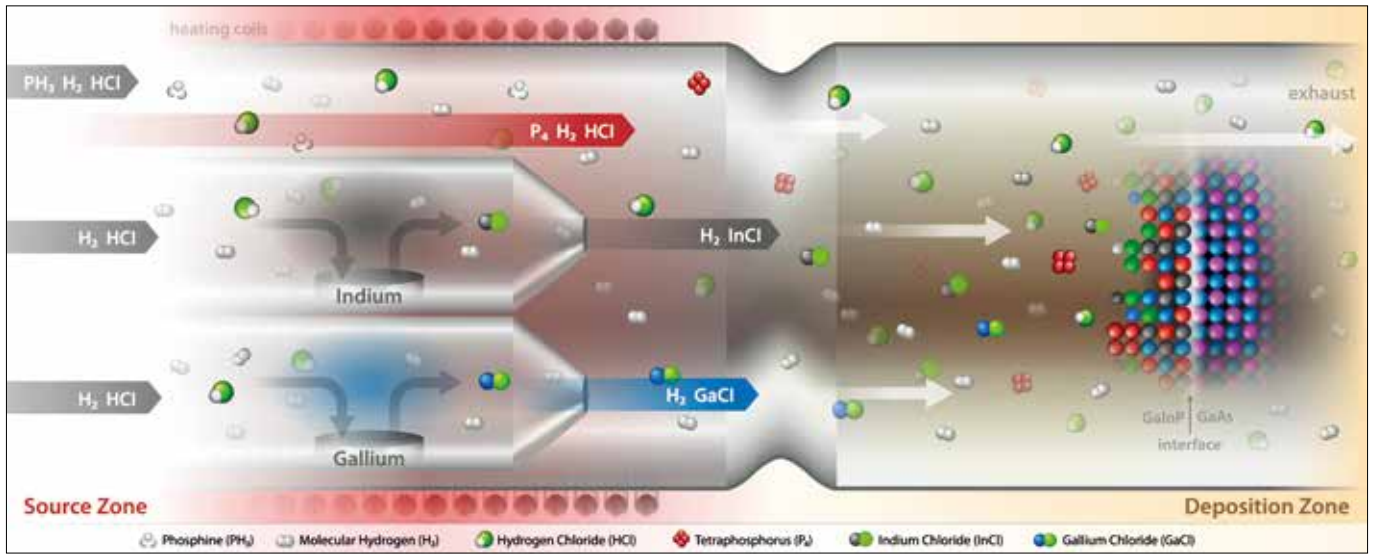


图1: 传统 HVPE 生长过程。

同样，以太阳能电池为例，用高效 III - V 光伏电池覆盖一平方米的成本在 3 万至 5 万美元之间，而硅太阳能电池的同等成本至少低两个数量级。由于这种显著差异，国家可再生能源实验室的 III - V 团队投入了大量精力开发聚光光伏 (CPV)，希望通过相对便宜的铝、玻璃和钢来抵消太阳能电池的高成本。不幸的是，由于过去十年硅光伏的价格暴跌，CPV 市场从未实现。

我们的新挑战是使 III - V 器件在单太阳、非聚光应用中具有竞争力，在这些应用中，薄、轻、灵活、稳定、高效的 III - V 光伏技术的优势才能真正发挥出来。这些特性将使 III - V 能够被部署在当今更普遍的太阳能技术无法实现的应用中，例如为无人机提供动力，或者以更美观的方式被制成汽车车身中和集成到建筑中。但是存在规模问题。由于每个 6 英寸 III - V 晶圆只能产生 4-5 W 的功率，因此生产兆瓦所需的面积令人惊讶，更不用说为日益电气化的世界供电所需的千兆瓦了。

如果这些 III - V 器件要在没有聚光的帮助下，从空间光伏等利基市场转向广泛的地面应用，它们的成本不得不大幅下降。这方面的成功将受到整个化合物半导体界的欢迎。即使对于芯片尺寸是次要问题的器件制造商而言，由于对 III - V 的需求全面上升，成本大幅下降也是个好消息。

成本驱动因素

III - V 器件的生产成本有三个主要因素：衬底价格、与外延工艺相关的费用以及器件制备。近年来，由于对 VCSEL 和其他光电器件的需求增加，衬底生产成本有所下降，而后处理过程也

受益于更高水平的自动化。然而，外延生产的成本一直居高不下，这就是为什么我们一直专注于降低外延生长成本的方法。今天的 MBE 和 MOCVD 工具是批处理系统，它限制了产量，并阻碍了大规模生产。不但是相对昂贵的前驱体，使用效率低下，又有昂贵的高真空设备。我们需要的是一种低成本、高产量、易扩展的沉积方法，能够生产与现有方法质量相同的材料和器件，尤其是对于面积密集型器件应用。

我们认为 HVPE 是一种令人兴奋的可能解决方案。这种生长技术在 20 世纪 60 年代至 80 年代之间发展起来，以使用高生长速率从廉价的原料中生产高质量、高纯度的 III - V 而闻名 (见图 1)。

在其鼎盛时期，工程师们通过 HVPE 生产了许多器件，包括在 GaAs 衬底上的成分渐变缓冲层上生长的 GaAsP 可见 LED。HVPE 非常适合生产这种类型的器件。高生长速率可以满足相对较厚的分级层，从而最大限度地减少位错密度，但却无法生产高质量的 p-n 结 -- 这一弱点源于 HVPE 反应器内化学生长产生陡峭界面的挑战。为了避开这些挑战，通过扩散形成 p-n 结。这种解决方案可以帮助我们了解为什么 HVPE 没有被应用于复杂的器件结构。

传统 HVPE 的局限性

在整个 20 世纪 80 年代，对 MBE 和 MOCVD 生长技术的改进使这些技术的性能超过了 HVPE，而 HVPE 则逐渐失宠。现在主导 III - V 族外延生长的两种替代方法与传统的 HVPE 相比有三个主要优势：宽且易于控制的工艺窗口；在

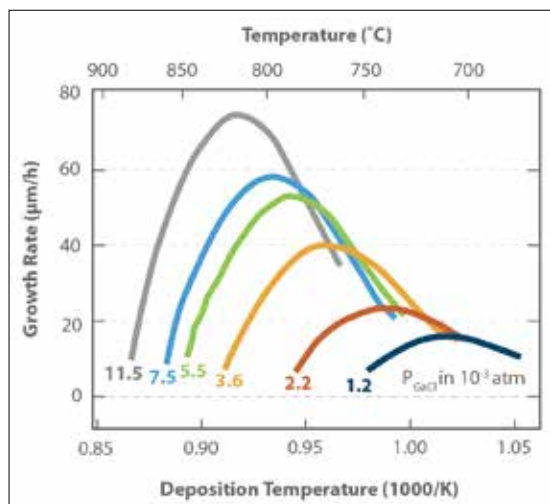


图2: 不同金属氯化物分压下HVPE生长的GaAs的生长速率。生长速率受到低温下动力学和高温下分解效应的限制。

器件层之间形成结构和化学突变界面的能力；以及更广泛的材料选择，包括众所周知难以通过HVPE生长的AlGaAs和AlGaInP等含铝合金。

在这里，我们更详细地讨论传统HVPE面临的挑战，然后概述我们的解决方案，这些解决方案使HVPE在当今的外延领域具有重要意义。

对于传统的HVPE，生长速率取决于活性氢对表面As-Ga-Cl物质的还原。在较低的生长温度下，裂解分子氢的能量势垒限制了生长速率，而在较高的温度下，分解是一个重要的因素。这些趋势背后是‘倒U形’生长率对温度的依赖（见图2）。相比之下，MBE和MOCVD的生长速率在较大的温度范围内对温度不敏感。简而言之，虽然HVPE具有更高的生长速率，但它无法提供宽的、与温度无关的工艺窗口，从而简化目标层厚度或合金成分的生长。

HVPE工艺涉及原位生成金属氯化物—通过金属镓和镉与无水HCl的反应实现—提供第Ⅲ族前体物质。这一反应通常发生在反应器内的热石英腔体中。生长不同材料的分层堆栈时，需要停止反应、清除产物并换成新的化学物质—但这会占用宝贵的时间。加快这一过程并不容易，因为在这一过程中存在着显著的化学惰性，并且尝试这样做会导致分级界面（见图3）。HVPE中固有的高生长速率加剧了分级材料的范围。由于这一挑战，传统的HVPE工艺无法生长当今现代复杂器件结构所需的突变异质界面。

从激光器和LED到晶体管和太阳能电池，实现许多高效器件结构的两种关键材料是AlGaAs和AlGaInP。这些宽带隙材料承担的角色包括为

其他材料提供包覆层，以及在可见光领域中工作的器件中充当有源层。在HVPE中，与标准的Ga和In前体GaCl和InCl类似的含铝前体是AlCl。然而，这种分子具有极强的反应性。它会腐蚀石英，也就是最常见的HVPE反应器材料，除非反应器在1000℃或更高的温度下运行，否则它很可能在到达衬底之前就热解并沉积在反应器壁上。这些温度与相对易挥发的含镉分子的结合不相容，因此阻止了AlInP及其相关合金的形成。即使当AlCl到达衬底时，它与V族源的反应速度非常快，以至于它超过了所有其他前体，导致形成AlAs而不是可控的三元和四元合金。

对HVPE的重新认识 -- 动态HVPE

由于需要大幅降低Ⅲ-V PV在所有应用中的成本，我们在过去十年中一直在重新审视、改进和重振HVPE，以在最大限度地降低不利因素的同时利用其有利的特性。我们的关键创新是保持工艺气体恒定并移动晶圆，而不是像传统外延那样在改变反应气体的同时保持晶圆静止（见图3）。这种单一变化完全避开了分级界面背后的传统HVPE的化学惰性。

我们将我们的方法命名为动态HVPE，以区别于传统的HVPE。对于传统形式的HVPE，改变工艺气体以从一种材料的沉积转移到另一种材料的沉积，会导致在包含两种气体的混合气氛中的显著生长时间。这是不可取的，由于生长速率通常超过1 μm/min，这会导致分级材料的大量生长。

为了解决这个问题，动态HVPE采用了两个相邻的生长室，每个生长室均采用稳态气流和生长条件，以及一个晶圆，该晶圆在它们之间的移动时间不到两秒，从而产生化学和结构突变的异质界面。根据在透射电子显微镜下对GaAs/GaInP异质界面进行的能量色散X射线光谱测量，动态HVPE可确保原子级界面突变（见图4）。

与使用生长暂停的传统HVPE生长的器件相比，这种高度的界面控制是显著提高器件性能的关键。对于双异质结构（许多光电器件中的一个常见特征），根据时间分辨光致发光，我们的HVPE的优越形式使界面复合速度降低了五倍。这表明动态HVPE适用于生产任意复杂的器件结构，这些器件结构依赖于低缺陷界面以实现高性能工作。

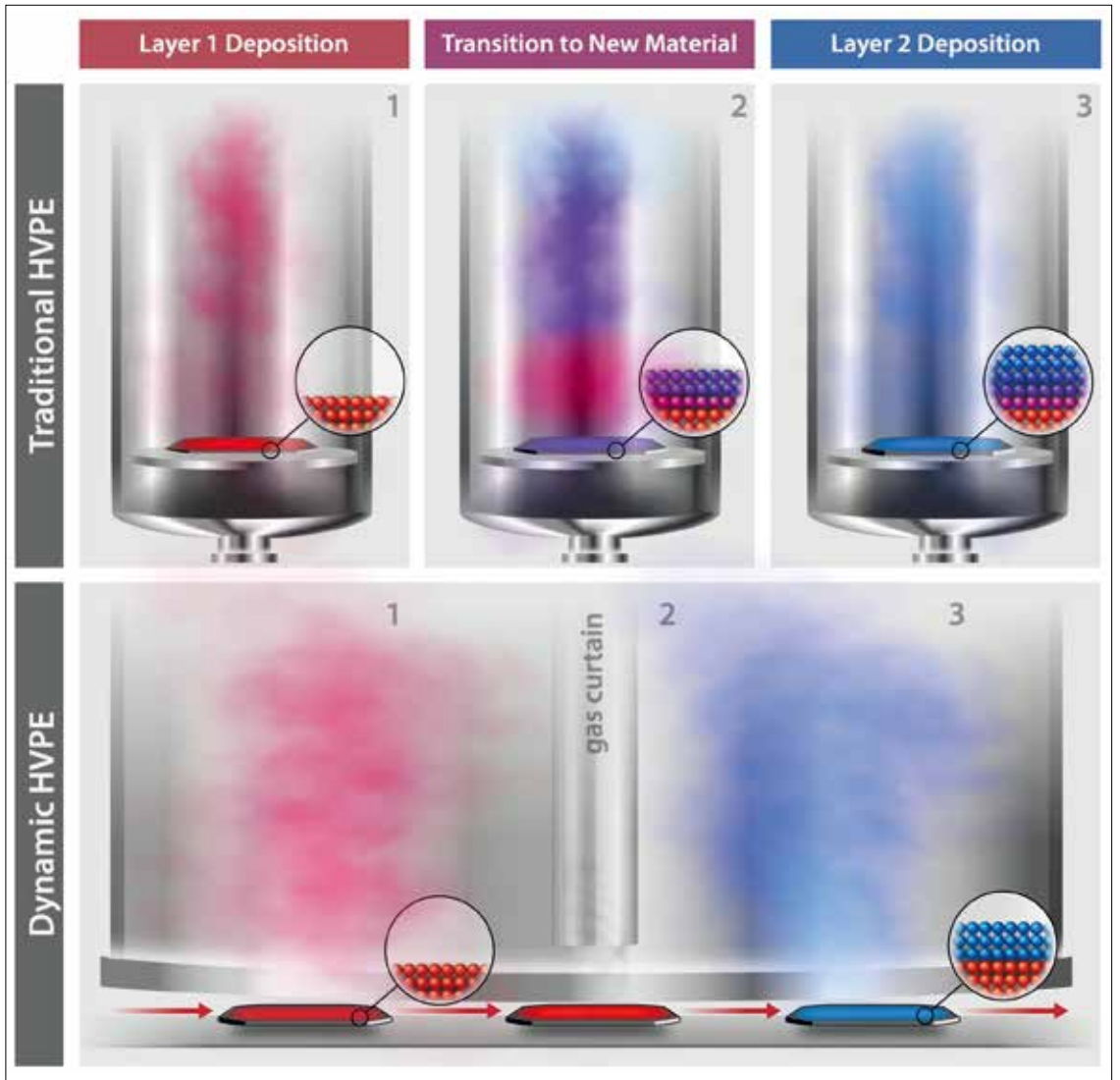


图3：使用传统和动态 HVPE 的异质结构生长示意图。

精准控制快速增长

在此成功的基础上，我们下一步着手应对过程可控性的挑战。由于氯还原步骤的大活化能导致生长过程的温度依赖性，因此温度的微小变化会导致生长速率和合金成分的剧烈变化。在传统的 HVPE 中，负责还原表面上的氯并为砷吸附打开新的表面位点的氢原子通常来自用于生长的氢环境。由于分子氢热解动力学在典型的生长温度下非常缓慢——也就是说，裂解有限——氯的还原过程非常低效。

裂解的氢化物气体，如砷（arsine），提供了另一种潜在的活性氢物质来源。然而，在典型的热壁 HVPE 生长条件下，砷几乎立即开裂，所以相对来说，到达生长表面的活性氢很少。

我们应对氯还原速率限制步骤的解决方案是在需要的地方，在表面提供更多的活性氢。我们

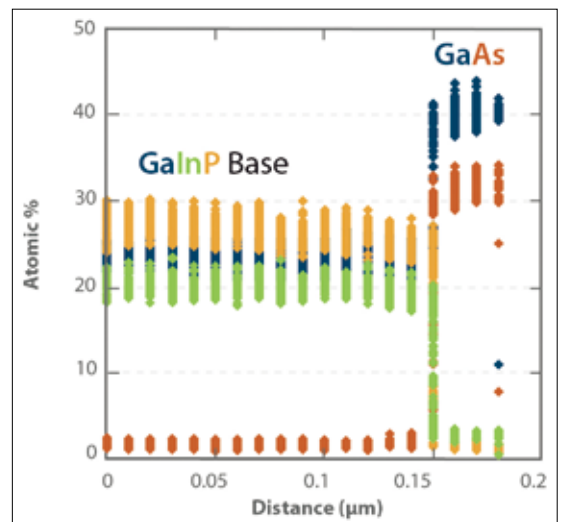


图4：能量色散 X 射线光谱测量显示了通过动态 HVPE 沉积的化学突变 GaInP/GaAs 异质界面。

通过将未裂解的氢化物气体引入表面来实现这一点，它们会在那里迅速分解。这使表面充满了大

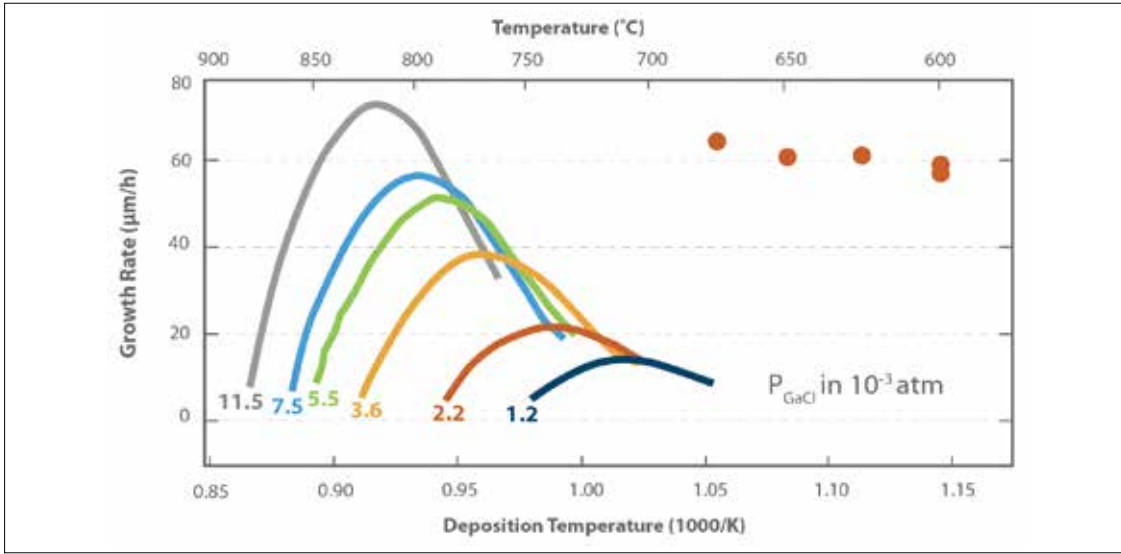


图5: 传统(曲线)和氢化物增强型 HVPE (红点) 的 GaAs 生长速率温度依赖性的比较。氢化物增强的 HVPE 在更低的沉积温度下保持高生长速率。

量的活性氢，从而清除镓中的氯并打开吸附砷的位点。这一根本性的变化将 HVPE 从需要高温才能实现高生长速率的动力学受限生长过程转变为对生长温度不敏感的传质受限过程。凭借这种有吸引力的运作方式，HVPE 与现有的生长技术保持一致。

通过动态 HVPE，生长速度非常快，以至于我们可以用毫米/小时，而不是微米/小时来衡量它们。对于 GaAs，我们已经证明了速率超过 0.5 mm/h (见图 5)。最重要的是，这些极端的生长速率仍然能带来出色的器件性能，这一点在太阳能电池的开路电压测量中得到了证明(见图 6)。我们观察到生长速率从低于 50µm/h 到 300µm/h 的性能变化很小，而在恒定的掺杂流量下，随着

生长速率的提高，掺杂水平的降低，充分解释了这种明显的变化。

解决铝问题

培育含铝材料是一项挑战。我们的解决方案是将前体从高反应性 AlCl 转换为更稳定的 AlCl₃。为了从 Al 和 HCl 中生产 AlCl₃，同时避免大量形成 AlCl，我们采用比 HVPE 系统中通常存在的温度更低的温度。对于含铝合金的生长，我们使用接近 400°C 的温度，通过在反应器内引入较冷的区域或添加外部 AlCl₃ 发生器来实现—每种解决方案都有其自身的优势和挑战。

使用 AlCl₃ 可以在整个成分范围内可控地形成 AlGaAs 合金，以及 Al(Ga)InP 的生长，而长期

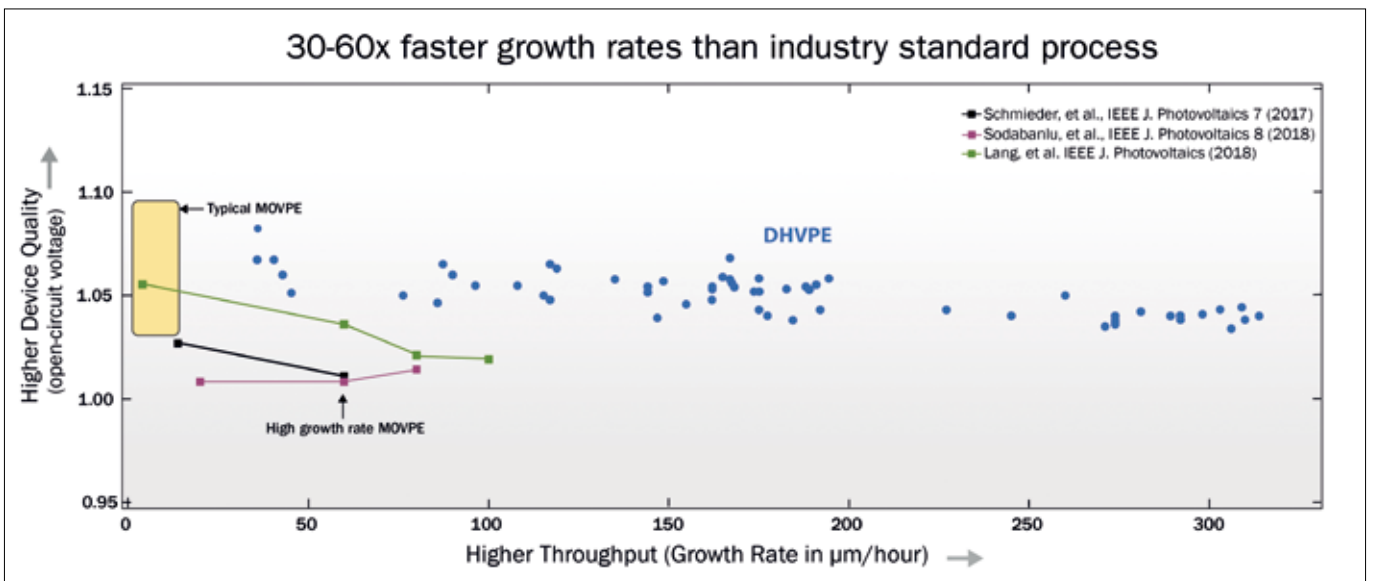


图6: 使用氢化物增强机制以高速率生长的 GaAs 太阳能电池的性能。

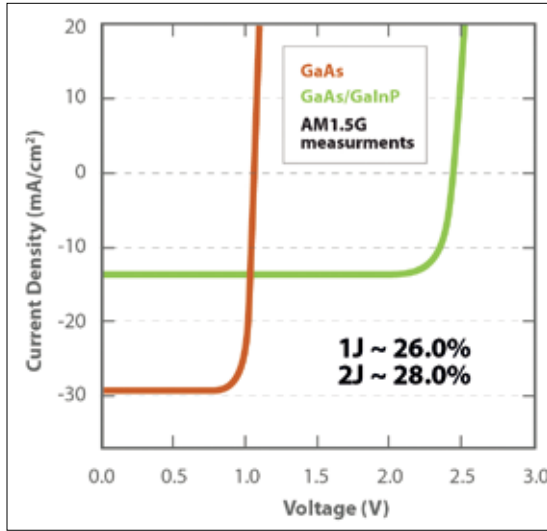


图7：包含 AlInP 窗口层的单结和双结 III-V 太阳能电池。

以来这被认为是不可能通过 HVPE 实现的。通过这种方法生产的外延层仍然含有氧和硅杂质，可能是由于与三氯化物一起形成的少量一氯化物发生了壁反应，或者是由于在衬底表面形成了一氯化物。然而，这项工作还处于起步阶段，还有很大的优化空间。

尽管有这些挑战，我们还是能够将含铝材料整合到器件中，包括纳入 AlInP 窗口层的单结和双结太阳能电池（见图 8）。这些电池的效率正在提高，缩小了与 MOCVD 生长器件的差距。

通过解决 HVPE 的三个局限性—缺乏陡峭的界面、生长条件随温度变化以及生长含铝合金的挑战—我们打破了与当今主流技术生长的器件性能匹配的障碍。现在有机会将 MBE 和 MOCVD 的质量与更低的成本和更高的产量相结合。

为了展示动态 HVPE 生长各种器件的能力，我们制造了三种类型的非太阳能结构：具有 20 对 GaInP/GaAs 的分布式布拉格反射器，在约 900 nm 的波长下提供高反射率，确认了厚度控制和平坦的平行界面（见图 8）；显示电流调制和增益的 HBT 的一次性生长，表明动态 HVPE 对晶体管生长的初始概念验证；以及成分分级的 GaInP 缓冲层，在 GaAs 衬底上生长到 3.8% 的晶格失配，其位错密度与 MOCVD 生长的结构相同。此缓冲层的生长时间不到 10 分钟。所有这三种结构的结果都突出了动态 HVPE 的前景，这种技术将非常快的生长速度与廉价的前体结合在一起，具有巨大的潜力，可以为包括 VCSEL、LED、热光伏和用于能量传输的发射器 / 接收器在内的各种器件实现大规模生产。

前方的道路

规模是半导体生长中最有效的降低成本的工具，对于大面积的器件来说更是如此。提高产量可以在整个生产过程中节省成本。即使是占地面积相对较小的器件也能从降低成本和在需要时轻松扩大生产的能力中受益。通过采用动态 HVPE，芯片制造商可以采用一种方法，为更大规模地生产 III - V 器件打开大门。

我们已经在研究反应器中验证了动态晶圆转移过程具有内在的可扩展性，所以它非常适合于完全在线的生产系统。在图 9 中，我们提供了能够生产多结 III - V 太阳能电池的在线动态 HVPE 系统的图示。请注意，对于具有任意数量或类型的层的任意器件结构，可以调整不同腔室的数量和容量。我们估计，这样的系统每年可以生产 50 万片晶圆，这大约是当今批量系统的 70 倍。这种产量的飞跃除了满足未来的生产需求外，还将削减成本。

作为迈向这一高产能未来的第一步，我们很快将交付一个试验规模的动态 HVPE 系统，该系统具有三个生长室，以模拟一个伪在线生长反应器。该系统将 6 英寸晶圆来回移动以构建完整的器件结构，而不是在一个方向上连续移动晶圆。即使这个试验系统的产量也应该达到每年 80,000 片晶圆，相当于 300 千瓦的单太阳非聚光光伏。

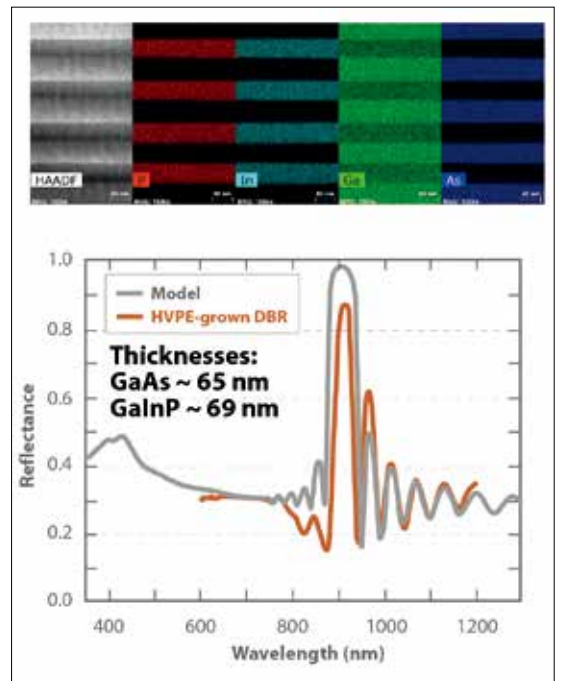


图8：使用动态 HVPE 生长的 GaInP/GaAs DBR 结构的一部分的透射电子显微镜和能量色散电子衍射测量（上图），以及 DBR 的测量反射率（下图）。

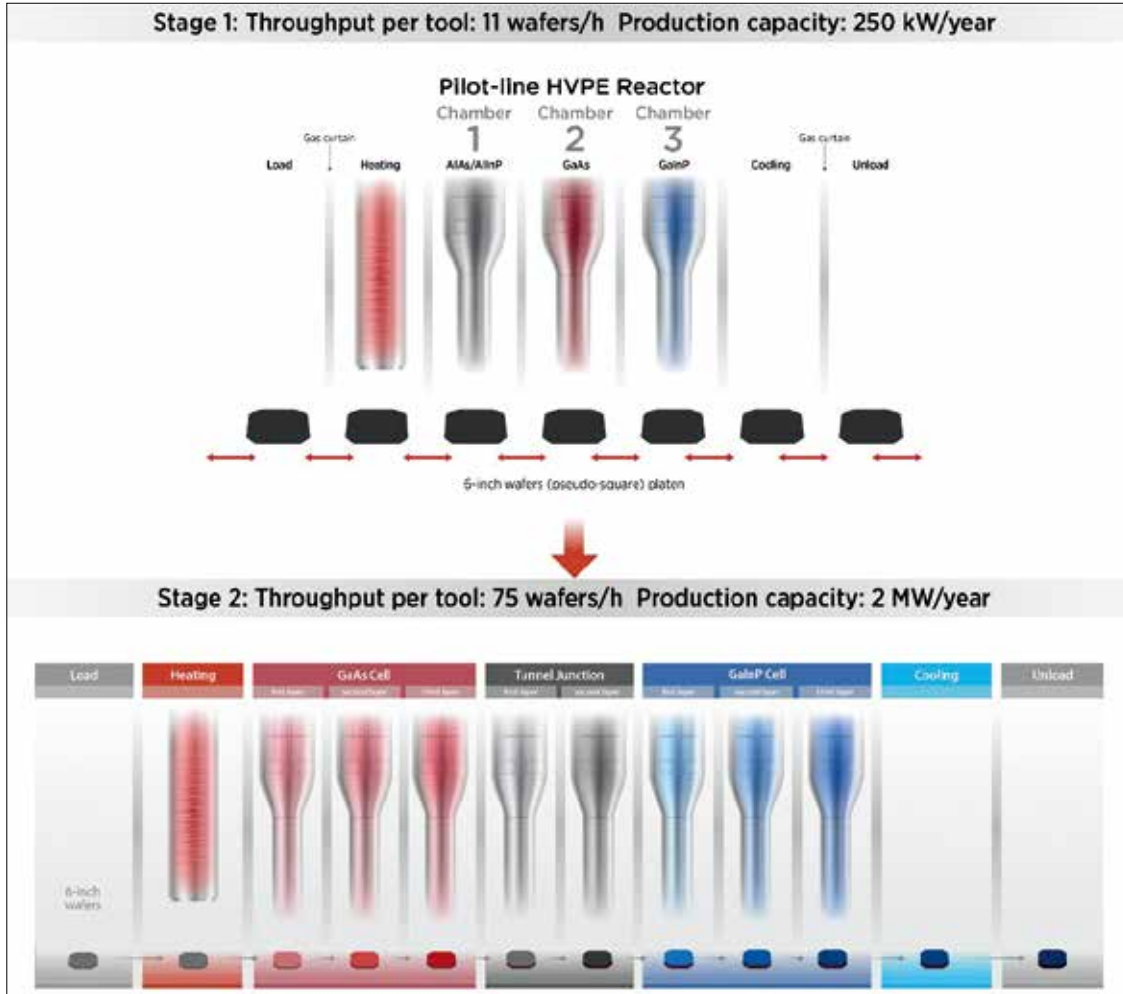


图9：2022 年秋季交付给 NREL 的试生产动态 HVPE 反应器的示意图（上图），以及每年能够生产 500,000 片晶圆的全在线生产反应器的概念。

我们计划在近期试运行我们的新系统，然后优化其性能，以提高高效多结 III - V PV 的器件质量和产量。这些方面的成功将代表着大幅降低 III - V 太阳能电池成本迈出的重要一步，并

为所有 III - V 器件提供降低成本和扩大规模的途径。

访问 [NREL.gov](https://www.nrel.gov) 了解更多关于低成本 III - V 和许可机会的信息。🔗

扩展阅读（提供免费访问的 OSTI 链接）

- ▶ D.W. Shaw “Epitaxial GaAs Kinetic Studies: {001} Orientation” , J. Electrochem. Soc. 117 683 (1970)
- ▶ K.A.W. Horowitz et al. “A Techno-Economic Analysis and Cost Reduction Roadmap for III - V Solar Cells” , NREL Technical Report NREL/TP-6A20-72103 (2018) [[https:// www.osti.gov/biblio/1484349-techno-economic-analysis-cost-reduction-roadmap- III -solar-cells](https://www.osti.gov/biblio/1484349-techno-economic-analysis-cost-reduction-roadmap-III-solar-cells)]
- ▶ J. Simon et al. “ III - V -Based Optoelectronics with Low-Cost Dynamic Hydride Vapor Phase Epitaxy” , Crystals 9 3 (2019) [[https://www.osti.gov/biblio/1488632- III -based optoelectronics-low-cost-dynamic-hydride-vapor-phase-epitaxy](https://www.osti.gov/biblio/1488632-III-based-optoelectronics-low-cost-dynamic-hydride-vapor-phase-epitaxy)]
- ▶ L.L. Schulte et al. Inverted metamorphic GaInAs solar cell grown by dynamic hydride vapor phase epitaxy Appl. Phys. Lett. 119 092101 (2021) [[https://www.osti.gov/ biblio/1821416-inverted-metamorphic-gaInAs-solar-cell-grown-dynamic-hydride-](https://www.osti.gov/biblio/1821416-inverted-metamorphic-gaInAs-solar-cell-grown-dynamic-hydride-vapor-phase-epitaxy)
- vapor-phase-epitaxy]
- ▶ W. Metaferia et al. “GaAs Solar Cells Grown at Rates > 300 μm/h by Atmospheric-Pressure Dynamic Hydride Vapor Phase Epitaxy” , Nat. Commun. 10 3361 (2019) [[https:// www.osti.gov/biblio/1619643-gallium-arsenidesolar-cells-grown-rates-exceeding-hydride-vapor-phase-epitaxy](https://www.osti.gov/biblio/1619643-gallium-arsenidesolar-cells-grown-rates-exceeding-hydride-vapor-phase-epitaxy)]
- ▶ E.M. McClure et al. “GaAs Growth Rates of 528 μm/h Using Dynamic-Hydride Vapor Phase Epitaxy with a Nitrogen Carrier Gas” , Appl. Phys. Lett. 116 182102 (2020) [[https:// www.osti.gov/biblio/1659831-gaas-growth-rates-using-dynamic-hydride-vapor-phase-epitaxy-nitrogen-carrier-gas](https://www.osti.gov/biblio/1659831-gaas-growth-rates-using-dynamic-hydride-vapor-phase-epitaxy-nitrogen-carrier-gas)]
- ▶ K.L. Schulte et al. “Growth of AlGaAs, AlInP, and AlGaInP by Hydride Vapor Phase Epitaxy” ACS Appl. Energy Mater. 2 8405 (2019) [[https://www.osti.gov biblio/ 1580495-growth-algaas-alinp-algaInP-hydride-vapor phase-epitaxy](https://www.osti.gov/biblio/1580495-growth-algaas-alinp-algaInP-hydride-vapor-phase-epitaxy)]



展示 MBE 大批量生产的资质

虽然分子束外延可能被认为是生长研究样品的最佳工具，但它还有另外一个优势：它是生产制造许多不同器件的首选技术。

作者：理查德·史蒂文森，《CS Magazine》

我们都会做出概括性的判断。有时，我们会因此而被提出异议，其他人可能会指出一些特例，并在我们的判断中挑出漏洞。但是，尽管有这样的告诫，我们很快就会回到我们的老路上。毕竟，当我们试图得出结论和制定计划时，花太多时间考虑那些不适合的案例，几乎不可能构建出一条推理线。

可能正是出于这个原因，我们中的一些人

会以一种过于简单化的方式对我们行业的生长技术进行分类。我们中的许多人可能认为 MOCVD 是用于大批量生产的技术，并将分子束外延技术（MBE）视为用于研究的外延技术，如新型四元材料和各种电子和空穴气体材料。但事实上，MBE 也是一种可进行批量生产的工具。去年在英国谢菲尔德举行的最近一次 MBE 国际会议上，两位主题大会发言者都很好地阐述了这一观点。

将 MBE 技术用于外延片的生产

IQE 的 Amy Liu 在这次会议上发言——这是可追溯到 1978 年在巴黎举行的一系列会议中的最新一次——她倡导将 MBE 多样化地用于生产各种化合物半导体外延片。

IQE 美国研发计划副总裁 Liu 女士在演讲开始时指出，MBE 在生产器件薄膜方面有着良好的记录，可以追溯到几十年前。早期的成功包括 1972 年在贝尔实验室制造了 GaAs 激光器。

美国也是世界上第一家 MBE 外延制造厂——量子外延设计的诞生地。这家开创性的公司成立于 1988 年，1999 年与总部设在英国的外延产品国际公司合并，成立了 IQE，今天它已经是生产外延晶片的跨国巨头公司。

IQE 目前在美国有两个具有 MBE 能力的站点。有位于宾夕法尼亚州伯利恒的工厂，量子外延设计公司就是在这里诞生的；还有位于北卡罗来纳州格林斯伯勒的前 RFMD 工厂。整合工作正在进行中，包括将伯利恒的分子束外延工具重新部署到格林斯伯勒工厂，这些工具用于制造各种红外和硅基 III-V 结构，用来生产砷化镓射频和光电外延片。

Liu 说，最初制造基于 GaAs 基的射频器件的出货量，如 PHEMTs，主导了 MBE 外延片的市场。然而，她预计，未来几年，这个市场将变得更加多样化。

为了降低成本和提高生产率，IQE 采用可容纳多个晶片的 MBE 反应器。这些生长工具可容纳多达 23 个直径为 75mm 的晶片，或 9 个直径为 100 mm 的晶片。在生长之后，外延片由 Liu 所称的“全套材料表征工具”进行检查。

射频领域制造量最大的两种外延片是用于制造 PHEMT 和 HBT 的外延片。虽然 PHEMT 已不再像过去那样部署在手机中，但 HBT 仍广泛用于移动设备中，用于放大射频信号，保持了该行业作为射频应用的霸主地位。

IQE 的批量生产可以追溯到几十年前，工程师们已经在使用良好的工具上建立了非常成熟的流程，这不足为奇。Liu 描述了在 7 x 150 mm 平台上的生长，其中 6300 次运行产生了 44000 个外延片。

IQE 的光子产品的体量比砷化镓射频产品要少，但仍然很可观。与砷化镓产品一样，生产中采用了统计过程控制，但通常是在较小的衬底上

生长。例如，75 mm 的衬底被用来制造 InGaAs 光探测器的外延片。据 Liu 说，该公司的技术组合还包括为跨度为 2.1-2.4 mm 的 InP 基边发射器外延片，在 100 mm 的衬底上声称具有良好的一致性；以及 GaSb 光电探测器，过去几年需求急剧增长。

美国国防部的计划通过努力增加衬底的尺寸，帮助我们的行业提高了基于 GaSb 器件的成熟度。多亏了这一点，GaSb 基片的尺寸最初从 50 mm 扩大到 75 mm，然后扩大到 100 mm。现在，MBE 甚至可以在 7×125 mm 的载盘上生产外延片。

Liu 分享了伯利恒和格林斯博罗两个工厂基于 GaSb 外延片生产的设备数据。使用 SurfScan 6220 对材料进行评估发现，所有外延片都没有主要缺陷，缺陷密度远低于规定的要求。生长过程据说是良好的，可重复性的，并提供良好的可控性，多次生产的可重复很好。

除了生产用于单波段检测的晶片外，IQE 还开始生产双波段检测的产品。正如人们可能预期的那样，后者的销量较低。

Liu 还概述了他们未来的计划，讨论了公司正在开发的产品，以及哪些技术具有近期潜力。为了开发新材料和新工艺，IQE 现在从一开始就使用具有大容量能力的反应器。为了说明这一点，Liu 提到这些努力将涉及高容量的反应源单元，例如 10 公斤的 In 和 Ga 源。



莫里斯舞者在 ICMBE 会议晚宴上提供了娱乐，该晚宴在谢菲尔德的 Cutlers Hall 举行。这座狭窄的乔治亚式三层建筑里收藏着用钢制成的刀具，这是制造 MBE 工具的一种重要材料。信用：Laure Divisia。



ICMBE的会议主席David Ritchie是剑桥大学的实验物理学教授和斯旺西大学的半导体科学和技术教授。资料来源：Laure Divisia。

IQE正在开发的一种外延技术是用于稀氮化物激光器的外延技术。对于与GaAs或锗晶格匹配的激光器，引入这种新型材料可以使发射波长增加到约1600 nm。这种光谱域中的发射器，无论是VCSEL还是边缘发射器，都可以用于智能手机中的传感功能，因为OLED显示器对于该波长的发射光来讲是透明的。虽然MOCVD是制造GaAs基激光器（特别是VCSEL）的传统工具，但MBE其实更能成功地生长有源区。

IQE在硅衬底上开发基于铽化物的探测器方面非常活跃。工程师们已经评估了硅、硅上锗模板和GaSb上合适的异质结构的质量。虽然缺陷密度不同，但量子效率大小是相似的。与QmagiQ的合作很好地支持了这一发现，该公司是用于成像的红外焦平面阵列的设计者和制造商。他们的研究发现，这三种衬底的性能几乎相同。

量子点激光器

ICMBE的代表们还听取了日本QD激光公司的介绍，该公司在量子点激光器的生产方面有着非常强大的背景。

代表这一领域的开拓者，该公司技术总监Kenichi Nishi在讲话开始时承认了去年7月去世

的MBE之父之一——Arthur Gossard对自组装量子点激光器做出的重大贡献。

Nishi接着列举了量子点激光器的一些关键属性：低阈值电流；低功耗；最低的温度敏感度；高效率；能够在高温下工作；以及对背反射的耐受性。

这些属性推动了这一光源的发展，该光源首先由东京大学的Yasuhiko Arakawa和Horroyuki Sakaki于1982年提出。20世纪90年代，Nikolay Ledentsov领导的团队将这一想法转化为真正的器件，当时他在俄罗斯科学院A.F.Ioffe物理技术研究所工作，现在是VI Systems的首席执行官。

量子点激光器历史上的另一个关键里程碑出现在2006年，当时富士通推出了Nishsi公司QD激光，该公司生产量子点激光器和其他类型的激光。根据Nishsi的说法，该公司的核心技术是：基于GaAs的量子点和量子阱外延，使用分布式布拉格反射器的光栅制造，以及芯片测试。产品使用标准固体源Riber MBE 49反应器制造，最多可容纳5个75 mm的砷化镓衬底。来源于这种工具生产的材料制造成发射波长约1.3 μm的量子点激光器和跨度为1000~1160 nm的InGaAs量子阱激光器。

虽然MBE仍然是大学研究制备样品的一个很好的工具，但它也是用于开发实用器件的很好研究工具。这些努力肯定会支持未来分子束外延在化合物半导体行业内大量生产多种器件。

Nishi 解释说，该公司的量子点激光器是使用 Stranski-Krastanov 生长模式生产的。如今的量子点通常直径约 20 nm，高 7 nm，密度约为 $6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 。

由于量子点的形貌对压力、温度和生长速度非常敏感，因此必须消除生产中的波动。帮助做到这一点的是在反应器发生故障之前对其进行有效的维护。

多年来，QD 激光的工程师们一直在改进他们的量子点的生长过程。最初，这些密度约为 $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的纳米结构将产生宽度约为 35 meV 的谱峰，并提供 25-30 的增益。改进首先要增加量子点密度—带来增益的提高—40-50 左右。最近，增益已提高到 50-60，光谱线宽缩小到约 25 meV，通过优化的再生长和抑制扩散实现了精细化控制，并通过亮场透射电子显微镜进行了验证。

自 2011 年以来，QD 激光从最初给 Fabry-Pérot 激光器供货为开端，开始大规模生产用于光通信的激光器。它现在已经出货了超过 450 万台带有量子点有源区的激光器。对于这些激光器，温度稳定性非常高，眼图在 25°C 到 85°C 之间没有变化。可靠性极高，不会突然坏掉，而使用寿命估计超过 300,000 小时。高温工作性能优越，量子点 Fabry-Pérot 激光器能够在高达 220°C 的环境下工作，类似的分布式布拉格反射器能够产生高达 150°C 的单模激光。

Nishi 认为，量子点激光器最有前途的应用之一是为数据中心的互连提供光源，在数据中心，它们可以以较小的占地面积实现高速传输。其他的潜在应用领域包括硅光子学和激光雷达的光源。

帮助支持量子点源数量扩大的是 IQE，它正在为这类激光开发外延片。一种选择是在 150 mm 的 GaAs 晶片上生长，这家外延晶片供应商已经展示了 $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 的量子点密度；它还研究了

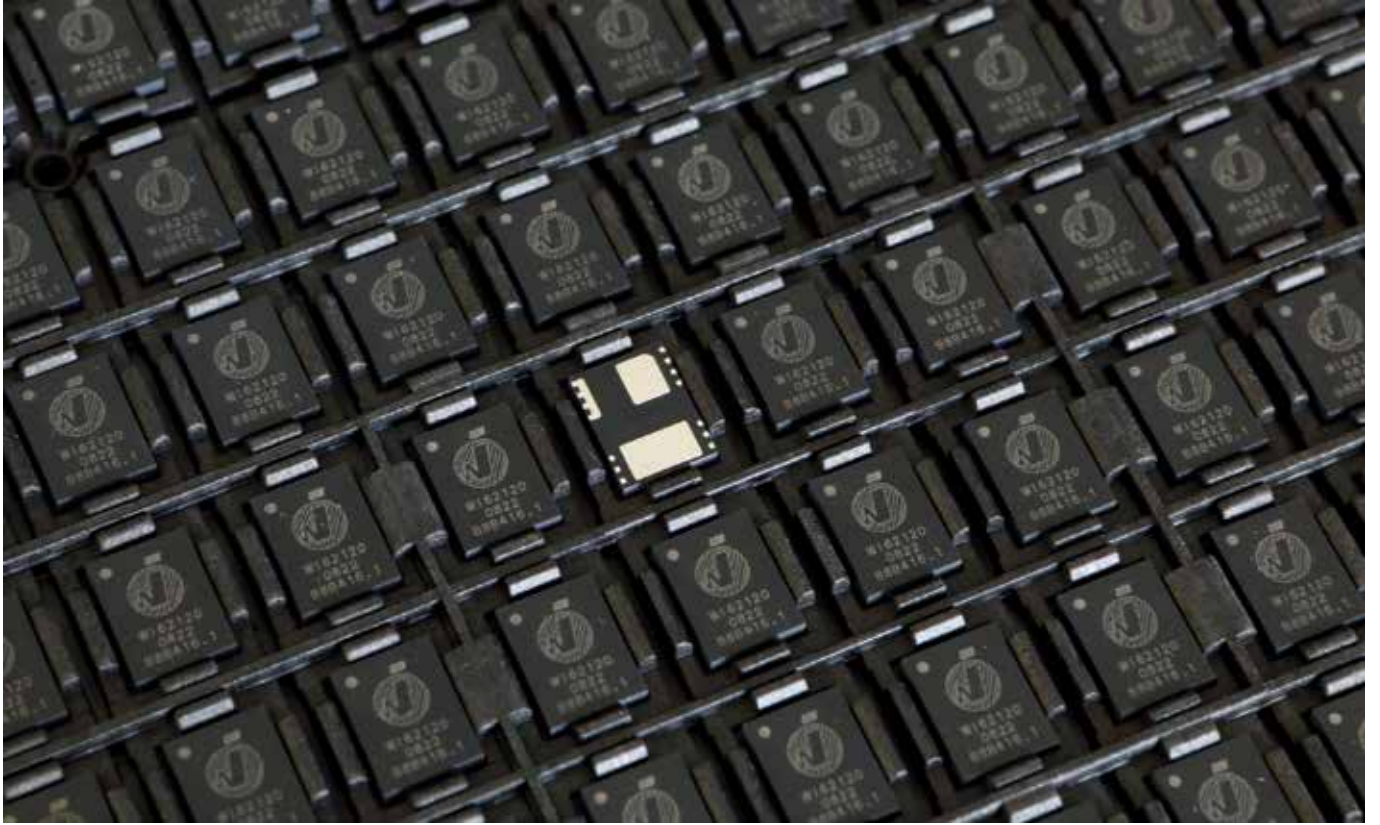
在硅衬底上制造晶片的机会，硅衬底提供了大的晶片尺寸（如 300 mm）和与 CMOS 的兼容性。

根据 Liu 教授的说法，在过去的几年里，硅基 III-V 族量子点的生长取得了“很大的进步”。为了推动进一步的发展，IQE 已经与加州大学圣巴巴拉分校的约翰·鲍尔斯的团队进行合作。这种合作包括使用 Veeco GEN2000 反应器生产异质结构，从而制造出连续波输出功率为 125 mW 的激光器。

卡塞尔大学和伦敦大学学院也在努力提高量子点激光器的性能。这两个组织的代表在最近的 ICMBE 会议上发言，强调虽然 MBE 仍然是为大学研究生产样品的一个很好的工具，但它也是用于开发实用器件的很好工具。这些努力肯定会支持未来分子束外延在化合物半导体行业内大量生产若干种器件。☞



用户小组会议是 ICMBE 的一个特点。在谢菲尔德大学学生会大楼举行的 Riber 晚会上，一支爵士乐队演奏。出处：Laure Divisia。



现在是将 GaN IC 商业化的时候了

在单个 GaN 芯片中结合多个电力电子功能的功率 IC 将在全球电气化中发挥重要作用

作者：GERALD AUGUSTONI, PLINIO BAU, DOMINIQUE BERGOGNE, FLORIAN COUVIN AND RYM HAMOUMOU, WISE INTEGRATION

从家用电器和笔记本电脑到数据中心和电动汽车，电力转换系统是大多数电子器件的核心。在其中一些应用中，GaN 技术将很快成为必不可少的技术，因为硅基器件已经达到了其作为电力转换平台的物理极限。

除了提高功率转换阶段的效率外，GaN 还具有其他的优点。其优点主要来自于它优异的物理特性，例如：3.2 eV 的带隙，这几乎是硅的三倍；3.3 MV/cm 的击穿场强，大约是硅的 10 倍。这些

优势为导通电阻和关键品质因子（导通电阻和芯片表面积的乘积）带来了极佳的价值。GaN 器件可以提供高的工作电流、高的击穿电压和高的开关频率，并可以在高达 650 V 的工作电压下与目前的 MOSFET 和 MOSFET 超级结相竞争。

传统上，电源设计人员利用分立晶体管和大量外部组件（如驱动器、电平移位器、传感器、自举和外围器件）构建用于电源转换系统的半桥电路。通过将分立的 GaN 器件（而不是那些由硅制成的器件）与其他元件相结合，可以实现性能上的提升。然而，还有一种比这更好的方法 -- 我们正在总部位于法国的 Wise Integration 推行这一方法。我们的团队成立于 2020 年，是 GaN 功率 IC 的先驱，它将多个电力电子功能整合到单个 GaN 芯片中。通过集成，我们正在提高速度、效率、可靠性和成本效益。

更灵活的适配器

在过去的十多年里，主要的 OEM 投入了大量的精力来制造功能最强大的智能手机、最薄的笔记本电脑和尺寸最大的电视。这一趋势的共同因素是对电力的需求不断增长，以实现每秒共享大量数据。

不幸的是，OEM 并没有对放置在他们产品旁边的适配器给予太多关注。这导致了依赖于硅基晶体管的电源表现得非常笨重且低效。但这种情况正在开始逐渐发生改变。

早在 2019 年，GaN 技术就渗透到了消费电子市场，最初是 30-100 W 的适配器。从那时起，这种宽禁带技术得到了广泛的应用，成为下一代电力转换技术的选项。如今，大多数移动设备制造商都承认，适配器是必须重视的一部分，移动性要求适配器紧凑且轻便，与其主要产品战略保持一致。电源供应现在正成为该产品不可或缺的一部分。

功率密度是 GaN 的主要“驱动因素”，而效率正变得越来越重要，以满足从 100W 到 3kW 的 AC-DC/DC-DC 电源的新需求，尤其是对于数据中心行业。对于这一特定市场，在相同的外形尺寸下需要更高的功率才能达到高能效水平。

GaN 在 2022 年度过了美好的一年。随着它越来越受欢迎，它变得具有成本竞争力，不断扩大的需求促使几家全球生产商增加 GaN 生产线。在系统层面上，用不了多久，AC-DC 模拟控制器就会“兼容 GaN”。然而，他们的 GaN 能力将不会得到充分利用，因为他们仍然在低频切换。

现在是 GaN 行业开始克服这一限制并带来下一个重大能源和功率提升的时候了。这可能要源于从分立的 GaN 器件转向 GaN IC，从而提高系统级的效率，并使材料成本比传统硅基电源更具竞争力。

GaN IC 设计

为了实现这一愿景，我们一直在使用不同的形状因数和金属化策略制作不同的 HEMT 原型。我们的工作包括使用多项目晶片对 100 W 到 1 kV 应用的 GaN 晶体管进行建模和设计。这些研究使用了法国微电子研究所 CEA-Leti 的专业知识。通过这次合作，我们为大规模生产奠定了坚实的基础。

在我们建造的所有多项目晶圆和原型中，我们承担了专注于功率晶体管布局拓扑的研发项目。从基体金属化到梳状金属化，我们发现了影响性能参数的金属路径的寄生贡献，导致寄生电容、导通电阻和栅极内阻值的不同。我们发现，焊盘在平面图中的位置，影响由键合导线引起的寄生导通电阻，以及由金属方块计算出的电流和

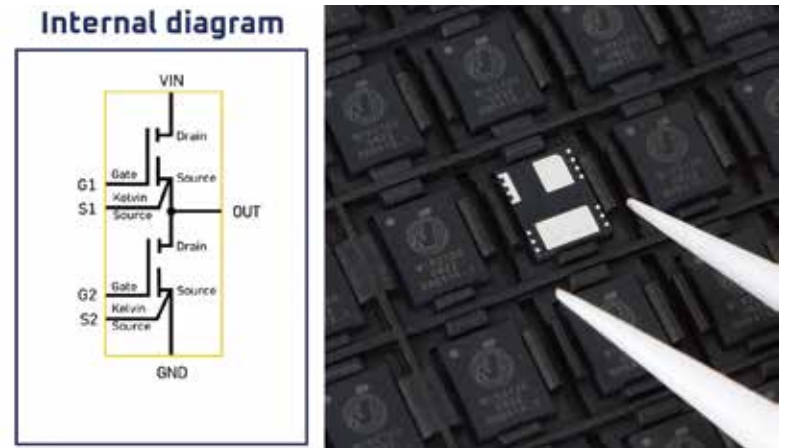


图1：WiseGan半桥。

金属电阻的分布。改变焊线在功率 IC 版图中的位置，通过两种方式影响最终的导通电阻：由于金属化内部电流分布的变化而导致的版图后模拟和性能参数的变化；以及并联添加的焊线会影响最终的电阻。在过去的两年里，我们已经搭建了数百个原型，优化出最好的。我们还对不同电路策略的原型、二极管电路、数字输入/输出钳位电路和功率钳位电路进行了 ESD 测试。

当我们相聚在国际会议上时，除了讨论功率晶体管外，还有与 GaN 功率集成的模拟电路相关的对话。为了获得高性能的电路，显然需要克服制造角色散和电荷捕获效应。另一个障碍是缺乏用于负载电路的 p 型晶体管。然而，设计者可以通过调整他们的电路拓扑来克服这些挑战。许多公司已经展示了模拟电路模块，如基准电压源、欠压锁定、ESD 电路、比较器和运算放大器，开

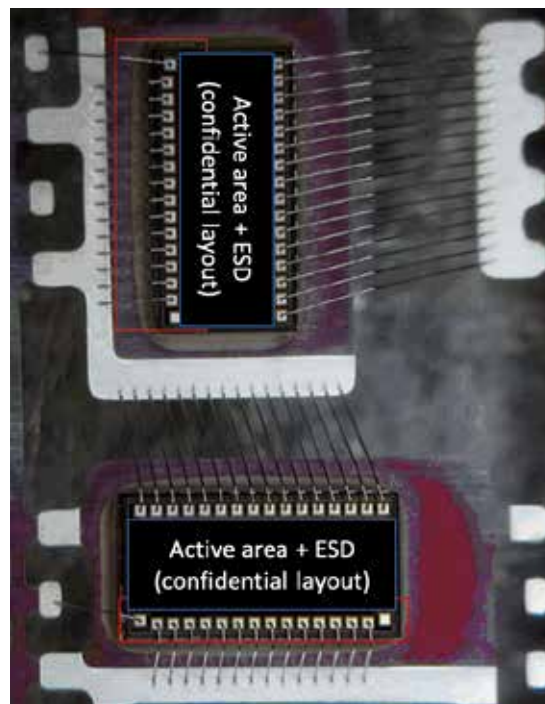


图2：集成半桥晶体管，由同一封装中的一个低端和一个高端功率开关组成。

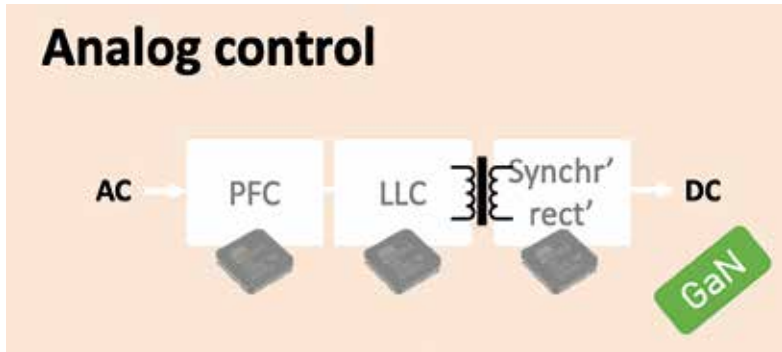


图3: 典型的带有模拟控制的氮化镓电源。

关频率高达 10 MHz。这些模块还兼容高达 650 V 的电压和高达 1 kW 的功率。

系统级优势

限制使用硅基 MOSFET 系统性能的一个根深蒂固的因素是这种晶体管的品质因数 -- 它是其导通电阻以及其内部栅源和栅漏电容综合指标。从硅到 GaN 的转变使设计师可以获得更好的品质因数。对工作频率不再有限制，它可以是硅的十倍。

然而，这并不像看起来那么简单，因为提高系统频率还有另一个障碍。如果转换器中的 GaN 晶体管不工作在软开关条件下，即晶体管每次开启时的电压接近于零或受到限制 -- 即由于晶体管的电容以及系统电容而存储的能量必须在 GaN 中耗散，从而导致晶体管迅速过热。虽然这对于以 100 kHz 或更低的频率运行的系统来说是可以接受的，但对于我们系统的典型工作频率在 500 kHz 到 2 MHz 的器件就不能接受了。

我们的解决方案是始终工作在软开关条件下，需要通过特定的控制和拓扑来实现。为了确保每个器件都能做到这一点，我们启动了 WiseWare 控制器 (参见图 4)。

驱动力

GaN 集成电路注定是迈向高功率密度和系统集成道路上的下一站，这是半导体取得历史性成功背后的两个关键驱动因素。但针对电力电子，尤其是电力电子晶体管，在集成方面一直落后，因为形成垂直架构所采用的复杂工艺阻碍了这一进程。

我们坚信，由我们的 GaN 横向工艺提供的集成将在系统层面带来好处。实现集成是向前迈出的关键一步，因为它总是能够减少系统尺寸和增加复杂性，从而提高可靠性和性能。

我们的 GaN IC 将为市场带来好处，因为它们实现了以下几方面的好处：1) 通过减少组件数量和最大限度地减少功率损耗，缩小了系统尺寸，从而实现了用于散热的实用封装；2) 增加了复杂性，从而可以优化系统性能，包括更好地整形电源信号；3) 由于电路板上的组件更少，提高了可靠性；4) 由于集成了驱动器，提高了可靠性，包括早期检测异常；5) 由于集成了驱动器，更快的开关器件具有更好的性能，通过减少寄生分量并确保更好的开关性能来实现更高的工作频率。此外，还有机会引入“在位功率感应”，通过集成在功率晶体管芯上的传感器将转换器的真实状态反馈给控制器。

当然，这种演进需要几个步骤。然而，这些努力是值得的，因为它们为 GaN 市场的未来提供了主要动力。虽然进步可能需要几十年，但其结果将是系统设计的一场革命，从而以低成本提供无与伦比的性能。

数字控制

数字 GaN 是利用 GaN IC 实现高性能的一个

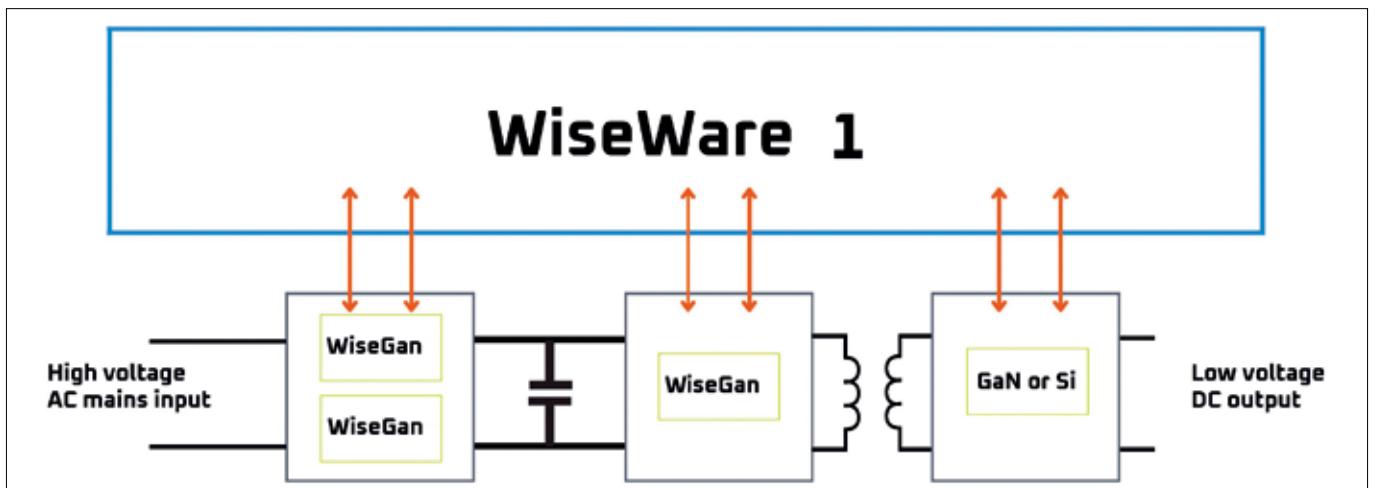


图4: WiseWare 1 数字控制。

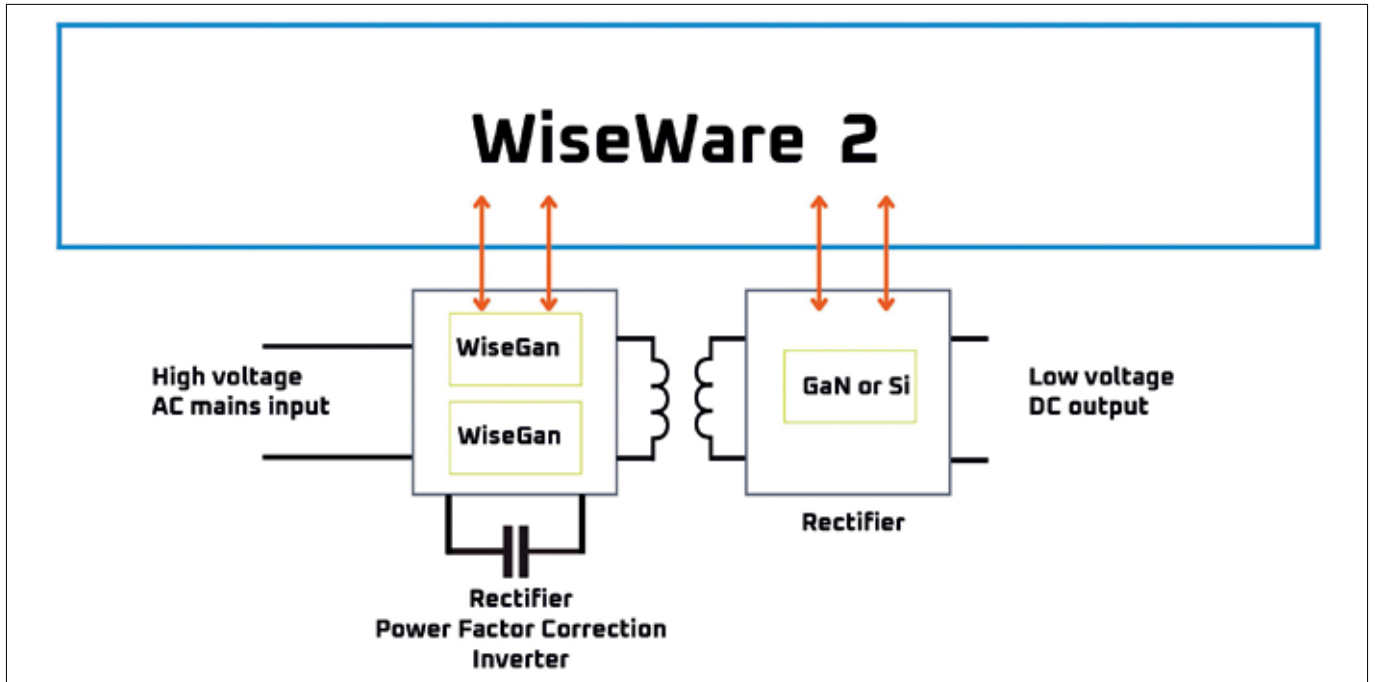


图5: WiseWare 2 数字控制。

很有前途的选择。这是一种颠覆性的数字控制方法。不再需要将模拟信号块‘转换’为数字块，而 GaN IC 和数字 GaN 控制器的功能以这样一种方式划分，即每个部分都提高了另一个部分的性能。电流检测通常很难实现，但数字 GaN 解决方案使电流的分析评估成为可能，从而创建了一个虚拟电流传感器。这种传感器只需几行代码，可防止损耗、节省印刷电路板面积、减少材料成本并消除模拟传感器问题(参见图 5)。

数字 GaN 的另一个优势是，它将高分辨率的脉宽调制提高到模拟控制器无法达到的水平。通过提供精确的亚纳秒时间分辨率的机会，结合高性能微控制器单元(MCU)，零电压开关推出了新的解决方案 -- 这是一种可达到极高开关频率而不增加开关损耗的技术，这要归功于所谓的“软开关”。通过计算准确的开关时间，数字 GaN 控制器可以使用低带宽饥饿传感器和开关器件的模型来执行零电压开关。

请注意，高频开关电压波形不会被测量或检测。相反，缓慢变化的变量被馈送到 MCU 模数转换外围设备。

数字 GaN 开辟了从电力阶段到云阶段的新途径，通过大幅减少交换的数据量来帮助应对气候变化。数字 GaN 位于电源单元和电源转换器的核心，可以收集电源电路的性能数据，以计算运行状况和使用数据。通过处理机载数据可以生成超低带宽的数据流：每天只需要几千字节就可以提供用于监控使用大量电源单元的大型设施的最佳信息。

通过在数据世界和电力世界之间提供智能链接，数字 GaN 实现了远程固件更新，以及通过互联网激活功能。这种可能性在许多计算设备中很常见，例如网吧、电视和计算机主板。

也有机会向电动汽车提供电力和数据。对于满足消费电子产品、移动电子产品、数据中心和工业应用等各种数据需求的电源系统来说，提供传输这些数据所需的海量电力的压力将越来越大。帮助满足这一需求的是我们的 GaN IC，它在单个 GaN 芯片中结合了多种电力电子功能。这样做的回报是：更高的速度、更高的效率、更高的可靠性和成本效益，同时数字控制开辟了从电力阶段到云的新途径，同时通过大幅减少交换的数据量来实现环境友好。☑️

扩展阅读

- ▶ P. Bau et al “Static and dynamic measurements for GaN integrated switches”, International Exhibition and Conference for Power Electronics (PCIM 2022)
- ▶ D. Bergogne et al “Integrated GaN ICs, development and performance” 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE’ 2019)

北京大学团队实现全氮化物 Mini-LED 全彩显示

随着智能时代的加速到来，人们对先进的新型显示技术的需求正在爆发式增长。Mini/Micro-LED 显示技术使用主动发光的红绿蓝三色 Mini/Micro-LED 芯片作为显示像素，具有高分辨率、高亮度、高对比度、高响应速度、高稳定性和低功耗的优势，备受显示行业的青睐，被认为是继液晶显示 (LCD) 和有机 LED 显示 (OLED) 之后的下一代显示技术。

然而 Mini/Micro-LED 显示的发展仍然面临着的技术不成熟、成本高的问题，其中技术瓶颈之一是 Mini/Micro-LED 显示的全彩化问题。现今，Mini/Micro-LED 显示的蓝光和绿光芯片通常使用的是氮化物材料，红光芯片则是使用磷化物材料，并通过巨量转移技术将三色芯片集成在同一面板上。三色芯片在材料和结构上的不匹配，给巨量转移工艺带来了极大的复杂性，限制了巨量转移工艺的良率的提升和 Mini/Micro-LED 显示技术成本的降低。另一方面，基于磷化物材料的 LED 器件具有显著的尺寸效应，即随着 LED 芯片尺寸的减小，其电光转换效率急剧下降。磷化物 LED 的尺寸效应限制了其在高像素密度 Micro-LED 显示领域的应用。全氮化物材料的技术路线无疑是实现 Mini/Micro-LED 显示全彩化的优选方案之一。

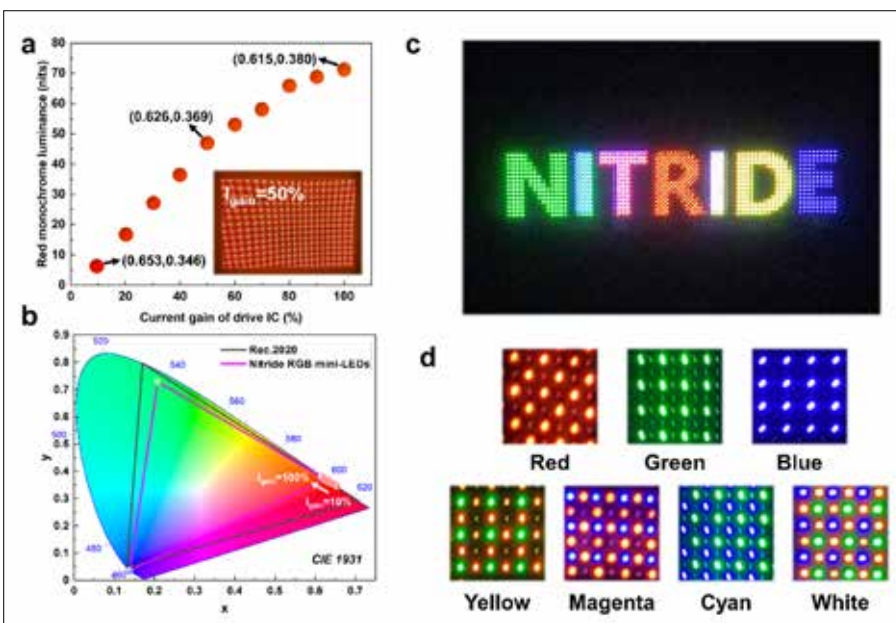
虽然氮化物蓝光和绿光 LED 的发光效率已经达到 Mini/Micro-LED 显示应用的要求，但是氮化物红光 LED 的效率却远远不足。这主要是因为

氮化物红光 LED 需要使用高 In 组分 InGaN 材料 (In 组分 ~40%) 作为发光层，而高质量的高 In 组分 InGaN 材料的制备仍然是世界性难题。

针对上述科学问题，北京大学的陈兆营、王新强等与姑苏实验室、东莞阿尔泰显示技术有限公司、中微半导体设备 (上海) 股份有限公司深入合作，基于应变调控的研究思路，成功实现了高效率的 InGaN 基红光 Mini-LED 芯片，并基于此实现了全氮化物 Mini-LED 全彩显示模块的制备。该项工作使用低温 GaN 和溅射 AlN 作为复合缓冲层，充分利用复合缓冲层中的晶界合并过程，使得 GaN 外延层的表面晶格产生张应变，从而提高了后续高 In 组分 InGaN 材料的镓原子并入效率。基于这一策略，他们实现了 0.5 A/cm^2 的工作电流驱动下，外量子效率为 7.4%、峰值波长为 629 nm 的 InGaN 基红光 Mini-LED 芯片。

进一步，联合团队使用他们制备的 InGaN 基红光 Mini-LED 芯片和商用蓝绿光 Mini-LED 芯片制备了分辨率为 60×90 的全氮化物 Mini-LED 全彩显示模块。图 (a) 是该显示模块在红光单色显示状态下的显示亮度与驱动 IC 电流增益之间的关系曲线；图 (b) 是该显示模块实现的色域范围，结果表明，在 50% 的电流增益下，该显示模块覆盖了 74.1% 的 Rec.2020 色彩空间；图 (c) 是该显示模块全色显示状态时的照片，显示了包括红色、绿色、蓝色、黄色、品红色、青色和白色的彩色图像；图 (d) 是该显示模块的显示像素的照片。这项研究成果直接从实验上证明了基于全氮化物技术路线实现 Mini/Micro-LED 全彩显示的可行性。同时，该工作中使用的应变调控策略与现今蓝绿光 Mini/Micro-LED 的外延和芯片工艺完全兼容，将加速推动 Mini/Micro-LED 全彩显示技术的商业化进程。

该成果以题为“High-Efficiency InGaN Red Mini-LEDs on Sapphire Toward Full-Color Nitride Displays: Effect of Strain Modulation”近日发表于 Advanced Functional Materials (<https://doi.org/10.1002/adfm.202300042>)。 



退火 AlN 模板有助于远紫外线 LED 的发展

由于量子阱中的应变更大，在退火 AlN 模板上的深紫外线 LED 提供了更高的输出功率

实现高效 LED 在深紫外线中发光的一个明显障碍是横向磁偏振的主导作用，它抑制了有效的光提取。但根据柏林一个团队最近的研究，通过在退火的氮化铝 (AlN) 模板上引入压应变的氮化铝 (AlN) 量子阱，可以克服这个问题。

柏林联邦理工学院 (FBH Berlin) 和柏林技术大学 (Technical University Berlin) 的研究人员合作，利用这种方法生产出了在 230 nm 左右可提供几毫瓦连续输出的 LED。这为应用于杀菌的深紫外线发射提供了一种有吸引力的技术途径。

“深紫外线对细菌的杀灭效果不如 265 nm 的 LED。关键是 265 nm 对眼睛和皮肤有害，所以不能在有人在场的情况下使用，”柏林联邦理工学院的 Arne Knauer 解释说。将波长移至 230 nm 左右，确保光线只穿透皮肤的表层。

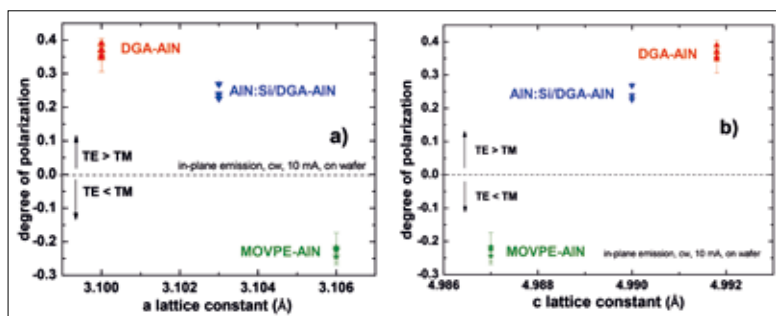
柏林的团队并不是第一个利用应变的团队，来提高深紫外线 LED 的提取效率。但使用双重退火 AlN 模板却是一种创新。Knauer 说，除了实现较低的位错密度 $\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，双重退火的 AlN 模板还获得了小得多的 a 晶格常数，这确保了外延层中的应变大幅增加，从而导致更大的光提取。

Knauer 及其团队所面临的挑战是如何在不引入新的位错以抑制光发射的情况下加入这种应变。他们在这项工作中取得了成功，该团队声称，在双重退火 AlN 模板上制备 LED 的输出功率提高到了创纪录的水平。器件显示出光提取效率和内量子效率都有所提高。

该团队的双重退火模板是通过以下方式实现的：在 2 英寸蓝宝石衬底上溅射 0.4 μm 厚的 AlN 层；将该膜在 1720 °C 下退火 3 小时；再通过 MOCVD 沉积 1.1 μm 的 AlN；并将所得样品在 1720 °C 下退火 5 小时。

在柏林联邦理工学院的 Sylvia Hagedorn 的领导下，团队正在努力优化双重退火的 AlN 模板。“问题是位错降低过程与 AlN 中氧的引入有关，”Knauer 说。“这同时也产生了新的缺陷，这些缺陷吸收了 LED 的光线并发出寄生发光。”

研究人员对生长在双重退火 AlN 模板上的深



紫外 LED 性能与其它结构进行了比较：一种结构是 AlN 模板上再外延 3 μm 厚硅掺杂 AlN 的变体；一种是 MOCVD 生长的仅 2 μm 厚的 AlN 层的简单结构。

在所有这三种模板上，Knauer 及其团队都添加了 LED 异质结构，其中包括 500 nm 厚的 AlN 缓冲层、875 nm 厚的 AlGaIn n 型接触层、具有三个 $\text{Al}_{0.76}\text{Ga}_{0.24}\text{N}$ 量子阱的有源区，成分梯度 AlGaIn 层，30 nm 厚 p 型重掺 GaN 盖层。

倒装芯片封装的底部发射 LED 由所有三种结构的外延片制成，使用等离子体蚀刻来定义 0.4 mm^2 发射面积的台面结构，并露出 n 型接触层。在添加了铂基 p 型触点和钒铝基 n 型触点后，该团队测量了片上 CW 特性。

测量结果表明，偏振度——定义为 TM 模和 TE 模的强度之差，除以这两个强度之和——在具有双重退火模板的器件中的发射是最佳的。

这反映在 50 mA 的 CW 输出功率中，在 MOCVD 生长的 AlN 模板上制备的 232-233 nm LED 的输出功率从 0.28 mW，分别增加到生长在双重退火模板上有和无 AlN MOCVD 再生长盖层的器件的 0.44 mW 和 0.73 mW。

Knauer 说，该团队可以通过以下方式进一步提高输出功率：用反射触点替代吸收性 p 面触点；通过引入纳米图案的蓝宝石衬底增加外耦合；以及引入微像素 LED 阵列等。[1]

参考文献

A. Knauer et al. Appl. Phys. Lett. 122 011102 (2023)

双重退火的 AlN 模板在深紫外线 LED 的 a-和 c-方向（分别为 (a) 和 (b)）上提供了最有利的偏振度。

MXene 范德华接触在氮化镓高电子迁移率晶体管中的应用

肖特基栅耗尽型氮化镓高电子迁移率晶体管被广泛应用在高频电子器件领域。然而肖特基栅晶体管通常面临着高栅极漏电，开关电流比低等一系列问题。高栅极漏电将降低栅极击穿电压，因而导致高功耗和器件提前失效。最近几年，大量的研究通过增加栅极电介质来降低栅极漏电。然而，在氮化镓高电子迁移率晶体管添加栅介质会导致阈值电压的负向移动和降低栅控能力。

一个好的栅极 - 氮化镓界面是增强栅控能力的必要因素。然而传统栅电极如 Cu, Pt, W, Au, Ni 和 Cr 通常以电子束蒸发和磁控溅射方式沉积在氮化镓表面，在电介质和栅电极沉积过程中通常伴随着高能量等离子体和高温环境对氮化镓表面造成损坏。另外，由于电介质材料和氮化镓的晶格不匹配也会在电介质 - 氮化镓界面引入缺陷，从而降低氮化镓电力电子器件的可靠性。沙特阿卜杜拉国王科技大学李晓航团队提出二维导电材

料 MXene，与氮化镓形成范德华异质结，不同于常规电介质 - 氮化镓和金属电极 - 氮化镓的直接接触类型，由范德华接触组成的异质结构无需满足晶格匹配的要求，不会对氮化镓表面产生损害，而且制备过程简单，可大面积生产。

氮化镓高电子迁移率晶体管的栅电极通常以电子束蒸发和磁控溅射的方式沉积在氮化镓的表面，栅极金属与氮化镓表面形成化学键。如图 1 (a) 所示，由于金属与氮化镓的直接接触，来自金属的波函数会扩散到氮化镓的能带内引起缺陷能级。如图 1 (c) 所示，当在栅电极上施加负向电压，金属中的电子会通过缺陷能级在电场的作用下，转移到二维电子气沟道，而增加栅极漏电流和关态漏极电流。如图 1 (b) 和 (d) 所示，于此形成鲜明对比的是，MXene 与氮化镓形成范德华接触，金属的波函数无法扩散到氮化镓的能带内而避免了缺陷能级的形成，从而可以有效降低栅极漏电流和关态漏极电流。

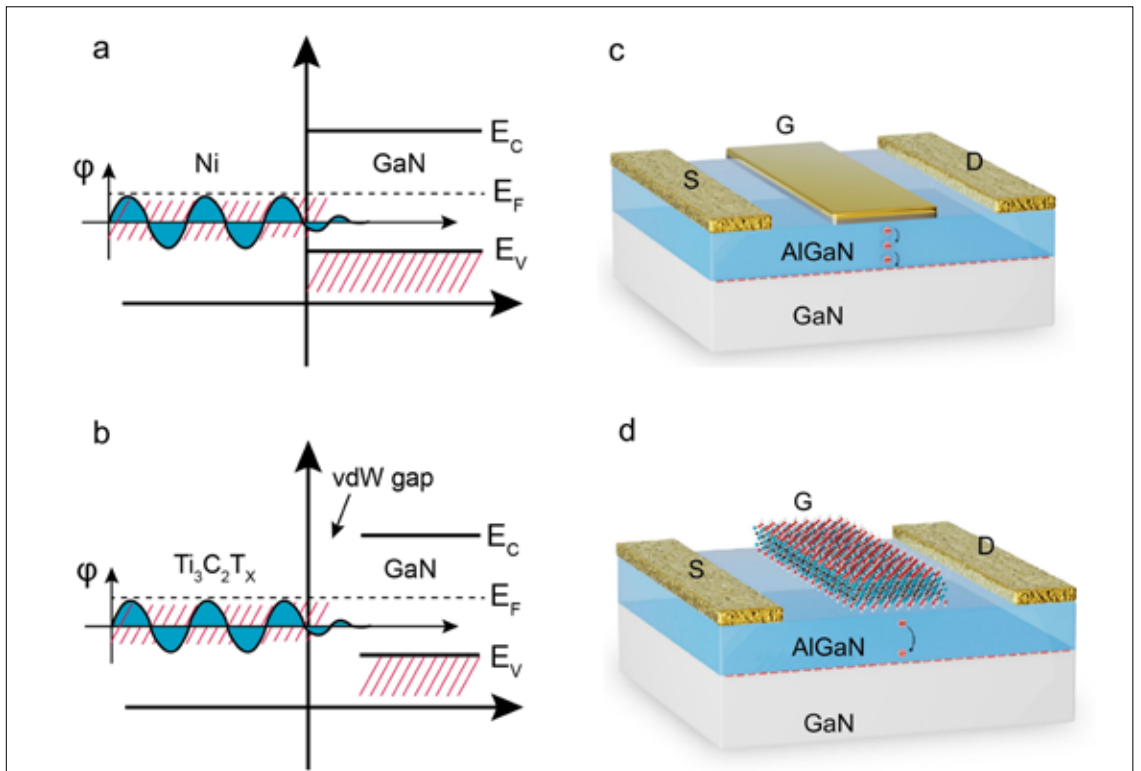


图1: Ni (a) 和 (b) MXene的金属诱导能隙态。Ni (c) 和 (d) MXene作为栅电极的氮化镓高电子迁移率晶体管示意图。

如图 2(a) 所示, 李晓航团队利用扫描透射电子显微镜图检测了 Ni 与 MXene 和氮化镓界面。在 Ni 与氮化镓之间会形成一层氧化物, 文献报道这层氧化物由氧化镍与氧化铝组成。如图 2(c) 所示, 在栅极的负电压扫描下, 界面氧化物中的缺陷不停地俘获和释放电子从而在电容 - 电压曲线上引起噪声。如图 2(b) 所示, MXene 与氮化镓之间形成范德华接触, MXene 与氮化镓之间无化学键的形成从而减少了缺陷形成。如图 2(d) 所示, MXene 作为栅电极的电容器的电容 - 电压曲线更加光滑而少噪声。

李晓航团队进一步通过优化 MXene 来提高氮化镓高电子迁移率晶体管的性能。如图 3(a) 和 (b) 所示, 对多层 (FL-) 和单层 (ML-) MXene 分别实现了开关电流比分别为 $\sim 10^8$ 和 $\sim 10^{10}$ 。如图 3(c) 所示, 而经过部分氧化后的 (O-) MXene 可以得到创纪录的 $\sim 10^{13}$ 开关电流比。如图 3(d) 所示, 他们对比了 MXene 和其它常用栅电极的晶体管性能。利用 MXene 可以同时实现超高开关电流比和接近热力学极限亚阈值摆幅 61 mV/dec。MXene 范德华接触可以有效避免传统金属栅电极对半导体表面的损害, 对于进一步提高氮化镓高电子迁移率晶体管性能有着重要意义。这项研究显示了 MXene 范德华接触在宽禁带半导体中巨大的应用前景。SC

参考文献

Chuanju Wang, Xiangming Xu, Husam N. Alshareef, and Xiaohang Li et al. Adv. Mater. 2023, 2211738

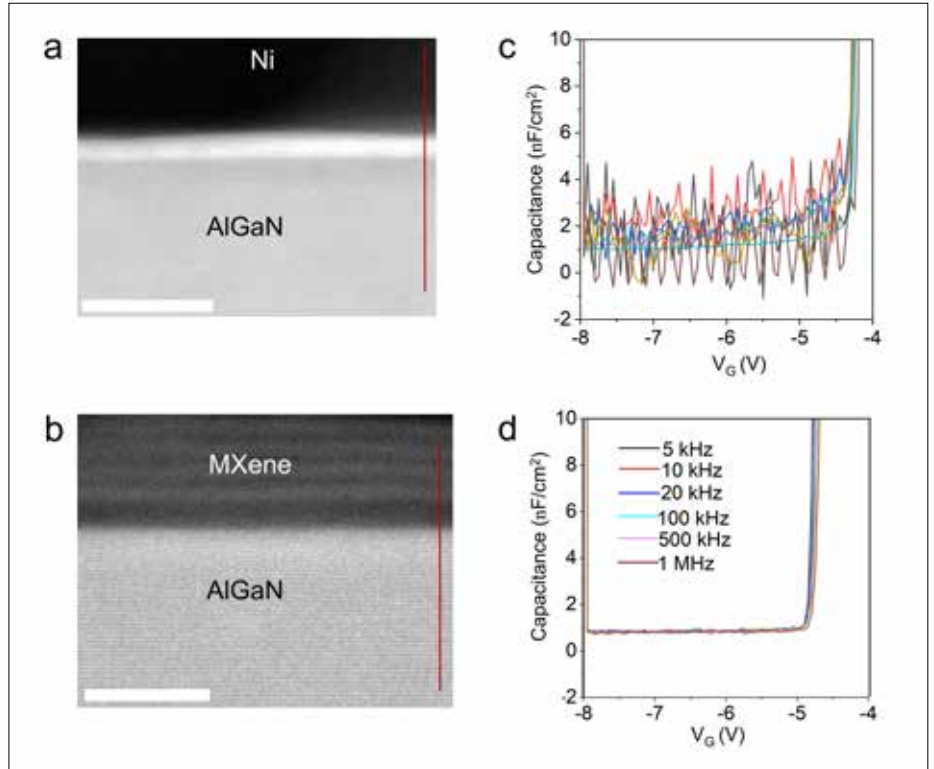


图2: Ni (a) 和 (b) MXene和氮化镓界面扫描透射电子显微镜图。Ni (c) 和 (d) MXene作为栅电极的电容器的电容-电压曲线(耗尽区电容)。

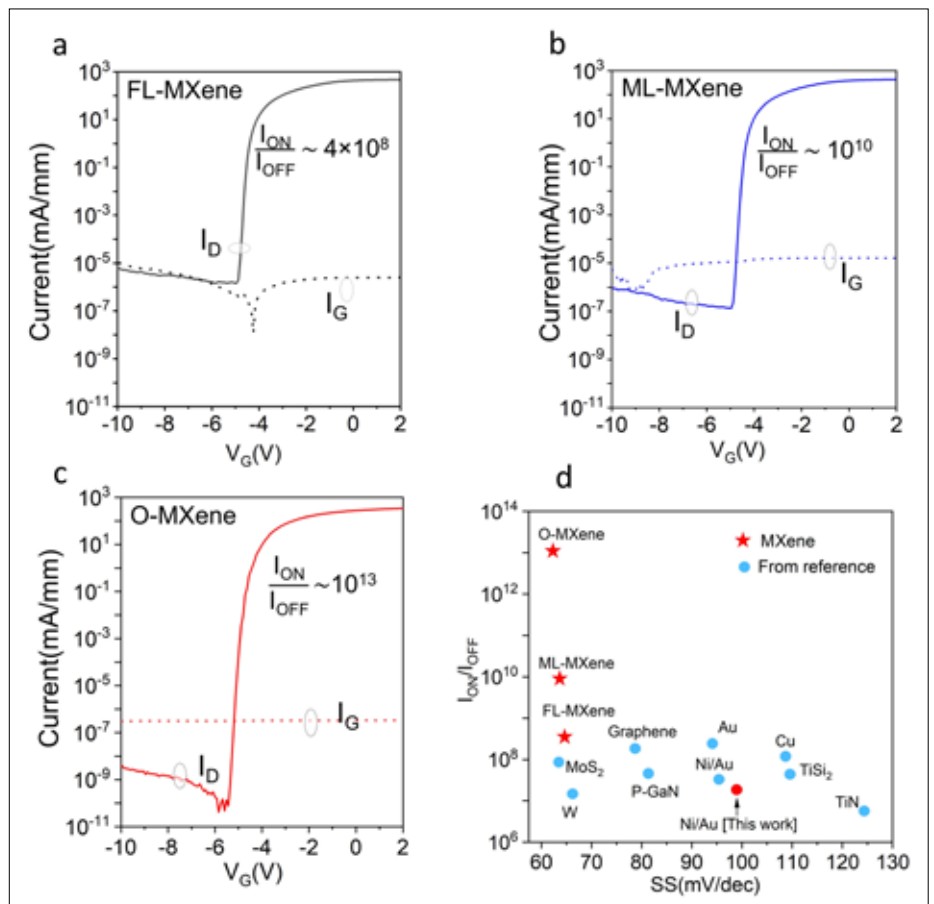


图3: (a) FL-, (b) ML-, 和 (c) O-MXene作为栅电极的晶体管的转移特性曲线。(d) MXene栅电极和其它常用栅电极的晶体管性能比较。

Advertiser	广告商名称	网址	页码
Aixtron		www.aixtron.com	BC
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
CIOE 2023	第 24 届中国国际光电博览会	www.cioe.cn	9
ES SHOW 2023	2023 年深圳电子元器件及物料采购展览会	https://esshow.cn	IBC
Evatec AG		www.evatecnet.com	13
华卓精科		www.u-precision.com	FC
iWISEETEC	芯睿科技	www.iwiseetec.com	7
Riber		www.riber.com	IFC
SEMICON China 2023		www.semiconchina.org	20
江苏晶工		www.jsjgbd.com	5

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 (雅时国际通讯)
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 (中文版编辑)
Min Lu (陆敏)
minL@actintl.com.hk

UK Office (英国办公室)
Angel Business Communications Ltd.
6 Bow Court, Fletchworth Gate,

Burnsall Road, Coventry, CV5 6SP, UK
Tel: +44 (0)2476 718 970

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

销售人员 Sales Offices

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

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

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

Phoebe Yin (尹菲菲)
phoebey@actintl.com.hk
Tel: 86 159 0270 7275

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

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

US (美国)
Janice Jenkins
jjenkins@brunmedia.com
Tel: 724-929-3550
Tom Brun
tbrun@brunmedia.com
Tel: 724-539-2404

Europe (欧洲)
Shehzad Munshi
sm@angelbcl.co.uk
Tel: +44 (0)1923 690215
Jackie Cannon
Jackie.cannon@angelbc.com
Tel: +44 (0) 1923 690205



深圳电子元器件及物料采购展览会 Electronics Sourcing Show

2023年10月11-13日 深圳国际会展中心（宝安）

主办单位：



深圳市电子商会
Shenzhen Electronic Chamber Of Commerce



励展博览集团
同励百业·共展商机

同期展览：



国际全触与显示展
C-TOUCH & DISPLAY



参展请扫码



Translation

AIXTRON

G10-SiC

150/200 mm 碳化硅外延
高生产力全自动化解决方案



扫码联络AIXTRON中国

EMPOWER TOMORROW

www.aixtron.com