

化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2023年 10/11月

在氧化镓蚀刻方面
表现突出



消除应用GaN的障碍



制造性能更好的蓝色
和绿色激光器



简化SiC衬底生产



专注于半导体设备
非金属精密零部件 / 耗材加工

Focus on processing semiconductor equipment non-metallic/consumables precision parts



高纯石英系列： 石英环、石英舟、石英槽、石英管、石英腔等

精密陶瓷系列： 陶瓷环、陶瓷plate、陶瓷pin、陶瓷套筒等
碳化硅环、碳化硅舟等

单晶硅系列： 硅环、硅电极等



公司名称：宁波云德半导体材料有限公司

联系电话：0574-23887666

联系邮箱：sales@ymat.com.cn

地址：中国浙江省宁波市杭州湾新区玉海东路68号28栋



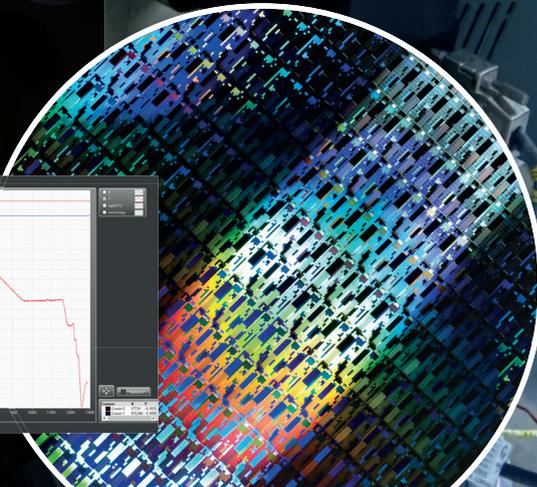
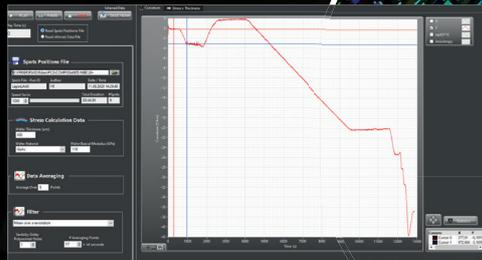
化合物半导体外延表面 实时监测

原位实时 曲线跟踪

RIBER
EZ-CURVE®

过程监控工具： 良率增强

- 表面应力和曲率原位测量
- 实时探测
- 经典曲线对比



RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

引领用于失效分析和 大型样品研究的纳米计量工具



Park NX20

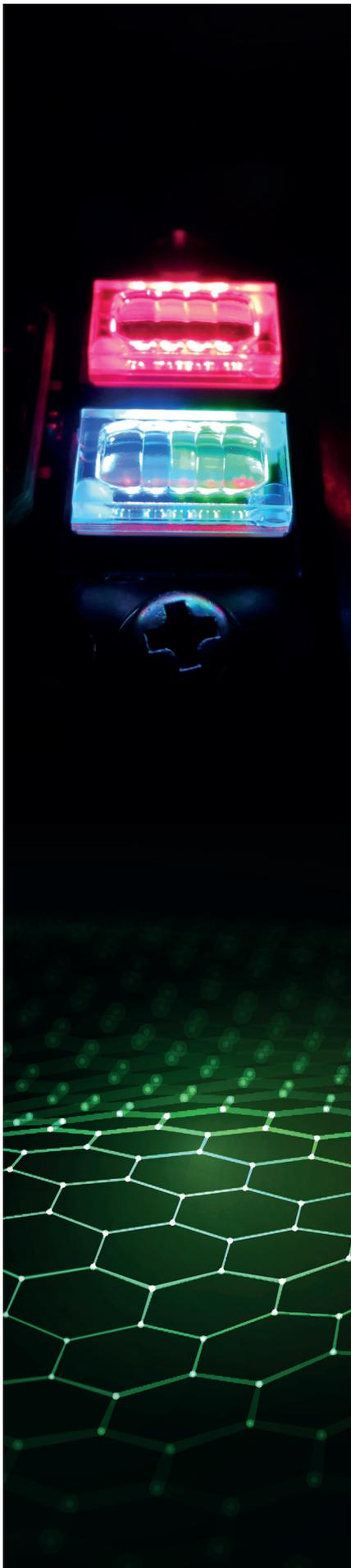
- 为FA和研究实验室通过精准的原子力显微镜解
- 实现高量率的精准且高重复性的测量
- 低噪声Z探测器可精确测量原子力显微镜表面形貌
- 使用真正非接触模式扫描方式，实现样品损坏最小化

作为一款缺陷形貌分析的精密测量仪器，其主要目的是对样品进行缺陷检测。而仪器所提供的数据不能允许有错误的存在。

Park NX20，这款高精密的大型样品原子力显微镜，凭借着数据的准确性，在半导体和硬盘行业中大受赞扬。



扫码关注公众号



封面故事 Cover Story

17 在氧化镓蚀刻方面表现突出 Excelling In The Etching Of Gallium Oxide

随着快速发展，目前Ga₂O₃已经开始影响功率器件市场。由于从熔体中有机会制造出高质量的块状衬底，该类超宽禁带半导体可以以极具竞争力的成本实现器件的卓越性能。在过去的十年中，该类功率器件的性能有了突飞猛进的发展。其中的关键突破包括制造击穿电压超过8 kV、击穿场强超过5 MV/cm的器件，其性能超出了SiC和GaN的理论极限。然而，Ga₂O₃基器件性能尚未达到接近理论的极限水平，其中部分原因是由于缺乏合适的、高度可控的、无损伤的蚀刻工艺。

- Fikadu Alema¹、Aaron Fine¹、William Brand¹、Andrei Osinsky¹、Abishek Katta²和Nidhin Kurian Kalarickal² (¹Agnitron, ²亚利桑那州立大学)

编者话 Editor's Note

04 深紫外LED技术和产业化进展 The progress of UVC-LED technology and industrialization

- 陆敏

业界动态 Industry

06 Crystal IS宣布推出首款4英寸AlN衬底 Crystal IS announces first 4-inch AlN substrate

06 Wolfspeed将射频业务出售给Macom Wolfspeed to sell RF business to Macom

08 金刚石p型横向SBD取得突破 Breakthrough in diamond p-type lateral SBDs

08 Transphorm的GaN器件达到短路里程碑 Transphorm's GaN meets short circuit milestone

09 信越化学推进QST衬底业务 Shin-Etsu Chemical promotes QST substrate business

09 长电科技：公司封装的第三代半导体器件已经应用于汽车领域 Jcet: The third generation of semiconductor devices packaged by the company have been used in the automotive field

09 碳化硅领域又一起收购！ Another acquisition in Silicon carbide field!

关于雅时国际资讯 (ACT International)

ACT 25 雅时国际资讯 (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

九峰山实验室专栏 JFS Laboratory Column

- 10 化合物半导体材料的表征分析
Characterization of compound semiconductor materials
- 王瑜璞, 杨安丽, 刘琰, 王若兰, 王丹丹, 丁琪超, 麦志洪
九峰山实验室

技术 Technology

- 25 消除应用GaN的障碍
Banishing Barriers To GaN Adoption
- Enis Marcon, 英诺赛科 (欧洲)
- 30 制造性能更好的蓝色和绿色激光器
Building better blue and green lasers
- Yoshitaka Nakatsu, Tsuyoshi Hirao, Tomonori Morizumi, Yoji Nagao, Shingo Masui, Tomoya Yanamoto 和 Shin-Ichi Nagahama, 日本日亚化学工业株式会社
- 34 拓展深紫外 LED 的应用领域
Expanding horizons for deep-UV LEDs
- MICHAEL KNEISSL, 柏林工业大学和费迪南德-布劳恩研究所 (FERDINAND-BRAUN-INSTITUT)
- 38 简化 SiC 衬底生产
Streamlining SiC substrate production
- Jeff Gum, 哈挺 (Hardinge) 公司
- 42 射频声学滤波器技术的发展趋势
The Trend of Radio-Frequency Acoustic Filter Technology
- 欧欣¹、张师斌¹、吴进波¹、凌丹¹、章秀银²,
(¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所, ²华南理工大学)

科技前沿 Research Review

- 45 采用块状AlN可使FET性能更佳
Better FETs with bulk AlN
- 46 对非辐射机制的新见解
A new insight into non-radiative mechanisms
- 47 推进琥珀色microLED的发展
Advancing amber microLEDs
- 48 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
刘红超博士 安徽长飞先进半导体有限公司 首席科学家
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
钮应喜博士 中国科学院半导体研究所, 教授级高级工程师



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
niushenjun@cgbtek.com
郭生钢 13911279276
sgguo@cgbtek.com



深紫外 LED 技术和产业化进展

紫外光按波长可分为 315~400nm 近紫外 UVA、280~315 nm 中紫外 UVB、192~280 nm 深紫外 UVC 和 10~192nm 极紫外 UVE 四个范围。目前除 UVE，均可实现 LED 发光，其中 UVC-LED 由于能在消毒杀菌、水 & 空气净化、紫外固化、生化检测、非视距通信等领域应用而备受行业关注。UVC-LED 是宽禁带氮化铝镓 (AlGaIn) 材料在光电领域的最新应用之一。AlGaIn 作为 III 族氮化物三元合金材料，直接带隙，其禁带宽度随着 Al 组分变化可在 3.4-6.2eV 之间连续可调，是制备 200-365nm 高效 LED 的理想材料。汞灯作为目前最传统的紫外光源，主要波长为 365 nm。汞具有强剧毒性和挥发性，严重破坏环境，故 UVC-LED 成为替代紫外汞灯的最佳选择。UVC-LED 可以通过控制 Al 组分调节波长，无毒、体积小、开关快、工作电压低、寿命长的显著优势拓宽了 UVC-LED 的应用领域。但是基于 AlGaIn 的 UVC-LED 的 EQE 普遍小于 20%，其中用于消毒杀菌的 265-280 nm-LED 的 EQE 更低于 5%，这严重制约了其应用推广。随着 Al 组分增加，AlGaIn 掺杂效率降低，导致工作电压高和空穴注入效率下降等问题。n-AlGaIn 掺杂方面，大量掺杂 Si 会造成严重的缺陷自补偿和杂质散射，从而又反作用降低 n-AlGaIn 的电子浓度，影响 AlGaIn 的 n 型掺杂效率，目前铟硅 (In-Si) 共掺杂、超晶格掺杂、极化诱导掺杂、 δ 掺杂等非均匀掺杂技术被提出。AlGaIn 的 p 型掺杂困难更大，源于更大的 Mg 激活能 (160-510meV)，为了降低 Mg 的激活能，镁硅 (Mg-Si) 共掺杂、超晶格 p 型掺杂、多层的超晶格 p 型掺杂、非平衡 p 型掺杂方法被开发，还可以通过极化诱导提高 AlGaIn 的 p 型掺杂效率。由于载流子会受到 LED 中势垒的阻挡，因此目前对于阻止电子泄漏主要是采用 p-AlGaIn 电子阻挡层 (EBL)，但是 p-AlGaIn EBL 阻挡电子泄漏的同时也会阻碍空穴注入到有源区。为了解决这个问题，p-AlGaIn EBL 不断改进，现如今 p-AlGaIn EBL 大致可分为四大类型：传统单层型、复合型、线性或阶梯渐变型和超晶格型 EBL。与 InGaIn 基 LED 不同，AlGaIn 基 UVC-LED 不存在类似 In 团簇的金属团簇，因此其有源区的载流子辐射复合受到位错的影响非常严重。AlGaIn 基 UVC-LED 中的 AlGaIn 薄膜位错密度会随着 Al 组分的增加而提高。因此 AlGaIn 的外延质量对提高 AlGaIn 基 UVC-LED 的载流子辐射复合效率起着至关重要，科研人员通过使用同质衬底、异质衬底和氮化铝模板类外延技术来降低位错。载流子辐射复合效率还受极化效应的影响。AlGaIn 基 UVC-LED 中存在自发极化和失配极化，极化电场导致 MQW 发生 QCSE，MQW 能带弯曲使得电子和空穴波函数的分离，降低电子和空穴的辐射复合效率。为了克服极化效应带来的问题，提出了在无 EBL 结构，使用渐变阶梯量子势垒代替传统的量子势垒。MQW 中载流子分布的不均匀是导致载流子辐射复合效率下降的另一个原因。在电流注入下，AlGaIn 基 UVC-LED 受到蓝宝石衬底性质和电极设计等因素影响，会产生电流拥堵效应，从而导致载流子非辐射复合的几率增加和载流子辐射复合的效率降低，并导致 AlGaIn 基 UVC-LED 结温的增加，降低了器件的寿命。因此实现均匀的电流分布，成为提升 AlGaIn 基 UVC-LED 载流子辐射复合效率和减少芯片发热亟待解决的问题。在 AlGaIn 基 UVC-LED 中，有源区域中产生的光只有逃逸到自由空间才能被用于实际应用中。在不对 AlGaIn 基 UVC-LED 进行相关提高光提取措施的情况下，LEE 不足 10%。目前提高 AlGaIn 基 UVC-LED 的 LEE 有效途径是衬底表面粗化。在 AlGaIn 基 UVC-LED 中，随着 Al 组分的增加，主导光的发射方式由 TE 向 TM 模式转化，其中 TM 模式的偏振光是在平行于衬底的方向传播的。与 TE 模式相比，TM 模式的偏振光更难被提取，即 TE 模式比 TM 模式有更高的提取效率。其中衬底表面的粗化或图形化对 TE 和 TM 模式的 LEE 都有所改善。

据美国联合市场研究机构数据显示，2020 年全球深紫外 LED 市场规模为 2 亿美元，受全球杀菌消毒市场的强力带动，预计 2030 年将达到 190 亿美元，年复合增长率为 60%，成为全球 LED 产业新的“增长点”。国际上欧司朗、日亚等传统 LED 巨头加速布局 UVC-LED 产业，为其业务转型升级开辟新赛道。我国产学研合作快速推进，中科院、华中科大已分别在山西、湖北建立 UVC-LED 产业基地，三安光电、国星光电等 20 余家企业快速跟进。据不完全估计，UVC-LED 及衍生产品将在医院、学校、白色家电、高铁等领域稳定形成 600 亿元以上的市场规模，加上物流运输方面的大规模应用后将形成千亿规模市场。经过几十年的发展，基于 AlGaIn 基 UVC-LED 已初步实现工业化。然而，AlGaIn 基 UVC-LED 与已全面商业化的氮化物蓝光 LED 相比，其 EQE 仍旧处于较低水平。但是在载流子注入、载流子辐射复合和器件光提取方面已取得一系列的突破。期待在不久的将来，AlGaIn 基 UVC-LED 在 EQE 上将有重大突破，实现氮化物光电的“又一春”！



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

当规模量产 至关重要时 您需要可信赖 的合作伙伴



在中国拥有40年晶圆厂设备和材料工程经验的应用材料公司是您的正确选择

- » 广泛的业界产品组合，包括协同优化和集成解决方案
- » 助力加速并推进您的技术路线图——新的材料工程方法用于解决严峻的挑战
- » 2022年在研发领域的投资达到28亿美元
- » 广泛的服务和支持网络

现在是投资于您需要的产品、帮助您在市场确立优胜地位的绝佳时机



官方公众号



官方视频号

针对150mm和200mm晶圆的SiC, GaN和GaAs制造工艺



Centura® Etch



Centura® RTP



Endura® PVD



Mirra® CMP



Picosun™ ALD



Producer™ CVD



Raider™ Edge



Reveal® Review



VeritySEM™

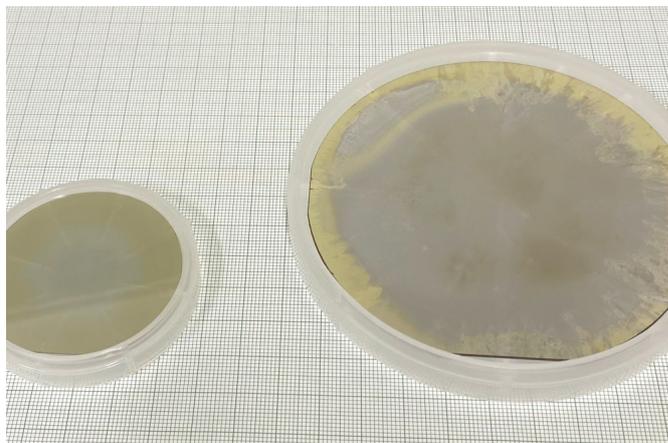


VIISta® Implant

Crystal IS 宣布推出首款 4 英寸 AlN 衬底

旭化成 (Asahi Kasei) 旗下的 Crystal IS 宣布, 已成功生产出直径 4 英寸 (100 mm) 的单晶氮化铝 (AlN) 衬底。据该公司称, 这是首次产出 4 英寸 AlN 衬底, 证明 Crystal IS 生长 AlN 块状单晶的工艺具有可扩展性, 可满足生产需求。AlN 衬底缺陷密度低、紫外线透明度高、杂质浓度低。AlN 具有超宽带隙和较高热导率, 因此对多个行业都有吸引力, 如 UVC LED 和功率器件。根据目前 UVC LED 的要求, Crystal IS 生产的 4 英寸衬底可用面积超过 80%。

旭化成先进科学与技术研究实验室的执行研究员 Naohiro Kuze 表示: “我们非常高兴地宣布, 我们已生产出 4 英寸块状 AlN 衬底。这一成就表明 AlN 在 UVC LED 以外的新行业中具有商业可行性。” Crystal IS 成立于 1997 年, 旨在开发原生 AlN 衬底, 其商业工艺可用于生产直径 2 英寸的衬底, 利用这一工艺可制造 UVC LED。UVC LED 非常适合生产波长为 260 nm 至 270 nm 的杀菌灯。在现有 2 英寸生产线的基础上, 针对使用 UVC LED 的消费器件, 工厂目前的产能可满足其批量需求。Crystal IS 总裁兼首席执行官 Eoin Connolly 说: “这表明了我们的工艺具有可扩展性, 可在 AlN 上生产高质量器件。我们为团队的成就, 及其对



这一成就表明 AlN 在 UVC LED 以外的新行业中具有商业可行性

整个半导体行业的影响而感到自豪。”目前, Crystal IS 每年生产数千个 2 英寸衬底, 以支持其 Klaran 和 Optan 产品线的生产。本次 4 英寸 AlN 衬底的商业化, 将使 Green Island 工厂的现有器件产量翻两番。还使在 AlN 衬底上开发新应用成为可能, 因为 4 英寸 AlN 衬底将融入现有制造生产线, 其中现有制造生产线用于生产使用替代材料的功率器件和射频器件。CS

Wolfspeed 将射频业务出售给 Macom

Wolfspeed 将向 Macom Technology 出售其射频业务, 售价约 7500 万美元现金和 711,528 股 Macom 普通股, 其中股



份总值为 5000 万美元, 根据 30 个交易日 (截至 2023 年 8 月 21 日) Macom 普通股的平均值算出。Wolfspeed 期望今年年底能完成交易。Wolfspeed 总裁兼首席执行官 Gregg Lowe 表示: “鉴于汽车市场、工业市场、可再生能源市场均在显著增长, 我们相信现在是最佳时机, 可进一步专注于扩大我们的功率器件和材料业务, 从而满足需求的增长。这项交易还为我们的射频团队提供了一个巨大的机会, 可利用 Macom 的多元客户群、射频工程领导力、运营效率, 实现规模化发展和运营。” Wolfspeed RF 的技术包括强大的 GaN on SiC 系列产品, 针对下一代电信基础设施、军事、其他商业应用进行了优化。Wolfspeed 的 100mm GaN 晶圆制造工厂位于北卡罗莱纳州 Research Triangle Park, 交易完成后, 大约两年内 Macom 才会接管该工厂, 以便 Wolfspeed 可搬迁特定生产设备。工厂转让之前, Wolfspeed 在交易完成时获得的 Macom 股票将受到转让限制。CS



爱发科苏州公众号

爱发科真空技术(苏州)有限公司

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

高精度蒸发台 ($\pm 1\%$)

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



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



Load-lock 式溅射台

- 可对应2~8寸方片,未定型片,切换兼容;
- 可对应多元溅射材料。

金刚石 p 型横向 SBD 取得突破

半导体行业总值 2000 亿美元，其中 10% 的收入来自功率半导体器件和集成电路。人们认为，全球 50% 以上的电力由功率器件控制。而随着可再生能源的出现，预计 2030 年将增至 80%。

美国能源信息署预计，2050 年全球电能需求将上涨近 50%；因此，为消除电力转换中 90% 的功率损耗，利用新兴超宽带隙材料实现快速、高效、坚固、可靠的半导体开关变得至关重要。金刚石作为选定材料，是所有这些需求的核心，因为金刚石热导率最高，是已知最坚硬的半导体，其击穿场强高、饱和速度快，同时热膨胀系数最低。金刚石的超宽带隙为 5.47 eV，击穿场强约为 10 MV/cm，热导率约为 2200W/mK，其性能优于宽带隙半导体（GaN）和超

宽带隙半导体（Ga₂O₃、AlN）。伊利诺伊大学团队在《IEEE Electron Device Letters》期刊上报告称金刚石肖特基势垒二极管（SBD）击穿电压达到 4612 V，创下新高。这一成果得益于创新横向结构，其中使用了高导电接触再生长方法和场板边缘终止技术。Al₂O₃ 场板减轻了接触边缘附近的电场拥挤，提高了反向偏压性能。反向偏压为 4.6 kV 时，带 Al₂O₃ 场板的 SBD 漏电流密度低于 0.01 mA/mm，4.6 kV 是金刚石 SBD 迄今所知的最高击穿电压之一。这也是首次对采用场板边缘终止技术的横向金刚石 SBD 进行报告。比较预制横向肖特基二极管与先前金刚石功率器件的基准图，先前的金刚石功率器件包括横向 MESFET、MOSFET、结型 FET、室温下的伪纵向和纵向肖特基二极管。☞

Transphorm 的 GaN 器件达到短路里程碑

GaN 公司 Transphorm 利用专利技术，使 GaN 功率晶体管的短路耐受时间 (SCWT) 长达 5 μs。

这是有史以来首次达到的成就，标志着整个行业的重要里程碑。Transphorm 表示，证明 GaN 能满足耐用型功率逆变器所需的短路能力，这类功率逆变器包括伺服电机、工业电机和汽车动力系统，传统上由硅 IGBT 或 SiC MOSFET 提供支持，未来五年，GaN 在以上领域的 TAM (Total Addressable Market, 可获取市场总量) 将超过 30 亿美元。该项目是在安川电机公司的支持下开发的，安川电机是 Transphorm 的长期战略合作伙伴，也是中低压驱动器、伺服系统、机器控制器、工业机器人的制造商。对伺服系统而言，GaN 成为一种极具吸引力的功率转换技术，因为与现有解决方案相比，GaN 可使效率更高、尺寸更小。为此，GaN 必须通过严格的稳健性测试，其中最具挑战性的是承受住短路冲击。发生短路故障时，器件必须在高电流和高电压的极端条件下正常运行。系统检测到故障并停止运作可能需要几微秒。这段时间内，器件必须能自行承受短路故障。安川企业技术部基础研发部经理 Motoshige Maeda 说：“如果功率半导体器件无法承受短路，那么系统本身可能出现故障。人们普遍认为，GaN 功率晶体管无法满足像我们这种重型功率应用所需的短路要求。安川电机与 Transphorm 合作多年后，我们相信这种看法毫无根据，现在证明我们的观点是对的。我们对 Transphorm 取得的成就感到兴奋，并期待能展示这



种 GaN 新特性如何使我们的设计受益。”短路技术已在新近设计的 15 mΩ 650 V GaN 器件上得到验证。值得注意的是，在 50 kHz 的硬开关条件下，该器件效率峰值达 99.2%，最大功率为 12 kW。该器件不仅性能优异，而且可靠性高，满足高温高压应力要求。Transphorm 首席技术官兼联合创始人 Umesh Mishra 表示：“标准 GaN 器件的短路耐受时间仅为几百分之一纳秒，这对于故障检测和安全关断来说太短了。然而，凭借我们的级联架构和关键专利技术，在不增设外部元件的情况下，我们证实短路耐受时间可长达 5 μs，从而保持器件的低成本和高性能。”他认为研究成果将“颠覆”GaN 在电机驱动和其他大功率系统中的应用。明年，对 SCWT 成果的完整介绍、实证分析及更多内容预计将在一场大型电力电子会议上公布。☞

信越化学推进 QST 衬底业务

日本公司信越化学宣布推出用于 GaN 功率器件的 QST (Qromis 衬底技术) 衬底。此外, 该公司还将应客户要求销售 GaN 生长 QST 衬底。目前, 该公司已推出直径为 6 英寸和 8 英寸的衬底, 并正在开发 12 英寸衬底。QST 衬底的热膨胀系数 (CTE) 与 GaN 相同, 因此能抑制 GaN 外延层翘曲开裂。信越化学表示, 这种衬底可实现大直径、高质量的厚 GaN 外延生长, 适用于功率器件和射频器件, 以及 MicroLED 显示器的 MicroLED 生长。自 2021 年以来, 日本及全球客户一直在评估用于功率器件、射频器件、LED 的样品。功率器件方面, 正在对宽电压范围 (650V 至 1800V) 的器件进行持续评估。信越化学表示, 公司一直在稳步改进 QST 衬底技术。其中一个例子是降低了键合工艺产生的缺陷。此外, 针对更厚的 GaN 薄膜, 该公司还推动

了模板衬底的供应, 这些模板衬底带有优化缓冲层, 能够实现厚度超过 10 μm 的稳定外延生长。信越化学还使用 QST 衬底生长出厚度超过 20 μm 的 GaN 厚膜, 并在功率器件中实现了 1800V 的击穿电压。信越化学与冲电气共同开发了一项技术, 可从 QST 衬底上剥离 GaN, 并利用晶体膜键合 (CFB) 技术将其键合在不同材料制成的衬底上。迄今为止, 大多数 GaN 功率器件都是横向器件, 但 CFB 技术利用 QST 衬底的特性, 通过从绝缘 QST 衬底上剥离一层厚厚的高质量 GaN, 实现了可控制大电流的垂直功率器件。对于制造 GaN 器件的客户, 信越化学将供应 QST 衬底或 GaN 生长 QST 衬底, 而冲电气工业将通过合作或授权的方式提供其 CFB 技术。两家公司希望通过这种方式为垂直功率器件的发展做出贡献。CS

长电科技：公司封装的第三代半导体器件已经应用于汽车领域

近日长电科技在互动平台表示, 公司封装的第三代半导体器件, 已经应用于汽车、工业储能等领域并进入产能扩充阶段。

预计 2024 年起相关产品营收规模有望大幅增长, 并在未来几年显著成长, 将有利促进第三代半导体器件在全球应用市场的快速上量。CS

碳化硅领域又一起收购!

近期, 以色列半导体检测与量测设备制造商 Camtek Ltd. (康泰科技) 宣布拟以 1 亿美元 (约合人民币 7.3 亿元) 现金收购 FormFactor, Inc. (NASDAQ: FORM) 旗下的 FRT Metrology (“FRT”) 业务。目前, 双方已签署了协议, 预计交易将在 2023 年第四季度完成, 前提是满足惯例成交条件。资料显示, Camtek 是半导体制造及封测领域的芯片检测与量测 (三维计量) 设备头部厂商, 总部位于以色列拉马特甘 (Ramat Gavriel), 在亚洲和欧美地区等全球市场设有 8 个办事处。在半导体器件的生产过程中, Camtek 的设备主要负责检测晶圆上的集成电路 (IC) 并测量 IC 特征, 涵盖前端、中端和开始组装 (切割后) 的各个环节, 设备具体提供晶圆检测, 覆盖先进互连封装、异质集成、内存和 HBM、CMOS 图像传感器、化合物半导体、MEMS 和射频等领域, 为全球 IDM、OSAT

(半导体封测服务提供商) 和晶圆厂提供服务。Form Factor 是 IC 整个生命周期内关键测试和测量技术供应商, 提供的服务包括计量和检测、特性评估、建模、可靠性测试、设计调试、资格认证和生产测试等, 其产品和服务能够为半导体厂商优化器件性能、提升产量, 从而加速盈利。目前, FormFactor 在亚洲、欧洲和北美等地区均设有办事处。而 FRT 总部位于德国贝吉施格拉德巴赫 (Bergisch Gladbach), 是先进封装及 SiC 碳化硅领域的高精度计量解决方案主要供应商, 于 2019 年并入 Form Factor。本次收购预计将发挥 Camtek 和 FRT 在先进封装和 SiC 领域的技术 (这些技术在半导体制程中需引入新的检测和量测工艺)。通过整合 FRT 独特的混合多传感器 SurfaceSens™ 技术, Camtek 将能够为客户提供更广泛和更全面的检测和量测解决方案。CS

化合物半导体材料的表征分析

作者：王瑜璞，杨安丽，刘琰，王若兰，王丹丹，丁琪超，麦志洪

引言

与当前市场上成熟且广泛应用的硅基半导体不同，化合物半导体是由三五族 (Group III and V)、二六族 (Group II and VI) 或同样来源于第四族 (Group IV) 的两个及以上元素组成的化合物。典型的化合物半导体包括 ZnSe (II-VI)、GaAs (III-V)、GaN (III-V)、InP (III-V)、SiC (IV-IV) 和 SiGe (IV-IV)。这些化合物半导体在电子学和光电子学等领域具有广泛的应用，并且由于其特殊的能带结构和物理性质，它们在某些方面表现出优于硅的特点。因此，化合物半导体在高频电子器件、光电子器件和高温高功率电子器件等领域中具有重要的地位和应用前景。

化合物半导体市场的迅速增长主要归因于 GaAs、InP、SiC 和 GaN 等化合物半导体在 LED、光电器件、射频器件和功率器件等在通讯、照明、新能源汽车和电力供应等方面的广泛应用。GaAs 和 InP 是第二代半导体材料的代表，而 SiC 和 GaN 是第三代半导体材料的代表，它们具备出色的高频性能和高温性能，因此备受关注。

基于行业前瞻维度，第三代化合物半导体以其优良的电性能、热性能和化学稳定性，受到了功率半导体领域在高温、高压、高频、大功率、耐辐照等应用方面的关注。随着第三代化合物半导体材料生长技术和器件制造技术的提高，特别是新能源汽车、5G 通讯、轨道交通和特高压输电等方面需求的增长，第三代化合物半导体功率器件正处于快速发展阶段。然而，受限于第三代化合物半导体材料和器件工艺水平，进一步的大规模应用仍存在众多难点，特别是在高质量材料可控生长和高性能、高可靠性器件制造及降低成本方面。例如，与硅基半导体技术相比，第三代化合物半导体的晶圆质量仍存在很大的改进空间。特别是，晶圆的缺陷尚待进一步减少，材料的均

匀性和重复性也未达到大规模量产的期望值。九峰山实验室作为产业级研发及分析测试验证平台，将战略性重点聚焦大规模高质量的材料与器件的表征分析工作。

根据当前化合物半导体材料分析表征的需求，九峰山实验室建立了针对化合物半导体材料全面的测试、分析和表征能力。其中，化合物半导体材料的表征工作包括：化合物的组分元素和微痕元素定量测量、晶格结构的显微分析、材料的分子键和结合能的测定以及材料的电学、光学、热学和机械性能等方面的确定。此外，缺陷分析也是材料表征的一项重要任务。

材料的各种物理特性，由其原子组成、有序排列形成晶格结构以及原子之间的化学键相互作用所决定，这些特性在制造化合物半导体芯片中得到应用。针对不同样品和需求，使用二次离子质谱 (SIMS)、X 射线光电子能谱 (XPS)、俄歇电子能谱 (AES) 和能量散射 X 射线谱 (EDX) 等技术可以对化合物半导体的组分元素和元素的深度分布进行测量。特别是动态二次离子质谱技术 (D-SIMS)，可以提供半导体掺杂元素的定性、定量和深度分布分析，这在国内是比较稀缺的设备。在动态二次离子质谱的应用中，九峰山实验室除了提供常规的微痕元素的定性、半定量和定量检测外，还提供多达 68 种元素的定量标样制备。可分析的晶圆包括 Si、Si thin wafers、Si Taiko wafers、SiC、GaN、InP、GaAs、InSb、HgCdTe、LiNbO₃、Sapphire、Diamond、Quartz 等。化合物半导体的分子键和相应的分子结合能可以采用 XPS、FTIR 和 Raman 的技术来进行分析，XPS 可以检测材料的组分元素和结合能，并获取外延和薄膜材料的元素深度分布。

透射电镜 (TEM)、X 射线衍射 (XRD) 和扫描电镜 (SEM) 及其电子背散射衍射谱 (EBSD) 等技

术在分析晶圆晶格结构、质量和缺陷分析方面是不可或缺的。此外，光谱分析技术，包括结合高倍光学显微 (OM) 技术的光致荧光发光谱 (PL)、光致发光谱寿命 (PL lifetime)、阴极荧光光谱 (CL)、傅里叶红外光谱 (FTIR) 和拉曼光谱 (Raman) 等，为半导体材料的质量和缺陷分析提供了有力的手段。深能级瞬态谱 (DLTS) 可以帮助分析和探测半导体材料的深能级缺陷。

在电子器件和光电器件的应用方面，我们聚焦材料的电学特性、光学特性、热学特性和力学特性的表征与分析。电学特性包括电导率、载流子浓度和迁移率。电学特性可以用接触和非接触的方式进行测量，比如霍尔效应、四探针和汞探针等。光学特性可通过 PL、FTIR 和 Raman 进行测试。PL 可以无损地确定电子带隙，为化合物半导体的元素组成的分析提供了量化的手段，同时，这种技术的高灵敏度提供了识别极低浓度杂质的可能性。热学特性可使用热成像显微镜，其 thermal mapping 功能可以测试物体表面的温度分布，用于测试半导体材料的热阻。此外，纳米压痕仪 (NI) 和原子力显微镜 (AFM) 的技术也可用于分析和测量材料的电学特性和力学特性，其中，原子力显微镜配备扫描电容显微镜、扫描电阻显微镜等电学模块，可以测量掺杂特性分布，纳米力学模块可测量纳米级结构的力学特性。

几种主要化合物半导体材料的比较

表 1 列举出第一代半导体 Si，第二代化合物半导体 GaAs、InP 和第三代化合物半导体 SiC、GaN 材料物理特性。传统的单晶材料主要应用于微电子和电力电子领域，由于其间接带隙结构不能产生高效发光，因而在光电子领域的应用受到限制。在光电子领域内应用较多的是具有直接带隙结构、发光效率高的化合物半导体材料，如 GaAs 是 III-V 族化合物中被人们开发利用较早且较多的一种半导体材料。激光器、探测器、高速器件和微波二极管是其当前比较成熟的一些应用。InP 半导体材料与 Si 和 GaAs 材料相比具有高电光转换效率，高电子迁移率，高工作温度 (400 ~ 450℃) 以及强抗辐射能力的特点，因而被广泛应用在民用和军事领域，例

表 1. 半导体材料基本物性对比表。

| | Si | GaAs | InP | 4H-SiC | GaN |
|--------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|---------------------------|-------------------------|
| 晶体结构 | 金刚石型 | 闪锌矿型 | 闪锌矿型 | 4H六方晶系 | 六方纤锌矿 |
| 晶格常数 (Å) | 5.431 | 5.642 | 5.869 | a=3.076 | a=3.189 |
| 能带结构 | 间接带隙型 | 直接带隙型 | 直接带隙型 | c=10.053 | c=5.185 |
| 禁带宽度 (eV) (室温) | 1.124 | 1.424 | 1.350 | 间接带隙型 | 直接带隙型 |
| 本征载流子浓度 ni (cm ⁻³) | 1 × 10 ⁷ | 1.5 × 10 ¹⁰ | 1.3 × 10 ⁷ | 8.2 × 10 ⁻⁹ | 1.9 × 10 ⁻¹⁰ |
| 击穿电场强度 (MV/cm) | 0.3 | 0.4 | 1 | 3 | 3.3 |
| 热导率 (W/cm·K) | 1.5 | 0.5 | 0.7 | 4.9 | 1.3 |
| 电子迁移率 (cm ² /V·s) | 1200 | 6500 | 5400 | 800 | 1250 |
| 介电常数 | 11.9 | 13.18 | 12.5 | ε11=ε22=9.6 ε33= 10.33 | 9 |

如在太赫兹 (THz)、激光器、太阳能电池、光电探测器和光纤网络系统等领域，包括入户光纤和数据中心传输以及目前正在大力发展的 5G 移动网络等，这些都给 InP 衬底材料带来巨大的市场前景。SiC 具有出色的高温特性，能够在高温环境下保持较低的漏电流和更高的电子迁移率，使 SiC 器件能够在极端条件下工作，可应用在汽车电子，航空航天等领域。SiC 还具有优异的热导率，能够更好地分散热量，避免过热问题，使 SiC 器件能够在高功率应用中表现出色。SiC 的击穿电场强度远高于硅，这意味着 SiC 器件能够承受更高的工作电压，可应用在电子传输、电动汽车和电网等领域。SiC 具有较高的载流子迁移率，使 SiC 器件能够更快的开关并具有更小的开关损耗，可应用在无线通信、雷达和医疗设备等高频领域。由于氮化镓 (GaN) 宽的直接带隙、强的原子键、高的热导率、化学稳定性好 (几乎不被任何酸腐蚀) 等性质和强的抗辐照能力，在光电子、高温大功率器件和高频微波器件应用方面有着广阔的前景。近年来，第三代半导体材料不仅在照明和显示领域大放异彩，也彻底改变了人们的生活方式，而且正凭借其宽带隙、高电子迁移率和高临界击穿电场等优异的物理特性开始在功率半导体市场上崭露头角。表 2 罗列了这四种材料的应用领域。

表 2. 半导体材料应用领域对比。

| 产业分类 | 器件 | 材料 | 应用领域 |
|----------|---|--------------------|---|
| 光电子 | 光电集成、激光器、LED、光探测器、光伏器件等 | GaAs InP GaN | 光纤通信、光天线通信、数据中心、通用照明、大尺寸显示屏、光伏电池等 |
| 射频通信 | 功率放大器 (PA)、LNA、射频开关、滤波器、混频器、振荡器、单片微波集成电路等 | GaAs InP GaN | 移动通信设备和基站、军用/民用雷达、WiFi/蓝牙模组、卫星通信、CATV 等 |
| 电力电子 | 肖特基势垒二极管 (SBD)、MOSFET、IGBT | GaN SiC Si | 家用电器、新能源汽车、UPS、光伏/风能电站、智能电网、高速列车等 |
| 量子高端光电集成 | 集成量子光学芯片和单量子点器件 | GaAs InP 等 | 高性能计算机、服务器、光子计算机、量子计算机等 |

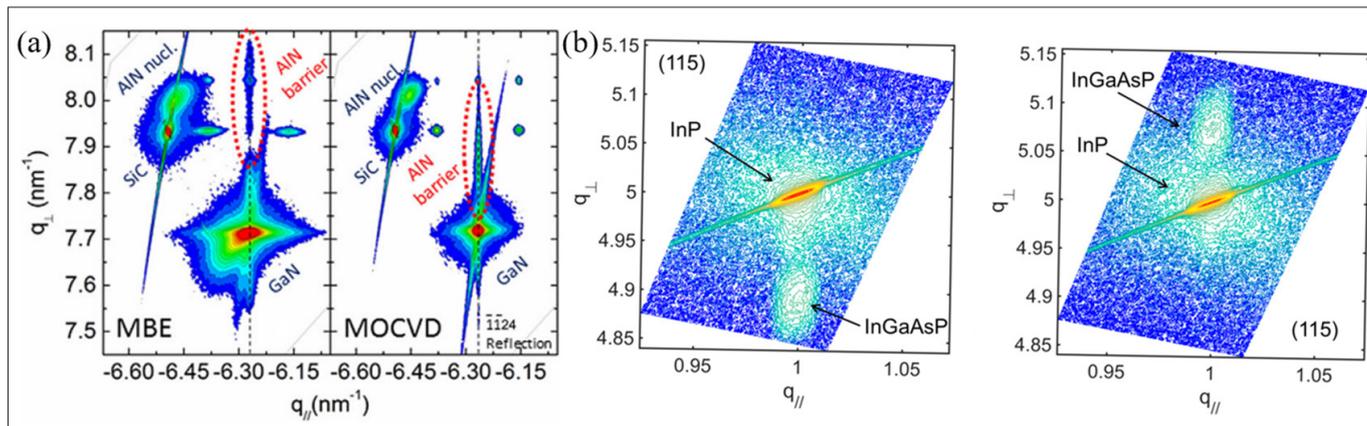


图 1. (a) 具有 4.8 和 4.5 nm AlN 势垒厚度的 MBE (左) 和 MOCVD (右) 生长的 HEMT 结构的 $\bar{1}\bar{1}24$ 衍射的倒易空间图^[1]。(b) InP 上 (左) 1% 压缩应变和 (右) 1% 拉伸应变 InGaAsP 层的衍射的倒易空间图^[2]。

化合物半导体材料的晶体结构和微观结构表征

XRD 不仅是判定材料晶体结构最直接有效的测试方法之一，而且通过测定特定晶面的 X 射线摇摆曲线的半高宽 (XRC-FWHM) 可以判定材料的结晶质量。将 X 射线衍射数据转化为倒易空间的衍射花样 (RSM) 经常用于研究晶体结构、晶体取向和晶格畸变等问题。图 1(a) 使用高分辨的 XRD 表征了 SiC 衬底上的 AlN/GaN HEMT 外延结构，在倒空间里不仅可以清楚区分 SiC、GaN 和 AlN 这三种材料，还发现采用 MOCVD 生长的 AlN 势垒层的衍射峰位置更靠近 GaN 缓冲层 (24) 衍射峰，这表明在 MOCVD 生长过程中，有一定量的 Ga 无意的掺杂进入 AlN 势垒层，形成了 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ ，其晶格常数更接近 GaN。另外，在化合物半导体材料生长过程中，经常采用超晶格生长技术以补偿应力，图 1 (b) 就用 (115) 晶面衍射的倒易空间图谱表征了不同组分 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 超晶格相对于体 InP 的应力状态，为材料

的生长设计提供重要的指导。

SEM 及其附带的电子能谱仪 (EDS) 在观察微观形貌的同时进行物质微区成分分析。和 XRD 测定宏观材料中的晶体结构及宏观取向的统计分析不同，SEM 中的 EBSD 功能进行微结构分析、微取向和晶粒取向分布测量，可以将晶体结构及取向信息与微观组织形貌相对应。图 2 是化合物半导体材料的晶型不同，其中 GaN 为六方纤锌矿结构，所以典型的缺陷形貌为六角形；SiC 单晶具有多种多晶型体，包括 3C-SiC、4H-SiC 和 6H-SiC 等，所对应的缺陷形貌也更复杂。GaAs 和 InP 具有相同面心立方“闪锌矿”的晶体结构，可以看到它们的典型缺陷形貌也比较相似。

TEM (透射电子显微镜) 在材料科研领域用途广泛。可以利用吸收衬度像对样品进行一般的形貌观察，而对于确定材料的物相、晶系等，则可以利用电子衍射等衍射技术对样品进行物相分析；由于 TEM 的高分辨率，可以利用高分辨电子显微方法直接“观察”到晶体中原子或原子团在特定方向上的投影，以确定晶体结构，还可以观察晶体中存在的结构缺陷，确定缺陷种类、估算缺陷的密度等。TEM 所附加的电子能量损失谱仪 (EELS) 或能量色散 X 射线谱仪 (EDX)，可以对样品的微区化学成分进行分析。图 3(a) 展示了通过 TEM 不仅可以确定 SiC 衬底和 GaN 外延层的物相和晶格常数，测量每一层的厚度，而且还可以观察到各层的缺陷形貌、种类和数量^[7]。图 3(b) 通过高分辨的晶格像不仅可以清楚地看到衬底 InP 和外延层 InGaAs 的原子排列界面，还可以观察衬底和缓冲层界面处产生的位错在外延层中的延伸路径^[8]。

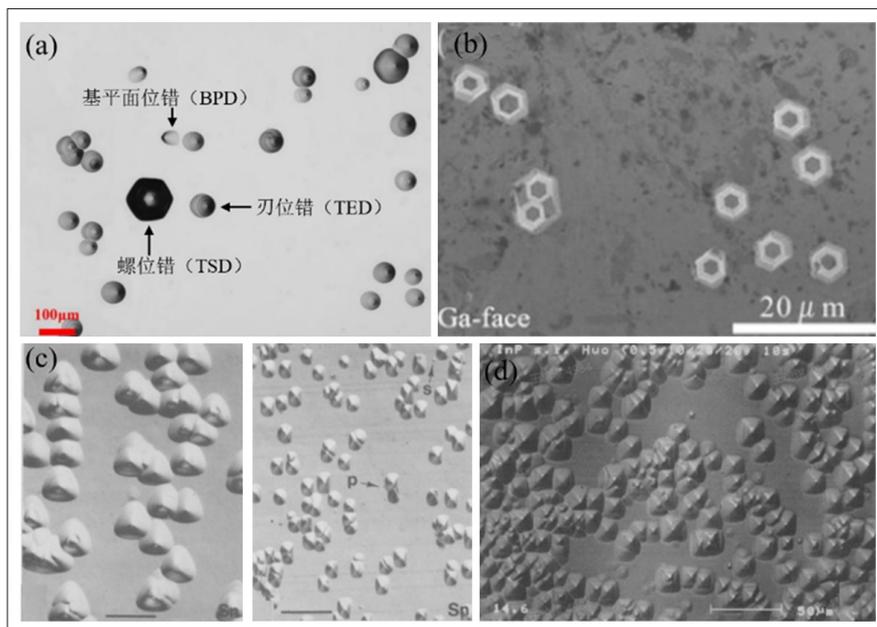


图 2. 化合物半导体 SiC(a)^[3]、GaN(b)^[4]、GaAs(c)^[5] 和 InP(d)^[6] 晶体中典型的缺陷形貌。

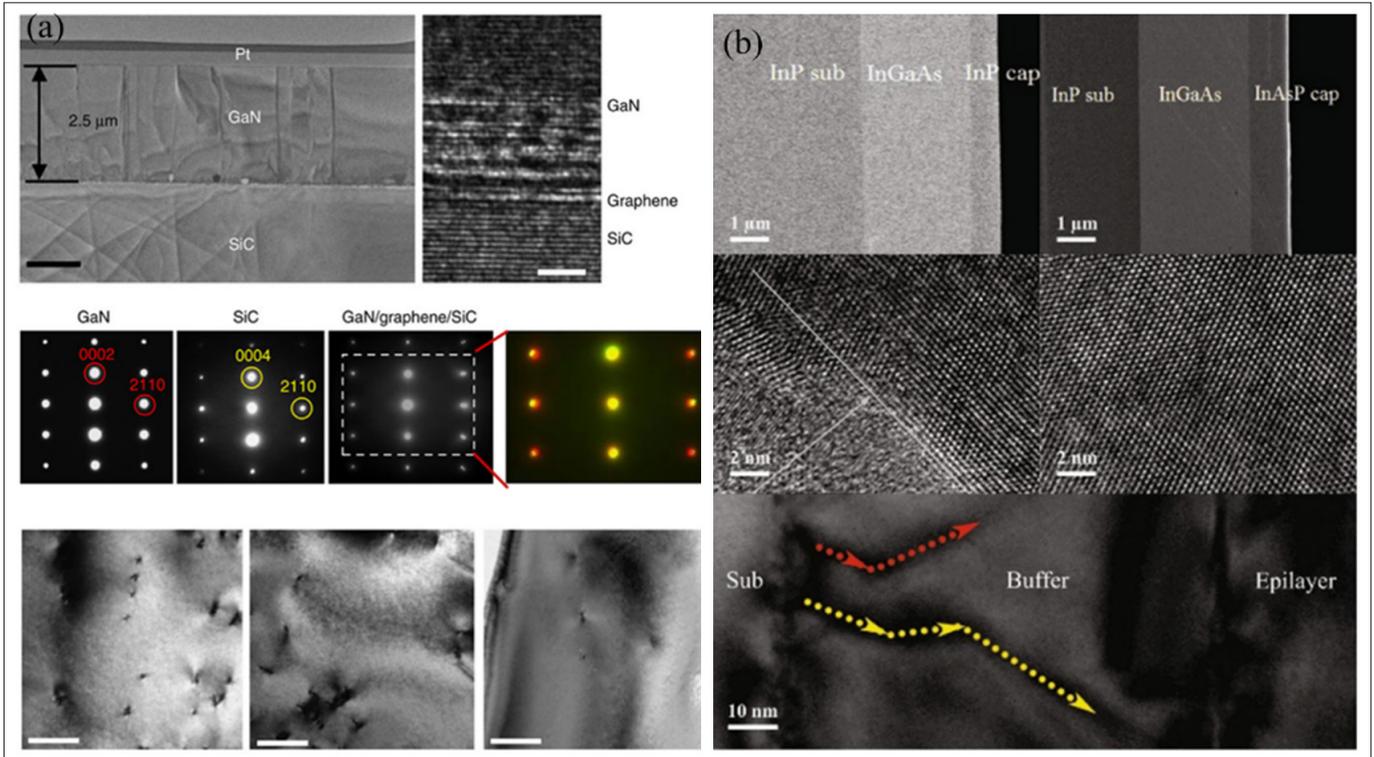


图 3. (a) GaN/Graphene/SiC 多层材料的 TEM 图^[7]。(b) InP/In_{0.82}Ga_{0.18}As/InP 异质结截面的高分辨 TEM 图^[8]。

除了上述晶圆缺陷表征手段之外,深能级瞬态谱 (DLTS) 是研究半导体中电活性缺陷的一种有效手段。DLTS 建立基本的缺陷参数并测量其在材料中的浓度。一些参数被认为是缺陷“指纹”,用于对其进行识别和分析。DLTS 比几乎所有其他半导体诊断技术都具有更高的灵敏度,对于高纯材料的制备起着举足轻重的作用。例如,在 SiC 材料中,碳空位点缺陷(能级对应 Z_1/Z_2) 被认为是 n 型碳化硅外延层载流

子寿命的“杀手”,热氧化后可基本消除,如图 4 所示。对于点缺陷这样的微观缺陷,DLTS 无疑是表征其最有力的工具。随着化合物半导体材料晶体质量的提升,对 DLTS 的测试需求必将提出新的要求。对于第一代半导体材料或者说窄禁带的半导体材料,变温范围经常从低温开始,比如液氮温度;而对于宽禁带半导体材料,要测到禁带中央的深能级位置,则要求设备和材料在更高的温度下工作。

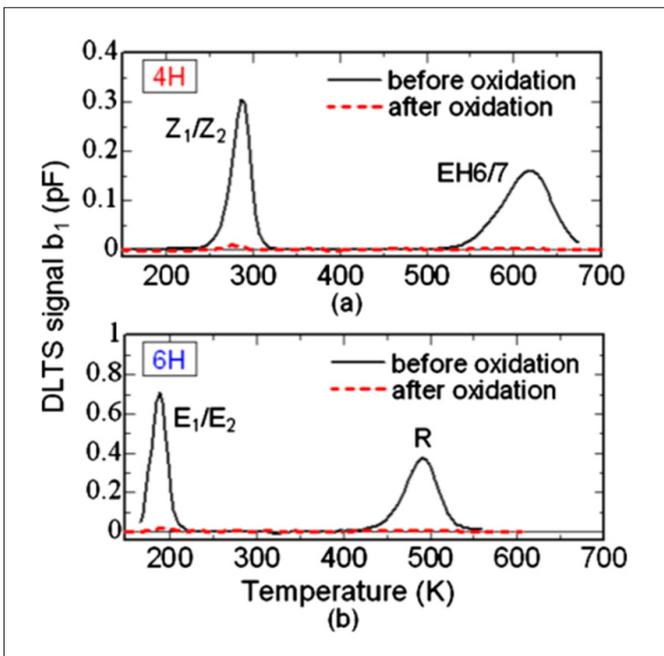


图 4. n 型 4H-SiC 和 6H-SiC 热氧化前后的 DLTS 图谱^[9]。

化合物半导体材料的元素组分分析

化合物材料是由两种及以上的元素组成,因此,鉴定元素种类及化学态信息对于材料的生长设计及器件工艺优化极为重要。XPS 可以用来:1) 元素的定性分析:可以根据能谱图中出现的特征谱线的位置鉴定除 H、He 以外的所有元素;2) 元素的定量分析:根据能谱图中光电子谱线强度(光电子峰的面积)反应原子的含量或相对浓度;3) 固体表面分析:包括表面的化学组成或元素组成,原子价态,表面能态分布,测定表面电子的电子云分布和能级结构等;4) 表征化合物的结构:可以对内层电子结合能的化学位移精确测量,提供化学键和电荷分布方面的信息。图 5 反映了不同表面处理技术对 InGaAs (100) 表面的影响。九峰山实验室检测中心的 XPS 设备具有出色的能量分辨率 (ΔE : 0.6 eV),同时能够使用高达 3000 eV 的入射能量,可以探测近表面的化学态信息。此外,配备微区聚焦功能的 AES 技术不仅能够提供微区元素组成信息,还可以获取化学价

态信息，从而实现对样品的定性和定量分析。同时，通过结合氦离子溅射技术，可以获得元素在深度方向上的分布情况。

掺杂是半导体器件制备过程中的关键技术之一，可以调控材料的电学性质。在 SiC 材料中，掺杂分为 n 型掺杂和 p 型掺杂，常用的 n 型和 p 型的掺杂元素包括 N 与 P 和 Al 与 B。在 GaN 材料中，Si 是常用的 n 型掺杂元素，Mg 是常用的 p 型掺杂元素，生长环境中 O 不可避免会无意掺入。九峰山实验室检测中心所拥有的 ToF-SIMS 设备具备优异的掺杂剂和杂质检测灵敏度，可以检测到 ppm 甚至更低浓度的掺杂物，

并且能够检测含有 H 等元素和同位素的样品。因此，ToF-SIMS 技术可准确检测晶圆表面的各种污染物，并用于薄膜成份和杂质的鉴定。另外，D-SIMS 技术具备极低的组分浓度检测限和良好的表面深度分辨率，能够精确分析元素和同位素的存在情况。该技术不仅可以对掺杂剂和杂质进行深度剖析，还可以测量掺杂元素在深度方向上的浓度分布情况。图 6(a) 展示了 SiC 样品的 ToF-SIMS 和 D-SIMS 测试图谱；图 6(b) 显示了 N 极 GaN 衬底上生长的 GaN/AlGaN 多层周期性结构的 SIMS 图谱。

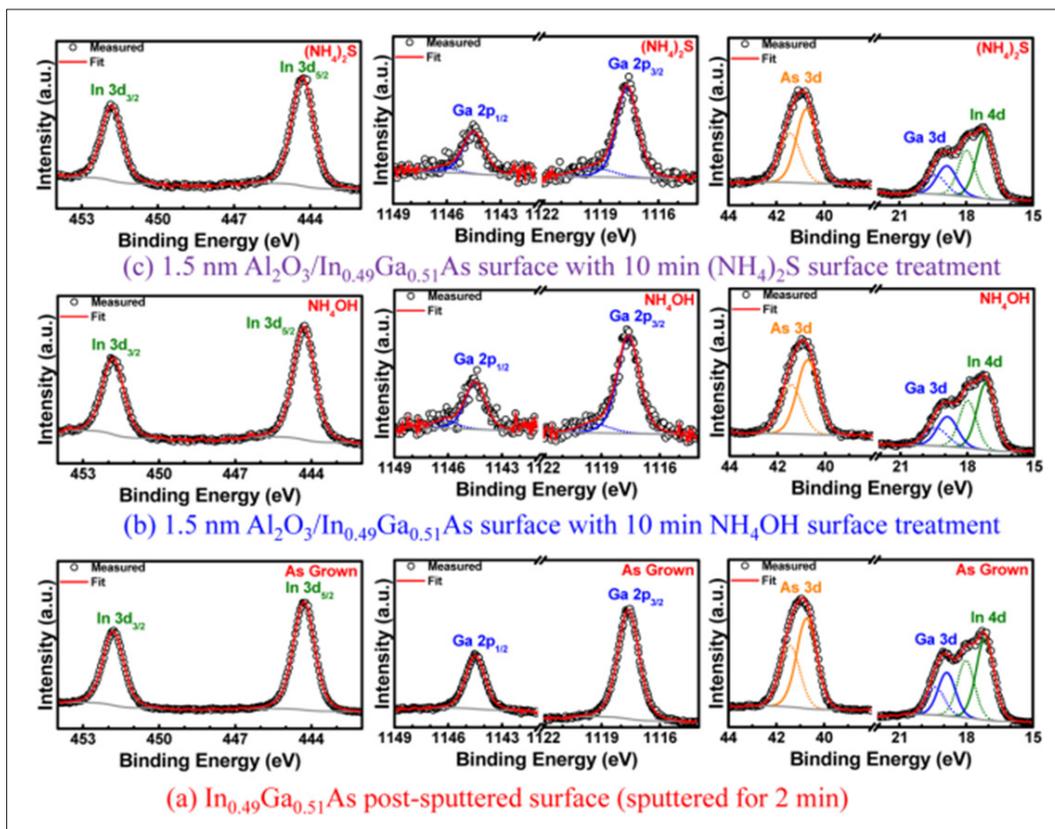


图 5. InGaAs (100) 表面的 XPS 光谱: (a) 溅射后表面, (b) 1.5 nm Al₂O₃ 沉积和 10 分钟 NH₄OH 表面处理后, (c) 1.5 nm Al₂O₃ 沉积, 经过 10 分钟 (NH₄)₂S 表面处理, 显示出砷和镓氧化物的有效去除^[10]。

化合物半导体材料的光学性能分析

Raman 光谱作为除三大表征（扫描电镜、透射电镜、X 射线衍射）以外在材料领域中经常使用的表征技术之一，可以提供材料的化学结构、相和形态、结晶度和分子相互作用的详细信息。与 SEM-EDS 的区别是 EDS 得到的是样品中不同元素的分布，而通过 Raman 成像可以获得的是样品的成分分布，这主要是因为不同的物质具有不同的指纹峰，通过不同的指纹峰即可得到样品表面物质的分布。其中图像中的每个点分别代表这个点对应样品表面 Raman 信号的强弱，

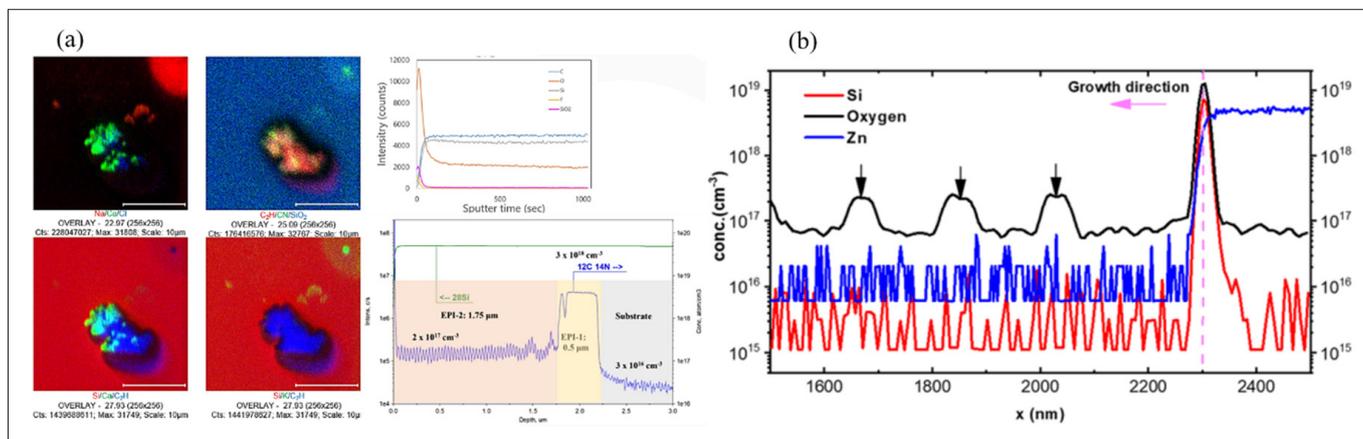


图 6. (a) SiC 外延层的 ToF-SIMS 和 D-SIMS 测试结果图 (b) SIMS 剖面图显示了 N 极 GaN 衬底上生长的 GaN/AlGaN 层中 Si、Zn 和氧的浓度。箭头表示 AlGaN 层中的氧浓度高于 GaN 膜中的氧浓度^[11]。

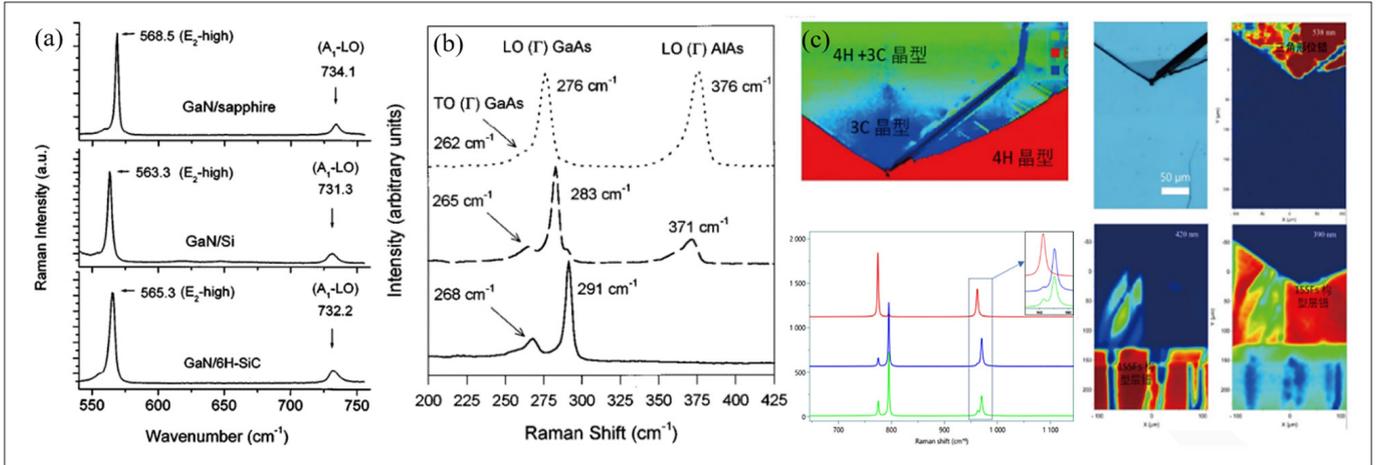


图 7. (a) 不同衬底上生长的 GaN 的 Raman 图谱^[12]; (b) 不同组分的 Raman 图谱^[13]; (c) SiC 样品的 Raman 和 PL mapping 图。

并通过颜色加以区分。而 Raman 信号可以转换成峰位，峰强度，半峰宽，峰面积，甚至是二个峰的比值，分别对应不同的分析目的。从 Raman 成像中我们可以得到样品组分的分布，颗粒大小；样品中结晶度的改变，相变；污染物颗粒大小和形状；不同相的边界组分的相互作用和混合；样品的应力分布。图 7(a) 中不同衬底上 GaN 的拉曼图谱表明了衬底对 GaN 生长应力的影响。图 7(b) 反映了不同 Al 组分对 GaAs 特征拉曼峰的影响。

PL 测试是一种无损的测试方法，可以快速、便捷地表征半导体材料的缺陷、杂质以及材料的发光性能。其主要功能包括：1) 组分测定；对三元或四元系合金，如 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 等，

通过 PL 峰位确定半导体材料的禁带宽度，进而确定材料组分 x ；2) 杂质识别；通过光谱中的特征谱线位置，可以识别材料中的杂质元素；3) 杂质浓度测定；4) 半导体材料的少数载流子寿命测量；5) 位错等缺陷的相关作用研究。

随着化合物半导体禁带宽度的不断增加，拉曼和 PL 测试所需激发光源波长也越来越短，对探测器的波长响应范围也提出了新的需求。九峰山实验室检测中心配置了高空间分辨率和多波长激发的 Raman 和 PL 激发光源，图 7(c) 展示了 SiC 样品的 Raman 和 PL mapping 图。图 7(c) 中拉曼成像证明该 SiC 样品存在三角型位错区域，其中包含 4H 和 3C 晶型，这与图中的拉曼谱图相对应，可以清晰地观察到不同晶型的存在。同时展示了位错区域的显微 PL 成像，可以看到 538 nm PL 对应于三角形位错，以及 420 nm 和 390 nm PL 对应于层错位错。

化合物半导体材料的载流子寿命表征

载流子寿命是反映半导体材料质量的重要参数之一，对功率器件性能的改善和优化起着重要作用。九峰山实验室分析检测中心同时配备了微波光电导和时间分辨荧光光谱设备，可对整个 6 英寸晶圆进行载流子寿命测试。GaAs 和 InP 作为直接带隙半导体材料，其载流子复合寿命极短，在 ns 量级；GaN 作为直接带隙半导体材料，晶体中缺陷密度比前两者更高，因此，载流子寿命更短，在 ps 量级，如图 8(a) 所示；SiC 是间接带隙半导体材料，载流子寿命相对较长，但受限于目前的外延质量，在 μs 量级，如图 8(b) 所示。

化合物半导体材料的电学性能表征

九峰山实验室检测中心配置的霍尔设备可用于确定半导体材料的导电类型，并测量关键参数，如电阻（导）率、载流子浓度及载流子迁移率。除了传统的 Hall 测试设备，该实验室还配置了非接触式霍尔（NC-Hall）和非接触方阻测

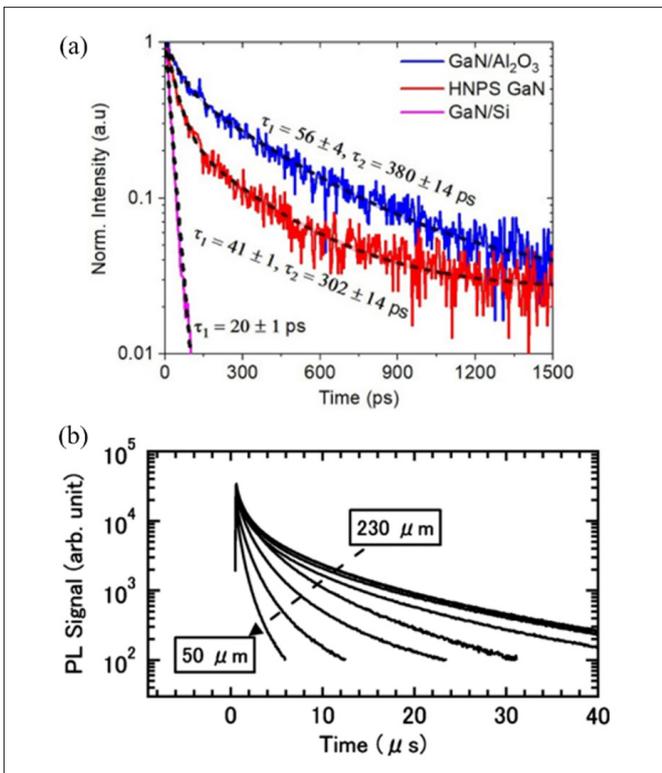


图 8. GaN(a)^[14] 和 SiC(b)^[15] 晶圆的载流子寿命图。

测试仪 (NC-SR), 可满足 2/6 英寸 wafer 无损检测。

表 4 列出 SiC 样品霍尔测试的结果。

表 4. SiC 样品霍尔的测试结果。

| 测试项 | 霍尔结果 | | | 电阻率结果 |
|-----|---|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| | 载流子迁移率 ($\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$) | 载流子浓度 (cm^{-3}) | 霍尔系数 (cm^3/C) | 电阻率 ($\Omega\cdot\text{cm}$) |
| 结果 | $127 \pm 281e^{-3}$ | $2.207e^{18}$ | $2.828 \pm 6.27e^{-3}$ | $22.273e^{-3} \pm 2.97e^{-6}$ |

图 9 是 SiC 晶圆的电阻率和方阻的测试结果。SiC 晶圆的平均方阻为 $0.602 \Omega/\text{sq}$, 平均电阻率为 $0.0228 \Omega\cdot\text{cm}$ 。

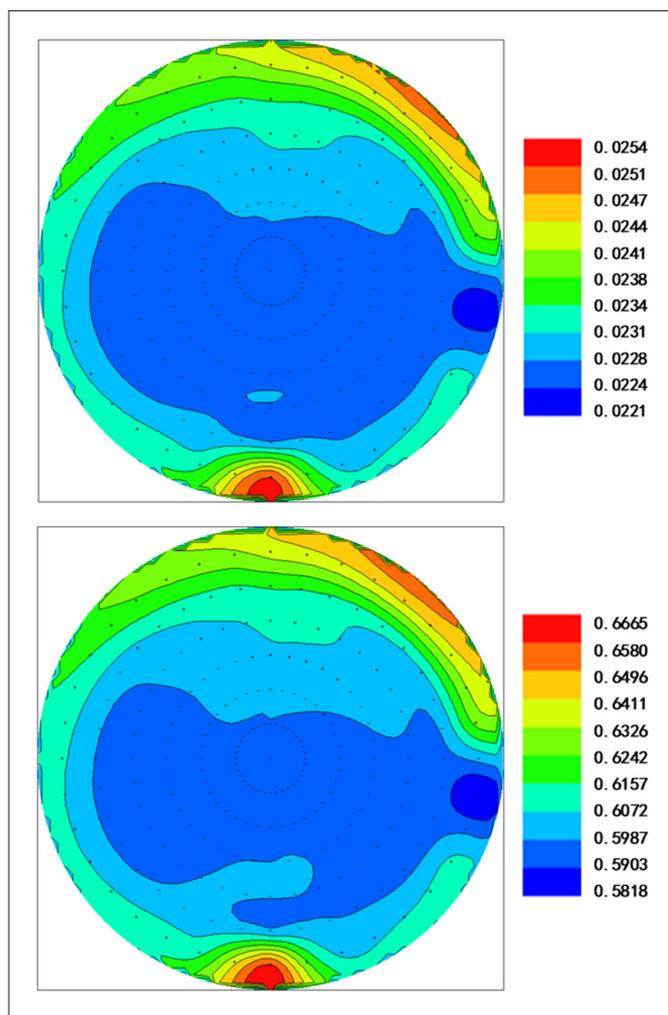


图 9. SiC 样品非接触式电阻测试结果。

总结

九峰山实验室已建立了全面的针对化合物半导体材料的表征能力, 包括化合物的组分元素分析 (XPS、AES、EDX) 和微痕元素定量测量 (SIMS)、晶格结构分析 (XRD、EBSD、DLTS) 和显微分析 (SEM、TEM)、材料的化学键 (FTIR、Raman、PL、CL) 和价态 (XPS) 的测定, 以及材料电学参数的确定 (NC-Hall、Raman、NC-SR、DLTS)。另外还有缺陷分析的能力 (TEM、PL、PL lifetime、CL、Raman、DLTS)。

材料的分析表征伴随在化合物半导体材料的开发过程中。对于化合物半导体来说, 其材料的特性与硅基半导体材料存在显著差异。因此, 我们在材料的分析表征技术上, 需要根据化合物半导体器件的性能和可靠性要求做相应的更新。与传统的实验室相比, 九峰山实验室将针对化合物半导体材料的分析在以下几个方面更新:

1. 针对化合物半导体外延的分析需求, 增强组分元素深度分布的分析能力;
2. 结合 D-SIMS、化学分析和扫描电容显微镜 (SCM) 等技术, 建立晶圆级的微痕元素分析能力;
3. 使用球差和双球差透射电镜分析材料的晶格结构和各物理层之间的界面原子排列, 提供更详细的信息;
4. 建立分析材料的分子的结合能;
5. 提供多维度的缺陷分析能力, 改善材料质量, 为化合物半导体大规模应用找到降低成本解决方案;
6. 利用紫外、可见光和红外等多激发光源光致发光谱系统, 更好的分析材料的光学带隙及缺陷特性;
7. 建立半导体电学特性的测试能力, 满足化合物半导体材料开发的需求;
8. 建立热动力学和机械力学性能分析, 满足材料生长的分析需要。

参考网页: <https://www.jfslab.com.cn/>

扩展阅读

- [1] B. J. Godejohann, Phys. Status Solidi B, 254(8): 1600715 (2017)
- [2] L. Megalini, Materials, 11(3):337 (2018)
- [3] 彭同华 et al. 《碳化硅单晶位错密度的测试方法》, 20202830-T-469 (2022)
- [4] R. Yu, et al. Crystals. 9(11):547 (2019)
- [5] G. Müller, et al. Topics Appl. Phys. 78: 121–171 (2000)
- [6] E. Peiner & A. Schlachetzki, J. Electron. Mater. 21(9), 887–892 (1992)
- [7] J.Kim, et al. Nature Communications 5(1):4836 (2014)
- [8] Z.W. Zhang, et al., Appl. Phys. A, 123(4):219 (2017)
- [9] S. Sasaki, et al., J. Appl. Phys. 109(1):013705 (2011)
- [10] Mantu K. Hudait, et al., ACS Omega 2018, 3(11): 14567 (2018)
- [11] S. Diez, et al., Appl. Phys. Lett. 117(4): 042102 (2020)
- [12] D.G.Zhao, et al., Appl. Phys. Lett. 83(4): 724 (2003)
- [13] S. Fleischer, et al., J. Appl. Phys. 81(1): 190 (1997)
- [14] J. Meyer, et al., J. Phys. Photonics 2(3): 035003 (2020)
- [15] T. Miyazawa, et al., Appl. Phys. Lett. 97(20):202106 (2010)



在氧化镓蚀刻方面表现突出

利用 MOCVD 反应腔将含镓有机分子引导到外延层上时， Ga_2O_3 的蚀刻效果最佳

作者：Fikadu Alema¹、Aaron Fine¹、William Brand¹、Andrei Osinsky¹、Abishek Katta² 和 Nidhin Kurian Kalarickal²
(¹Agnitron, ²亚利桑那州立大学)

随着快速发展，目前 Ga_2O_3 已经开始影响功率器件市场。由于从熔体中有机会制造出高质量的块状衬底，该类超宽禁带半导体可以以极具竞争力的成本实现器件的卓越性能。

在过去的十年中，该类功率器件的性能有了突飞猛进的发展。其中的关键突破包括制造击穿电压超过 8 kV、击穿场强超过 5 MV/cm 的器件，其性能超出了 SiC 和 GaN 的理论极限。然而， Ga_2O_3 基器件性能尚未达到接近理论的极限水平，其中部分原因是由于缺乏合适的、高度可控的、无损伤的蚀刻工艺。

可控的蚀刻和材料的去除是制造许多不同类型半导体器件的基本步骤。去除材料的能力与沉积材料的能力同等重要——这对互补的工艺能够将半导体材料塑造成严格定义的器件架构。

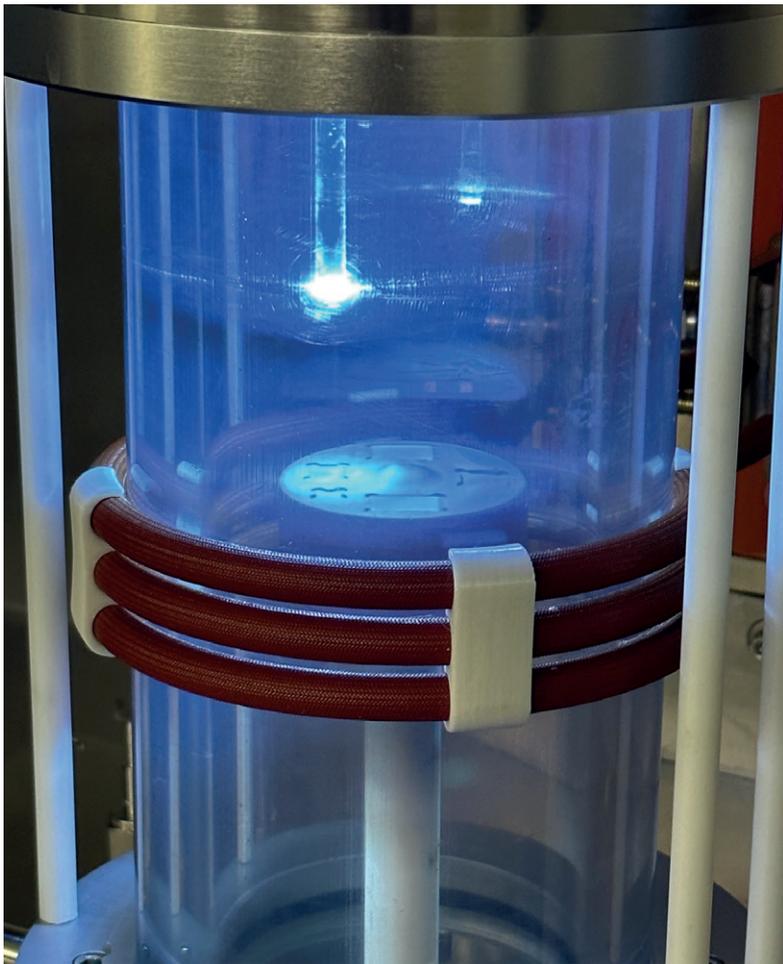
在蚀刻之前，许多器件的有源区往往受到电介质（例如 SiO_x 或 SiN_x ）的保护。 Ga_2O_3 基器件也是如此。然而，要找到一种避免影响器件性能或者不影响器件可靠性的无损伤蚀刻工艺并不容易。

许多 β - Ga_2O_3 基器件的制造过程中，采用了多种蚀刻工艺。其工艺包括干法蚀刻、湿法蚀刻、

光化学蚀刻和金属辅助化学蚀刻。不幸的是，所有这些蚀刻形式都表现出局限性，例如产生表面损伤、倾斜侧壁以及沿着某些晶面的各向异性蚀刻。因此，这些方法都不适合生产高性能器件。

而更有前景的一种技术是在生长设备反应腔中采用基于蒸汽的原位蚀刻技术，例如采用 MBE 和 MOCVD 技术。就其本质而言，这种外延生长方法能够在不破坏真空的情况下进行蚀刻和重新生长外延层与电介质，从而产生更洁净的界面。由于 MOCVD 生长的 β - Ga_2O_3 外延层的质量最高，因此这种反应器是将生长和蚀刻工艺集成在一起的最佳选择。

Agnitron 是 β - Ga_2O_3 外延层生长 MOCVD 反应器方面享有盛誉的领先供应商，其设备现已在许多世界一流的实验室安装使用。然而，可能不太为人所知的是，Agnitron 反应腔可用于 Ga_2O_3 薄膜、衬底和相关合金的原位蚀刻。本文将接下来探讨利用含有镓和氯的金属有机源蚀刻 β - Ga_2O_3 。



考虑到客户的反馈，Agnitron对当前的紫外线曝光装置进行了重磅升级。目前该装置包含一个定向聚焦光管，可以在薄膜生长过程中将紫外线功率精确聚焦到特定晶圆上。在同一运行期间，这种增强的设置让薄膜能够在紫外线照射下紧邻未照射紫外线的晶圆生长。

采用 MBE 蚀刻…

利用 MOCVD 生长 Ga_2O_3 会涉及镓和氧前驱体的反应，沉积速率通常由引入反应腔中的镓浓度决定。然而，当反应器缺乏活性氧时，镓前驱体将对蚀刻的衬底或外延膜的表面产生不同的作用。

对于 MBE，这种蚀刻工艺是众所周知的。随着 Ga_2O_3 的生长， Ga_2O_3 及其挥发性低氧化物 Ga_2O 的形成会与其产生竞争——当较高的镓通量落在缺氧环境中的衬底上时， Ga_2O_3 的生长速率会降低（实际发生的情况是材料从 Ga_2O_3 表面蚀刻，而不是在上面生长）。

当这些情况发生时，加上缺氧，会形成极易挥发的低氧化物 Ga_2O ， Ga_2O 会从表面解吸而不是促进 Ga_2O_3 的生长。因此，采用标准 MBE 生长工艺来加快 Ga_2O_3 的生长速率是不切实际的。鉴于这种现象，许多研究人员转向采用金属镓在 MBE 反应腔中蚀刻 Ga_2O_3 的表面。据报道，这是一种低损伤蚀刻技术，其中镓与 Ga_2O_3 会发生反应。

…采用 MOCVD 蚀刻

ASU 的 Nidhin Kalarickal 团队在使用 MBE 反应腔对 Ga_2O_3 进行镓蚀刻方面拥有相关经验，我们与其合作研究了利用 MOCVD 技术蚀刻 Ga_2O_3 。在双方共同努力下，我们证明了在缺乏氧气的情况下，含镓金属有机前驱体，例如三乙基镓 (TEGa)，可以在 MOCVD 反应腔中对 Ga_2O_3 进行原位蚀刻。同样，蚀刻来自于镓与 Ga_2O_3 的反应，会产生挥发性的低氧化物 Ga_2O ，但此工艺是始于 TEGa 的均相分解。当 TEGa 暴露在约 350°C 或更高的温度（来自衬底温度）下时，就会发生热解，在表面产生移动的镓吸附原子。热解过程中产生的稳定有机乙烯副产物通过废气从反应器中排出，与衬底表面的相互作用最小。

为了监测原位蚀刻速率，我们利用了 β - Ga_2O_3 薄膜和下面的蓝宝石衬底之间的显著折射率差异。通过在 Agilis 100 中安装工作波长为 470 nm 的光纤反射计来测量蚀刻速率。

考虑到客户的反馈，Agnitron 对当前的紫外线曝光装置进行了重磅升级。目前该装置包含一个定向聚焦光管，可以在薄膜生长过程中将紫外线功率精确聚焦到特定晶圆上。在同一运行期间，这种增强的设置让薄膜能够在紫外线照射下紧邻未照射紫外线的晶圆生长。

通过这种设置，我们研究了各种工艺条件对

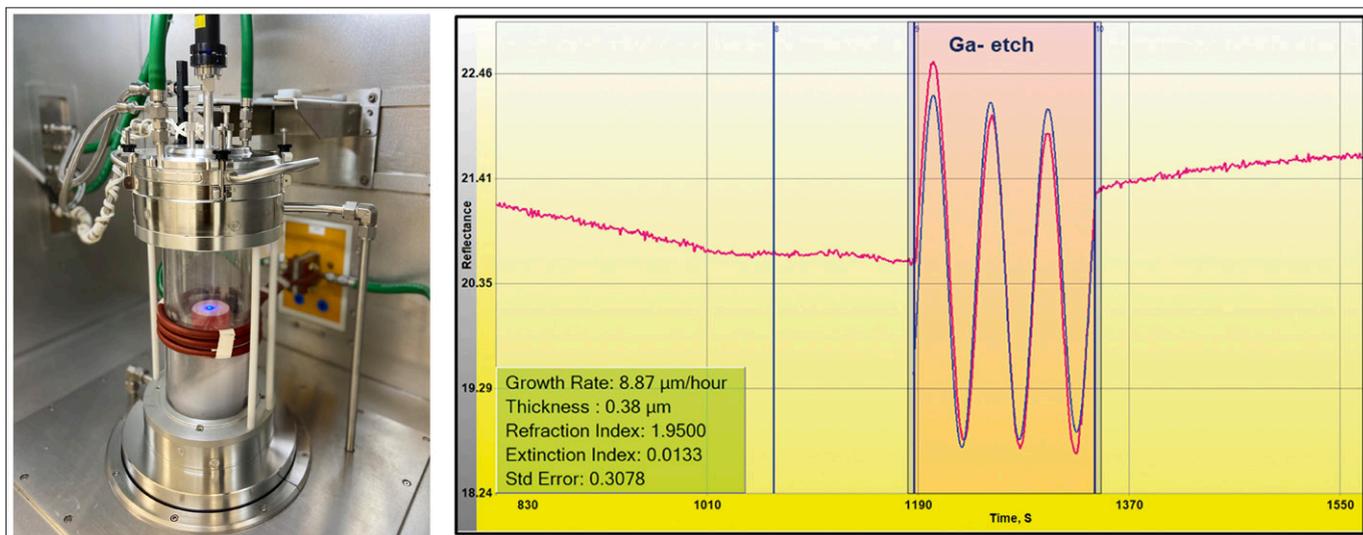


图1. Agnitron MOCVD反应器, 蓝色LED在2寸晶圆的中心发光(左)。(右)红色迹线是测量的反射率数据, 蓝色迹线与预估蚀刻速率的反射率数据相符。预计蚀刻速率为 $9\mu\text{m/hr}$ 。

在c面蓝宝石上生长的(201)取向 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 外延膜的蚀刻速率的影响。我们还特别研究了TEGa摩尔流速、衬底温度和腔室压强。这些实验表明, 我们可以将蚀刻速率从大约 $0.3\mu\text{m/hr}$ 提高到 $9\mu\text{m/hr}$ (见图2)。

我们发现, 对于低的TEGa摩尔流速(即低于 $100\mu\text{mol/min}$), 蚀刻速率随着流速的增加而线性增加(见图2(a))。然而, 在较高的流速下, 蚀刻速率在饱和之前仅略有增加。当蚀刻条件处于线性状态时, 低氧化物反应速率高到足以消耗到达衬底表面所提供的所有镓吸附原子。因此, 蚀刻速率受到所提供的TEGa摩尔流速的限制, 从而得出了观察到的线性关系。相反, 当供应的镓吸附原子的数量增加到超过低氧化物反应可以消耗的程度时, 蚀刻速率将亚线性增加, 之后达

到饱和。

提高蚀刻速率的另一个影响因素是衬底温度。较高的温度会加速蚀刻速率, 但也只能达到一定程度, 超过 900°C 时会出现饱和。当发生饱和时, 饱和时的蚀刻速率取决于TEGa摩尔流速(见图2(b))。当衬底温度低于 800°C 时, 蚀刻速率会受到低氧化物反应速率的限制, 而不是受到所提供的TEGa流量的限制。在这种情况下, 衬底温度的升高会导致更高的蚀刻速率, 并且衬底表面上会存在过量的镓。在较高温度下又是另一种情况, 会导致所有提供的镓在低氧化反应中消耗。之后蚀刻速率受到所提供的TEGa流速的限制, 导致蚀刻速率饱和。MOCVD反应腔内的压强也会影响蚀刻速率(见图2(c))。最大蚀刻速率发生在15Torr。

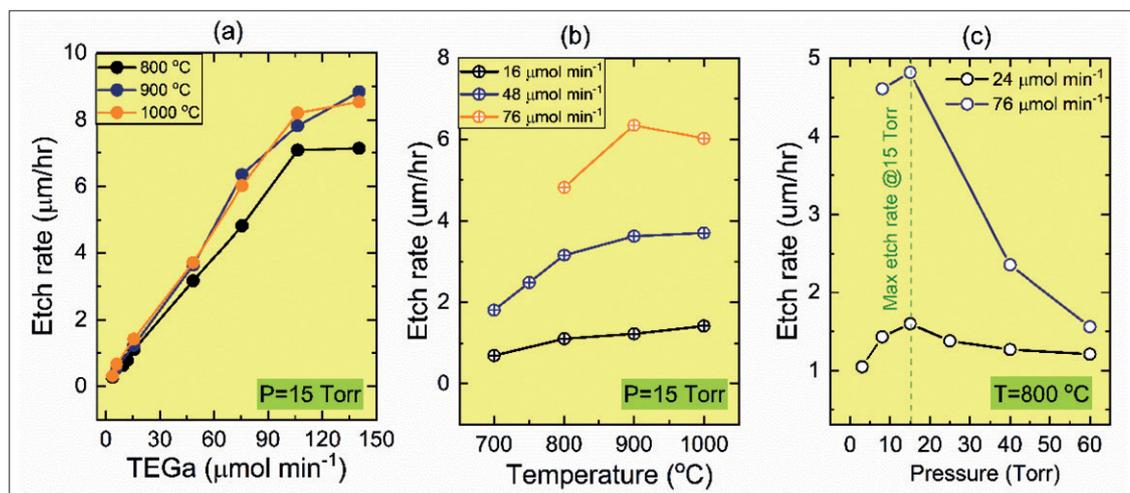
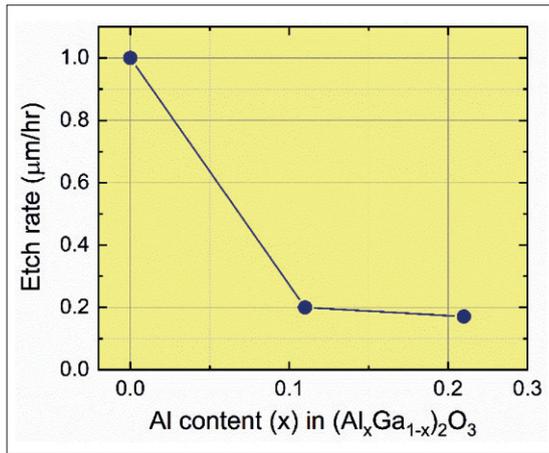


图2. 蓝宝石上 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的蚀刻速率与蚀刻参数的关系。(a)在15 Torr的恒定压强和 800°C 、 900°C 和 1000°C 的衬底温度下蚀刻速率与TEGa摩尔流量的关系。(b)在15 Torr的恒定压强和 $16\mu\text{mol/min}$ 、 $48\mu\text{mol/min}$ 和 $76\mu\text{mol/min}$ 的TEGa摩尔流速下, 蚀刻速率与衬底温度的关系。(c)衬底温度为 800°C 、TEGa摩尔流量为 $24\mu\text{mol/min}$ 和 $76\mu\text{mol/min}$ 时, 蚀刻速率与腔室压强的关系。

图3. $(Al_xGa_{1-x})_2O_3$ 在蓝宝石上的蚀刻速率与铝组分的函数关系。蚀刻是在3 Torr压强、800°C衬底温度和24 μ mol/min TEGa摩尔流速下进行的。



此外，我们还使用 TEGa 蚀刻 $(Al_xGa_{1-x})_2O_3$ 。在这项特殊研究中，我们比较了 Ga_2O_3 、 $(Al_{0.11}Ga_{0.89})_2O_3$ 和 $(Al_{0.22}Ga_{0.78})_2O_3$ 薄膜的蚀刻速率，这些薄膜均通过 MOCVD 在 c 面蓝宝石衬底上生长。使用 3.0 Torr 的反应器压强、800°C 的衬底温度和 24 μ mol/min 的 TEGa 摩尔流速，我们确定 Ga_2O_3 的蚀刻速率约为 1.0 μ m/hr，而 $(Al_{0.11}Ga_{0.89})_2O_3$ 和 $(Al_{0.22}Ga_{0.78})_2O_3$ 的蚀刻速率仅分别为 0.2 μ m/hr 和 0.17 μ m/hr。这些发现表明 AlGaO 是一种蚀刻终止剂，在这方面 $(Al_{0.11}Ga_{0.89})_2O_3$ 与 $(Al_{0.22}Ga_{0.78})_2O_3$ 一样好。

控制金属液滴

镓原位蚀刻的一个限制是会产生镓金属残留物，该残留物沉积在蚀刻表面。在 MBE 和 MOCVD 反应腔中蚀刻时存在的残留物必须在进行器件工艺步骤之前去除。

去除镓残留物的一个成功方法是用盐酸蚀刻样品表面。但由于只能在生长室外进行，因此蚀刻表面会暴露在空气中，容易产生污染，从而损害器件性能。因此，用盐酸蚀刻是不切实际的，

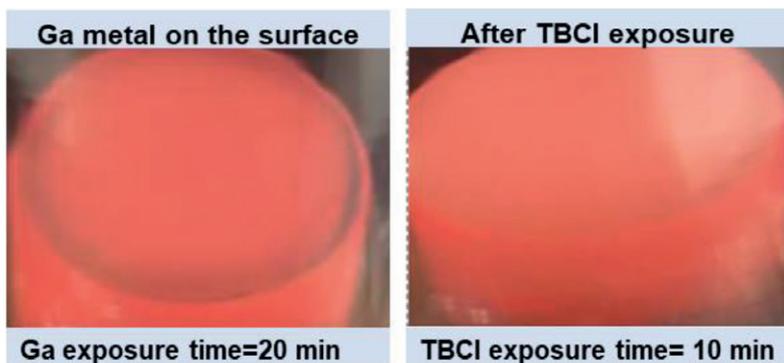


图4. 在进行 Ga_2O_3 /蓝宝石蚀刻时从外部通过透明石英管反应器拍摄的图像。晶圆表面的深色涂层(左)是由于金属镓沉积物造成的，右侧是去除金属镓沉积物后的晶圆表面。

而这又是在 MBE 反应腔中蚀刻后的唯一选择。

通过 MOCVD，还可以使用基于卤化物的金属有机前驱体原位去除镓滴。有一种我们已经验证的选择，涉及使用叔丁基氯 (TBCl)。这种有机化合物还因 GaN 的原位和选择性区域蚀刻而闻名。当镓滴在蚀刻的 Ga_2O_3 上形成时，会转化为 $GaCl_x$ 的挥发性衍生物，并释放出来，留下洁净的表面。在小流量的 TBCl 下可进行清洁，而在较高的流量下也可以进行蚀刻。

界面硅

困扰 Ga_2O_3 生长的一个问题是硅在薄膜和衬底之间的界面处的积累。无论是什么工艺条件、衬底中的掺杂剂以及是通过 MBE 还是 MOCVD 技术生长，都会产生硅。

界面硅被认为来自于衬底的硅基抛光制程，也可能来自于 Ga_2O_3 衬底暴露在空气中的环状硅氧烷。但无论其来源如何，它的存在都会损害器件性能。例如，在 FET 中，在薄膜/衬底界面处产生寄生导电沟道，防止器件夹断。

在装入生长腔之前，可以通过在浓氢氟酸中蚀刻 Ga_2O_3 衬底约 30 分钟来降低界面硅的浓度。这种方法并没有消除界面硅，而是降低了其浓度，导致其被受主杂质（镁或铁）部分补偿，受主杂质在外延膜生长过程中从半绝缘衬底扩散到界面中。近期，我们与加州大学圣塔芭芭拉分校的 Krishnamoorthy 团队合作，利用这项技术生产并公布了高性能、千伏级 Ga_2O_3 MESFET，具有超过 350 $MW\ cm^{-2}$ 的创纪录功率值。

我们还研究了镓蚀刻是否可以去除界面硅。我们利用 TEGa 将 Ga_2O_3 衬底蚀刻至约 300nm 的深度，然后将表面暴露于 TBCl 来去除镓金属沉积物，之后生长约 650nm 厚度的非故意掺杂的 β - Ga_2O_3 层。在不破坏真空的情况下在同一个反应器中执行所有这些步骤后，我们用二次离子质谱 (SIMS) 仔细检查了样品，量化了非故意掺杂的外延层以及该薄膜与衬底之间界面的硅、碳、氢和氯的浓度（见图 5 (b)）。SIMS 的结果表明，非故意掺杂的外延层是洁净的，每种杂质的浓度都低于仪器的检测限。在界面处没有观察到碳和氯的结合，但氢的浓度略有增加，而硅的浓度不受影响。我们将后者的持久性归因于含有硅和氧原子的强共价键。

我们可以得出结论，镓蚀刻适用于加工各种

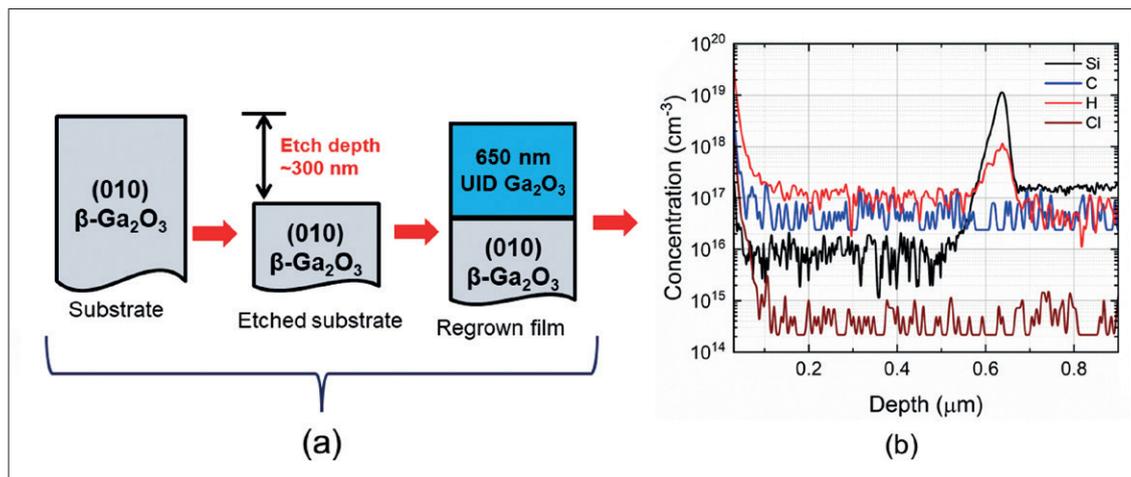


图5. 蚀刻的和再外延的样品(a), 以及硅、碳、氢和氯杂质的二次离子质谱 (SIMS) 深度剖面(b)。

器件架构的尺寸以及重新生长欧姆接触和介电材料, 例如 SiO_2 和 Al_2O_3 。然而, 这种去除界面硅的技术的前景是毋庸置疑的。

评估表面粗糙度

最重要是, 当任何物质蚀刻薄膜或衬底时, 都会留下光滑的表面。为了了解 TEGa 的情况是否如此, 我们使用该前体对掺铁 (010) 和掺锡 (001) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 衬底进行毯式蚀刻, 其深度为 350nm。

根据原子力显微镜图, 蚀刻后的粗糙度很低, 并且光滑度随着衬底温度的增加而增加 (见图 6)。蚀刻后的均方根表面粗糙度的值约为 3nm。此外, 这种形式的显微图像还发现了平行细长的凹槽, 在外延生长的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 薄膜的表面上也观察到这一点。

我们还使用扫描电子显微镜来检查蚀刻后的材料。除了采用该技术评估经过全面蚀刻的薄膜的形态外, 我们还研究了蚀刻图案化 SiO_2 硬掩膜形成的结构 (见图 6 (e) 和 6 (f))。

优化工艺条件, 例如 TEGa 流速、衬底温度、压强和反应器的整体气流, 可以进一步改善表面质量。此外, 我们发现将 TEGa 蚀刻的表面暴露在 TBCl 中更长时间会导致表面粗糙度降低。我们在使用从同一衬底上切割的一对大约 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的 (010) 铁掺杂 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 片进行蚀刻实验时发现了这一点。对于仅在 TEGa 中蚀刻的样品, 其表面粗糙度约为 21nm, 而在 TEGa 蚀刻的暴露于 TBCl 约 20 分钟的样品, 其表面粗糙度约为 8nm (见图 6 (g) 和 6 (h))。我们将更光滑的表面归因于 TBCl 可有效去除镓滴, 能温和蚀刻 Ga_2O_3 表面。

其他蚀刻剂

除了 TEGa 之外, 我们还研究了用其他有机分子来蚀刻 Ga_2O_3 。此外, 还研究了三甲基镓 (TMGa), 期望它能以与 TEGa 相同的方式蚀刻 Ga_2O_3 。然而, 我们使用 TMGa 进行的初步蚀刻实验并未产生任何 Ga_2O_3 蚀刻的迹象。相反, 将 Ga_2O_3 表面长时间暴露于 TMGa 还会导致表面形成黑色涂层。我们认为沉积的涂层是由甲基中的碳造成的, 甲基是 TMGa 热解过程中的副产品, 可阻止镓进入表面。涂层形成的真正本质机制尚不清楚。

我们已经证明 TBCl 可以去除 TEGa 蚀刻表面上的镓金属沉积物, 也可以蚀刻 Ga_2O_3 。对于

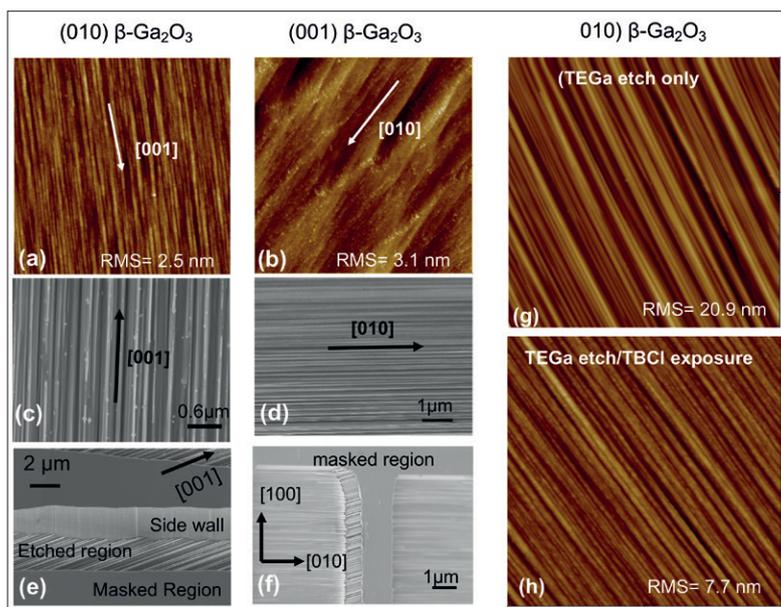


图6. (a) 蚀刻的 (010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面的原子力显微镜 (AFM) 图像, (b) 蚀刻的 (001) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面的 AFM, (c) 蚀刻的 (010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面扫描电子显微镜 (SEM) 图像, (d) 蚀刻的 (001) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 表面的 SEM 图像, (e) 显示使用 SiO_2 硬掩膜进行图案蚀刻的 Ga_2O_3 (010) 样品的 SEM 图像, (f) 显示使用 SiO_2 硬掩膜进行图案蚀刻的 Ga_2O_3 (001) 样品的 SEM 图像, (g) 没有 TBCl 暴露, TEGa 蚀刻 (010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 衬底的 2D AFM 图像 (g) 和在 TBCl 下暴露 20 分钟, TEGa 蚀刻 (010) $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 衬底的 2D AFM 图像 (h)。所有 AFM 图像均取自 $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ 的扫描区域。

Agnitron 的评价

Shubhra Pasayat, 威斯康星大学麦迪逊分校

“Agnitron 独一无二的经验和先进的设备技术使其成为 MOCVD 系统的主要制造商之一，其产品涵盖广泛的材料系统，包括两用系统。他们在各种材料系统方面的卓越专业知识以及定制反应器设计可以满足特定用户的需求和要求，这引起了我的兴趣，因此我为自己的实验室选择了 Agnitron MOCVD 反应器。

我最近从 Agnitron 购买了一个两用 GaN/Ga₂O₃ Agilis 100 反应器，初始配置用于高温氮化物生长，也可以轻松转换为 Ga₂O₃ 生长。非常期待设备的安装和启动。迄今为止的整个过程中，Agnitron 提供的出色客户支持给我留下了深刻的印象。他们的团队反应迅速，能参与信息丰富的讨论并及时解决任何问题或疑问。这次好的经历进一步巩固了我对 Agnitron 的信心，相信他们是一家可靠、以客户为导向的公司。

未来，我准备扩建自己的实验室，打算添置另一台 Agnitron MOCVD 反应器，有可能是 Agilis Mini。根据我目前的互动和经验，我特别推荐 Agnitron 作为满足任何 MOCVD 需求的理想合作伙伴。Agnitron 对客户满意度的承诺，加上他们的专业知识和尖端技术，是当之无愧的行业首选。我相信他们的持续支持将为我的研究工作取得成功做出重大贡献。”

赵红平, 俄亥俄州立大学

“很高兴为我在俄亥俄州立大学的研究购买的两个 Agnitron MOCVD 设备表达我的满意度。第一台设备是 2017 年交付的第一台双室 GaN 设备，第二个是 2018 年交付的 Ga₂O₃ 设备。双室 Agilis 反应器是一种 GaN 设备，已用于开发基于 II-IV-N₂ 的 GaN 和新型氮化物半导体。该设备的性能和功能满足了我的期望。双室 GaN 设备已用于展示高质量 GaN 外延以及 ZnGeN₂、ZnSnN₂ 及其异质结构和 III-N 合金的成功开发。Agnitron 在不断创新，我们目前正在考虑升级该设备以进一步增强其实用性。

Ga₂O₃ MOCVD 系统非常高效。Agnitron 的 Agilis 100 是一个行业标准，非常感谢 Agnitron 对 MOCVD 系统的支持以及他们强大的技术团队提供的帮助。该设备让我们能够出色地完成工作，生产出世界一流的 Ga₂O₃ 材料。

Agnitron 对 OSU 的客户支持非常优秀。该团队反应灵敏、积极参与，并及时解决出现的疑问或问题。他们是可靠的合作伙伴，在需要时随时提供指导。根据我的经验，我很高兴选择 Agnitron，很乐意将其推荐给其他研究人员。”

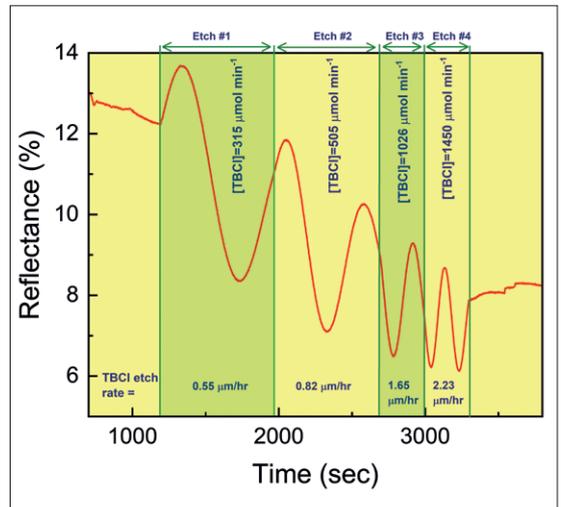


图7. 在25 Torr反应器压强和900°C衬底温度下使用TBCl监测Ga₂O₃/蓝宝石蚀刻的光谱反射率。在单次蚀刻实验中，TBCl流速从315μmol/min到505μmol/min、1026μmol/min和1450μmol/min变化，对分别对应标记层Etch #1、Etch#2、Etch#3和Etch #4。蚀刻速率在0.55μm/hr和2.23μm/hr之间变化。

仅 50 μmol/min 的摩尔流速 (用于去除镓金属沉积物的较低值), 蚀刻速率太小而无法测量。但是, 当该速率增加至少 10 倍时, 可以观察到 TBCl 对 Ga₂O₃ 的蚀刻, 前提是蚀刻是在高衬底温度 (超过 800°C) 下进行的。

我们使用光纤反射计来监测在 TBCl 蚀刻蓝宝石上生长的 Ga₂O₃ 过程中的光谱反射率 (见图 7)。在本次研究中, 我们在 Agilis 100 反应器中采用了 25 Torr 的反应腔压强和 90°C 的衬底温度。TBCl 摩尔流速为 315μmol/min、505μmol/min、1026μmol/min 和 1450μmol/min。随着流速增加, 光谱反射振荡的周期减少, 表明蚀刻速率增加。对于最高流量 1450μmol/min, 其蚀刻速度超过 2μm/hr。这明显低于 TEGa 的最快蚀刻速率。TEGa 是一种更有效的蚀刻剂, 可以使用更少量的摩尔流量。

我们进行了许多与 TEGa 类似的实验。研究了在不同的反应器压强、不同的 TBCl 摩尔流量以及一系列衬底温度和氧气流量下暴露于 TBCl 的 Ga₂O₃ 薄膜的蚀刻速率。重复基于 TEGa 蚀刻的观察结果, 我们发现存在快速蚀刻的最佳反应腔压强, 在本例中为 25 Torr (见图 8(a))。对于恒定的压强和温度, 蚀刻速率随着 TBCl 流量的增加而线性增加 (见图 8 (b))。

在较高温度下, TBCl 对 Ga₂O₃ 的蚀刻速率增加。对于较低的衬底温度, 需要相当高的 TBCl 流量才能获得可测量的蚀刻速率。例如, 在衬底温度为 700°C 时, 我们必须使用超过 1000 μmol/

min 的 TBCl 摩尔流量来观察蚀刻，即使如此，我们也只能实现 0.15 $\mu\text{m/hr}$ 的速率（见图 8 (b)）。但当我们把温度提高到 900 $^{\circ}\text{C}$ 时，相同的流量会将蚀刻速率提高到 1.65 $\mu\text{m/hr}$ 。虽然有所提升，但仍然比 TEGa 的蚀刻速率慢得多，再次凸显了 TBCl 的低效率，特别是在低衬底温度下。我们还探讨了在 TBCl 蚀刻 Ga_2O_3 过程中引入氧气的影 响（见图 8(c)）。但没有成功证明，蚀刻速率降低可能是由于 Ga_2O_3 在氧气环境中的重新沉积。

我们还将 TBCl 应用于生长在蓝宝石衬底上的 $(\text{Al}_{0.13}\text{Ga}_{0.87})_2\text{O}_3$ 的蚀刻。与 TEGa 蚀刻类似， Ga_2O_3 基体中铝的存在降低了蚀刻速率，再次表明 AlGaO 可以用作 TBCl 的蚀刻终止剂。

功率产品系列

为了实现刚才讨论的蚀刻结果，我们 Agnitron 的工作人员在化合物半导体领域汲取了 15 年的创新经验。虽然本文详细介绍的许多研究都涉及 Agilis 100，但这些研究也可以在我们 MOCVD 产品系列中的其他平台上进行。

Agilis 100 是我们最受欢迎的 MOCVD/CVD

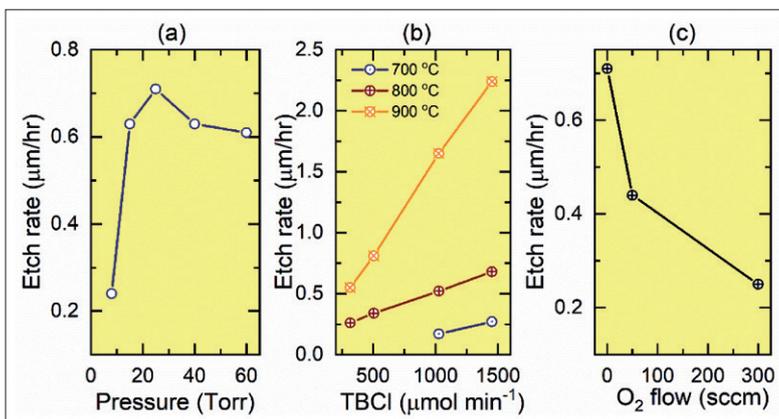
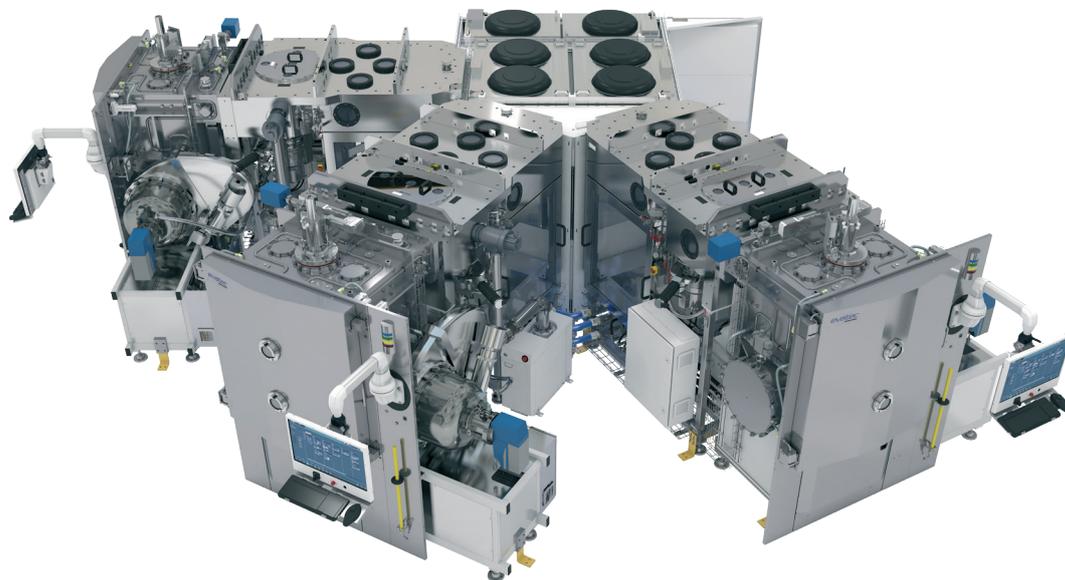


图8. 使用TBCl蚀刻剂时，蓝宝石上 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的蚀刻速率与蚀刻参数的函数关系。(a) 衬底温度为800 $^{\circ}\text{C}$ 、TBCl摩尔流速为1450 $\mu\text{mol/min}$ 时，蚀刻速率与腔室压强的关系。(b) 在25 Torr恒定压强和700 $^{\circ}\text{C}$ 、800 $^{\circ}\text{C}$ 、900 $^{\circ}\text{C}$ 衬底温度下蚀刻速率与TBCl摩尔流量的关系。(c) 在25 Torr恒定压强和1026 $\mu\text{mol/min}$ 的TBCl摩尔流速下，蚀刻速率与氧气流速的关系。

系统，以其占地面积小和多功能性而闻名。除了 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 之外，该系统对于其他各种实验来说也是一个非常好的选择。

Agilis 100 将紫外和蓝色范围光学反射计集成到 Imperium 分析控制软件中，可提供生长速率和厚度的实时测量。另一个特点是在生长过程中可以选择紫外光曝光，通过减少残留碳和管理点缺陷来有效控制 Ga_2O_3 薄膜纯度。此外，Agilis



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

Footnote¹: 实际产量依据工艺决定

100 以及我们所有其他 MOCVD/CVD 系统——可在维护后两小时内实现气源和气体分配（喷头）配置之间的无缝切换。另一个功能是能够添加前体分配喷嘴，从而实现工艺改进或晶圆载体清洁，增加了我们设备各种应用的吸引力。

为了解决研发中晶圆的高成本和气体消耗问题，必须在单个大面积晶圆上进行生长。我们的 β -Ga₂O₃ MOCVD/CVD 反应器，特别是 Agilis 500/700，现在可分别容纳直径达 4 寸和 6 寸的晶圆。这些较大的多晶圆反应器与 Agilis 100 占地面积相同，可以帮助希望通过匹配的生产线生长更大直径晶圆的研究人员。

我们大多数工具的核心是专有的垂直生长室，配有高速旋转盘式反应器，能够以每分钟超过 1300 转的速度运行。利用材料科学和设计工程，我们可最大限度地减少腔室内任何沉积物到达晶圆表面的机会。

我们的高速旋转圆盘反应器中独特的流动动力学可抑制颗粒再循环，从而使晶圆上方的区域保持清洁且无沉积。转盘反应腔高速旋转的另一个优点是它可以实现更高层次的控制，确保厚度分布均匀。

最近，我们向多所大学交付了 Agilis Mini。今年初，我们在印第安纳州圣母大学安装了一台将用于研究量子计算的高纯度材料的设备。我们还向 ASU 运送了一台 Agilis Mini，用于 AlGaIn/BN 化合物的高温生长。这种特殊型号的吸引力在于，它具有与 Agilis 100 相同的性能和多功能性，但占地面积更小，价格实惠。

我们的产品阵容在不断扩大。很快我们将推出 Agnitron GOX 300，这是一款全自动生产 Ga₂O₃ MOCVD/CVD 系统，可为更大的晶圆提供更多功能。此外，Agnitron 很荣幸承诺将持续改

进并提供客户支持，确保每台新一代 Agnitron 反应器都能为工艺工程师提供更可靠和多功能的体验。我们致力于与世界各地的研究人员和行业合作伙伴共同合作，不断突破半导体技术的界限。另一项重大进展计划于 2023 年第三季度推出，即第一个专为研究和开发目的而设计的 MOCVD/CVD 反应器，具有高温、低压金属有机前驱体输送的特点。这项突破性的创新进一步扩展了 MOCVD/CVD 技术的能力。最初，该功能将在 Agnitron Agilis 100 反应器上提供，使其成为第一个能够在高达 200 °C 的温度下将前驱体输送到反应器中的反应腔。这一突破使研究人员能够通过 MOCVD/CVD 探索新的化合物和异质结构的生长，促进新型和改进器件的开发，以及研究作为潜在掺杂剂的新元素。

此外，我们很荣幸能为该类技术申请专利，该技术升级了喷头气体分配设计。该系统与我们的旋转盘反应器的快速旋转相结合，可实现外延层的优异厚度和掺杂均匀性。

我们多年来所达到的成功帮助我们在重要项目中发挥了关键作用。其中包括 AFRL SBIR 项目在内的成果，旨在开发大面积衬底上的 Ga₂O₃ 生长。在这个项目中，我们计划使用 Agnitron Agilis 700 和 GOX 300 系统扩大 Ga₂O₃ 外延结构的生长规模，从小型衬底到直径 4 寸及以上的衬底。

简而言之，Agnitron 的硬件工程部门在不断改进设备，确保每台新一代 Agnitron 反应器能为工艺工程师提供更高的可靠性和多功能性。此外，我们还持续支持研究活动，例如本文中描述的蚀刻工作。通过支持和推动 Ga₂O₃ 各方面的发展，我们在帮助该类超禁带氧化物的开发人员沿着从器件开发到商业化的道路竞速，开启高压功率电力电子的新时代。CS

扩展阅读

- ▶ P. Vogt et al. “Comparison of the growth kinetics of In₂O₃ and Ga₂O₃ and their suboxide desorption during plasma-assisted molecular beam epitaxy” *Appl. Phys. Lett.* 108 062103 (2016)
- ▶ N. K. Kalarickal et al. “Planar and three-dimensional damagefree etching of β -Ga₂O₃ using atomic gallium flux” *Appl. Phys. Lett.* 119 123503 (2021)
- ▶ Y. Oshima et al. “Growth and etching characteristics of (001) β -Ga₂O₃ by plasma-assisted molecular beam epitaxy” *Semicond. Sci. Technol.* 33 015013 (2018)
- ▶ B. Li et al. “In situ and selective area etching of GaN by tertiarybutylchloride (TBCl)”, *Appl. Phys. Lett.* 115 162101 (2019)
- ▶ A. Bhattacharyya et al. “Multi-kV class β -Ga₂O₃ MESFETs with a lateral figure of merit up to 355 MW/cm²,” *IEEE Electron Device Lett.* 42 1272 (2021)



消除应用 GaN 的障碍

随着 GaN 性能优势的确立以及 GaN HEMT 挑战的克服，现在是时候解决设计人员最关心的问题了，如价格、可用性和可靠性等

作者：Enis Marcon 英诺赛科（欧洲）

不难发现，用 GaN 制造的功率器件取代硅功率器件有着显著优势。以电动自行车充电器为例，当采用 GaN 时，其体积缩小了 75%，可以放入背包中；以 USB-PD 笔记本电脑充电器为例，其尺寸约为硅基器件充电器的三分之一；以数据中心 DC/DC 转换器为例，其中 GaN 的引入让尺寸减半，并大幅提高效率。

GaN 提供的应用优势背后有很多原因，目前众所周知的是，GaN 能够减小尺寸并提高效率。采用这种宽禁带半导体制成的器件的一项重要优

点是不存在反向恢复电流，有利于更简单的架构。此外还有其他优点，包括：相比于硅，GaN 能够在更高的频率下工作，从而允许部署更小的无源器件；比导通电阻显著降低，允许 GaN 器件更小；基于导通电阻和栅极电荷的乘积，品质因数可提高 10 倍，从而实现更高的效率。

因此，GaN 将继续在所有应用领域快速铺开，包括消费、工业、汽车和可再生能源，采用 GaN 将提高所有功率转换系统的性能，同时可以缩小尺寸、提高效率并降低成本。

GaN : 有力的案例

之前的担忧有所缓解，如今 GaN 市场一片繁荣。然而，这并没有缓解一些电源转换器设计人员对 GaN 大规模采用的顾虑。其原因主要集中在价格和大批量供应上，不过也存在对二次采购的担忧。

智能手机市场巧妙地阐明了这些观点。尽管其出货量略有下降，但每年的销量仍远超 10 亿台，促进了 GaN 功率器件供应商将其产品设计到手机中。但在此之前，必须克服四个障碍。首先，此举背后需要有明显的优势。另外，GaN 器件必须复制硅极低的栅极漏电特性；以有竞争力的价格出售；可大量供应，维持每年销售 10 亿部智能手机并满足快速增长的需求，从而匹配 6 至 9 个月推出新型号的节奏。

在英诺赛科，我们符合所有这类条件。但这还不是全部。我们不断创新，推出了市场上首款双向 GaN 等产品。这项技术（我们称之为 VGaN）具有明显且引人注目的优势。它提供了一种优于传统方法的双向阻断电流的替代方案，即在配备了两个背对背 Si MOSFET 的电池管理系统中使用过压保护单元。在我们的努力之下，这对晶体管可以用单个 VGaN HEMT 取代，从而可提供体积缩小 50%、效率更高的替代方案（见图 1）。

我们的突破之一是解决了与漏电流相关的问题。许多设计人员没有考虑这一点的习惯，因为典型硅器件栅极下方的氧化物会阻止泄漏。而 GaN HEMT 中不存在氧化物层，栅极可以建模为两

个背对背二极管（见图 2）。

为了减少泄漏，我们优化了外延、器件架构和工艺。基于所有这些方面的进步，漏电流已下降了近十倍。在器件的整个使用寿命期间，温度在 85℃ 时，漏电流降至 3μA 以下。这种性能水平十分受智能手机制造商的欢迎，可确保 VGaN HEMT 适用于手机内的负载开关。

这一创新表明，一家公司想要成为领先的 GaN 供应商，首先得是一家集成器件制造商。晶圆厂公司难以创新，因为其不具备优化外延、架构和工艺的固有能力。

如果仔细观察价格和供货情况，很快就会明白为什么客户和供应商的需求都在不断增长，而 GaN 未能在智能手机市场占有一席之地。为了在 2022 年售出的 10 亿部手机中实现 10% 的市场渗透率，GaN 功率器件制造商每年需要生产 1 亿部。而为了达到这一产量，需要每月加工 3,000 片 8 英寸晶圆，或每月加工 5,400 片 6 英寸晶圆。根据市场分析公司 Yole Intelligence 的数据，如果暂时忽略英诺赛科的产能，全球 GaN 的总产能仅为每月 16,000 片 6 英寸晶圆。由此可知，这个单一应用就将需要世界产能的近三分之一！

一旦纳入我们的产能，情况就会截然不同。我们是最大的完全专注于 GaN 的集成器件制造商。通过使用 8 寸晶圆，可以经济高效地大批量生产 GaN 器件。我们的产能还在持续攀升，到 2025 年我们每月将生产 7 万片 8 英寸晶圆，而所有其他制造商的总产量就显得相形见绌。

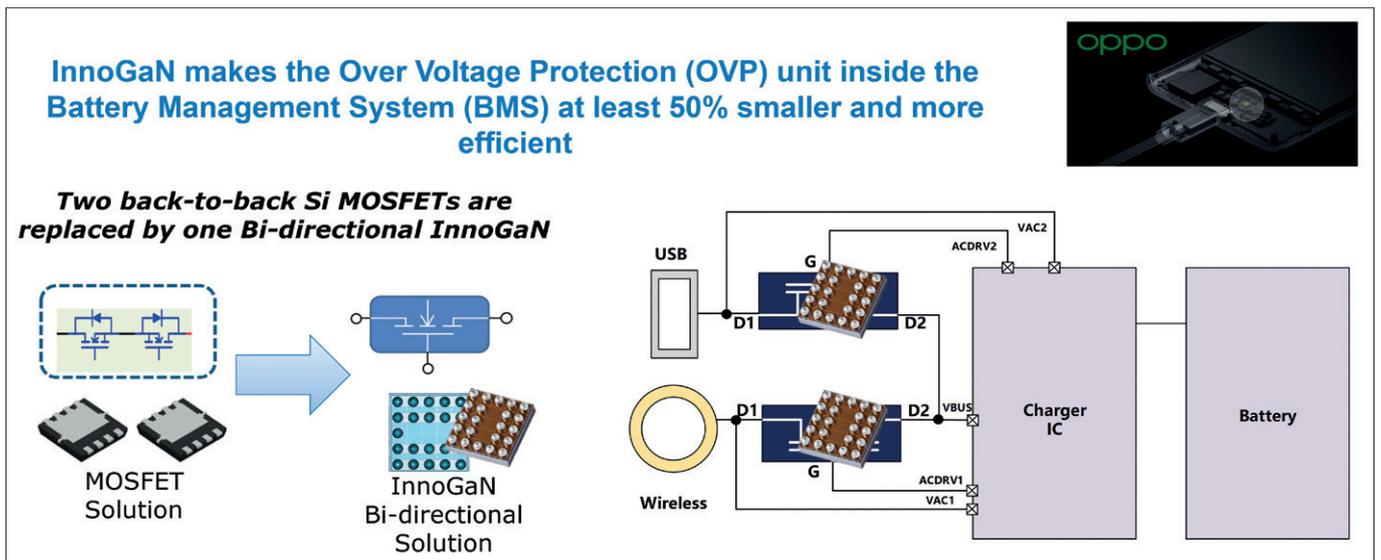


图 1. 单个 VGaN 可以替代两个背对背 Si MOSFET。

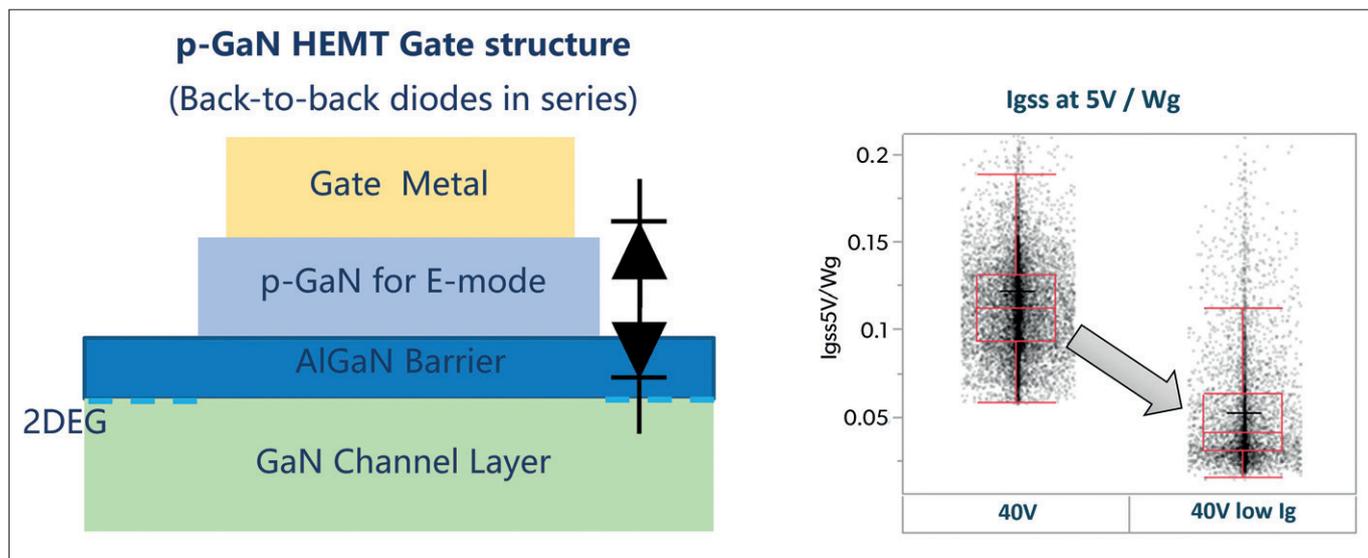


图 2. 将漏电流优化降低至 3 μA 以下。

可靠性问题

成功的关键是可靠性。对于智能手机制造商如 Oppo 等大公司来说，如果可靠性存在疑问，GaN 将永远不可能集成到手机中。

我们已经证明公司的器件在这方面很强大。根据 JEDEC 描述的评估以及加速寿命测试，超过 20 年的栅极加速因子模式的器件故障率为百万分之十（见图 3）。漏极的等效数字则是一万多年。

另一个关键因素是雪崩耐用性，这是硅功率 MOS 器件的一个重要特性。为了评估这种能力，工程师倾向于执行未钳位的感应开关测试。

为此，需要打开测试器件，使电感器以线性速率充电。一旦漏极电流足够高，器件就会关闭，促使电感器耗散其存储的能量。而这将导致器件崩溃。测试器件的雪崩能力允许消耗电感电流，从而限制电压的进一步增加。测试器件保持击穿

状态，直到能量全部耗散。

我们将此测试的结果转换为器件可以支持的雪崩时间和雪崩能量的值。如果功率器件不具备雪崩能力，则必须提供更高的击穿电压，以允许电感器的能量完全放电。我们的器件就是这种情况，高击穿电压可满足电感开关额定值。对于我们的低压器件，击穿电压是器件额定值的两倍以上，可确保这些产品能够安全地处理电压尖峰并成功通过此类关键测试。

数据中心

智能移动器件当然不是 GaN 的唯一市场。在其他应用机会中，数据中心非常耗电，提供了一个巨大且不断增长的市场。在这里，效率是第一位。即使效率仅提高 0.1%，也能节省大量成本。GaN 实现的小型化也很有价值，更小的电源转换

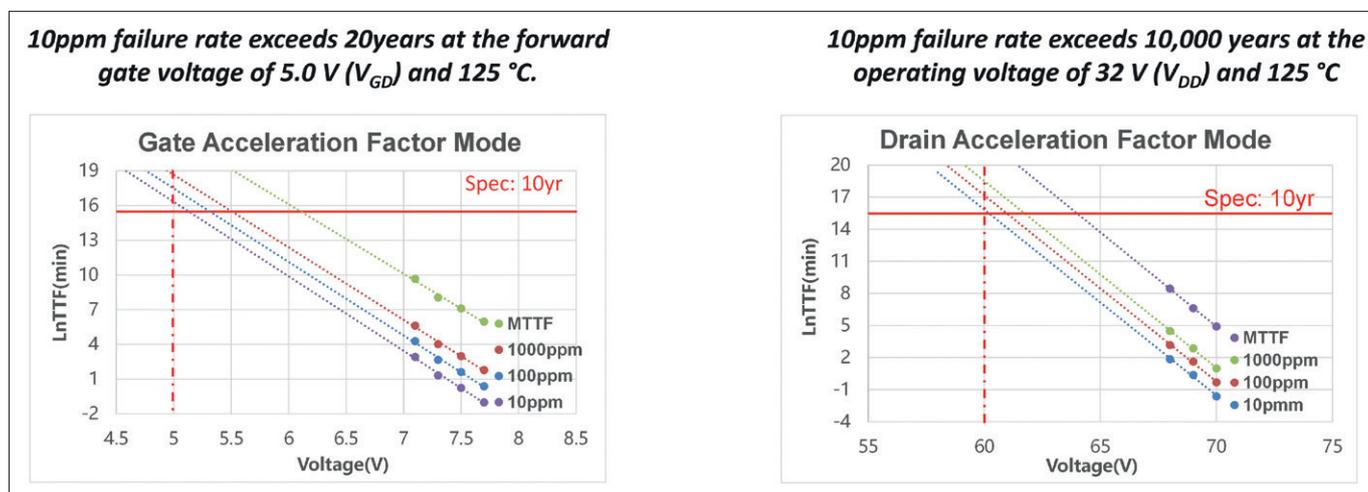


图 3. 加速寿命测试凸显了低压 VGaN 的可靠性。

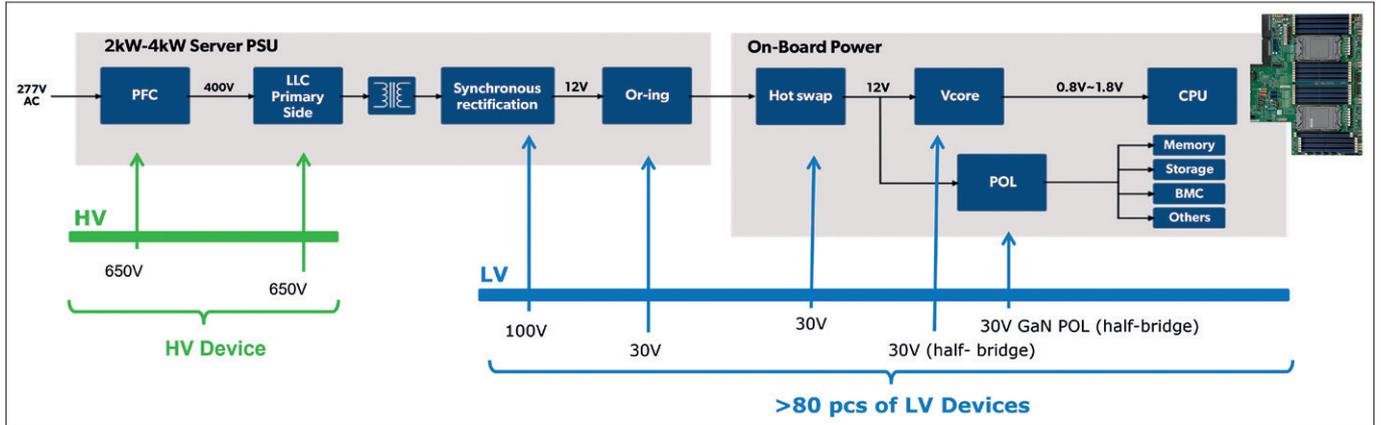


图 4. 高耗能数据中心对 GaN 的需求巨大。

系统可以为计算单元腾出更多空间。

然而，为了确保销量，GaN 供应商还必须提供大量可用的产品产能以及低廉的价格。

从 AC 到 DC 开始过渡，图 4 概述了数据中心内的电源转换阶段。初级侧的常用设计结合了功率因数校正和一对电感器以及一个电容器，通常部署 650 V 的器件。同时，在低压侧，当涉及负载点器件时，通常使用 100 V 和 30 V 零部件。在这里，每次导入通常使用多达 80 个或更多低压功率晶体管。所有这些零部件必须能够以合适的价格批量交付。

在使用一对电感器和一个电容器构建的 600 W 全桥中，我们器件的优势得到了体现。当采用四个 3.2 mΩ 100 V GaN INN100W032A HEMT 构

建时，最终设计的尺寸仅为基于硅解决方案设计的四分之一，同时效率还提高了 0.6%。这相当于减少近 10% 的能耗，确保成本显著减少并降低二氧化碳排放。

集成解决方案

通过集成可以进一步减小尺寸。例如，我们的 SolidGaN ISG3201 是一个完整的半桥电路，其尺寸还缩小了 20%（见图 5）。

在这种尺寸仅为 5 mm × 6.5 mm × 1.1 mm 的单焊盘网格阵列封装中，有两个采用半桥配置的 GaN HEMT，以及一个驱动器和一个自举电容器。

请注意，集成的好处不限于缩小尺寸。由于电路元件之间的封装嵌入连接，这种方法还可以

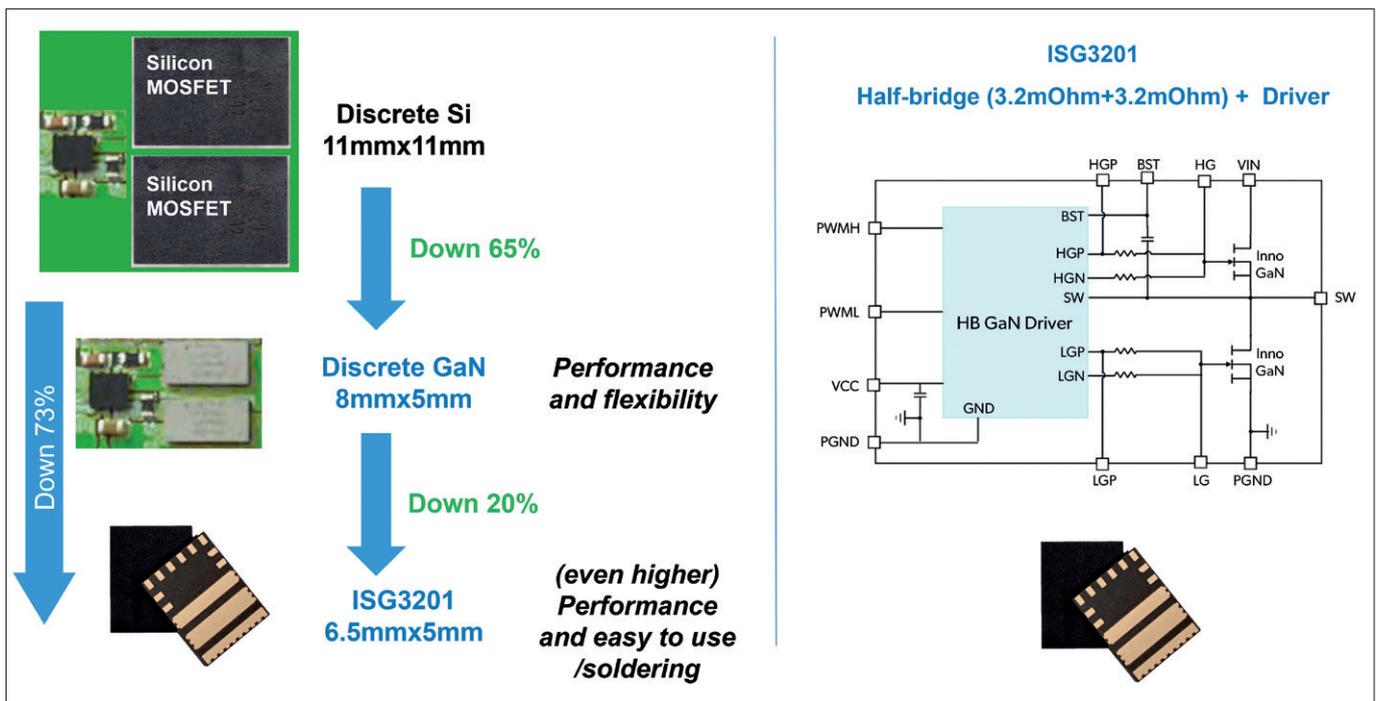


图 5. SolidGaN 集成解决方案具有尺寸、性能和易用性等优势。

带来更高的性能。例如用于数据中心的 600 W 48 V/12 V DC/DC 转换器。通过引入 ISG3201，设计人员可以提高功率密度，在相同尺寸的模块中可达到 1000W，效率高达 98.26%。

这给了我们的客户选择的机会：分立解决方案，例如 INN100W032A，可提供更好的灵活性；集成解决方案，例如 ISG3201，更易于安装和使用。

此外，我们还将注意力集中在高压领域，推出了导通电阻范围为 30 mΩ 至 2.2 Ω 的 650 V HEMT 产品系列。同样，我们意识到一些设计人员会担心高压尖峰导致的雪崩故障。对此，我们解决这个问题的方法是确保阻断电压的余量。由于 GaN 晶体管（与硅制成的晶体管不同）没有雪崩额定值，因此避免这种形式故障的唯一方法是选择击穿电压远高于指定电压额定值的器件。我们的 650 V 额定值设备可以在高达 800 V 的电压下承受低于 200 μs 的非重复脉冲，这远高于最大额定值。当重复脉冲的持续时间缩短至 100 ns 以下时，我们的组件在室温和 125 °C 下可以保持最大瞬态电压降至 750 V。这也远远超出了 650 V 额定值，增加了我们器件使用可靠性方面的数据收集。

英诺赛科在其位于中国苏州的 8 英寸晶圆厂生产器件

双重来源

当然，我们的一些客户不愿意依赖单一供应商。不过也没必要，因为目前出现了多种来源的 GaN 零部件。例如，我们采用 DFN 8 × 8 或 5 × 6 封装的 650 V/700 V 器件与具有相似额定值和规格的零部件可实现引脚对引脚兼容。显而易见的是，在功率半导体大众市场中采用 GaN 不再存在任何障碍。担心大批量可用性、价格、制造商之间的兼容性、低压和高压可靠性以及雪崩的日子已经一去不复返了。简而言之：未来是 GaN 的时代。

通过应变层降低导通电阻

英诺赛科的 GaN HEMT 本质上是增强模式(E 模式) 器件。

这种备受青睐的故障安全操作模式（称为常关）是通过在 AlGaIn 势垒顶部生长 p-GaN 层，然后沉积和图案化栅极金属，以及在 AlGaIn 势垒



英诺赛科在其位于中国苏州的 8 英寸晶圆厂生产器件

上选择性凹陷 p-GaN 层来实现的。栅极金属层与 p-GaN 层形成肖特基接触，因此，平衡时沟道中的电势升高，以确保常关操作。

通过内部控制所有制造工艺阶段，英诺赛科已经能够开发出多项技术改进，这些技术改进对于优化 GaN HEMT 制造来实现高性能和可靠性以及大规模生产和降低成本至关重要。

决定晶体管性能的关键参数之一是 $R_{DS(on)}$ ——即每单位面积的总漏源导通电阻。 $R_{DS(on)}$ 决定开关的最大可能额定电流并影响电流损耗，从而影响效率。因此，通过最小化特定的 $R_{DS(on)}$ ，工程师可以针对给定的导通电阻缩小器件尺寸，并最终在每个晶圆上生产更多器件，从而降低成本。

为了降低特定的 $R_{DS(on)}$ ，英诺赛科开发了一种应变增强技术。在明确栅极堆叠之后，应变增强层立即沉积到晶圆上。该应变增强层产生的应力调制会引起额外的压电极化；这会导致二维电子气的密度增加，与没有应变层的器件相比，薄层电阻下降了 66%。

最重要的是，由于应变增强层是在栅极形成之后沉积的，因此它仅影响接入区的电阻。而对其他器件参数没有影响，例如阈值和漏电流。得益于这项专利技术，英诺赛科的硅基 GaN HEMT E 模式表现出非常低的比导通电阻。☑



制造性能更好的蓝色和绿色激光器

蓝色和绿色激光二极管将让全彩激光投影仪和激光电视拥有十分惊人的电光转换效率

作者：Yoshitaka Nakatsu¹, Tsuyoshi Hirao¹, Tomonori Morizumi¹, Yoji Nagao¹, Shingo Masui¹, Tomoya Yanamoto¹ 和 Shin-Ichi Nagahama¹
(¹ 日本日亚化学工业株式会社)

日亚化学 (Nichia) 成立于 1956 年，总部位于日本阿南市，是一家知名的化学材料、LED 和激光二极管制造商。50 多年来，公司一直致力于显示器相关业务。早在 1970 年，公司就开始生产用于彩色电视的荧光粉。之后一年，开始为客户的高压汞灯（投影显示器的关键元件）生产所需的荧光粉。凭借高亮度蓝色 LED 的发明，公司在 20 世纪 90 年代享誉全球，并于 1993 年开始生产该产品。在此成功的基础上，公司于 1995

年生产出了世界上首个电子注入式 InGaN 基激光二极管。这一特别成功为激光投影仪和激光电视等激光显示器的发展奠定了关键基础。这类激光显示器采用了发射红、绿、蓝三基色的激光器，其市场在持续增长。

一套直射式产品系列

我们不仅是蓝色激光二极管的先驱，也是第一家将瓦特级绿色激光二极管商业化的公司。这

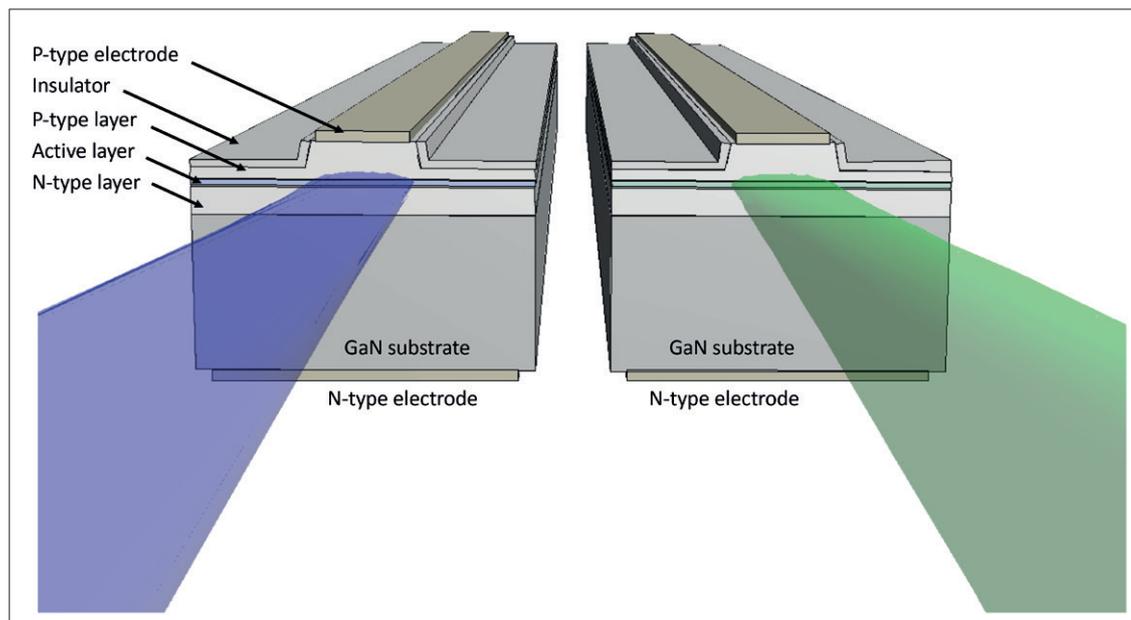


图1. 日亚化学的多模蓝色和绿色激光二极管。

两种产品均属于我们的激光二极管产品系列，其光源范围涵盖从 375nm 的紫外光到 532nm 的绿光。显示器制造商可以将我们的激光器与许多其他公司商业化生产的红色激光二极管结合使用。

由于其在色彩图上的强大能力，红、绿、蓝激光器的组合给投影仪带来了很大前景。当这三种光源结合在一起时，会扩展色域，产生更多的颜色，最终可能创建刺激感官的图像。从商业角度来看，激光二极管也具有吸引力：功耗低、寿命长，有助于降低电影院的运营成本。

此处，我们详细介绍蓝色和绿色激光二极管的最新进展。当这些光源加上红光的衍生物，发射窄波长时，就可以创建色彩丰富的显示器。就其成熟度而言，红色和蓝色激光器处于领先地位，并且已经实现了量产。最常见的绿色光源实际上是基于 1064nm 激光器二次谐波的光源，其来源是一种复杂的装置，装置功率转换效率对于商业器件来说通常只有 6.5% 左右。由于性能上的不足，人们迫切期望发展出高效的绿色激光二极管，推动激光投影仪的应用。

破纪录的蓝光和绿光

为什么绿色激光二极管的制造如此困难？如果从蓝色开始，则必须通过增加量子阱中的镓含量，缩小禁带，将发射转换到绿色。不幸的是，这种方法有一个缺点，由于 InN 的晶格常数比 GaN 大得多，因此会向有源区引入应变。应变会导致退化，阻碍量子阱中电子和空穴之间的辐射

复合。而且，随着晶体结构的扭曲会导致镓含量增加，从而导致压电极化，由此会改变能带结构的轮廓。其影响包括发射波长的变化以及由于载流子复合概率的降低而导致的发光效率的降低。

为了抑制压电场，一些研究小组转向使用非极性 GaN 衬底，但这种衬底的尺寸和可用性都有限制。我们更倾向于具有更大商业可行性的替代方法，包括减薄量子阱来实现更好的均匀性以及电子和空穴波函数的更大重叠。通过改变外延结构和器件设计，我们生产出了具有高电光转换效率的激光二极管。

我们利用 MOCVD 生长激光器的外延层结构。其生产过程包括将 2 寸 c 面自支撑 GaN 衬底装入 MOCVD 反应腔中，沉积 n 型层、有源层和 p 型层。我们通过蚀刻在 p 侧形成脊状结构，将这些外延片加工成器件（见图 (1)），然后将 n 型和 p 型电极添加到芯片的顶部和底部。这些边缘发射结构末端的反射镜是通过晶圆切割然后在裸

由于其在色彩图上的强大能力，红、绿、蓝激光器的组合给投影仪带来了很大前景。当这三种光源结合在一起时，会扩展色域，产生更多的颜色，最终可能创建刺激感官的图像。

图2. (a) 3A CW下的发射光谱和 (b) 日亚化学蓝色激光二极管在25°C CW模式下的电流-光 (I-L) 和电流-电压 (I-V) 特性。

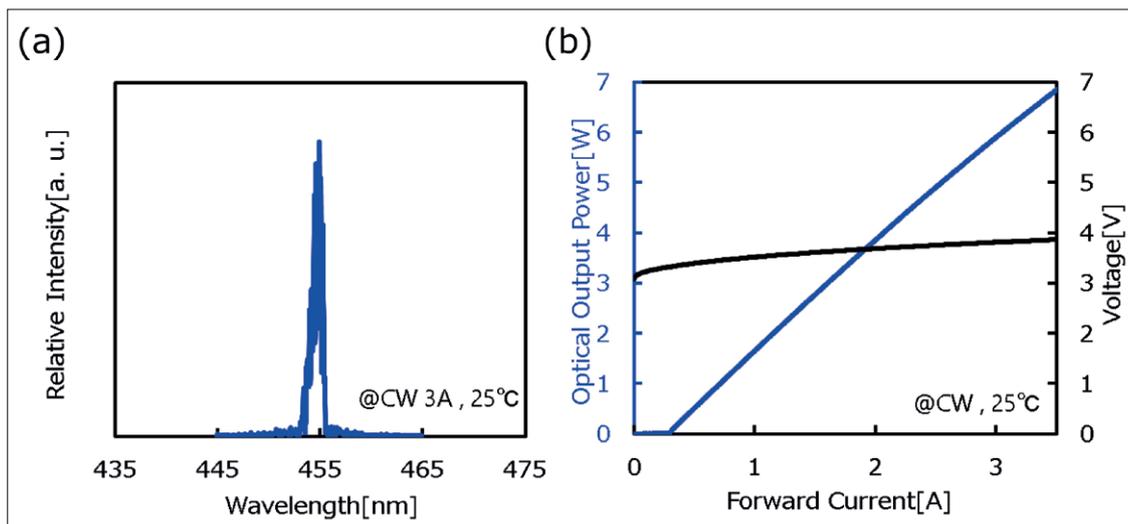


图3. 日亚化学蓝色激光二极管在25°C CW模式下的电流-WPE (I-WPE) 特性。

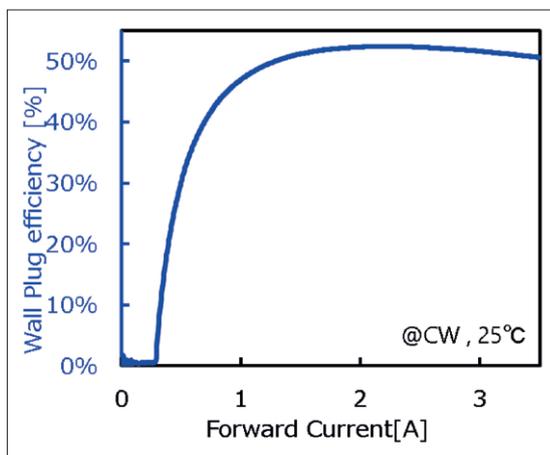
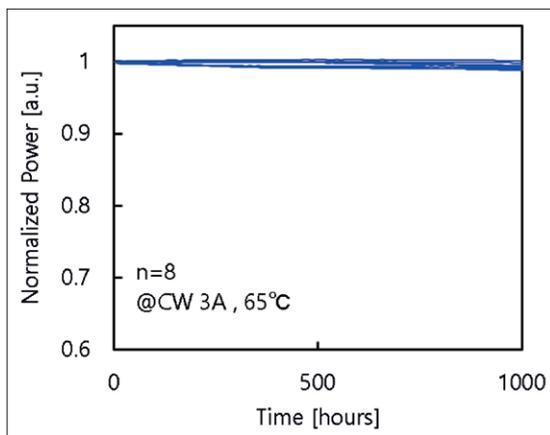


图4. 日亚化学蓝色激光二极管在外壳温度 65°C、3.0ACW模式自动电流控制下的寿命测试结果。工作电流按其初始值标准化。



展, 于 2007 年推出了首款瓦特级激光二极管。最近, 我们突破了另一个重大屏障, 实现了 50% 的 WPE。对于我们发射波长为 455nm 的蓝色激光器, 其光谱宽度通常为 2nm, 这意味着所有光能仅存在于 LED 光谱宽度的十分之一左右。令人惊讶的是, 一半的电输入功率转换成激光的波长仅为 2nm。但请注意, 这一效率水平低于性能最好的 GaAs 基和 InP 基激光二极管的效率水平, 因此我们可以预计未来效率会进一步提高。

年初, 我们展示过以 3A 电流驱动的 455nm 蓝色激光器的光学输出为 5.90W, WPE 为 51.6% (见图 2 和 3)。芯片设计的发展提高了这些激光二极管的输出功率和效率标准。具体来说, 性能的提高来自于抑制激光二极管元件内部的吸收损耗、提高载流子注入效率以及通过降低电阻来调整工作电压。

我们蓝色激光器的一个重要特点是其卓越的可靠性。在额定电流为 3A 的 30,000 小时寿命测试中证明了这一点 (见图 4)。由于这一特性, 我们的蓝色激光二极管可以在投影仪显示器中使用几年或更长时间, 比传统的灯光源寿命更长, 而传统的灯光源则需要在几千小时后进行更换。

为了达到所需的输出功率, 我们可以将多个蓝色激光二极管安装在一个封装中。采用这种方法, 我们可以生产出光输出功率从 20W 到 100W 的光源。

近年来, 全球范围内出现了从灯光源到固态光源的转变。随着产品的更新换代, 这种趋势还将持续。这一转变的核心是激光二极管。毫无疑问, 随着从灯到激光器的转变蔓延到所有市场, 激光二极管将成为主流。

露的面上涂上介质镜而形成的。为了减少光吸收损耗, 我们非常注重外延叠层的光学限制结构的设计。激光器的制造是采用倒装方法将芯片安装在可抑制热阻的 TO-can 封装中来完成的。

蓝光超出 50%

早在 2001 年, 我们就曾公布过蓝色激光二极管里的一个重要里程碑: 该器件首次实现毫瓦输出功率。在接下来的几年里我们取得了快速进

瓦特级绿光

近期我们所取得的另一项成功是将 525nm 绿色激光二极管的 WPE 提高到近 24%。该激光器能够完全覆盖绿光区数字电影的标准。为了实现这一成功，我们克服了与压电极化相关的挑战，减少了电子和空穴的重叠，从而降低了辐射效率。我们的解决方案是减少有源层的厚度。虽然压电极化仍然存在，但通过将有源层厚度变得非常薄，我们抑制了发光的减少。

绿色激光二极管的脊宽为 20 μm ，腔长为 1200 μm ，其特性凸显了量子阱更薄的优势。当以 1.9A 的电流驱动时，我们的 525nm 发射器件可提供 1.86W 功率和 23.8% 的 WPE，同时还受益于低阈值电流（见图 (5)）。此外，我们还生产出基于二次谐波产生的现有 532nm 激光器的直接替代品。我们的 532nm 激光器以 1.9A 电流驱动，可产生 1.64W 的光输出和 20.2% 的 WPE（见图 (6)）。请注意，我们的绿色激光器可以以较低的输出功率产生更高的 WPE。以 1A 电流驱动，525nm 激光器的峰值 WPE 为 5.9%；当提供 1W 的光输出功率时，532nm 激光器的最大 WPE 为 21.9%（见图 (7)）。

我们的研究将加速将现有的红色激光二极管与全新的、更强大、更高效的蓝色和绿激光二极管相结合，为投影机创造引人注目的光源。此举将使新一代投影机具有宽色域。请注意，其高效率的优点不仅仅在于削减电费，还简化了热管理，这一点非常重要。我们正在开辟新的天地，是唯一一家拥有商业化瓦特级 532nm 激光二极管的公司。所提供的光源完全满足 BT.2020 高清标准。更高的效率不仅对投影机应用很有价值，而且在其他市场（包括加工和工业应用）中也将会是一种资产。

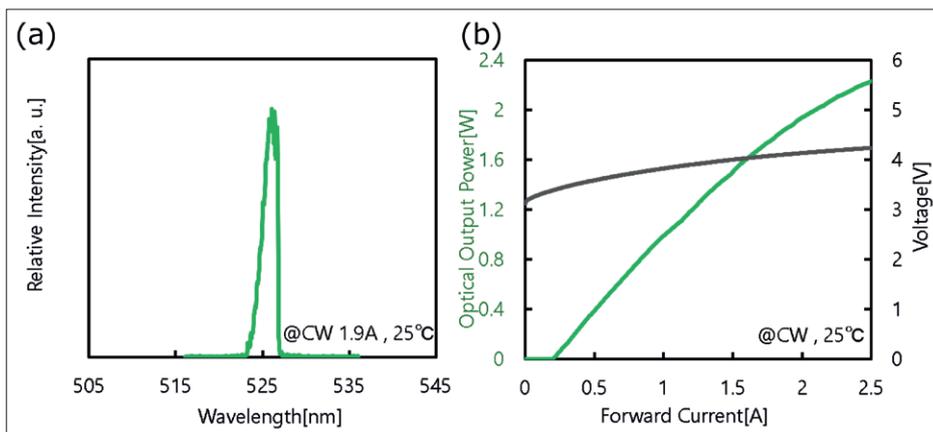


图5. (a) 日亚化学525 nm绿色激光二极管在外壳温度25°C时、1.9A CW模式下的发射光谱。(b) 25°C CW模式下绿色激光二极管的电流-光 (I-L) 和电流-电压 (I-V) 特性。

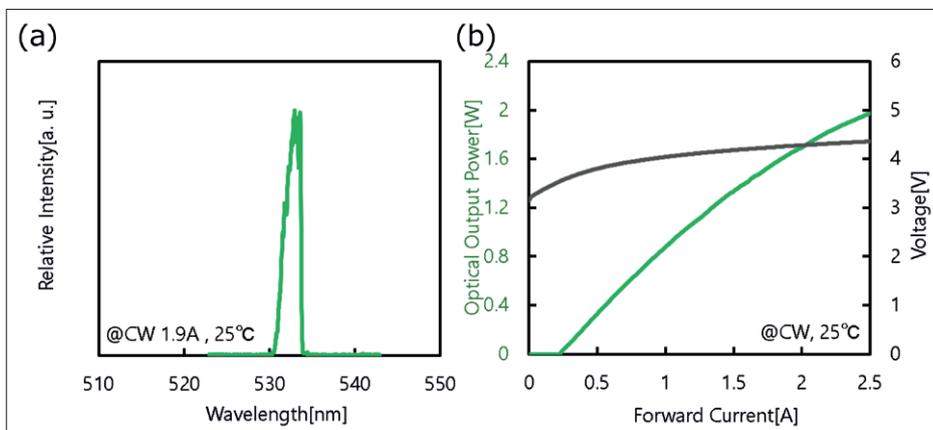


图6. (a) 日亚化学532nm绿色激光二极管在外壳温度为25°C时、1.9A CW模式下的发射光谱。(b) 25°C CW模式下绿色激光二极管的电流-光 (I-L) 和电流-电压 (I-V) 特性。

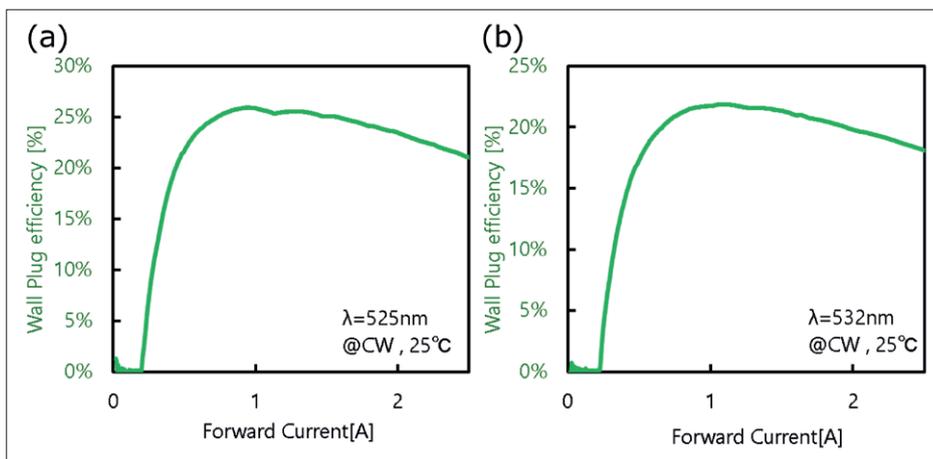


图7. 日亚化学 (a) 525nm和 (b) 532nm绿色激光二极管在25°C CW模式下的电流-WPE (I-WPE) 特性。

扩展阅读

- Y. Nakatsu et.al. “Blue and green edge-emitting laser diodes and vertical-cavity surface emitting lasers on c-plane GaN substrates.”, Proc. SPIE 12421 124210F 1-8(2023).



拓展深紫外 LED 的应用领域

深紫外 LED 在医疗保健领域的应用正在取得巨大进展，并且在 UVC 和远 UVC 的输出功率、效率和寿命方面均有所提高

作者：MICHAEL KNEISSL，柏林工业大学和费迪南德 - 布劳恩研究所（FERDINAND-BRAUN-INSTITUT）

备受关注的器件往往在许多方面都有所突破。除了性能上的提升，它们还经常在可靠性方面有所改进，并因其卓越的特性而受到更多应用领域的关注。深紫外 LED 当然也是如此。它在紫外线和远紫外方面的功率和寿命都在增加，在抗击医院病菌和空气传播病毒方面备受关注。

第三届国际紫外光发射技术和应用会议（也称为 ICULTA 2023）的核心内容就是报告所有这些领域的进展情况。今年的会议于 2023 年 4 月 23 日至 26 日在德国柏林举行，吸引了来自 27 个国家的 220 多名与会者，由最近成立的先进生命紫外线协会（Advanced UV for Life e.V.）与柏林

费迪南德 - 布劳恩研究所（FBH）共同组织，并与国际紫外线协会（IUVA）合作举办。

构建更好的器件

欧司朗（Osram）和日亚（Nichia）这两家重量级固态照明企业为推动紫外线领域的发展做出了贡献。在 ICULTA 2023 上，这两家芯片制造商的代表公布了他们在 UVC-LED 技术方面的最新研发成果，展示了 260 nm 至 280 nm 消毒波段的峰值功率。

项目经理 Marc Hoffmann 和产品管理总监 Christian Leirer 代表艾迈斯欧司朗（ams Osram）



左：负责组织 ICULTA 2023 的一些主要人员（从左到右）：Martin Strassburg（ams Osram, ICULTA 2023 主席）；Neysha Lobo-Ploch（费迪南德-布劳恩研究所, ICULTA 2023 项目主席）；Michael Kneissl（柏林工业大学和费迪南德-布劳恩研究所, 面上生命科学的高级紫外线部门主席）和 Sven Einfeldt（费迪南德-布劳恩研究所, ICULTA 2021 主席）。照片来源：T. Rosenthal

发言。除了概述公司的进展之外，二人还对 UVC LED 的最新进展及其在工业和消费应用中的使用进行了精彩的概述。应用领域目前正从消费类应用转向工业应用，从而影响了对紫外发光二极管的要求。为了支持这一趋势，艾迈斯半导体欧司朗公司正在改进其 UVC LED 的性能。当前产品在 250 mA 驱动电流下可提供高达 100 mW 的输出功率，以 L70（L70 是输出功率下降到初始值的 70% 所需的时间）来衡量，使用寿命为 10,000 小时。据发言人介绍，艾迈斯欧司朗的第三代器件在 WPE 为 10% 的情况下可产生高达 200 mW 的功率。

该公司为自己设定了一个非常雄心勃勃的目标：到 2026 年，WPE 将达到 20%，L70 的使用寿命将达到 40,000 小时，而定价水平仅为目前汞灯成本的十倍。这样的改进将是革命性的，将确保基于 UVC-LED 的系统的成本低于基于传统的汞灯系统。由于结合了 UVC-LED 和紫外线传感器，与现有技术相比，这种技术还能节省能源，并提高产品的安全性和可靠性。请注意，这个进度预测在我演示给出的范围内（见图 1）。

代表日亚化学欧洲公司（Nichia Europe）的董事总经理 Ulf Meiners 对蓝光 LED 和 UVC-LED 的 WPE 增长时间进行了有趣的比较，并指出这两种技术的发展似乎都处于类似的快节奏轨道上。Meiners 没有给出更长远的展望，但预测 2024 年日亚化器件的 WPE 将达到 7.5%，280 nm 的输出功率将达到 150 mW。

虽然许多人使用单独的性能参数对 UVC-

LED 和汞灯进行直接比较，但 Meiners 认为这没有多大意义。他强调研究 UVC-LED 特定特性的具体应用的重要性。例如，必须了解传统紫外线源无法实现的全新、更高效的系统设计。深紫外 LED 可以提高系统的光利用效率，其优点包括：点光源发射，可根据应用需要定制光源；降低能耗 - UVC-LED 易于调光，可快速开关，只在需要时以所需的功率水平启动。ams Osram 高级应用关键专家 Alexander Wilm 强化了这一观点，他描述了几个用例场景，在这些案例中，尽管 UVC-LED 的 WPE 较低，但其性能已经超过了传统的 UVC-C 灯管。

这两家重量级公司之间的一个有趣区别是其紫外线 LED 的峰值波长。Nichia 坚持使用其 280 nm LED 技术平台，认为 UVC-LED 在稍长的波长下可靠性更高，而 ams Osram 则专注于接近杀菌效率峰值（约 265 nm）的 LED。

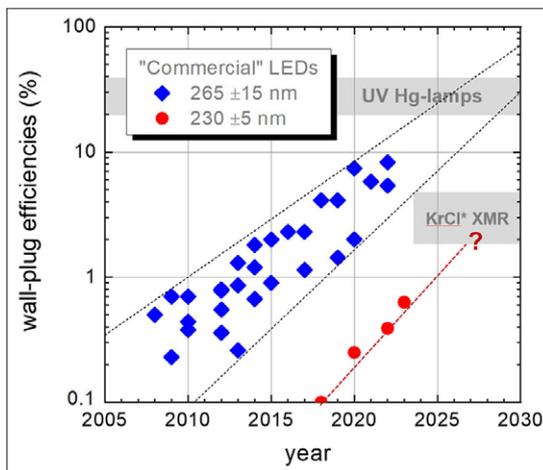


图 1. 250 nm - 280 nm 和 225 nm - 235 nm 波段生产级紫外发光二极管和工程原型的 WPE。资料来源：Michael Kneissl/TU Berlin



ICULTA 2023 第二届项目主席、来自 Heraeus Noblelight 的 Torsten Jenck 为最佳学生海报颁奖。获奖者是德累斯顿工业大学的 Tim Achenbach，其论文为：Novel UV dosimetry for surfaces based on the interplay of oxygen and room-temperature phosphorescence（由德累斯顿联邦理工学院的同事 Linda Steinhäuser 颁奖，右一）。并列第二名的是来自 KAUST 的 Iman Roqan（右二）（论文：Subquantum well effect on the carrier dynamics of Al-rich AlGaN/AlGaIn multiple-quantum-well DUV LEC structure grown on AlN substrate）和来自 Charité - 柏林医科大学的 Silke Lohan（左一）（论文：Radical formation in skin at different wavelengths: from UVC to NIR）。照片：T. Rosenthal

竞争生产同类领先器件的供应商为数不多。其中包括 Asahi Kasai 的子公司 Crystal IS。Crystal IS 应用工程总监 Rajul Randive 向参加 ICULTA 的代表们介绍了这些器件的最新功能。Randive 透露了该公司 265 nm LED 的创纪录性能水平，单芯片输出功率在 500 mA 时已高达 160 mW，最大 WPE 达到 6.5%。与大多数 UVC-LED 产品不同，Crystal IS 制造的产品是在内部生产的低缺陷密度块状 AlN 衬底上生长的。块体 AlN 中的穿透位错密度比在蓝宝石上生长的 UVC-LED 异质结构中的穿透位错密度低许多数量级。

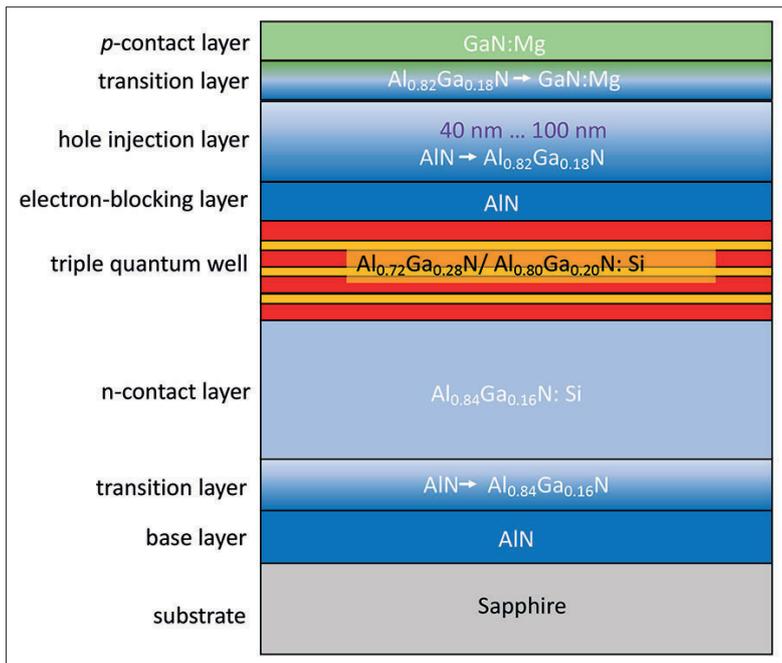


图 2. 具有分布式极化掺杂 (DPD) AlGaIn 空穴注入层的 234 nm LED 异质结构示意图。(来源: T. Kolbe et al. Appl. Phys. Lett. 122 191101 (2023))

该公司将卓越的器件寿命归因于较低的穿透位错水平。在 350 mA 的驱动电流下，Crystal IS 器件的 L70 寿命已经达到 25,000 小时。

远紫外线：改善健康……

最近关于多重耐药细菌、真菌和病毒体内灭活的研究令人鼓舞，从而激发了人们对远紫外线辐射器的兴趣。在最近举行的 ICULTA 会议上，纽约哥伦比亚大学和柏林夏里特医科大学的研究人员介绍了这方面的工作。

哥伦比亚医学中心放射研究中心主任 David Brenner 表示，虽然 Covid-19 疫情的影响正在消退，但每年还有许多其他空气传播的病原体造成重大感染和死亡，包括流感和肺结核。

他的研究小组已经证明，在 222 nm 波长下，仅 2 mJ cm⁻² 的剂量水平就能将严重急性呼吸系统综合征冠状病毒 2 型 (SARS-Cov-2) 和其他病原体的病毒载量降低几个数量级。

参加 ICULTA 2023 的几位专家强调，抗菌素耐药性是人类面临的最大健康挑战之一。仅在美国，每年就有 280 万人感染多重耐药细菌，其中 35,000 人因此死亡。据估计，全球每年的死亡人数约为 120 万，而且还在不断上升。

深紫外 LED 行业完全有能力帮助拯救生命。柏林夏里特医科大学 (Charité-Berlin University of Medicine) 实验皮肤生理学系主任 Martina Meinke 解释说，在对抗 MRSA、MSSA 和其他细菌时，发射约 233 nm 的远紫外线 LED 是一种有效且安全的工具。

Meinke 的团队已经从志愿者的临床试验中取得了非常令人鼓舞的结果。

40 mJ cm⁻² 的典型剂量水平仅对人体皮肤造成轻微的 DNA 损伤，相当于不到 0.1 MED (最小红斑剂量)，而且在 24 小时后也没有 DNA 损伤的迹象。在这些非常有希望的结果的激励下，Meinke 及其同事正在将研究范围扩大到其他有害病菌，包括念珠菌等真菌。他们还开始研究人体其他部位的治疗方法，特别是口腔和鼻腔粘膜。

改善医疗保健的其他工作包括创新的 UVC 光疗平台，用于净化慢性不愈合的伤口。光谱医疗技术公司 (Spectrum Medical Technologies) 的 Mark Gerber 参与了这一开创性项目。他解释说，当他们使用 Asahi Kasai 公司生产的 235 nm UVC-LED 发出 80 mJ cm⁻² 的剂量水平时，人体皮肤上

的 MRSA 减少了 95%。Gerber 声称，由于穿透深度稍深，235 nm 发射器在生物膜灭活方面优于 222 nm 准分子灯，同时仍然不会造成明显的皮肤损伤。这项技术最初将用于疗养院、医院和医生办公室。

... 并提高输出功率

今年 ICULTA 上的许多演讲都概述了提高深紫外发射器性能的方案。其中包括 Crystal IS 联合创始人、现任名古屋大学教授 Leo Schowalter 的演讲，他讨论了在低缺陷密度块状氮化铝衬底上的氮化铝异质结构的赝晶生长。Schowalter 阐述了原生衬底的情况，指出尽管 AlN 和 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_x\text{N}$ 之间存在显著的晶格失配，而且这种失配随着镓组分的增加而增加，但在高质量块状 AlN 衬底上生长的 UVC LED 的有源器件区域中的穿透位错密度远低于 10^6 cm^{-2} 。较低的穿透位错密度有助于各种形式的光发射器，Schowalter 认为这是远紫外 LED 性能大幅提高的原因，也是连续波激光二极管能在 272 纳米附近发光的原因。他还提到了 230 nm 以下 LED 效率的最新进展，目前 EQE 已高达 0.5%。这项工作刚刚发表在《应用物理快报》上（参见 H. Kobayashi et al. Appl. 122 101103 (2023)）。

深紫外 LED 面临的挑战之一是向器件中注入空穴。费迪南德-布劳恩研究所采用的一种解决方法是采用分布式极化掺杂空穴注入层。在讨论具有此特性的器件时，发言人 Tim Kolbe 解释说，他们的 LED 异质结构的基础是 MOCVD 生长的直径为 2 英寸的蓝宝石氮化铝（AlN-on-sapphire）模板，采用双重生长和双重退火工艺。根据 (002) 和 (102) X 射线摇摆曲线的半高全宽值，研究小组估计这些模板中的穿透位错密度约为 $2.1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。在退火模板上，该团队生长了 LED 结构，该结构具有 AlGaIn 多量子阱有源区、2 nm 薄 AlN 电子阻挡层和 AlGaIn 分布式极化掺杂空穴注入层，其中铝的摩尔分数梯度范围为 100 % 到 82% 之间（见图 2）。

与可见光 LED 相比，远紫外 LED 的光提取更具挑战性。费迪南德-布劳恩研究所的研究人员为此提供了一种新方法，他们正在使用 microLED 阵列来增强远 UVC 发射器的提取能力。参与这项工作的 Jens Rass 告诉与会代表，该团队采用精确定制的等离子蚀刻和金属化步

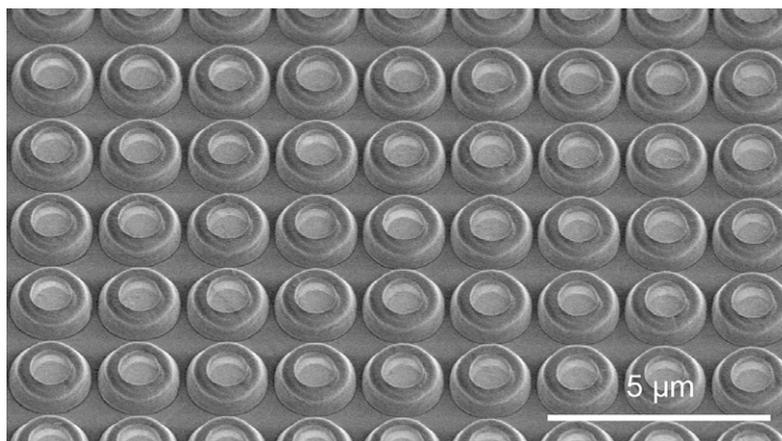


图 3: 间距为 2 μm 的 UV microLED 阵列的扫描电子显微图像。
图片来源: 德国柏林费迪南德-布劳恩研究所 (FBH)。
资料来源: <https://www.fbh-berlin.de/en/research/researchnews/arrays-of-ultraviolet-micro-leds-for-production-sensing-and-communication>

骤，制造出直径小至 1.5 μm、间距短至 2 μm 的二维紫外线发射器阵列（见图 3）。由于发射光可以通过倾斜的台面侧壁重新定向，因此缩小发射器直径可以极大地提高光提取效率。通过仔细选择和优化台面直径、绝缘体材料和台面侧壁角度，Rass 及其同事已经证明，远紫外线 microLED 的外量子效率创下了 1.6% 的记录，该 LED 采用了直径为 1.5 μm 的微像素和用于侧壁钝化的 SiO_2 绝缘体。这些 233 nm 发射器在 20 mA 和 50 mA 电流下的输出功率分别为 1.7 mW 和 3.5 mW。

澳大利亚公司 Silanna UV 是远紫外 LED 领域的新晋企业之一。其 MBE 团队负责人 William Lee 向出席 ICULTA 2023 的与会者介绍了该公司在 235 nm 波长下发射的高功率远 UVC LED 的开发情况。Silanna UV 的 MBE 工具能够生产直径达 6 英寸的外延片，并用于生长 LED 异质结构，该异质结构的硅掺杂电流扩展层和有源区域具有短周期超晶格。这些超晶格由交替的 AlN 和 GaN 层组成，扩展了横向电主导发射的光谱范围，并降低了施主的活化能。对于相当于 $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ 的 n 型短周期超晶格，电阻率可低至 $0.015 \Omega \cdot \text{cm}$ 。利用这项创新，Silanna UV 团队制造了 235 nm LED。这些器件的驱动电流为 200 mA，输出功率高达 7 mW，WPE 为 0.4%。将驱动电流降至 20 mA，可确保 L70 的使用寿命达到 2,800 小时。

今年 ICULTA 上报告的进展突显了 UVC 和远 UVC LED 以及基于其发射的医疗技术的巨大进步。在计划于柏林再次举行的 2025 年 ICULTA 大会上，肯定会有更多的突破性进展。CS



简化 SiC 衬底生产

一种突破性工具可在生产标准碳化硅晶锭时实现高精度

作者：Jeff Gum，哈挺 (Hardinge) 公司

效率低下，成本高昂。这两个词最恰当地描述了制造碳化硅晶锭的传统方法。

然而，现在已经进入了生产晶圆级碳化硅晶体的新时代。它始于 2022 年底，当时我们在哈挺 (Hardinge) 公司的团队推出了 BoulePro-200AX。凭借其单步双平面补偿功能，它简化了碳化硅行业将生长好的晶体转化为晶锭的工艺。SiC 是推动电动汽车和其他高增长市场发展的重要半导体材料，鉴于对 SiC 的极高需求，我们推出 BoulePro 的时机再好不过了。

SiC 行业需要一种新的晶锭成型方法，这背后有很多原因。原因包括：使用多个工具集来执行不同功能的低效率，以及需要雇用多个操作员来操作这些工具集；在不同步骤中，将坯料粘合

到载体上以及从载体上脱胶所耗费的时间；人工材料处理和设置导致的工艺差异增大；缺乏推动优化和改进的最佳实践。

凭借 130 年的研磨和材料相关知识，我们的开发团队在 SiC 行业主要专家的支持下，通过创建全面且经济高效套件，解决了碳化硅晶锭加工中的所有低效问题。我们的工艺优化能够全面大幅降低成本，包括耗材、运营支出和资本支出。

在过去的几年里，我们一直与一些碳化硅原材料供应商合作，以优化制造晶锭的生产工艺。凭借在磨削、车削、铣削和工件夹具方面的丰富经验，我们通过优化正确的加工速度、角度、工件夹具和加工刀具类型，以及在机床中采用 X 射线计量技术，大幅削减了成本。

提高效率

我们的 BoulePro 200AX 具有制造能力，可满足改进工艺流程的所有要求。这种全自动、独立的机床可以将生长的 SiC 晶体加工标准晶圆，无需粘合 / 固定、外部材料设置或手动干预。

BoulePro 的另一个优势是通过集成 X 射线衍射功能实现的单步双平面补偿能力。有了这一功能，BoulePro 可以在极短的时间内完成从晶体到晶圆的所有转换步骤。

将晶体转变为晶圆的传统工艺流程可以根据不同的客户、不同的晶体坯料进行调整。然而，一般来说，首先是手动或自动加载晶体坯料，然后加工初始外径，应用粗圆顶研磨并通过 X 射线衍射评估晶体取向。此后，进行精加工圆顶磨削以校正方向，然后移交给辅助工作台、去除籽晶、通过 X 射线衍射进行确认测量、应用最终外径和平面 / 凹口，最后手动或自动取下晶圆（参见图 1 的流程示意图）。

BoulePro 缩短了将晶体加工成晶圆所需的时间。传统方法需要 24 小时以上，而 BoulePro 使用自动化单一设置解决方案，只需 2-3 小时。考虑到劳动力、生产占地面积、废料、产能效率和耗材等因素（有关详细信息，请参见图 2），这种时间上的节省使总成本降低了近 70%。这将在帮助碳化硅生产商降低生产成本和提高这种宽带隙材料的行业利用率方面发挥关键作用。

秘诀

由于没有用于生产标准 SiC 晶圆的行业标准工艺，制造商们转而采用各自的方法。在所有情况下，他们都采用五步工艺，首先使用 X 射线衍射法确定晶体取向，以获得正确的表面取向，接着进行外径研磨，最后去除头尾（籽晶和圆顶侧），然后制备参考边或凹槽。

我们的专家对这一流程中的各个步骤及其固有的低效率进行了评估。凭借我们作为定制磨削解决方案国际提供商的背景，我们利用一个多世纪磨削经验中的核心专业技术，采用了一种简洁的方法来提供一体化解决方案。

这一努力的成果就是 BoulePro，它建立在我们行业领先的 USACH 研磨机平台之上。它具有集成的 X 射线衍射工具和五轴功能，能够根据客户所需的规格对零件进行定向、X 射线、研磨和 / 或切割。这些都是全自动化完成的。请注意，BoulePro 能够处理当前所有相关尺寸的 SiC 晶体，包括 100 毫米、150 毫米和 200 毫米材料。我们的工具具有卓越效率的关键在于其先进的碳化硅晶体夹具。在整个工艺步骤中，都不再需要将晶体粘合和脱胶到固定装置上——这是当今 SiC 生产商面临的一个主要且极其耗时的问题。此外，BoulePro 无需从一台机器上移除晶体坯料，也无需为下一步做准备以及将其安装在另一台工具中。

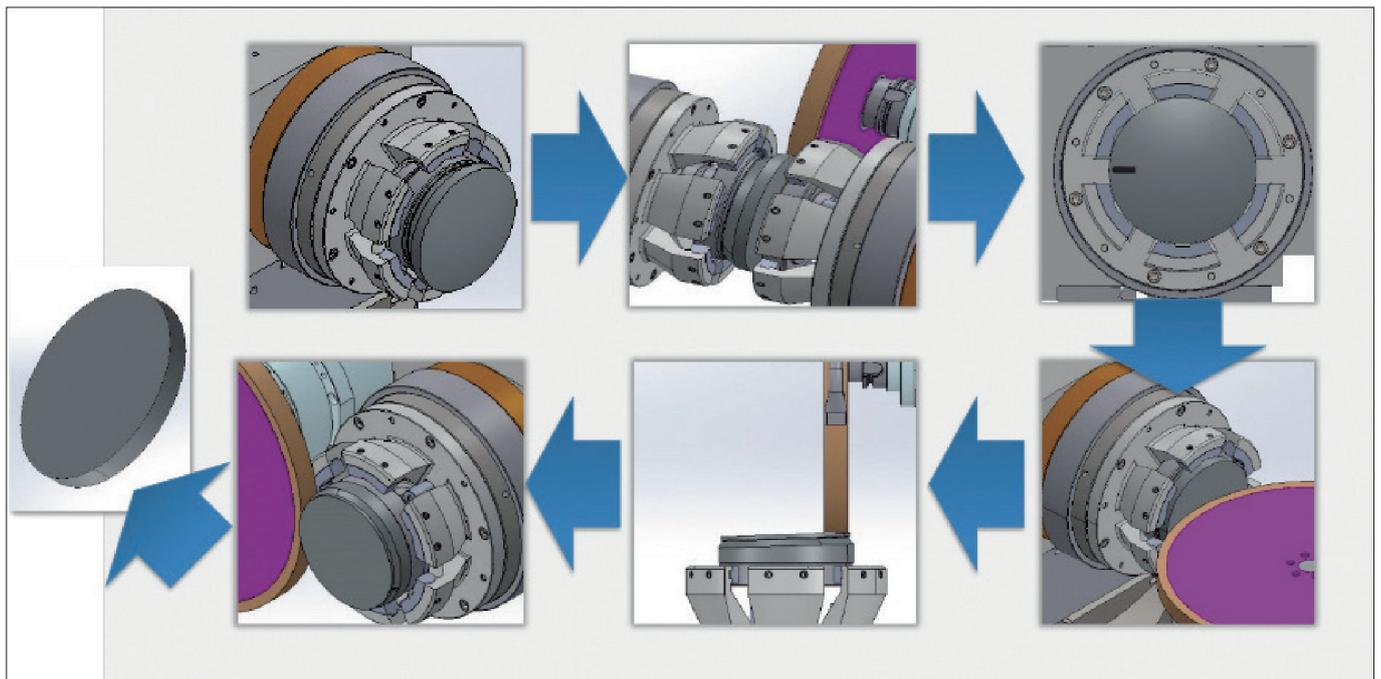
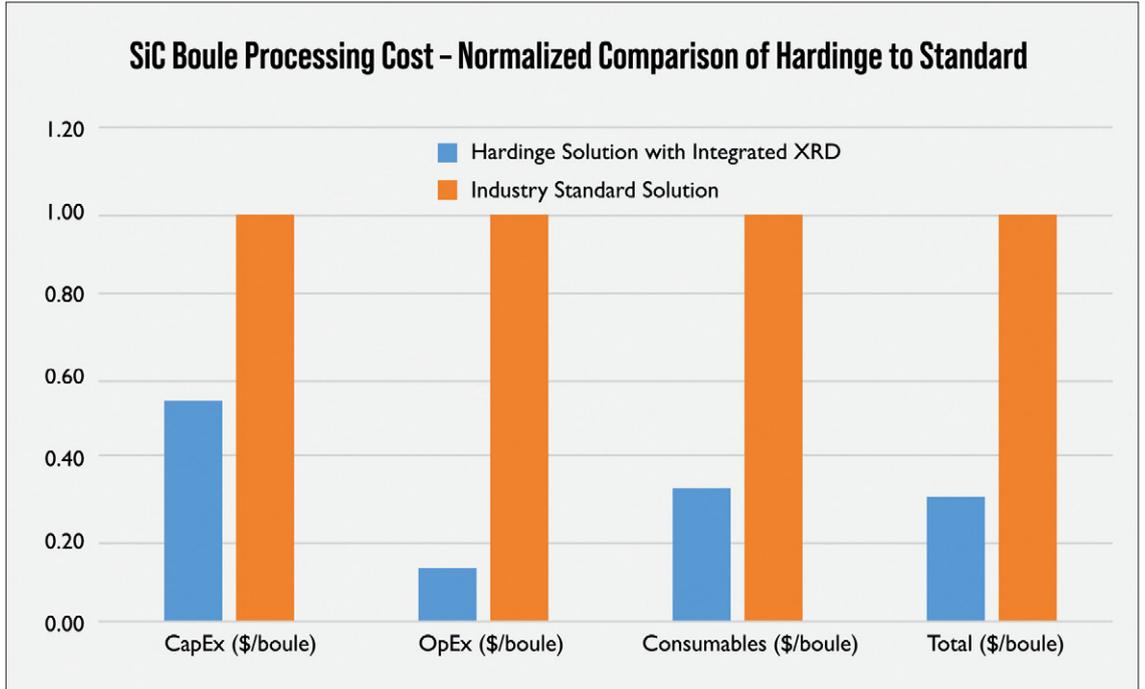


图 1. 生产 SiC 圆盘的一般工艺流程为：晶体加载（手动或自动）；应用初始外径 (OD)；圆顶粗磨；进行 X 射线衍射；将圆顶磨削完成至正确的方向；切换到辅助工作台；籽晶侧面去除；X 射线衍射证实；最终外径和参考面/凹槽；并取下晶圆（手动或自动）。

图 2. BoulePro200AX 的使用大幅削减了资本支出、运营支出以及与耗材相关的成本。



BoulePro 的一个重要组成部分是集成的 X 射线衍射系统。它对确定晶体取向至关重要，而晶体取向是确保正确放置主平面或凹槽的必要条件，同时还能在所有平面上以正确的补偿方式加工晶圆。通过采用这种方法，整个晶锭从一端到另一端都能生产出具有正确方向和几何形状的晶圆。使用 BoulePro，X 射线衍射系统的输出会告知工具平面或凹槽的位置，以及最终加工时必须对晶体表面进行多少调整。

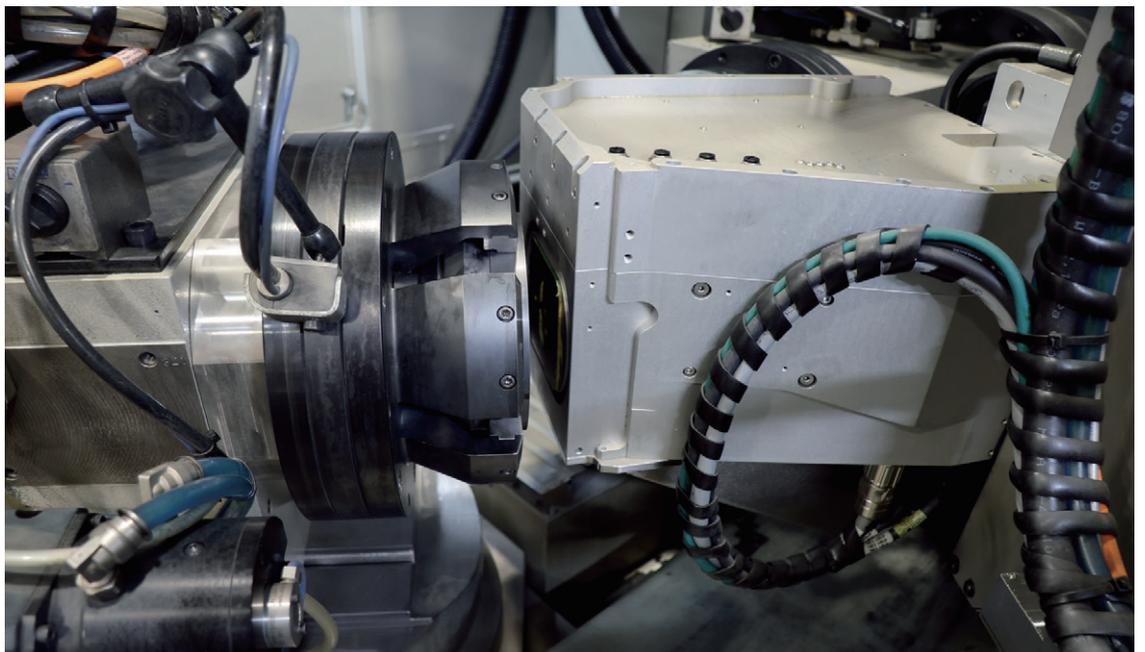
能够在工艺允许的任何步骤现场进行原位 X 射线衍射分析的另一个优点是有机切换工艺步

骤的顺序。这样做的一个结果是，可以在稍后的过程中制备参考面或凹槽，确保其方向高度准确。

附加功能

BoulePro 的功能远不止这些。除了其特色功能外，还可以根据需求提供其他功能。

其中之一是通过紫外光检测来识别外来晶体类型。当将 SiC 晶体置于紫外光下时，某些外来晶体（例如 6H）会显示出不同的颜色。识别出 6H 杂质的位置后，BoulePro 就能将其去除。确保最终的 SiC 晶锭仅包含所需的 4H 晶型。



左侧是工件夹具中的晶体，右侧是 XRD (X 射线) 机。XRD 正在测量晶体的取向，以便了解晶体取向并可以在后续研磨步骤中进行校正。



位于伊利诺伊州埃尔金的原型机用于进一步开发和客户演示。

此外，还可以在成品碳化硅晶圆表面添加激光刻划功能。这样，客户就能够跟踪批号、坯料编号等。这项功能在材料跟踪方面很有价值。

BoulePro 中包含的另一项功能是视觉系统。它可以在加工过程的任何阶段拍摄高水准的晶体坯料或晶圆照片，这也是一些客户所需要的功能。

拥抱 BoulePro

今年，来自世界各地的客户参观了我们位于伊利诺伊州埃尔金的工厂，观看 BoulePro 的运行情况。该工厂是我们 USACH 品牌的专业应用磨床的所在地。该工厂的工程师和应用专家团队利用他们的专业知识，迅速将 BoulePro 原型机安装并运行起来，以展示该机床的功能。参观者现在可以看到如何利用该设备的最终设计来生产碳化硅晶圆，我们预计该设备将在今年早些时候发货。考虑到市场的快速扩张，即使是原型机，客户也迫切希望看到 BoulePro 的实际应用。这些参观者希望亲眼目睹 BoulePro 如何在整个生产过程中适应他们独特的晶体坯料几何形状。在亲眼目睹了 BoulePro 的功能之后，他们对 BoulePro 的灵活性以及我们的工程和应用专家如何满足他们的需求感到兴奋不已。

BoulePro 内置的 X 射线衍射仪的精确性令我们的客户惊叹不已。由于 BoulePro 工艺操作顺序的灵活性，并且所有参数都受到极其严格的控制，因此我们的机器对晶体取向的角度校正比目前使用的手动工艺准确度高达 100 倍。这对于 SiC 生产商来说意味着，随着不同规格的发展，他们可以满足甚至超越客户的期望和要求。

BoulePro 的光明未来

激动人心的时刻即将到来。鉴于市场对 BoulePro 的极大热情，我们正在实施扩产计划，以满足产量增加的需求。将在 2023 年持续进行演示活动，第一批客户机器计划于年底前发货。我们将利用我们的全球足迹来满足客户需求和售后服务市场的需求，以确保我们的 BoulePro 供应和支持服务符合客户的要求。

SiC 在许多其他增长型市场中也蕴藏着无限商机，我们的 BoulePro 的通用配置和功能使其成为这些应用的解决方案。我们很高兴能够站在这场革命的最前沿，并成为全球碳化硅生产商可以信赖的可靠制造合作伙伴，满足他们的制造需求。CSiC

射频声学滤波器技术的发展趋势

作者：欧欣¹、张师斌¹、吴进波¹、凌丹¹、章秀银²，
¹中国科学院上海微系统与信息技术研究所，上海，中国
²华南理工大学，广州，中国

射频声学滤波器是目前移动射频前端主流滤波器技术，包括声表面波和体声波滤波器技术。随着移动通信系统的发展演进，两种技术不断得到改进以适应移动射频前端的更新迭代。当5G时代到来时，高频率和大带宽成为滤波器技术的主要发展目标，两种声学滤波器技术在频率和带宽上各有优劣，但还不能完全满足5G频段的需求。一些新的技术有望被用来解决这一问题，但仍遭遇各种挑战。尽管如此，多种方案的同台竞技使得射频声学技术的发展百花齐放。

移动通信技术在过去数十年中经历了1G时代到5G时代的变迁，数据的传输能力得到了巨大提升，其发展历程如图一所示。第一代无线通信技术于1980年代诞生于美国芝加哥，当时仅能应用于语音传输，且信号不稳定、品质低，笨重的“大哥大”便是1G时代的典型标志。2G则开启了数字网络时代，短信开始出现在大众生活中。随后的3G、4G时代中随着数据传输能力的逐渐提高，图片和视频的传输也不在话下。

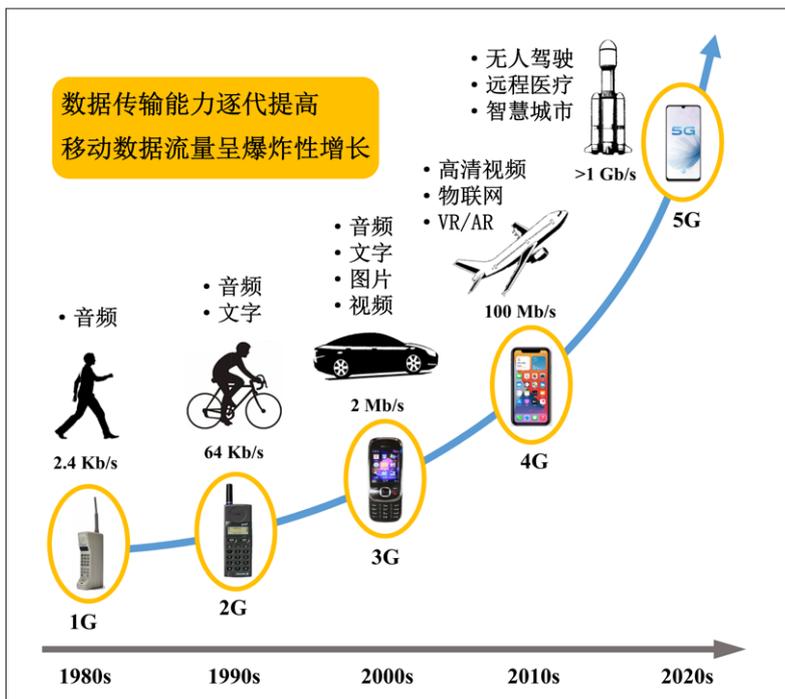


图1：移动通信技术的发展历程。

随着5G时代的来临，从零售到教育，从交通到娱乐，从智能家居到医疗保健，人们的生活方式将迎来深刻的变化。通信服务供应商的业务范围和基础设施建设在迅速发展，移动终端设备及其衍生应用的价值量也在快速增长。相应地，移动通信技术的更新迭代使得数据的传输从一开始的仅有音频逐渐过渡到现在的万物互联，移动数据流量呈爆炸式增长。我们需要更高频率、更宽通信频带的设备来应对大幅增长的移动数据流量。

手机芯片中的射频前端模块（示意图如图二所示）主要用于无线信号的发送和接收，包含滤波器、双工器、射频开关、功率放大器（PA）和低噪放大器（LNA）等。其中射频滤波器是无线通信系统中最重要的元件之一，也是近年来射频前端领域增长最快的细分方向，主要用于筛选和处理信号。射频滤波器技术主要包括：低温共烧陶瓷（LTCC）、集成无源器件（IPD）、以及声学滤波器技术。其中声学滤波器技术，主要包括声表面波（SAW）和体声波（BAW）滤波器技术，因为其在小尺寸和低损耗方面的巨大优势，成为了当前移动终端射频滤波器技术的主流。根据3GPP的划分，5G通信频段的范围包括Sub-6 GHz频段和毫米波频段，而Sub-6 GHz频段又是当前全球最主要的使用频段。

两种声学滤波器技术的示意图如图二所示。其中声表面波器件由压电材料和顶部叉指电极所组成，工作频率主要由目标声波模式的声速和电

极周期决定。体声波器件主要由压电薄膜和上下电极组成，工作频率主要由目标声波模式的声速和压电薄膜厚度决定，因此可以在较为宽松的光刻条件下实现更高的频率。

声表面波滤波器技术的发展历程

从 1885 年瑞利发现声表面波的数学描述，再到 1965 年怀特等人发明叉指换能器 (IDT)，声表面波技术如今已经被广泛应用到无线通信系统中，用以实现信号处理功能。在过去数十年中，声表面波技术已经实现了多次迭代和突破，性能和应用频率不断得到提升，其主要分类如图三所示。传统的声表面波器件主要由压电晶体以及位于表面的梳状电极结构组成，其可以在发射声表面波的同时探测声表面波，并将其转换回电能。该技术结构简单、成本极低，因而在较低的频段具有相当大的竞争力。然而随着通信频带的增加，频带之间越来越靠近，这对滤波器的温度稳定性提出了更高的要求，温度补偿型声表面波 (TC

SAW) 技术应运而生。该技术包括在传统声表面波器件上覆盖具有互补温度系数的材料，以及将较厚的压电薄膜与低热膨胀系数的材料结合以降低热膨胀带来的温度漂移两种。

2016 年，基于硅基压电异质衬底的高性能声表面波器件 (I.H.P. SAW) 问世，其采用了亚微米厚度的压电薄膜，并在压电层和硅支撑衬底之间插入了氧化硅层。氧化硅和支撑衬底组成的高低声速交替结构实现了声波能量的约束，与此同时氧化硅还可以作为温度补偿层。I.H.P. SAW 技术实现了 SAW 器件性能的重要突破，品质因子超过传统 SAW 器件的四倍以上，对应滤波器矩形度极大改善。类似的采用压电异质衬底的 SAW 技术还包括 Layered SAW、HAL SAW、Ultra SAW 等。我们团队也提出了超高性能声表面波滤波器 (SUPSAW) 的发展思路，在硅基压电异质晶圆的基础上开发出了蓝宝石基、石英基等低损耗衬底。这些技术无一例外都实现了非常高的性能。然而，由于硅等常用支撑衬底本身的声速限

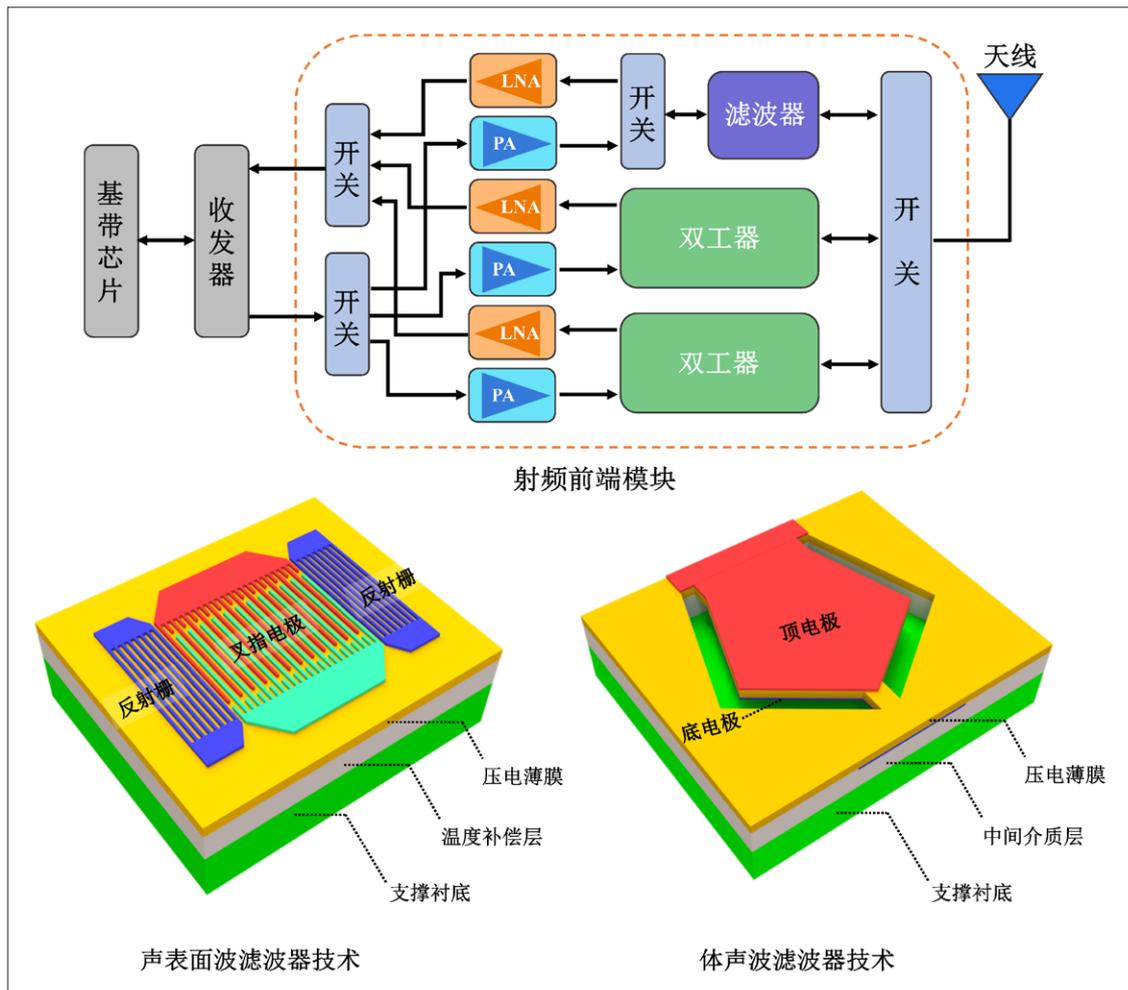


图 2：射频前端模块与射频声学滤波器技术。

制，目标模式仅能采用声速在 4000 m/s 左右的水平剪切波模式，受限于光刻精度，应用频率难以进一步提高，这也成为了声表面波技术向高频发展的最大挑战。

纵向泄漏声表面波 (LLSAW) 的声速通常在 6000 m/s，因而可以在较为宽松的光刻条件下实现超过 5 GHz 的工作频率。为了约束高声速的声波模式，通常需要采用布拉格反射层结构，这使得衬底的加工工艺更加复杂。为了简化结构，我们团队在国际上率先实现了具有高声速特性的碳化硅基压电单晶薄膜异质晶圆的高频 SUPSAW 技术，该方案用高声速衬底取代布拉格反射层结构，可激发并有效约束声速超过 6000 m/s 的声学模式，将声表面波滤波器的工作频率从 3 GHz 进一步扩展到了 5 GHz 以上，并有望提升到 12 GHz，使之具有与体声波 BAW 滤波器相媲美的性能。因此，5G 时代，为了满足高频率、大带宽的需求，SAW 技术的发展趋势无疑包括在简化结构的前提下提高目标模式的声速。

体声波滤波器技术的发展历程

体声波 (BAW) 器件于 1980 年被提出，到了 2009 年就几乎主导了高端移动设备，其分类如图三所示。早期的基于多晶氮化铝的 BAW 谐振器技术包括薄膜体声波谐振器 (FBAR) 和固态装配型谐振器 (SMR) 两种类型。其中 FBAR 采用空腔，BAW-SMR 则是采用布拉格反射层来实现声波能量的约束。由于体声波器件的工作频率主要由压电薄膜厚度决定，因此其可以在较为宽

松的光刻条件下实现 6 GHz 频段的应用。近年，为了提高体声波器件的性能，基于单晶氮化铝的体声波 (XBAW) 技术被提出，其应用频率和品质因子得到了进一步提高。

然而，氮化铝的缺点在于本征机电耦合系数较小，带宽一般小于 5%。即便在采用了掺钕技术之后，其带宽可以提高一倍以上，但仍然无法满足 5G 频段中大带宽频带 (N77、N79 等) 的需求。与集总元件相结合，或者采用新的滤波器拓扑结构，或许能为大带宽频带提供解决方案，但由此带来的额外损耗和器件面积又成了新的挑战。因此，基于单晶氟酸锂薄膜的高阶模式声学器件被提出。包括基于氟酸锂薄膜和叉指顶电极的一阶或更高阶反对称型兰姆波谐振器 (XBAR)，以及包含底电极的一阶或更高阶水平剪切模式谐振器 (YBAR)。当压电薄膜的厚度与叉指电极周期的比值足够小时，这两种模式都可以近似为体声波模式中的厚度剪切模式。这两种技术可以实现的最大带宽，足以满足任一 Sub-6 GHz 频段的完全覆盖。尽管相比于氮化铝基体声波滤波器技术来说，这两种新技术并不成熟，还有许多技术问题需要攻克，例如器件散热问题、良率问题等。但这也表示了，对于 5G 中的 Sub-6 GHz 频段，体声波滤波器技术的最大挑战不是在于频率，而是在带宽。如何提高带宽成为当下首要需要解决的问题，以及未来的主要发展方向。

致谢：感谢国家自然科学基金重大项目—“基于智能剥离技术的晶圆级异质集成材料与器件” (62293520) 项目的支持。

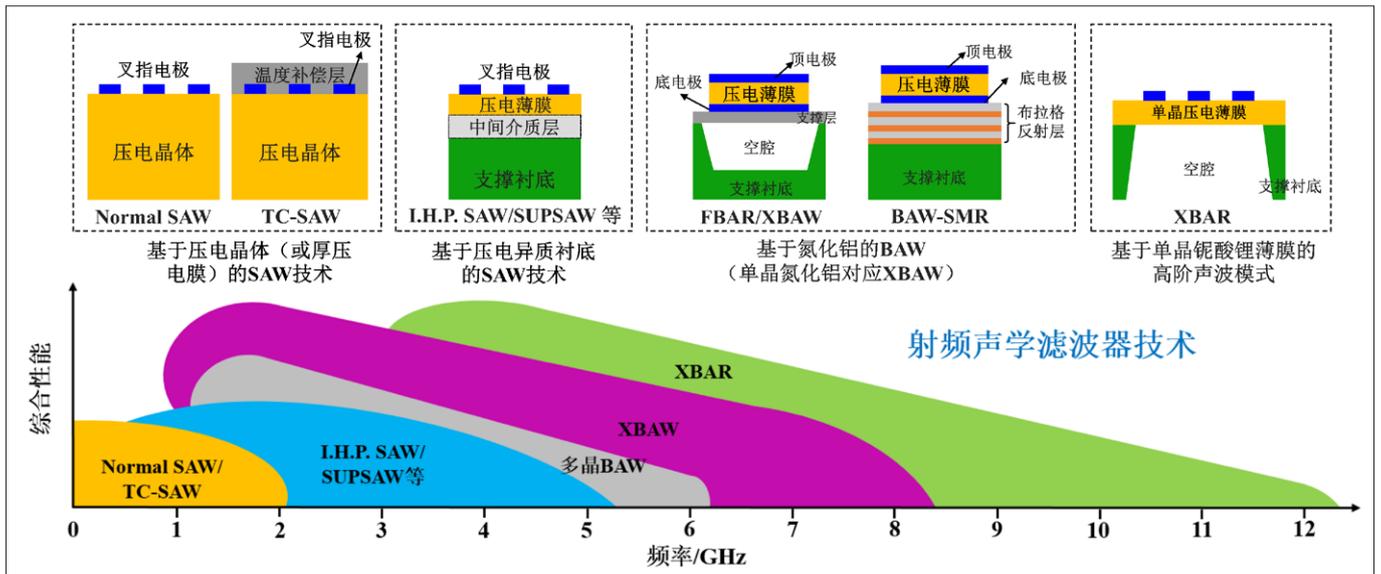


图 3：射频声学滤波器技术分类及应用频段。

采用块状 AlN 可使 FET 性能更佳

原生基底使氮化物 FET 的漏极电流升高，热阻抗降低

据南卡罗来纳大学的工程师称，针对拥有富铝 AlGa_N 沟道的氮化物 FET，已提高其性能标准。

该团队的器件是在块状 AlN 上生长的，据称其品质因数超越了 Baliga 的同类晶体管，创下新纪录。品质因数由击穿电压的平方除以特定导通电阻得出，该团队 FET 的品质因数为 460 MW cm⁻²。

其工程师表示，他们的器件可以提高消费充电器和下一代电动汽车中氮化物晶体管的性能。AlN 衬底导热性高，解决该衬底的热限制可改善其性能。

金属氧化物半导体 FET 在 400 μm 厚的单晶 AlN 衬底上制造，该衬底从 HexaTech 公司购买，是通过物理气相传输生长的。工程师将 AlN 衬底装入低压 MOCVD 反应腔中，并在该衬底上沉积外延叠层，包括 260 nm 厚的 AlN 层、140 nm 厚的 Al_{0.87}Ga_{0.13}N 背势垒层、100 nm 厚的 Al_{0.64}Ga_{0.36}N 沟道、23 nm 厚的 n 型 Al_{0.87}Ga_{0.13}N 势垒、30 nm 厚的渐变 AlGa_N 层，其中渐变 AlGa_N 层掺杂了硅，用来支持欧姆接触的形成。

要制造器件，首先需使用反应离子蚀刻形成台阶。电子束蒸发添加了源极和漏极触点，源极和漏极触点退火后，进行第二次蚀刻，去除栅区渐变层，然后引入 10 nm 厚的 SiO₂ 层，将其作为栅极氧化物。电子束蒸发添加栅极和探针垫后，通过等离子体增强 CVD 将器件嵌入 400 nm 厚的 SiO₂ 薄膜中，以减轻击穿测量期间的表面电场。为了能够进行对照，在 AlN 模板上制造了相同的结构，AlN 模板是通过在蓝宝石上沉积 3 μm 厚的 AlN 层形成的。

对栅极长度为 1.8 μm、栅源距离为 1.2 μm、栅漏距离为 2.64 μm 的 FET 进行电测量，显示出明显的饱和度和夹断。在原生衬底和模板上，器件的电流峰值分别为 610 mA mm⁻¹ 和 410 mA mm⁻¹。

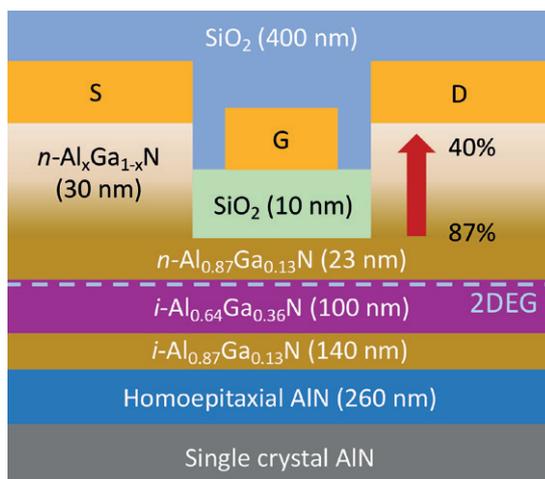
蓝宝石基 FET 的温度有所下降，而 AlN 基 FET 却没有。据称温度没有下降是因为热管理出色。

南卡罗来纳大学生产的氮化物 FET 采用单晶 AlN 制造，热阻仅为 10 K mm W⁻¹。

热阻抗测量显示，AlN 基器件的热阻抗值为 10 K mm W⁻¹，蓝宝石基器件的热阻抗值为 31 K mm W⁻¹。

AlN 的热导率比蓝宝石高 8 倍，使得 AlN 基器件的热阻抗值低得多，该团队认为这是因为 AlN 基器件的电流峰值较高。

由于存在 SiO₂ 栅极绝缘体，该团队预计两类器件间的反向漏电流不会有任何差异。但在正栅极电压下，蓝宝石基器件的漏电流明显更高，这一结果据称需进一步研究。



南卡罗来纳大学生产的氮化物 FET 采用单晶 AlN 制造，热阻仅为 10 K mm W⁻¹。

跨导峰值是沟道迁移率和栅极电容的乘积，AlN 基 FET 的跨导峰值为 45 mS mm⁻¹，而蓝宝石基 FET 为 34 mS mm⁻¹。两种器件的栅极电容相似，因此认为原生基底上的器件之所以跨导优异，是与迁移率较差有关，而迁移率较差会导致器件的温度下降。

栅源电压为 -30V 时，器件击穿电压为 959 V，因此“保守”估计 Baliga 的品质因数为 460 MW cm⁻²。有人认为接触退火后，不太可能产生各向同性的面内二维电子气，因此品质因数的合理上限大于 750 MW cm⁻²，与 AlN 基 FET 的其他结果相比，该值据称要大十倍，代表了最先进的技术。☞

参考文献

A. Mamum et al. Appl. Phys. Express 16 061001 (2023)

对非辐射机制的新见解

陷阱辅助过程会造成较短波长 GaN 基 LED 缺陷相关的损耗

LED 的一大谜团是：较短波长下，缺陷如何影响效率？几十年来，众所周知，由于位于缺陷处且涉及多声子发射的非辐射复合过程，LED 发出的红光和绿光受到阻碍。而该过程随着禁带宽度变小而呈指数下降，那么对蓝光和紫外线发射器至关重要的缺陷相关机制是什么？

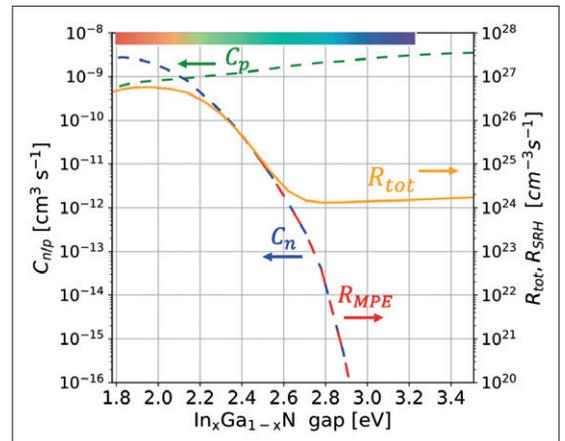
由 Chris Van de Walle 领导的加州大学圣塔芭芭拉分校的计算科学家团队回答了这个问题。Van de Walle 评论道：“我们新开发的方法表明，与仅基于多声子发射的机制相比，陷阱辅助 Auger-Meitner 效应的损耗率要大几个数量级，解开了缺陷如何造成宽禁带材料损耗这一谜题。”

这种新型损耗机制与通常被称为 Auger 的过程相似，该过程于 1923 年由 Pierre Auger 公布，但在 1922 年，Lise Meitner 也对此过程进行过描述，Lise Meitner 是一位颇有成就的女性物理学家，近期才开始得到其应有的认可。许多人认为 Auger-Meitner 过程是造成 LED 光衰的原因，该过程涉及电子与空穴的结合，从而使第二个电子或空穴的能态提升。与此同时，UCSB 团队刚证实，在短波长 LED 中，相关陷阱辅助 Auger-Meitner 过程发挥着关键作用，其中涉及电子或空穴在缺陷或杂质处的定位。

在 GaN 基 LED 中，存在高密度扩展缺陷，如穿透位错等，因此这些扩展缺陷似乎对器件内部量子效率几乎没有直接影响。因此，为了提高器件效率，需要关注点缺陷，例如原生缺陷或杂质，而这正是 Van de Walle 及其同事考虑的缺陷类别。

该团队在计算中考虑了钙杂质。已证实 MBE 生长的 GaN LED 中，钙是一种杂质，干扰物是晶圆抛光期间引入的。MBE 生长过程中，在沉积 InGaN 层之前，钙似乎一直停留在表面。然而，这种杂质似乎并不会妨碍 MOCVD 生长 LED，因为不同外延条件会阻止钙停留在表面，而有源区域下方的 InGaN 层也会捕获钙。

据该团队计算，针对 GaN 中钙杂质，与仅基于多声子发射的复合相比，采用陷阱辅助 Auger-Meitner 过程的缺陷辅助复合要快 11 个数量级（见图）。



多声子发射过程（表示为 RMPE）无法解释短波长 LED 中与缺陷相关的损耗。为了解释这种损耗，必须引入陷阱辅助 Auger-Meitner 过程，该过程表示为 R_{tot} 。

量级（见图）。

电流密度高时，大部分是 Auger-Meitner 过程占主导地位，因为 Auger-Meitner 过程与载流子密度的三次方成比例。但载流子密度适中时，陷阱辅助复合才是最显著的损耗机制。

一些研究人员可能想在描述 LED 行为的 ABC 模型中添加一个非辐射“B”术语，但 Van de Walle 警告说，这样就过于简单化了。“想充分描述陷阱处的非辐射复合过程，需要包括电子捕获和空穴捕获。最常见的情况是，其中一个捕获过程由陷阱辅助 Auger-Meitner 造成，而另一个捕获过程仍然由多声子发射造成”。因此，线性和二次贡献都在起作用。

目前，Van de Walle 及其同事正在完善这项研究，重申可能导致宽禁带材料效率损耗的备选缺陷和杂质，但之前未考虑这些缺陷和杂质，因为仅基于多声子发射时，其速率太低。此外，研究人员正在研究陷阱辅助 Auger-Meitner 过程，其中陷阱具有多个束缚态。Van de Walle 解释，“同样，仅考虑多声子发射时，此类缺陷的非辐射复合率低，因此我们很想弄清引入陷阱辅助 Auger-Meitner 能否改变这一点。”

参考文献

Zhao. et al. Phys. Rev. Lett. 131 056402 (2023)

推进琥珀色 microLED 的发展

针对长波长 GaN 基 LED 的效率，带盖量子阱的钝化发射器设立了新基准

加州大学圣巴巴拉分校 (UCSB) 团队称，在开发超小型高效红色 LED 方面已取得重大进展。

研究人员推出 InGaN 基 microLED，其尺寸为 $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ ，发射波长峰值为 601nm，外部量子效率峰值为 5.5%，最大电光转换效率为 3.2%。同样令人振奋的是，这类器件的效率降低幅度与尺寸为 $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 的同类器件非常相似。

对开发高效的红色、绿色、蓝色 microLED 而言，这项研究是重要的一步。增强现实显示器和虚拟现实显示器需要这三种光源，每种光源的尺寸需小于 $10\mu\text{m}$ ，才可生成高质量的彩色图像。

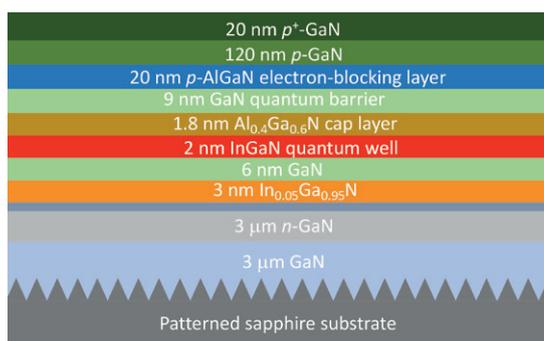
AllnGaP 是红色 microLED 的一种备选材料。然而，将 AllnGaP 用于传统红色 LED 时，由于 AllnGaP 的表面复合速度较快，该器件的效率随尺寸缩小而直线下降。当红色 AllnGaP LED 尺寸约为 0.1mm^2 时，外部量子效率约为 20%，但当尺寸为 $10\mu\text{m}$ 时，其外部量子效率仅为 3%。

许多创新均旨在提高 GaN 基红色 LED 的性能，与 AllnGaP 类器件相比，在进行适当侧壁钝化和处理时，GaN 基红色 LED 对尺寸缩放的敏感度要低得多。然而，这种氮化物基发射器存在两个重大问题：内部强电场会削弱辐射复合；InGaN 量子阱和 GaN 层之间存在显著的晶格失配，会产生高密度光猝灭缺陷。

提高红色 InGaN LED 性能的新途径包括加州大学圣巴巴拉分校团队在纳米多孔 GaN 衬底上生长外延结构。2021 年，该团队报告称，采用该技术制造出 $6\mu\text{m}$ microLED，其外部量子效率为 0.2%。同年，阿卜杜拉国王科技大学团队宣布，采用图案化蓝宝石制造出了 $47\mu\text{m}$ 红色 microLED，其外部量子效率为 0.56%。同时，格勒诺布尔 - 阿尔卑斯大学和 Soitec 的研究人员建立了合作伙伴关系，称对于松弛伪衬底上的 $47\mu\text{m}$ 琥珀色 microLED 来说，其外部量子效率为 0.14%。由国立阳明交通大学领导的一项合作研究，所取得的成果更为引人注目：去年，该团队报告称，琥珀色 LED 的外部量子效率峰值为 2.91%，但即

便如此，与加州大学圣巴巴拉分校的最新成果相比，也显得黯然失色。

加州大学圣巴巴拉分校团队将图案化蓝宝石衬底装入 MOCVD 反应腔中，并沉积具有 6 周期有源区域的外延叠层，其中包括 InGaN 阱、AlGaIn 覆盖层、GaN 势垒，进而生产出最新器件 (详情见图)。要制造器件，首先需在外延片上沉积 110nm 厚度的 ITO 层，然后通过步进光刻和反应离子蚀刻形成台阶。侧壁经氢氧化钾处理，并通过离子束沉积添加反射电介质堆叠后，形成厚度达 30nm 的 SiO_2 原子层沉积，在附加金属接触蒸发前， SiO_2 层可确保侧壁的钝化。



加州大学圣巴巴拉分校团队所生产的 InGaN microLED 的外延结构

对此类 microLED 进行测量，显示 1A cm^{-2} 时开启电压为 2.6V，-3V 时反向电流仅为 1 纳安。据该团队称，其研究成果表明外延材料、蚀刻工艺、钝化质量均良好。

1A cm^{-2} 时电效率峰值为 0.83，与该团队之前设计的红色 InGaN microLED 相比，数值较为领先。这一改进归功于对有源区域和侧壁化学处理的优化。随着驱动电流从 0.5A cm^{-2} 增至 80A cm^{-2} ，发射峰值从 614nm 缩至 593nm。这种变化源于电场屏蔽和局域态能带充填，据称与大多数红色 microLED 和琥珀色 microLED 相比，变化较小。

研究人员认为，这项研究为实现尺寸小 ($1\mu\text{m}$ 及以下) 且效率高的红色 microLED 铺平了道路。CS

参考文献

P. Li et al. Appl. Phys. Express 16 064002 (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 |
| Evatec AG | | www.evatecnet.com | 23 |
| Park Systems | | parksystems.cn/nx-wafer | 1 |
| Riber | | www.riber.com | IFC |
| ULVAC | 爱发科 | www.ulvac-china.com | 7 |
| 应用材料股份有限公司 | | www.appliedmaterials.com | 5 |
| YMAT | 宁波云德半导体材料有限公司 | | FC |

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



国际知名媒体授权
 引领全球高新科技信息
 8本专业杂志(双月刊)
 欢迎免费索阅
 全年行业资讯



免费
 订阅

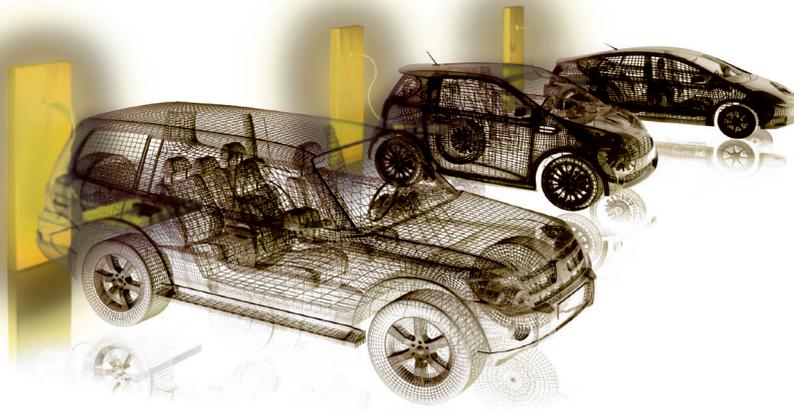
扫一扫添加
 ACT读者服务号免费订阅

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

AIXTRON

EMPOWER TOMORROW

G10-SiC: Best performance
for next generation SiC power electronics



- ▶ Electric vehicles: on board chargers, power inverters
- ▶ Infrastructure: charging stations
- ▶ Renewables: solar/wind inverters
- ▶ Industrial: motor drives, power supplies
- ▶ Power distribution: HVDC

**SiC power epi production platform
with 150/200 mm dual wafer size flexibility**

