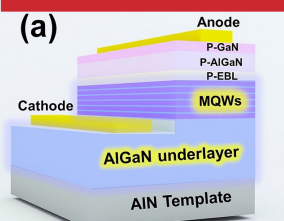


化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2022年12月/2023年1月

通过衬底驱动应变调控为高性能UVB-LED的制备铺平道路



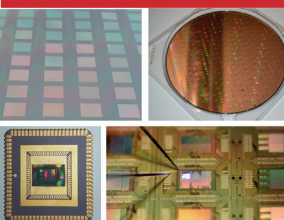
碳化硅促进航空电子系统设计演进



氧化镓晶体生长方法的选择



将microLED与先进CMOS集成



用复合晶体管开辟新天地

GaN-HEMT

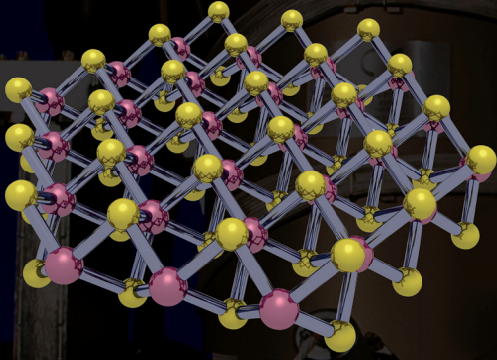
SiC PN-diode

Monolithic integration

hybrid-HEMT (hyHEMT)



RIBER's COMPACT 21 SERIES



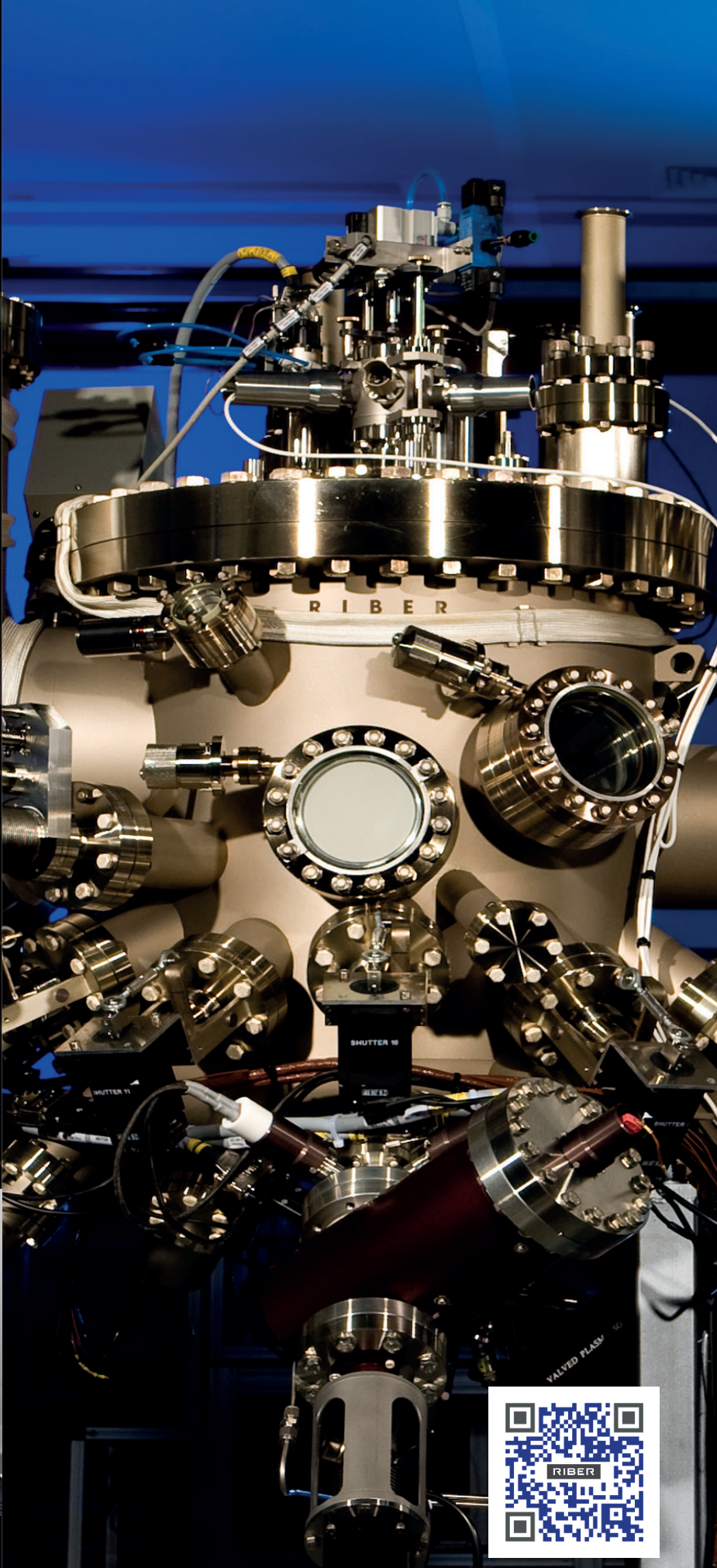
扩展您的研究 领域

小巧灵活

易于使用

高度集成

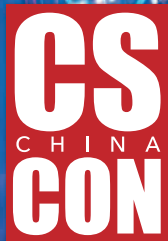
低使用成本



RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com



2023

化合物半导体先进技术及应用大会

Compound Semiconductor Conference for Advanced Technology and Applications

— 线上 —

01月 SiC车规应用，爆发在即

- 衬底及外延制备技术
- 配套设备
- 新能源应用
- 封装技术

04月 GaN功率应用，厚积薄发

- 衬底及外延制备技术
- 配套设备
- 通讯网络
- 高功率电子
- 失效分析

06月 MicroLED取得的进展

- 制造工艺
- 外延技术
- 激光加工
- 快速检测
- 修复技术
- 技术进展

09月 基于VCSEL芯片的检测及加工创新技术

- 工艺特点
- 技术突破
- 激光雷达
- 汽车
- 刻蚀
- 封装

12月 基于深紫外消杀/封测/制造创新技术

- 芯片制备
- 检测技术
- 消杀技术
- 工艺难点
- 封装展望

— 线下 —

06月 — 苏州

动荡2023

半导体技术创新发展和机遇大会

11月 — 太仓

化合物半导体先进技术及应用大会

*以上计划暂定，具体请以主办方通知为准

化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

化合 · 链接 · 赋能



扫码关注公众号



扫码添加客服号

封面故事 Cover Story

13 用复合晶体管开辟新天地

Breaking new ground with the hybrid transistor

转向低碳社会还需要增加电动汽车的使用量，同时安装更多的风力涡轮机和太阳能发电场。对于所有这些绿色技术，我们需要比现有技术更小、更高效、更可靠的电力转换器。要实现这一点，必须在变流器中使用的功率晶体管方面进行进一步的技术创新。独特的集成制造工艺创造了复合晶体管，将氮化镓HEMT的低导通电阻与SiC二极管的非破坏性击穿结合起来。我们的复合HEMT突出了复合器件如何能够提供单一材料所无法提供的优良性能。相信仍有许多组合可供探索，为新的器件概念打开了大门。我们的目标是调研究这种方法可能带来的可能性，以及它如何释放新一代功率器件极限。

- 国家先进工业科学技术研究所, Akira NAKJIMA

编者话 Editor's Note

04 超宽禁带半导体之AlN

AlN of Ultra Wide Bandgap Semiconductors

- 陆敏

Wolfspeed专栏 Wolfspeed Column

05 优化汽车应用的驾驶循环仿真

Optimizing Drive-Cycle Simulations for Automotive Applications

业界动态 Industry

09 应科院成立「微电子技术联盟」 构建微电子与半导体生态系统

NAstri established the Microelectronics Technology Alliance to build the microelectronics and semiconductor ecosystem

09 安森美提高SiC产量

Onsemi ramps SiC production

10 晶湛半导体完成数亿元C轮融资

Enkris Semiconductor completed C round financing of hundreds of millions RMB

11 意法半导体与Soitec合作开发碳化硅衬底制造技术

STMicroelectronics and Soitec cooperate on SiC substrate manufacturing technology

11 英国命令安世半导体剥离纽波特晶圆厂

UK orders Nexperia to divest Newport Wafer Fab

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—为跨国公司与中国企业架起了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站，以及各种技术会议，服务于机器视觉设计、电子制造、激光/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

- 12 SEMI报告：2022年第三季度全球半导体设备出货金额增长9%
SEMI reports: Global semiconductor equipment shipments grew 9% in Q3 2022
- 12 碳化硅将服务客车和卡车
SiC to service buses and trucks
- 技术 Technology**
- 17 通过衬底驱动应变调控为高性能UVB-LED的制备铺平道路
Paving the Way for High-Performance UVB-LEDs Through Substrate-Dominated Strain-Modulation
- 李泰, 康俊杰, 罗巍, 刘上锋, 杨嘉嘉, 陶仁春, 袁冶, 陈兆营, 王锦林, 王涛, 荣新, 李铎, 黄振, 王维昀, 王新强
- 22 碳化硅促进航空电子系统设计演进
Silicon carbide facilitates the evolution of avionics system design
- 罗宁胜, 曹建武; CISSOID 中国代表处
- 28 氧化镓晶体生长方法的选择
Weighing up the options for gallium oxide crystal growth
- Jani JESENOVEC和John McCloy, 华盛顿州立大学
- 32 将microLED与先进CMOS集成
Integrating microLEDs with advanced CMOS
- SOREN STEUDEL, MICLEDI MICRODISPLAYS
- 科技前沿 Research Review**
- 37 HVPE为高质量AlGaIn生长提供了一条新途径
HVPE offers a new route to high-quality AlGaIn
- 38 SiN降低了高速HEMT的电阻
SiN trims the resistance of high-speed HEMTs
- 39 剥离AlGaIn薄膜
Exfoliating AlGaIn films
- 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 安徽长飞先进半导体有限公司 技术总监
- 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 材料科学姑苏实验室 战略规划部部长
- 佟存柱教授 中科院长春光学精密机械与物理研究所 常务副主任/研究
- 陈明祥教授 华中科技大学/武汉利之达科技 教授/首席专家
- 周贞宏博士 BelGaIn CEO
- 王新强教授 北京大学 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



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>

总部地址: 北京经济技术开发区荣华南路15号院
中航技广场D座7层705单元

电 话: 010-60573500 67829099 67829168

北方制造基地: 河北省廊坊市. 星河机器人产业园-期C3栋

耿 彪 13910297918

gengbiao@cgbtek.com

牛沈军 13911271076

niushenjun@cgbtek.com

郭生钢 13911279276

sgguo@cgbtek.com



超宽禁带半导体之 AlN

AlN 具有超宽禁带宽度 6.2 eV, 高击穿场强 11.7 MV/cm, 该两参数都是我们熟知的超宽禁带材料 (如氧化镓、金刚石和氮化铝等) 中最高的, 高热导率 340 W/(m·°C), 远高于氮化镓, 接近碳化硅, 良好的紫外透过率、抗热和辐射稳定性等优异性能, 晶体结构与常规氮化物一样具有六方纤锌矿和立方闪锌矿两种结构, 故 AlN 是氮化镓基高温 (得益于 AlN 高热导率)、高频 (得益于高 Al 组分 AlGaIn)、高功率 (得益于高击穿场强) 电子器件以及高 Al 组分深紫外光电器件 (得益于高 Al 组分 AlGaIn 及紫外透明) 的理想衬底材料。与硅类似, AlN 易与水蒸气或高温氧气生成氧化铝绝缘介质层, 这或许是将来制备 MOS 结构的优势特性。

国内外众多科研机构近几十年来开展了 AlN 单晶生长的深入研究, 并开发了各种生长技术, 如 HVPE、MOCVD、MBE、ALD 及 PVT 等。在上述方法中, 前几种主要用来生长 AlN 单晶薄膜, 而 PVT 法在生长速率、结晶质量方面具有巨大优势, 被公认为是目前制备大尺寸、高质量 AlN 体单晶的最佳方法。自 1976 年 Slack 等首先使用 PVT 法得到微米级 AlN 晶体以来, PVT 被公认为是目前制备 AlN 体单晶的最佳方法。PVT 法生长 AlN 过程中, AlN 固体原料放置于封闭坩埚系统内, 生长系统内充满高纯 N₂ 气, 原料气体在温度梯度、浓度梯度等作用下输运至低温籽晶上进行结晶生长。一般选择垂直结构坩埚系统, 其中原料区位于坩埚的下部高温区, 籽晶位于坩埚的上部低温区。Al-N 系统在合适的温度和压力以及 N₂ 过量的情况下, 只有气态 Al 和 N₂ 与固态 AlN 处于平衡状态。通常长晶温度在 2000°C 以上, 但超过 2430°C 时, AlN 将无法稳定存在。过去几十年, 研究人员对 AlN 晶体生长工艺条件、热场结构和长晶机理等进行了大量深入研究, 归纳出了 AlN 晶体稳定生长的工艺窗口。在自发生成核或同质外延生长的温度范围在 2050-2320°C 之间, 相应的温度梯度通常在 5-20°C/cm 范围, 适配合理的过饱和度及长晶速度。采用 SiC 籽晶的异质外延时, 籽晶温度通常要低于 1900°C, 相应的生长速率就只有几十 μm/h。理论上, 高质量 AlN 晶体生长需在过饱和度接近零的近平衡状态时生长, 但过饱和度过小必将导致晶体生长速率过低, 相反太大的过饱和度将导致生长初期易于自发生成核、成核密度过大及生长速率过快而出现多晶。大家的共识是, 使用高质量的 AlN 籽晶进行同质外延生长是获取高质量、更大尺寸 AlN 晶体的最终途径。AlN 籽晶一般通过自发生成核或异质外延获得, PVT 生长工艺条件 (温度、坩埚类型, 钨或 TaC 坩埚) 对 AlN 单晶自发生长宏观形貌及极性有巨大影响。以 SiC 为籽晶的 AlN 异质外延生长虽然具有足够大尺寸的 SiC 作为异质生长的籽晶, 但在 N₂ 气氛下, SiC 在 1900°C 就会发生较强烈的分解, 导致籽晶温度限制在 1900°C 以下, 从而限制了 AlN 的生长速率, 同时 SiC 的分解会导致 Si 及 C 杂质扩散至 AlN 晶体内部, 从而严重影响晶体的质量, 另外由于 AlN 和 SiC 间的晶格失配及热失配, 将在 AlN 晶体内部引入较多的位错等缺陷。

AlN 晶体同质 PVT 经过近 20 年的发展, 取得了长足的进步, 但目前仍面临巨大挑战, 如在 PVT 长晶迭代优化过程中, 需要不断攻克诸如热场优化、原料纯度控制、高质量籽晶制备、初始成核生长、寄生成核、应力控制、缺陷抑制与极性控制等一系列关键科学和技术问题。AlN 单晶目前最大尺寸仅为 60mm, 目前国内外有能力生长出 2 英寸 AlN 单晶的单位非常有限。与目前较为成熟的 SiC、GaIn 衬底材料相比, AlN 单晶生长及其衬底加工具有更高的技术难度和成本。尽管众多研发机构在 PVT 法制备 AlN 单晶方面做出了长期不懈努力, 但过去几十年的研究进展表明 AlN 体单晶尺寸平均仅以 2.5mm/y 左右的速度在增加, 近几年还有放慢的节奏。这或许与下游器件研究严重滞后有关, 没有器件的需求和反馈, 材料不知发力的方向, 更没有终端市场的驱动牵引效应。因此, AlN 单晶的制备无论从生长机理的认识上, 还是长晶工艺技术的突破上, 以及材料-器件-应用的协同上都面临着许多机遇和挑战。

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

© 2022 版权所有 翻印必究



优化汽车应用的驾驶循环仿真

碳化硅 (SiC) 已经改变了许多行业的电力传输, 尤其是电动汽车 (EV) 充电和车载功率转换部分。由于 SiC 具备卓越的热特性、低损耗和高功率密度, 因此相对 Si 与 IGBT 等更传统的技术, 具有更高的效率和可靠性。要想获得最大的系统效率并且准确的预测性能, 必须仿真这些由 SiC 组成的拓扑、系统和应用。

Wolfspeed EAB450M12XM3 是一款车规级 SiC 功率模块, 已针对牵引逆变器市场进行了优化。这款功率模块具备很多优点, 但设计人员还是要尽可能多的进行系统仿真, 以充分利用这些优点。在仿真电动汽车应用的牵引逆变器时, 设计人员必须在复杂性、准确性和仿真时间之间找到一个平衡。本文将探讨如何开发一个适合仿真汽车驾驶循环中逆变器的模型, 在这些应用中可以利用 SiC 的优势。

器件级和模块级性能

仿真 SiC 牵引逆变器的方法有很多, 但我们将其分为四个级别。

1. 仿真半导体组件本身 (器件级) 是成功预测系统性能的核心所在。
2. 仿真器件的装配或封装 (模块级) 能预测电、热和机械性能。



图 1: Wolfspeed® EAB450M12XM3 车规级 1200 V, 450 A 全 SiC 导电优化型半桥模块。

3. 仿真每个子系统 (系统级) 将整个驾驶循环映射到电气要求中。

4. 仿真实际应用的系统 (应用级) 可以了解特定用例 (例如驾驶循环) 中的性能。

EAB450M12XM3 (如图 1 所示) 提供了许多器件级和模块级功能, 可减少开关损耗, 同时提供温度反馈和电压传感 / 过电流检测等功能。与行业标准封装相比, 该器件还具有易于集成的尺寸、优化的热管理、低寄生电感 (6.7nH) 和低电感母线互连, 以及更高的功率密度 (体积减小 60%, 尺寸缩小 55%)。

EAB450M12XM3 不仅提供了高性能, 属于 Wolfspeed 的车规级部件, 而且针对汽车应用进行了优化及验证。此外, 选择 Wolfspeed 器件对设计人员还有一些其他的好处:

1. 我们提供全面的电子器件仿真模型。
2. 能够使用热分析创建平均模型。
3. 能够在 PLECS 中进行完整的驾驶循环分析。
4. 能够仿真逆变器性能对电动汽车续航里程和电池成本的影响。

Lucid Air 的 XM3 牵引驱动器 (如图 2 所示, 该驱动器采用了 EAB450M12XM3) 已经实现 74 kg 的重量、超过 670 hp 的功率, 以及超过 9 hp/kg 的功率密度。这些规格使得 Lucid Air 荣获 MotorTrend 年度汽车大奖 (2022 年)。

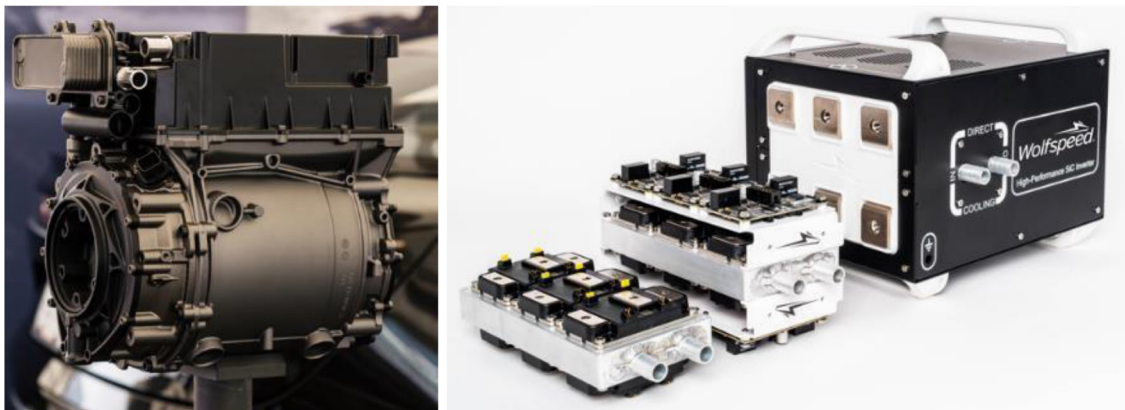
最后, 600 kW XM3 双逆变器参考平台 (图 2) 可帮助设计人员快速且从容地设计传动系统原型。该参考平台在整个功率范围 (200 - 600 kW) 中提供主要的功率密度和效率。

系统级仿真和工具

Wolfspeed 使用三种主要工具来仿真功率模块: PLECS、SPICE 和 FEA。

Piecewise Linear Electrical Circuit Simulation

图 2: Lucid Air 的 XM3 牵引驱动器 (左) 和 Wolfspeed 的 XM3 双逆变器 (右)。



(PLECS) 允许建模和仿真完整的电力电子系统, 包括电源、转换和负载。除了电子域外, 它还能帮助建模物理域, 例如热、磁和机械, 提供全面的系统级评估。它有助于器件的选择, 尽管具备多种实用功能, 但可能过分简化了某些方面, 例如器件的开关状态。对于逆变器应用, PLECS 可以使用数据表中的参数进行建模来确定导通和开关损耗, 同时还提供结壳热阻的热模型 (参见图 3)。

Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (SPICE) 是一种常用的开源电路仿真器, 可用于评估模拟电路中的电性能。通过仿真并联器件之间的动态电流, 帮助优化电流不平衡, 有助于逆变器的应用。此外, SPICE 还支持 Monte Carlo 仿真和 EMC 分析。虽然它是一个标准平台, 有许多可能的用例, 但可能受到电路的影响 (例如栅极驱动特性和寄生效应), 并导致设计人员使用误导性参数从而走上错误的设计道路。

Finite Element Analysis (FEA) 用于将一个形状或结构分解为许多更小的元素, 这些元素会受到与现实世界力量有关的计算, 如热、振动、应力 / 应变以及其他环境和物理影响。在模块级

上, 它可以使设计人员估计 R_{TH}、寄生电感、载流量, 并确定芯片间的相互作用 (参见图 4)。但是, 它通常价格很高 (成本方面), 需要非常详细的输入和 CAD 模型。与 PLECS 和 SPICE 相比, 它的仿真时间也是最长的。

使用任何或所有这些仿真平台可以帮助优化效率、损耗和热管理。例如, 对 SiC 半桥模块的开关特性进行仿真有助于预测开关电压波形并确定纹波。可以使用 2D 和 3D 查找表 (使用 V_{DC}、I_{AM1}、T_J 和 R_G 等参数) 计算功率损耗和开 / 关能量。PLECS 还可以将这些仿真的功率损耗插入带有其他一些参数 (如 R_{TH} 和 T_{FLUID}) 的 Cauer 模型中, 对半桥的热特性进行建模。在对负载和控制器进行建模后, 设计人员就可以进行完整的系统设计, 以帮助优化器件选择、拓扑、热管理、效率和控制方法。图 5 显示了完整系统级仿真的一般流程。对于驾驶循环仿真, 负载模型是关键部分。在该仿真中, 负载为遵循驾驶循

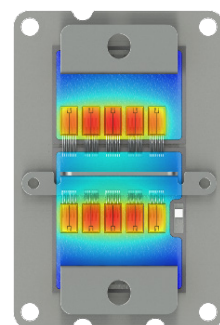
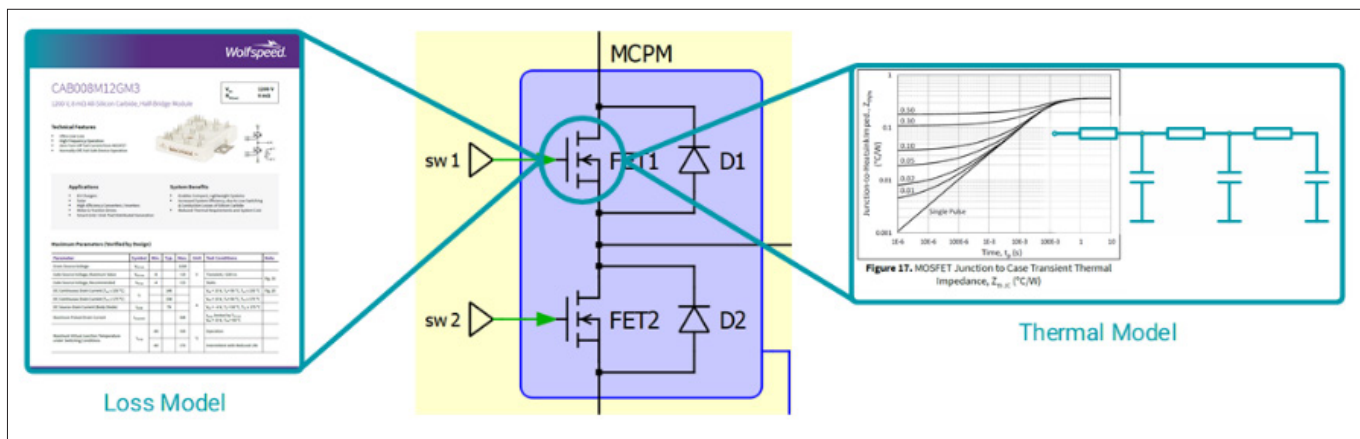


图 4: FEA 仿真示例, EAB450M12XM3 热分析。

图 3: 损耗和热仿真的 PLECS 模型示例。



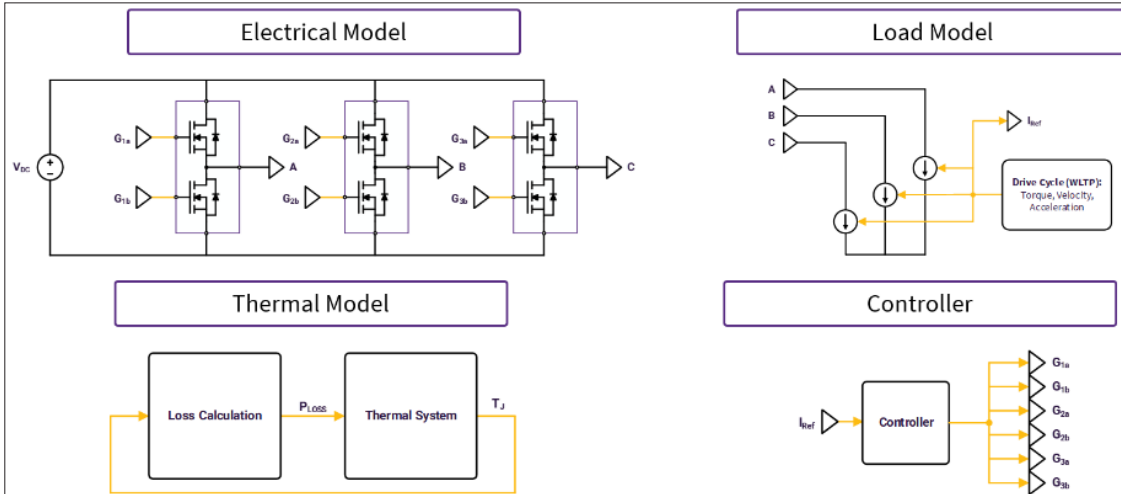


图 5: 全系统仿真, 包括电气、热、负载和控制器。

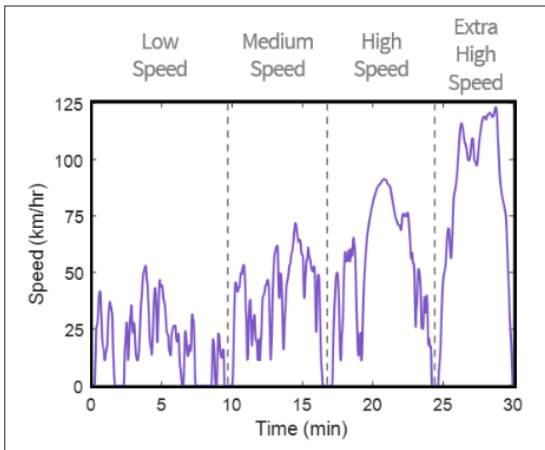


图 6: WLTC 图。

逆变器性能和驾驶循环仿真

在这一点上, 我们已经讨论了四个仿真架构中的三个: 器件、模块和系统级别。这些都是建立对驾驶循环中系统级功能的核心理解和期望所必需的。虽然电气操作点、热/电特性、损耗计算和模型可以在 Wolfspeed 方面处理, 但全球轻型车统一测试循环 (WLTC) (图 6 所示的样本图) 将规定扭矩、速度、加速度以及这些参数的操作点。

让我们来分析一下 WLTP, 了解它如何影响底层电子器件。

平均 WLTP 条件下, 通常 95% 的能量损耗是开关损耗。这通常会推动车辆续航里程提高, 而且只利用了 10% (或更少) 的可用热性能。

最大 I_{OUT} 或 WLTP 峰值条件将产生最大的工作温度, 但仍可能只使用 30% 的可用热性能。

正常工作下通常不会遇到 30 秒都接近峰值电流工况, 但可能会导致 SiC 区域需要散热处理, 从而增加逆变器成本、体积并降低效率。

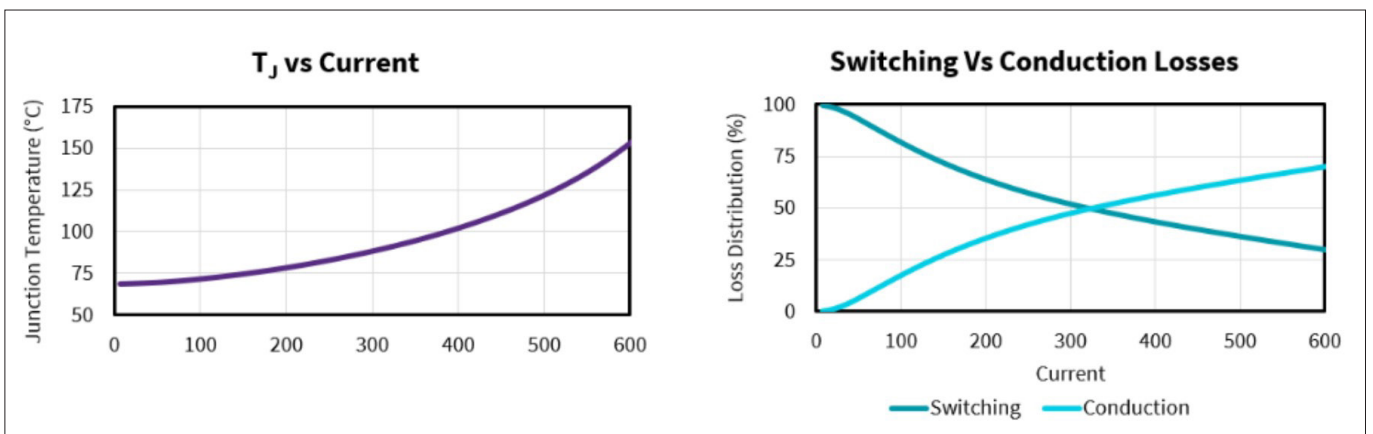
了解 WLTP 概况及其对系统电流的要求有助于设计人员计算损耗并优化系统配置。图 7 显示

图 7: 一个模块的电流与损耗 (左) 以及电流与结温 (右)。

环曲线的电流源。

为了构建此类系统模型, 必须通过测试或数据表了解功率模块的特性。在此, Wolfspeed 为其整个功率模块组合提供可下载的 PLECS 模型。

一旦确定了电气、损耗和热模型, 就可以使用它们进行完整的车辆仿真, 包括在适当的电气操作条件下开展全球统一轻型车测试程序 (WLTP) 驾驶循环测试。



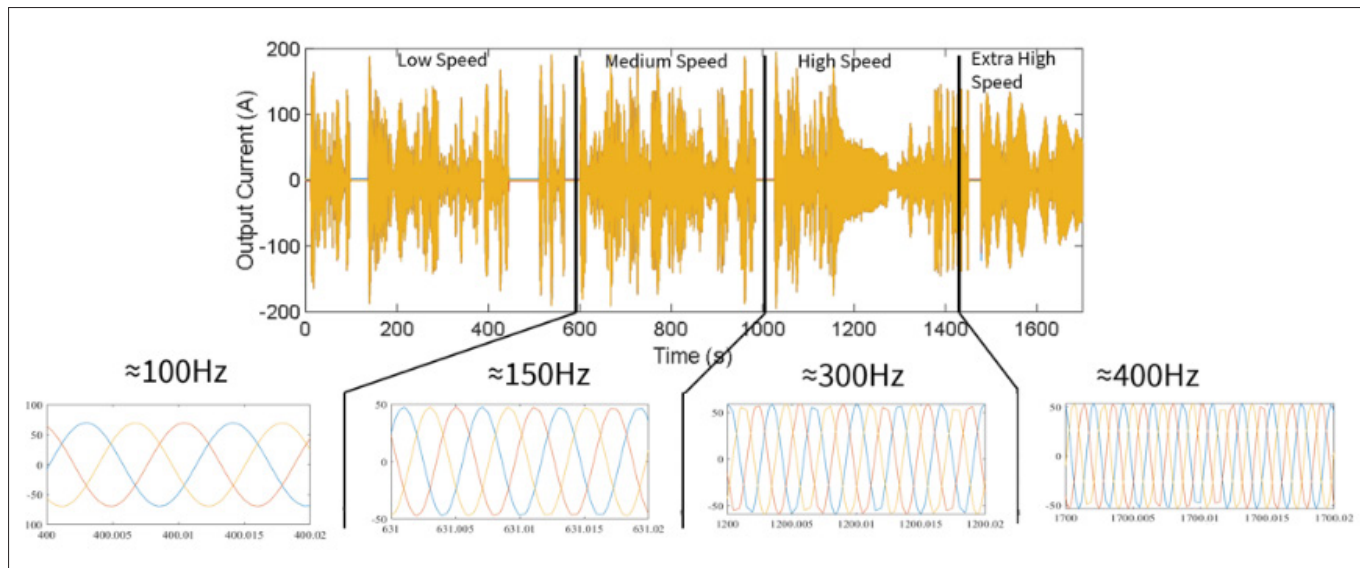


图 8: WLTP 驾驶循环中的逆变器电流波形。

了模块中较低的电流如何驱动开关损耗，而较高的电流则以传导损耗为主。图中的另一张图描述了模块结温通常如何随着电流而升高。

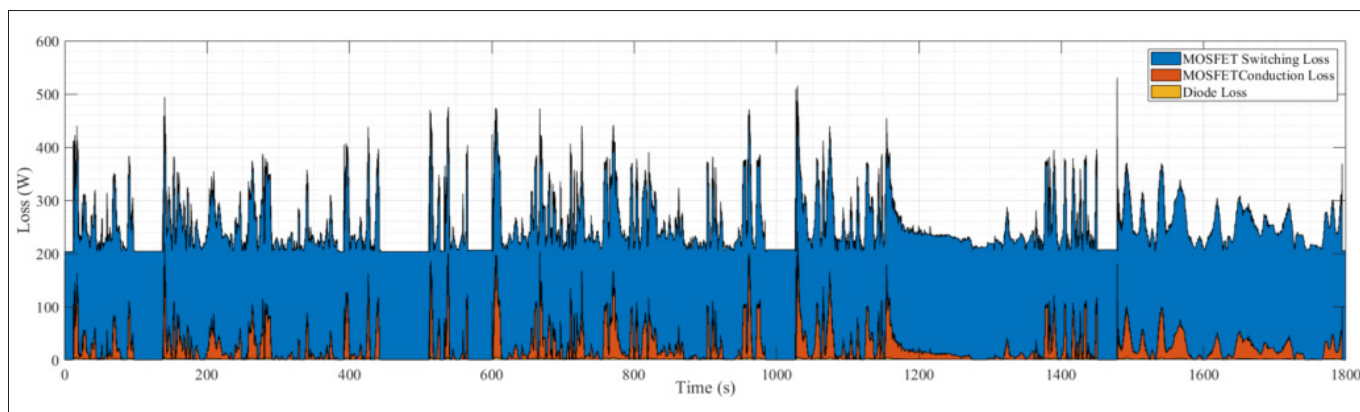
图 8 显示了 WLTP 驾驶循环速度与逆变器相位电流之间的关系。

如果我们采用上图并将显示的电流与转换功率损耗相关联，可以看到，在 WLTP 驾驶循环中，开关损耗远高于传导损耗（而二极管损耗可以忽略不计）。参加下方的图 9。

采用同样的 WLTP 驾驶循环并将其转化为结温，可使设计人员了解散热要求，甚至可以对可靠性和产品寿命进行预测。

从该 WLTP 驾驶循环仿真中还可以得出，由于选择了外部栅极电阻而导致的开关能量损耗随时间变化的比较。较低的 $R_{G(EXT)}$ 值（加上高回路寄生电感）可能会导致电压过冲， dv/dt 和 di/dt 值较高。这可能导致模块故障，甚至可能使电机绕组分层。但是，选择较低的 $R_{G(EXT)}$ 可以降低整个驾驶循环中的总能量损耗，从而为客户节省成

图 9. WLTP 循环中的逆变器功率损耗。



本，延迟电池续航时间。这是另一个例子，说明了如何理解驾驶循环并在前期仿真，有助于指导设计人员选择器件 / 组件，优化逆变器设计，同时考虑到客户的利益。

总结

总之，不仅要仿真底层子系统和系统级配置，还要仿真应用（驾驶循环），因为这有助于建立对系统实际使用的核心理解。优化模块（比如 EAB450M12XM3）和逆变器，以利用基于 SiC 的优势，如效率、开关速度 / 损耗和整个驾驶循环的热特性，可以延长产品的使用寿命。Wolfspeed 的双逆变器应用和评估套件有助于设计人员更快地进入市场，且信心满满。

敬请访问 wolfspeed.com/power-modules 了解更多信息并访问数据表、应用注释和其他设计支持工具和资源。OSc

应科院成立「微电子技术联盟」构建微电子与半导体生态系统

2022年11月9日，香港应用科技研究院宣布成立「微电子技术联盟」，旨在构建微电子与半导体技术生态系统，建设区域一流、世界知名的微电子技术和产品开发平台。创新科技及工业局局长孙东教授，太平绅士、创新科技署署长潘婷婷女士，太平绅士及来自学术界、微电子领域的高端专家和骨干企业代表齐聚一堂，共同见证了「微电子技术联盟」的成立。

由应科院主导成立的「微电子技术联盟」，获得本地学界及业界多间机构的支持，包括香港工业总会、ASMPT 香港、瑞声科技、万维数码智能有限公司、大能创智有限公司、香港理工大学、香港科技大学、香港城市大学、香港中文大学及香港大学等。「联盟」旨在促进创新科研，推动产业、研究机构、学术界之间的技术合作，吸引大湾区、中国大陆和世界各地的研究机构和企业进驻香港，开拓本地人才出路，成就生生不息的微电子生态系统，为香港发展成为国际创新科技中心，持续做出贡献。

「联盟」推动区域整合、打造高竞争力的微电子创新之相关策略包括：

- 合存量 聚焦增量

「联盟」将利用将建立的中试线，透过与本港、大湾区和海外的各研究机构的合作，充分地整合已有的研发资源（如人员、设备）与成果（专利），集中资源开发产业化所需要的增量技术，加快产品的市场化进程。

- 应用牵引、协同创新

「联盟」将以大型企业的应作为目标，使用商品化模式和协同创新理念，有效地整合海内外各种资源，形成「材料—设备—外延—器件—晶片—封装—模组—系统」的完整产业链，扩大与三维小晶片和第三代半导体相关的新兴市场。



（左起）香港中文大学工程学院院长黄定发教授；香港城市大学先进设计及系统工程学系冯宪平教授；香港理工大学副校长兼教务长高级顾问陈正豪教授；ASMPT 香港促成科技开发组副总裁吴汉瑜先生；应科院行政总裁叶成辉博士；创新科技署署长潘婷婷女士，JP；创新科技及工业局局长孙东教授，JP；应科院董事局主席李惠光工程师，BBS, JP；香港工业总会常务副主席庄子雄先生；瑞声科技执行董事莫祖权先生；香港科技大学副校长（研究及发展）郑光廷教授；香港大学工程学院院长David Srolovitz教授；应科院集成电路及系统副总裁史训清博士。

应科院在微电子研发具有超过十年的丰富经验。自2006年，应科院便组织跨国技术团队于大中华区率先开展三维集成技术研究，参与国家重大专项方向规划。自2012年，应科院更承建科技部海外第一个「国家专用集成电路系统工程技术研究中心香港分中心」，一直致力推动香港微电子科技产业发展，围绕三维集成芯片、第三代半导体和低功耗无线连接芯片三个方向上开展科学研究、工程转化和人才培养等工作。2016年，应科院主持制定中国2035第三代半导体电力电子技术发展路线图，并代表国家参与IEEE全球技术路线图制定，与全球学界和业界建立了广泛的联结。应科院亦获得香港和海内外各种科技奖项约40项，包括2020年国家科技进步一等奖（微电子三维集成技术）。CS。

安森美提高 SiC 产量

在我们的行业中，最引人注意的领域是SiC。这种芯片的销售额正在以惊人的速度增长，这是由于电动汽车制造商的巨大需求，以及这些器件在能源基础设施中的部署增加，因为它们使效率得到了提高。为了满足不断增长的需求并扩大销售额，SiC器件制造商正在扩大产能。正在进行努力的就包括跨国硅和碳化硅芯片生产商安森美半导体，该公司最近宣布计划大幅提高其生产碳化硅晶锭、制造和抛光碳化硅衬底以及生长碳化硅外延片的能力。据该公司高级副总裁兼

先进功率部（隶属功率解决方案集团）总经理Asif Jakwani称，此次增加的大部分产能将用于内部芯片生产。他说：“我们是一个完全集成的IDM，特别是在碳化硅和硅方面，我们希望能有能力提供我们自己的衬底。”支持这一计划的是安森美在2021年底收购了碳化硅晶锭制造商GT Advanced Technologies，该公司在新罕布什尔州的哈德逊设有工厂。“我们在同一区域内收购了第二栋建筑，这两栋建筑正在推动碳化硅的扩张。”

安森美半导体还在扩大其位于捷克共和国罗兹诺夫 (Roznov) 的工厂的产能, 该工厂提供 SiC 晶圆的抛光和外延生长; 以及硅的抛光、外延生长和代工制造。该工厂于 2019 年引入 SiC 加工, 投资总额为 1.5 亿美元, 并计划在 2023 年再投入 3 亿美元。安森美半导体尚未确切说明将如何使用这笔钱。“但我可以告诉你, 我们的大部分资本投资都针对碳化硅。” Jakwani 透露。在这项投资的推动下, 到 2024 年底, 罗兹诺夫的这座 SiC 工厂的 SiC 晶圆和外延生长能力将会扩大 16 倍。这一惊人的扩张水平将通过购买平滚磨、切片 (slicing)、抛光和外延生长的工具来支持。安森美是一家垂直整合的 SiC 器件制造商。它的生产从 SiC 晶锭的生长开始, 这些晶锭被切片并加工成衬底。

如今, 按照 SiC 行业的惯例, 二极管和晶体管的生产基于直径为 150 mm 的衬底。然而, 安森美正在为迁移到 200 毫米平台奠基。“我们的首席执行官在今年第一季度宣布, 我们已经在富川工厂生产了 200 毫米的二极管晶圆,” Jakwani 评论道, 他补充说, 所有购买的设备都可以转换成这种更大的尺寸。“最初的生产将是 150 毫米, 但我们的计划是将所有设备转换为 200 毫米。通过投资更多能够加工更大晶圆的工具来扩大 SiC 产能, 应确保更高的利润率。“规模经济稀释了固定成本, 并能够更好地利用设备,” Jakwani 说, 他指出, 当晶圆厂拥有更多加工设备时, 这将最大限度地减少晶圆通过生产线时发生的限制。自 2000 年第一个肖特基势垒二极管出现在市场上以来, SiC 已经有了长足的进步。然而, 这个行业还有很长的路要走, Jakwani 解释道: “如果你能想象 50 年前的硅, 碳化硅还处于相当的起步阶段。”他预计,



随着该行业从 150 毫米晶圆转向 200 毫米晶圆, 材料质量、外延和晶圆厂设备都将得到改进。他还希望看到对所采用的工艺和设备结构进行改进。与许多同行一样, 安森美是一家垂直整合的制造商。Jakwani 说, 这带来了好处, 包括有机会准备找出缺陷的原因, 可以一直追溯到晶体生长。一旦原因得到解决, 产量就会增加。到 2024 年底, 罗兹诺夫工厂的扩建预计将创造 200 个工作岗位。Jakwani 说: “我们正在将一些硅领域最优秀的人才迁移到碳化硅上,” 他指出, 这种迁移将得到这些工程师在 IGBT 方面的经验的帮助, 因为 IGBT 通常在高电流和电压下工作。劳动力的增加也将得到支持, 从半导体行业内部招聘工程师, 并与大学合作, 通过实习来帮助吸引新的人才。“通过所有这些努力, 我们能够培养一支良好、坚实的员工队伍, 这对于我们成为行业领导者至关重要。”

晶湛半导体完成数亿元 C 轮融资

本轮增资由蔚来资本、美团龙珠领投, 华兴资本旗下华兴新经济基金、欣柯资本等跟投, 老股东歌尔微电子、三七互娱等继续加码。近年来, 氮化镓材料不仅在电力电子和新型显示等领域的应用呈现出爆发式增长, 在不断涌现的颠覆性创新应用上也凸显其独特价值。以近年来高速成长的新能源汽车应用为例, 得益于 GaN 材料的优异特性, 在车载充电机 OBC、DC-DC 转换器以及主逆变器车载电力电子系统应用中, 更快的开关速度、更高的转换效率、更轻小的系统尺寸和重量得以实现, 从而满足车体轻量化、系统高效化和长程续航等核心需求。除此以外, 包括激光雷达 (LiDAR)、电池管理系统 (BMS)、无线电力传输系统、车载信息娱乐系统 (IVI)、以及新型高效车用照明、车载微显示等都离不开高品质 GaN 材料的支撑。晶湛半导体长期专注于高质量

GaN 材料的研发和产业化, 已建成国内规模领先的 GaN 外延材料研发和生产基地, 并已先后通过 ISO9001:2015 质量管理体系和 IATF16949:2016 车规质量管理体系标准认证。

晶湛半导体创始人、总裁程凯博士表示: “本次融资代表了资本市场对晶湛发展与实力的充分认可和信任, 今后晶湛将继续加大研发和技术投入, 加速推进 GaN 材料在汽车电子等领域的应用。”晶湛半导体自成立以来, 一直致力于第三代半导体材料——氮化镓的研发与产业化。一路走来, 晶湛半导体作为创新驱动型的国际化企业, 收获了众多海内外客户的青睐, 荣获各级组织奖励数十项, 多次在行业顶级期刊、国际顶级会议上发布创新成果, 晶湛半导体已申请专利近 500 项、授权近 150 项。

意法半导体与 Soitec 合作开发碳化硅衬底制造技术

意法半导体和 Soitec 宣布双方在碳化硅 (SiC) 衬底方面的合作进入下一阶段, 意法半导体计划在未来 18 个月内对 Soitec 的 SiC 衬底技术进行鉴定。此次合作的目标是意法半导体在未来的 200mm 衬底制造中采用 Soitec 的 SmartSiC™ 技术, 为其器件和模块制造业务提供支持, 预计将在中期实现量产。

“当我们的汽车和工业客户加速向其系统和产品的电气化过渡时, 向 200 毫米 SiC 晶圆的过渡将为他们带来巨大的优势。随着产品销量的上升, 这对推动规模经济非常重要, “意法半导体汽车和分立器件业务部总裁 Marco Monti 表示, “我们选择了一种垂直整合的模式, 以最大限度地发挥我们在整个制造链中的专有技术, 从高质量的衬底到大规模的前端和后端生产。与 Soitec 技术合作的目标是继续提高我们的制造产量和质量。”

“随着电动汽车的出现, 汽车行业正面临重大颠覆。我们尖端的 SmartSiC™ 技术使我们独特的 SmartCut™ 工艺适应于碳化硅半导体, 将在加速其采用方面发挥关键作用, “Soitec 首席运营官 Bernard Aspar 说, “Soitec 的 SmartSiC™ 衬底与意法半导体业界领先的碳化硅技术和专业知识相结合, 将改变汽车芯片制造的游戏规则, 树立新的标准。”

碳化硅 (SiC) 是一种内在特性上具有颠覆性的化合物半导体材料, 在电动汽车和工业流程等关键、高增长的功率应用中具有比硅更佳的性能和效率。它可实现更高效的功率转换, 更轻、更紧凑的设计, 并节省整体系统设计成本——这些都是汽车和工业系统成功的关键参数和因素。从 150mm 晶圆过渡到 200mm 晶圆将大幅提高产能, 制造器件的有用面积几乎是原来的两倍, 每个晶圆提供 1.8-1.9 倍的工作器件芯片。☞

英国命令安世半导体剥离纽波特晶圆厂

英国政府已向中国芯片公司安世半导体发出最后通牒, 要求其出售至少 86% 的纽波特晶圆厂 (NNL), 并表示了对国家安全的担忧。2021 年 7 月 5 日, 安世半导体获得了纽波特晶圆厂 (现为 NNL) 额外 86% 的股本, 使其持股比例达到 100%, 这才触发了审查。国务卿的命令说, 该所有权对国家安全构成了风险, 涉及到可能在纽波特厂区重新开展化合物半导体活动而产生的技术和专利, 以及这些活动有可能破坏英国自身的能力。

此外, 还有人担心, 该基地的位置可能有助于获得南威尔士化合物半导体集群的技术专长和知识, 而该基地与该集群之间的联系可能会妨碍该集群参与未来与国家安全有关的项目。安世半导体总部位于荷兰, 但却是中国公司闻泰科技的子公司, 它表示对于这一决定感到震惊, 不接受所谓的担忧潜在国家安全的理由。代表安世半导体的英国总经理 Toni Versluijs 回应这一决定时表示: “我们感到非常震惊。这个决定是错误的, 我们将上诉推翻这一撤资令, 以保护纽波特的 500 多个工作岗位。这一决定发出了一个明确的信号, 即英国对商业是关闭的。英国不是在升级, 而是在降级像南威尔士这样的社区。”他补充说: “我们将一家投资匮乏的公司从倒闭中拯救了出来。自 2021 年初以来, 我们已经偿还了纳税人贷款, 保证了就业、工资、奖金和养老金, 并同意花费超过 8000 万英镑用于设备升级。那些将企业出售给我们的人一致认为这是唯一可行的解决方案, 这笔交易曾受到威尔士政府的公开欢迎。”总部位于英国的石墨烯微芯片公司 Paragraf 的创始人兼首席执行官 Simon Thomas 评论说: “很



高兴终于看到对纽波特晶圆厂一案的决定。业界知道, 国家安全无疑是重要的, 必须尽一切努力确保英国及其利益得到保护。尽管如此, 必须采取重大措施, 以尽量减少未来这些调查所涉及的延误。”他补充说: “英国公司不能失去竞争优势, 这是这些旷日持久的调查和缺乏方向的意外结果, 导致客户和股东感到沮丧, 并可能在其他地方寻找明确的目标。”

“政府应考虑采取具体和有效的程序, 以明确概述和透明的程序为所有人提供及时的结果, 以审查国家安全问题。当然, 我们需要保护国家安全, 但不能损害英国商业利益。”“Paragraf 仍在等待一个更重要的问题的答案, 即政府是否相信英国半导体行业有未来, 以及他们将如何发展和保护这一未来。”9 月, 英国《金融时报》报道称, 化合物半导体专家、IQE 的前首席执行官 Drew Nelson, 正在寻求与私募股权集团 Palladian Investment Partners 联手, 回购纽波特晶圆厂。☞

SEMI 报告：2022 年第三季度全球半导体设备出货金额增长 9%

日前，SEMI 在其发布的《全球半导体设备市场报告》Worldwide Semiconductor Equipment Market Statistics (WWSEMS) Report 中宣布，2022 年第三季度全球半导体设备出货金额达到 287.5 亿美元，比上一季度增长 9%，比去年同期增长 7%。

SEMI 总裁兼首席执行官 Ajit Manocha 表示：“第三季度半导体设备销售额增长与对 2022 年的积极预测保持一致。第三季度设备支出比上一季度增长 9%，反映出半导体行业决心加强晶圆厂产能，来支持长期增长和技术创新。”

《全球半导体设备市场报告》汇总 SEMI 和日本半导体设备协会 (SEAJ) 旗下会员资料，提供每月全球半导体设备产业订单及出货相关统计数据。

按地区划分的季度出货金额（单位：10 亿美元），以及各地区季度及年度同比变化数据如下：

SEMI 出版的设备市场报告 (Equipment Market Data Subscription, EMDS) 包含全球半导体设备市场相关的丰富资

Region	3Q2022	2Q2022	3Q2021	3Q (QoQ)	3Q (YoY)
China	7.78	6.56	7.27	19%	7%
China Taiwan	7.28	6.68	7.33	9%	-1%
Korea	4.78	5.78	5.58	-17%	-14%
North America	2.61	2.64	2.29	-1%	14%
Japan	2.55	1.65	2.11	55%	21%
Rest of World	2.08	1.25	1.35	67%	54%
Europe	1.67	1.86	0.87	-10%	92%
Total	28.75	26.43	26.79	9%	7%

Sources: SEMI (www.semi.org) and SEAJ (www.seaj.or.jp), November 2022

Note: Summed subtotals may not equal the total due to rounding.

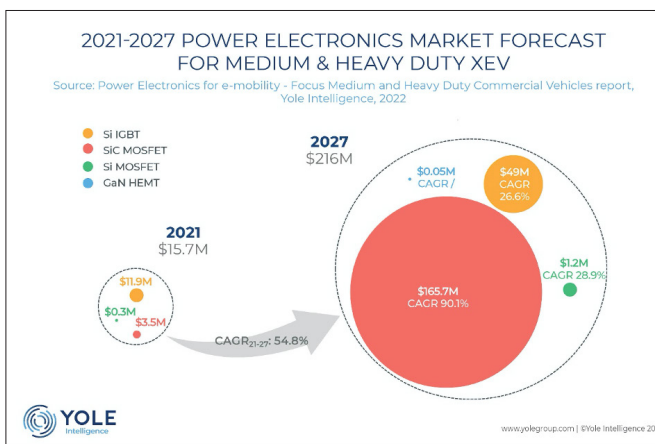
料，三个子报告包括：

- SEMI 每月半导体设备订单与出货报告 (Monthly SEMI Billings Report)，提供设备市场趋势相关看法。
- 每月全球半导体设备市场统计报告 (Monthly Worldwide Semiconductor Equipment Market Statistics)，提供全球 7 大地区共 24 个市场详尽的半导体设备订单与出货相关数据。
- 半导体设备资本支出预测报告 (SEMI Semiconductor Equipment Forecast)，提供半导体设备市场展望相关数据。

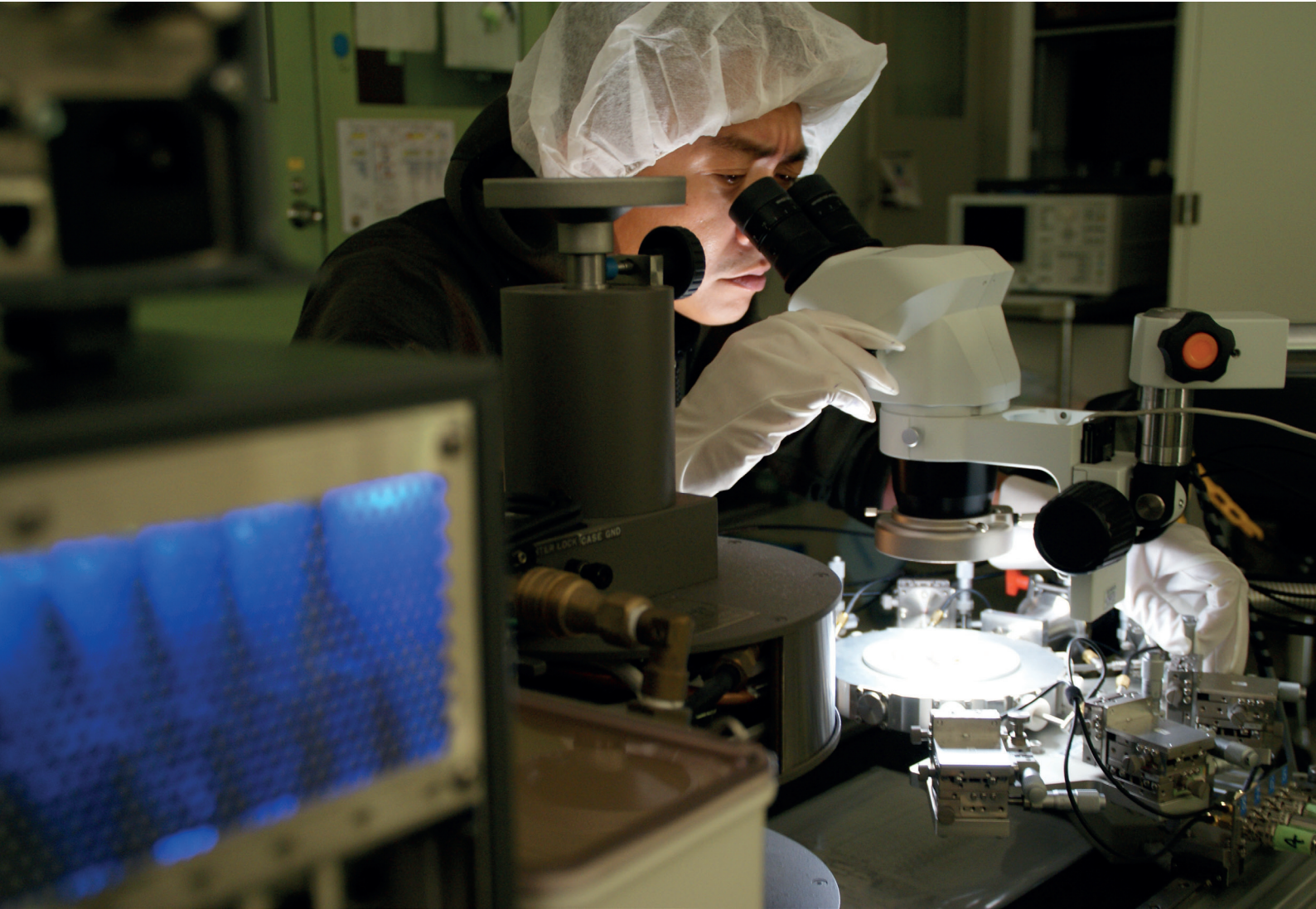
碳化硅将服务客车和卡车

英国化合物半导体晶圆和先进材料供应商 IQE 已与韩国 SK Siltron 公司签订合作协议，以共同开发化合物半导体产品并实现商业化。该协议正式确定了一项在亚洲市场发展业务战略协议，以 SK Siltron 的衬底专长和 IQE 的外延能力为基础。IQE 和 SK Siltron 将专注于开发和提供基于 SiC 上的 GaN 的外延片，用于无线通信市场的射频应用，以及基于硅氮化镓的电力电子应用，涵盖一系列市场。

这些市场加起来为 GaN 器件提供了数十亿美元的机会，并有望在消费电子、电信和汽车应用中实现强劲增长。IQE



首席执行官 Americo Lemos 评论说：“IQE 的 GaN 外延产品和 SK Siltron 的衬底产品之间存在巨大的协同效应，我们将利用这些优势为市场带来创新的解决方案。在亚洲的扩张是 IQE 的一个重点，我们很高兴能与全球公认的先进材料领导者合作。SK Siltron 首席执行官 Janho Jang 评论说：“我们很高兴两家先进材料领域的世界领导者联手，共同开发与 GaN 材料相关的令人兴奋的增长市场的产品。我期待着与 IQE 取得相当大的成功，并发展这种关系，以涵盖广泛的半导体材料。”



用复合晶体管开辟新天地

独特的集成制造工艺创造了复合晶体管，将氮化镓 HEMT 的低导通电阻与 SiC 二极管的非破坏性击穿结合起来。

作者：国家先进工业科学技术研究所，Akira NAKJIMA

我们这个星球的温度正在上升，这将给人类带来可怕的后果。正因为如此，全球碳排放量迅速下降至关重要。为此目标，我们必须在许多方面采取行动，包括采用新的方法来创造、分配和使用能源。

如果我们要迈向一个更环保的社会，我们将需要改变我们生产和使用大部分电力的方式。这样的努力将不得不考虑电力转换器，它可以升压

和降压，并将电压从直流转换到交流，反之亦然——这是广泛应用于许多电子应用中的“电力砖”，包括个人电脑、电信、电动汽车和航空航天应用中的电源。削减这些转换器中的功率损耗并提高效率，这将在系统层面上实现节能。

转向低碳社会还需要增加电动汽车的使用量，同时安装更多的风力涡轮机和太阳能发电场。对于所有这些绿色技术，我们需要比现有技术更小、

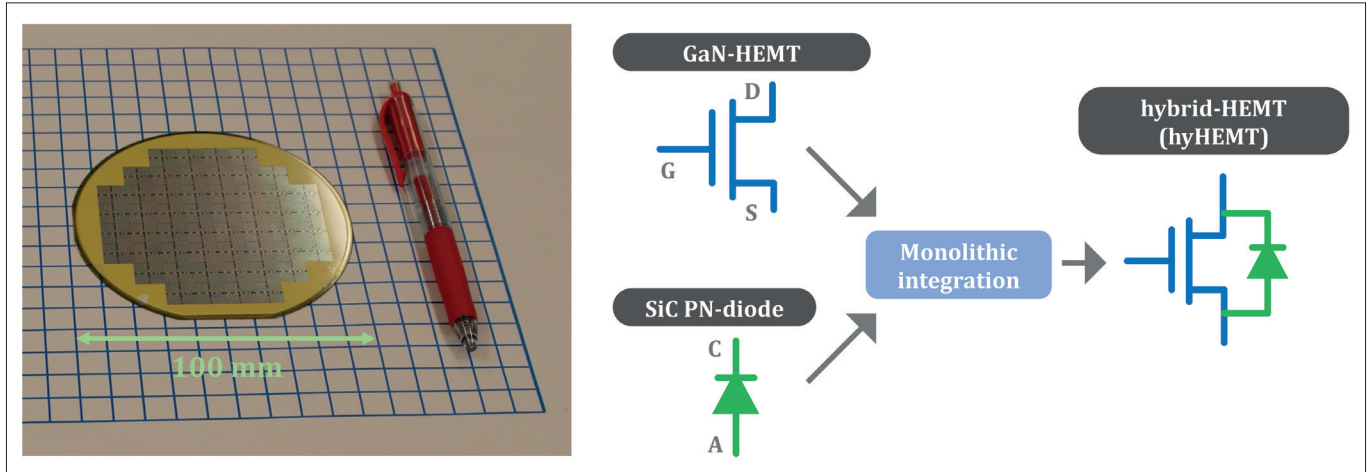


图1. 100毫米SiC衬底上制造的复合HEMT照片（左）和等效电路图（右）。

更高效、更可靠的电力转换器。要实现这一点，必须在变流器中使用的功率晶体管方面进行进一步的技术创新。

电源转换电路的核心是功率晶体管，发挥开关的作用。理想情况下，这些器件应结合低导通电阻，以确保在导通状态下的低传导损耗，并具有快速开关性能，以减少开关损耗。

硅功率晶体管被广泛部署在转换器应用中。由于自20世纪60年代以来的广泛研究和开发，它们的性能得到了改善，但现在正逼近材料的极限。因此，为了实现更高的效率，有必要转向其它半导体材料。

这促使人们对宽带隙半导体制备的器件产生了浓厚的兴趣。其中已经获得商业成功的是 GaN

HEMT，它具有高密度、高迁移率的二维电子气体（2DEG）作为沟道，其由 AlGaN/GaN 异质界面的独特极化性质所产生（见图 2（a））。

由于在没有杂质掺杂的情况下产生自由电子，该沟道的迁移率可以超过 $1500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。这种晶体管的另一个优点是，由于材料的高电场强度，可以在高达 10^{13} cm^{-2} 的浓度下实现对 2DEG 的控制，这比砷化镓和硅器件的浓度高一个数量级。有了这些特性，GaN HEMT 在低电阻和快速开关方面超过了硅器件的极限。

自从研究人员在20世纪90年代报告了第一个 GaN HEMT 以来，现在已经过去了很多年。随后的开发和商业化使它们被应用在小于约3千瓦的电源转换器中，如智能手机的紧凑型交流适配

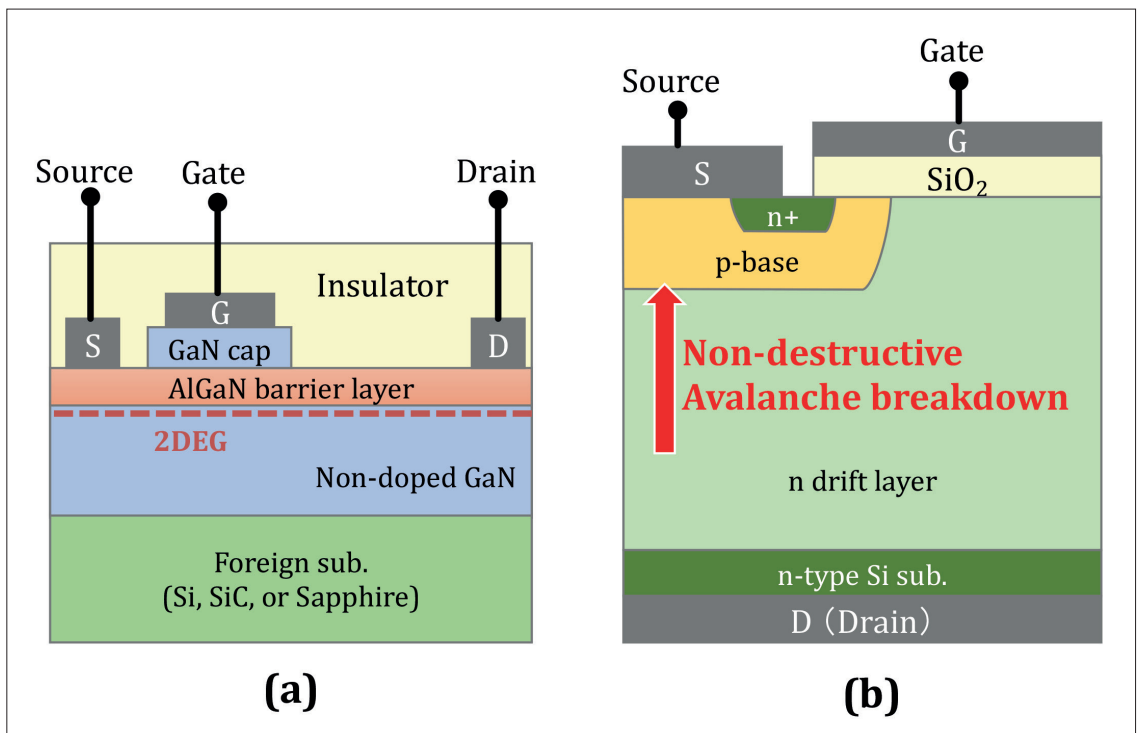


图2. (a) 传统的GaN基HEMT和 (b) 硅基的DMOSFET的示意图截面。

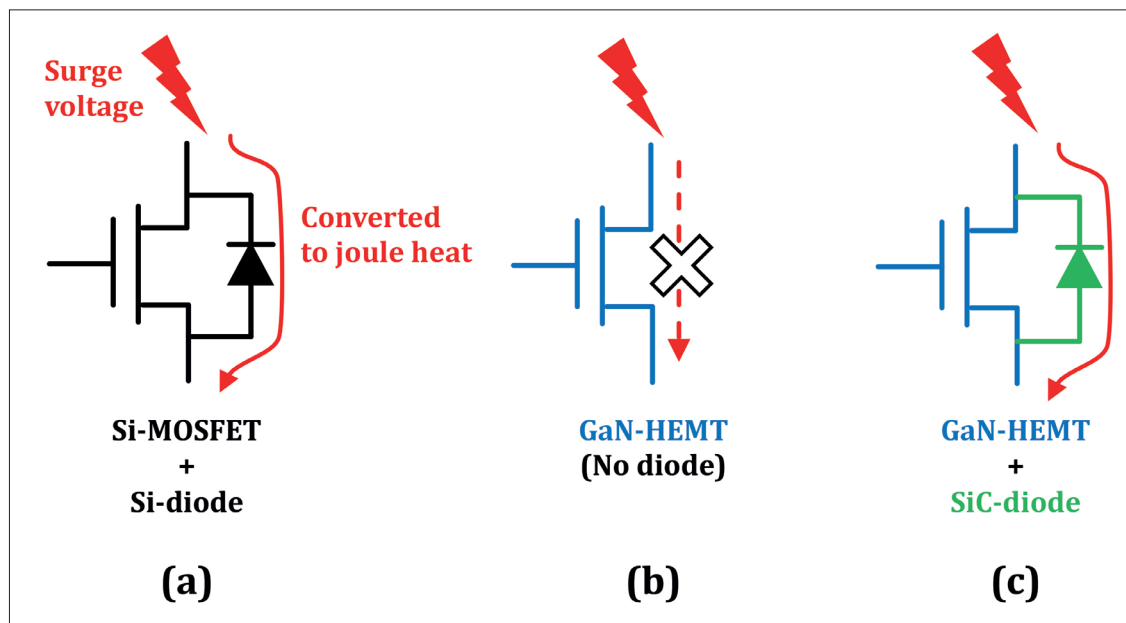


图3. 本研究中 (a) 硅 DMOSFETs, (b) GaN HEMTs 和 (c) 复合 HEMTs 的等效电路。

器，它们将高效率和小型化结合起来。

不幸的是，GaN HEMT 存在与可靠性有关的问题，阻碍了它们在大功率场景中的应用，如电动汽车。可靠性受损的原因是其特性与现有的硅基双扩散 MOSFET 不同（见图 2(b)）。在这种双扩散 MOSFET 中，在 p 型基区和 n 型漂移层之间有一个 p-n 结，以及一个 p-n 二极管称为“体二极管”以反平行配置连接（等效电路见图 3 (a)）。在这种配置下，在异常电路操作下对 DMOSFET 施加过电压会导致体二极管发生非破坏性的雪崩击穿，噪声能量在硅芯片中被吸收为焦耳热。由于这个原因，当硅功率晶体管被用于转换器电路拓扑结构时，它们倾向于防止在异常操作期间出现过电压，从而确保系统的可靠性。

对于 GaN HEMT，这是一个非常不同的状态。

氮化镓 HEMT 没有体二极管，所以没有通道让噪声能量流出，导致这种形式的晶体管易被过压破坏。这一弱点使 GaN HEMT 所提供的节能效果只限于低功率转换器。

氮化镓和碳化硅的结合

在国家先进工业科学与技术研究所，我们的团队开发了一种解决这一弱点的方法，该方法基于引入结合了 GaN 和 SiC 的复合 HEMT。这种新颖的晶体管解决了破坏性击穿的问题，其特点是一个基于碳化硅的反并行 p-n 二极管，单片集成到 GaN HEMT（见图 5(a)），查看该器件的示意图，3(c) 为器件的等效电路）。这种复合器件有五个电极：GaN HEMT 结构的源极、栅极和漏极；以及碳化硅二极管结构的阳极和阴极。

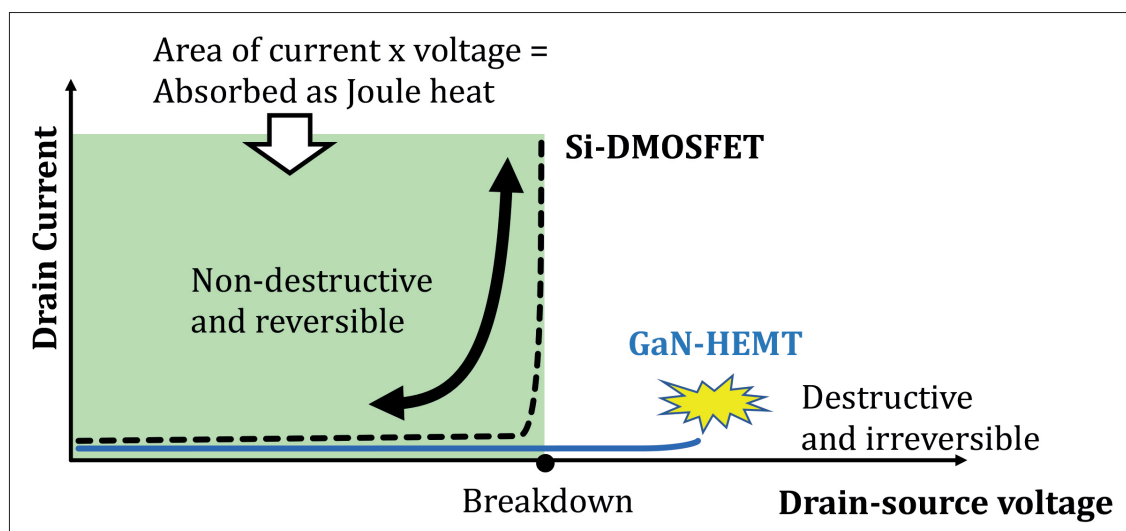
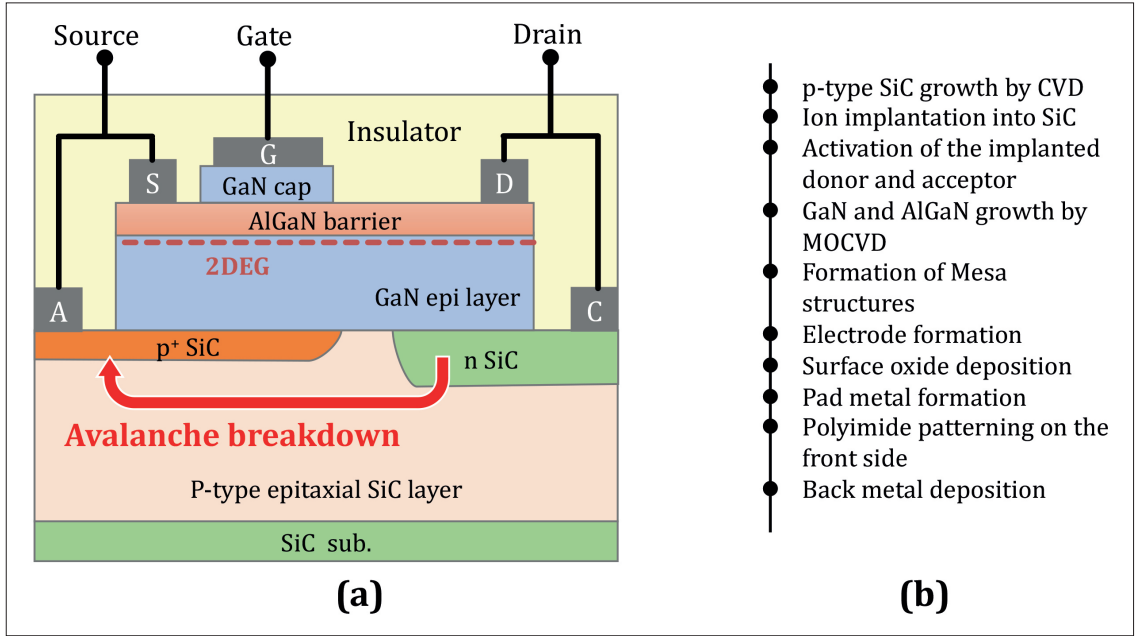


图4. 硅DMOSFETs与GaN-HEMTs关态击穿特性示意图。

图5.(a)GaN/SiC复合 HEMT示意图。HEMT 中的五个电极：HEMT 中的源极(S)、栅极(G)和漏极(D)；以及碳化硅二极管中的阳极(A)和阴极(C)。(b)GaN/SiC复合HEMT的制备工艺流程。



在关断状态下工作，这种复合器件可以在 SiC 体二极管中发生非破坏性的雪崩击穿，确保器件的可靠和稳定性。而该器件在导通状态下，电流流经 AlGaN/GaN 异质界面的 2DEG 沟道，实现了低的导通电阻。因此，得益于这些运行模式，我们的复合 HEMT 将两种材料真正重要的优点充分结合在了一起。

为了生产我们的新器件，我们扩大了一条 100 mm 的基于碳化硅的原型生产线，该生产线位于日本筑波的一家开放创新平台。我们的这种改进为制造碳化硅、氮化镓和复合器件创造了一条原型生产线。通过这些改进，我们已经能够制造出尺寸较小、栅宽为 50 μm 的混合 HEMT 器件。

我们制造器件所采取的步骤(如图 5(b)所示)始于通过 CVD 生长的 p 型碳化硅。之后，我们通过离子注入和激活形成 p 型和 n 型碳化硅区域，然后用 MOCVD 生长 HEMT 层，并用干法刻蚀确定台面结构。然后加入电极，接着沉积 3 毫米厚的铝层，

提供焊盘金属。我们的最后一步是用聚酰亚胺覆盖表面，并在器件的背面沉积一种镍基金属。

对我们的复合 HEMT 进行的电学测量产生了令人振奋的结果。与典型的 GaN HEMT 不同，它们不会在击穿后立即破坏，而是在碳化硅二极管中经历非破坏性的雪崩击穿，这是通过将碳化硅侧的击穿电压设计为略低于 GaN 侧的击穿电压来实现的。图 6(a)显示了与约 1.2kV 的击穿

电压相关的击穿行为。由于雪崩击穿是非破坏性的，我们的器件在多次扫描测试中提供了一个稳定的可逆击穿。在正向偏压下工作，我们的复合 HEMT 产生了高达 300 mA/mm 的漏极电流和仅 47 Ω mm 的导通电阻，这要归功于高迁移率的 2DEG (见图 6(b))。

除了低导通电阻和无损击穿外，我们的复合晶体管还具有出色的热耗散特性。这一特殊属性来自于 SiC 的优良导热性，它是硅基器件的三倍。

在关断状态下工作，这种复合器件可以在SiC体二极管中发生非破坏性的雪崩击穿，确保器件的可靠和稳定性。而该器件在导通状态下，电流流经AlGaN/GaN异质界面的2DEG沟道，实现了低的导通电阻。

下转第 27 页

通过衬底驱动应变调控为高性能 UVB-LED 的制备铺平道路

李泰^{1,2}, 康俊杰², 罗巍², 刘上锋¹, 杨嘉嘉¹, 陶仁春¹, 袁冶², 陈兆营¹, 王锦林¹, 王涛³, 荣新¹, 李铎¹, 黄振¹, 王维昀², 王新强^{1,2}

1. State Key Laboratory for Mesoscopic Physics and Frontiers Science Center for Nano-optoelectronics, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China.
2. Songshan Lake Materials Laboratory, Dongguan 523808, China.
3. Electron Microscopy Laboratory, School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China.

摘要

铝镓氮 (AlGa_N) 基紫外 B 波段 (UVB) 发光二极管 (LEDs) 在光疗、促进维生素 D3 合成、植物生长调控等方面显示出巨大的潜力。然而, UVB-LED 的多量子阱 (MQWs) 由于与 AlN 衬底之间存在较大的晶格失配会受到较大的压应变, 这严重影响了 UVB-LED 的性能。受制于此, 同时满足高功率、低电压和优异稳定性要求的 UVB-LED 目前还没有报道。针对以上难点, 本文提出了一种衬底驱动应变调控策略。我们在纳米图形化蓝宝石衬底 (NPSS) 上研发了应变可调的高质量 AlN 模板制备技术, 通过将 AlN 模板精确调制为微张应变状态, 成功抑制了 UVB-LED 中 Al_{0.55}Ga_{0.45}N 底层和 Al_{0.28}Ga_{0.72}N/Al_{0.45}Ga_{0.55}N 多量子阱受到的压应变。通过此方法, 我们成功获得了峰值波长为 303.6 nm 的 UVB-LED。该 UVB-LED 的 20 × 20 mil² 芯片在 20 mA 正向电流下具有 3.27% 的电光转换效率 (WPE); 在 800 mA 正向电流下实现了 57.2 mW 的最大输出功率, 同时其工作电压低至 5.87 V。值得一提的是, 芯片在正向电流 (75 A cm⁻²) 下连续老化 1000 小时后, 光功率仅衰减为初始值的 83%, 表现出优异的稳定性。本文所研制的 UVB-LED 同时具备了高功率, 低电压和良好的可靠性, 将很大程度上促进 AlGa_N 基 UVB-LED 的广泛应用。

背景介绍

铝镓氮 (AlGa_N) 基紫外发光二极管 (UV-LED) 在杀菌、光疗、紫外线固化等方面显示出

了极高的应用价值, 近年来受到广泛的关注。其中, 紫外 B 波段的 LED (UVB-LED) 具有诸多应用, 包括皮肤疾病 (如银屑病和白癜风) 的光疗、促进次生植物代谢物的生成、促进人体内维生素 D3 合成以及提高动物体内维生素 D 水平等。然而, 与 UVC-LED 和 UVA-LED 相比, AlGa_N 基 UVB-LED 工艺成熟度较低、性能相对较差, 还没有得到广泛的应用。阻碍高性能 UVB-LED 发展的一个主要因素是 UVB 多量子阱由于晶格失配所遭受的过量压应变。由于目前缺乏与 UVB-LED 多量子阱晶格匹配的 AlGa_N 衬底或模板, 大多数情况下, UVB-LED 需要生长在 AlN 模板上, 其多量子阱会受到 AlN 所带来的强烈的压应变。过量的压应变会损伤多量子阱的质量, 严重损害 LED 的光功率和可靠性。

针对上述难点, 本文提出了一种衬底驱动应变调控方法。我们通过调节孔型纳米图形化蓝宝石衬底 (NPSS) 的孔径, 实现了 AlN 模板中可控张应变的引入, 从而有效抑制了 UVB-LED 中 AlGa_N 底层和多量子阱受到的压应变。得益于该方法, 我们获得了高质量的 Al_{0.55}Ga_{0.45}N 底层 (弛豫度低至 20%) 和多量子阱。在此基础上, 制备的 20 × 20 mil² 的 UVB-LED 芯片具有 3.27% 的电光转换效率 (20 mA 注入电流), 57.6 mW 的最高光功率和 5.87 V 的极低电压 (800 mA 注入电流), 以及低至 -0.004 μA 的反向漏电流 (-5 V 下)。芯片在连续老化 1000 小时后 (老化电流密度为 75 A cm⁻²), 光功率衰减为初始值的 83%, 且反向漏电流小于 -1 μA (-5 V 下), 展现出良好的可靠性。

结果与讨论

衬底驱动应变调控法：

传统的 UVB-LED 结构如图 1 (a) 所示，其自下而上由 AlN 模板、中间 Al 组分的 AlGa_N 底层、多量子阱、电子阻挡层、p 型 AlGa_N 层和 p 型 Ga_N 电极接触层组成。图 1 (b) 展示了 UVB-LED 的常规应变调制方法，其中多量子阱受到的压应变主要通过 AlGa_N 底层的晶格弛豫来释放。在这种方式下，AlGa_N 底层通常需要进行较大的弛豫。然而，AlGa_N 底层的过量弛豫通常会导致一些负面影响，包括晶体质量和表面平整度的恶化等，这将损害其上生长的多量子阱的质量。此外，有研究表明，AlGa_N 底层的弛豫度增加会削弱其上的多量子阱中电子和空穴波函数的重叠，不利于实现具有高发光效率的多量子阱。

为了解决上述问题，我们应注意到压应变的来源，即 AlN 模板与其上生长的 AlGa_N 层之间的晶格失配。如果可以在 AlN 中引入张应变，适当扩大其横向晶格常数，则 AlN 与 AlGa_N 层（包括 AlGa_N 底层和多量子阱层）之间的晶格失配便可以得到有效抑制。该方法更利于我们获得具有更大横向晶格常数和更高晶体质量的低弛豫 AlGa_N 底层，进而更有利于实现高质量的多量子阱，最终实现高性能的 UVB-LED（如图 1 (c) 所示）。相比于此前研究人员在 AlN 中重掺 Si 引入张应变的方式，在无掺杂 AlN 模板中实现更有效的张应变调制可以避免过量掺杂下缺陷能级的引入，对背出光模式的 UVB-LED 意义重大。

与传统的平片蓝宝石衬底相比，纳米图形化蓝宝石衬底 (NPSS) 上生长的 AlN 模板会自发形成孔洞结构，这些孔洞可以作为一种应力调节通道。此外，纳米图形结构也被认为是提高深紫外 LED 光提取效率的有效途径。基于此，我们提出了一种应变调制策略，即通过改变 NPSS 的孔径来实现 AlN 模板的精确应变调制。在该技术

的支持下，我们有望通过衬底驱动应变调控来实现高性能的 UVB-LED。

NPSS 上应变可调的高质量 AlN 模板制备：

我们采用的 NPSS 具有周期的类孔结构图案，孔阵列的周期距离固定为 1 μm（如图 2 (a) 所示）。我们将 NPSS 的孔径分别设置为 750、650 和 550 nm，并在其上生长 AlN 模板，依次编号为 D750-AlN、D650-AlN 和 D550-AlN。我们通过 3D 模式生长转 2D 模式生长的方法获得了总厚度为 3 μm 的 AlN 模板，生长过程包含三个步骤：(1) 200 nm 的 3D-AlN 层；(2) 2 μm 的侧向外延 AlN 层；(3) 800 nm 的 2D-AlN 层。

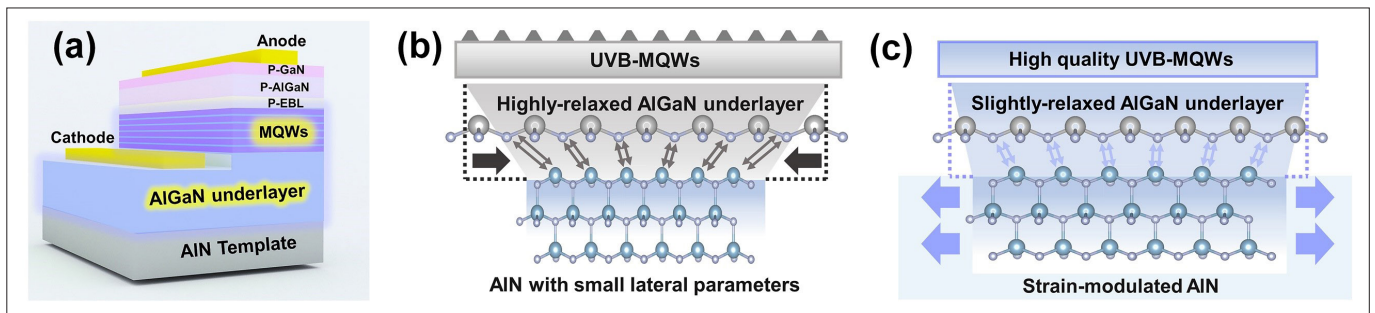
我们通过室温下的拉曼光谱测试对 AlN 模板的残余应力进行表征（图 2 (b)），当 NPSS 孔径从 750 nm 减小到 650 nm 和 550 nm 时，AlN 模板的 E₂(high) 声子模散射峰的峰位从 659.7 cm⁻¹ 变化到 658.0 cm⁻¹ 和 655.9 cm⁻¹。相对于 657.4 cm⁻¹ 处无应力 AlN 的 E₂(high) 声子模散射峰，这表明了 AlN 模板从残余压应力向张应力的转变。根据公式 (1) 和 (2)，我们计算了 AlN 模板 (AlN template) 的残余应力 σ_{xx} 和应变分量 ε_{xx} ($\epsilon_{xx} = \frac{a(\text{template}) - a(\text{AlN})}{a(\text{AlN})}$)

$$\Delta\omega = k\sigma_{xx} \tag{1}$$

$$\sigma_{xx} = \left(C_{11} + C_{12} - \frac{2C_{13}^2}{C_{33}} \right) \epsilon_{xx} \tag{2}$$

其中 Δω 为无应力 AlN 和 AlN 模板的 E₂(high) 声子模散射峰的频率差；k, C₁₁, C₁₂, C₁₃ 和 C₃₃ 各自取文献中的报道值。通过计算，D750-AlN, D650-AlN 和 D550-AlN 的残余应力 σ_{xx} 分别为 -0.622 GPa, -0.162 GPa 和 0.405 GPa，相应 ε_{xx} 的值依次为 -0.133%, -0.035% 和 0.086%。我们采用原子力显微镜 (AFM) (扫描面积为 10 × 10 μm²) 对三种 AlN 模板的表面形貌进行分析，如图 2 (c) - (e) 所示。D750-

图1: (a) UVB-LED 结构示意图, (b) UVB-LED 中传统的应变调制, (c) UVB-LED 中衬底驱动应变调控。



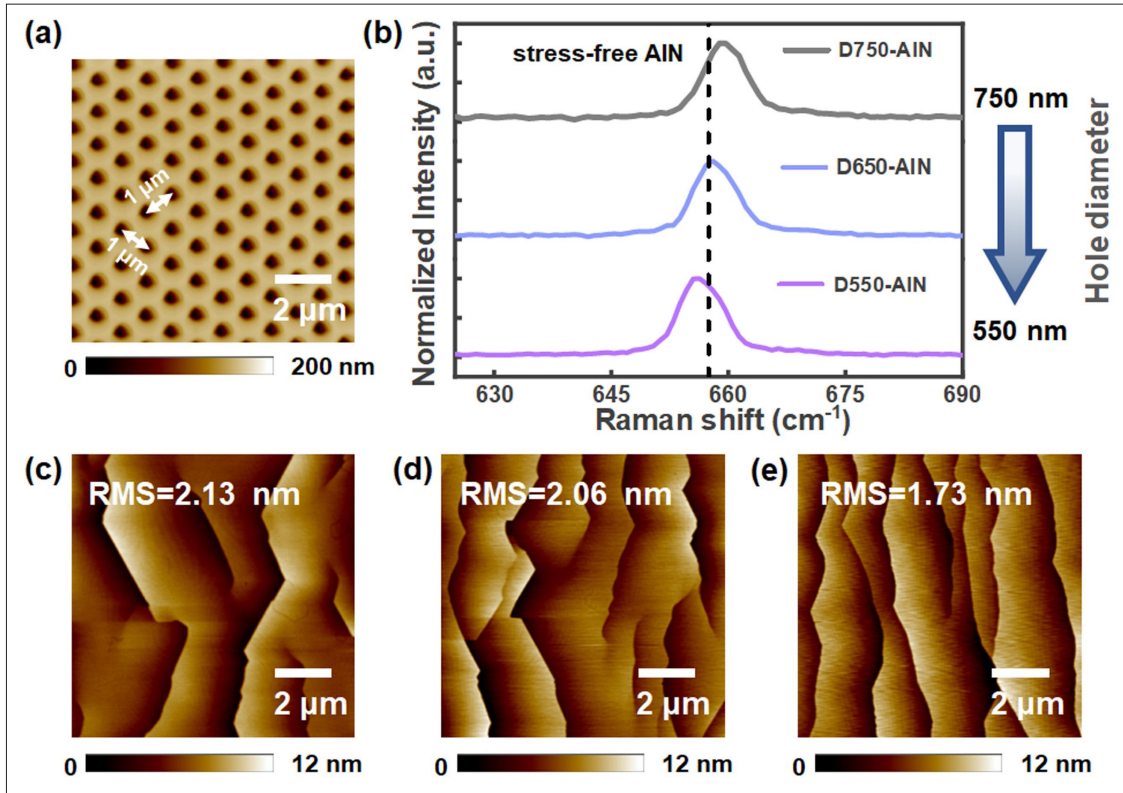


图2: (a) 纳米图形化蓝宝石衬底 (NPSS) 表面的原子力显微镜 (AFM) 图像 (扫描面积 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$)。 (b) D750-AlN、D650-AlN 和 D550-AlN 的拉曼光谱。 (c) D750-AlN, (d) D650-AlN, (e) D550-AlN 表面的原子力显微镜 (AFM) 图像 (扫描面积 $10 \times 10 \mu\text{m}^2$)。

AlN, D650-AlN 和 D550-AlN 模板的表面均为平滑的台阶聚并形貌, 表面均方根 (RMS) 粗糙度分别为 2.13、2.06 和 1.73 nm。我们利用 (002) 和 (102) 面的 X 射线衍射 (XRD) 摇摆曲线测试并根据马赛克模型计算的 D750-AlN、D650-AlN 和 D550-AlN 的位错密度依次为 1.05×10^9 、 1.25×10^9 和 $1.50 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$, 表明三个 AlN 模板都具有良好的晶体质量。

衬底驱动应变调控法制备 UVB-LED:

我们通过金属有机化学气相沉积 (MOCVD) 在 D750-AlN、D650-AlN 和 D550-AlN 上外延生

长了相同的 UVB-LED 结构, 它们被依次命名为 D750-UVB-LED、D650-UVB-LED 和 D550-UVB-LED。UVB-LED 的结构由 (1) 180 nm 的再生长 AlN 层; (2) 200 nm 的 AlGa_{0.55}N 过渡层 (平均 Al 组分为 80%); (3) 1.1 μm 的 n 型 AlGa_{0.55}N 底层 (Al 组分为 55%); (4) 四个周期的 Al_{0.28}Ga_{0.72}N (2.5 nm) / Al_{0.45}Ga_{0.55}N (10 nm) 多量子阱; (5) 20 nm 的 p 型 AlGa_{0.55}N 电子阻挡层 (Al 组分为 65%); (6) 40 nm 的 p 型 AlGa_{0.55}N (Al 组分为 50%); (7) 20 nm 的 p 型 GaN 电极接触层。我们将 AlGa_{0.55}N 底层的厚度设置为 1.1 μm, 目的是在一个低弛豫的 AlGa_{0.55}N 底层上实现高性能的 UVB-LED。

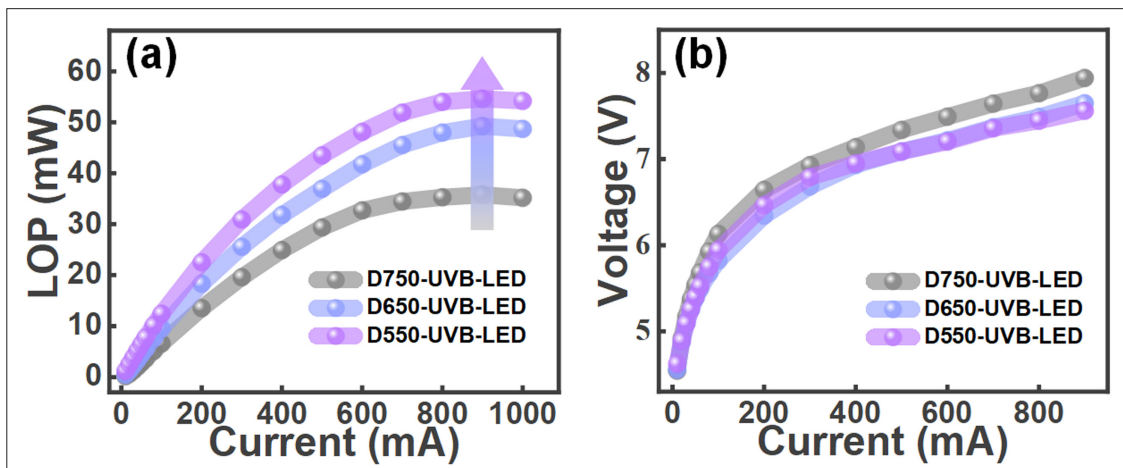


图3: (a) 三种 UVB-LED 芯片的功率-电流曲线。 (b) 三种 UVB-LED 芯片的正向 I-V 特性。

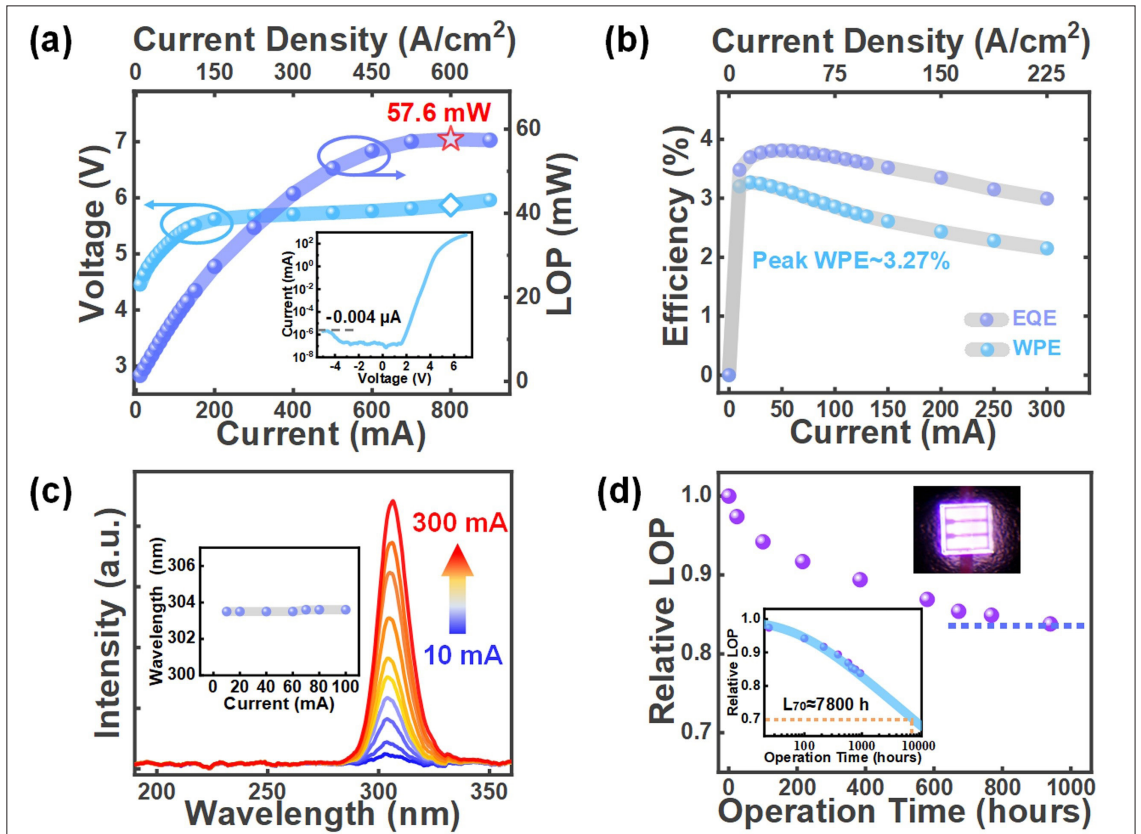


图4: (a) 室温下UVB-LED芯片的正向I-V特性和功率-电流曲线。插图为半对数电流坐标下的I-V曲线。(b) UVB-LED芯片的效率-电流曲线。(c) 不同注入电流下UVB-LED芯片的EL光谱。插图显示了EL光谱峰值位置随注入电流的变化。(d) 100 mA (75 A cm⁻²) 注入电流下的归一化光功率-老化时间曲线。左侧插图为预测的光功率随对数时间坐标变化的曲线图。右侧插图显示了UVB-LED芯片在老化过程中的图像。

通过 AlN 模板中张应变的引入，从 D750-UVB-LED 到 D650-UVB-LED 和 D550-UVB-LED，AlGaIn 底层和多量子阱生长时受到的压应力得到了抑制，AlGaIn 底层的晶体质量和多量子阱的发光效率得到了明显改善。最终 20 × 20 mil² UVB-LED 芯片的最大光功率从 D750-UVB-LED 的 35.4 mW 成功提升到 D550-UVB-LED 的 54.6 mW (图 3 (a))。遗憾的是，D550-UVB-LED 的 AlN 模板中张应变的大量引入导致了薄膜的严重开裂，这将降低生产的良率。此外，在 400 mA 注入电流下，我们发现 D550-UVB-LED 的动态电阻高达 1.48 Ω (图 3 (b))，预示着器件结构还需要进一步的优化。

为了保持 AlN 模板的张应变状态，同时抑制裂纹的产生，我们在 600 nm 孔径的 NPSS 上生长了 D600-AlN 模板，用于制备 UVB-LED (即 D600-UVB-LED)。经拉曼散射测试，D600-AlN 的 E₂(high) 声子模散射峰位于 657.1 cm⁻¹，对应于 0.081 GPa 的残余张应力，小于 D550-AlN 的 0.405 GPa。此外，我们将 n 型 AlGaIn 底层的厚度增加到 2 μm，以降低器件的动态电阻。结果显

示：与 D550-UVB-LED 相比，D600-UVB-LED 晶圆边缘的裂纹得到了明显的抑制。XRD 测试表明，D600-UVB-LED 的 AlGaIn 底层弛豫度为 20%，其 (002) 和 (102) 面 XRD 摇摆曲线的半高宽分别为 167 arcsec 和 340 arcsec，对应于 5.85 × 10⁷ cm⁻² 的螺位错密度和 1.18 × 10⁹ cm⁻² 的刃位错密度。我们通过变功率 PL 测试得出其上生长的 UVB 多量子阱拥有大于 62% 的内量子效率 (IQE)。

通过标准的芯片制作工艺，我们将 D600-UVB-LED 外延片制作成尺寸为 20 × 20 mil² 的倒装型芯片，并使用 AuSn 合金焊接在 AlN 金属化陶瓷基板上进行相关测试表征。图 4 (a) 展示了芯片在连续电流注入下的功率 - 电流和电流 - 电压 (I-V) 特性。在 100 mA 标准注入电流下，303.6 nm 的 LED 工作电压低至 5.30 V，输出功率为 15.2 mW，对应 2.87% 的电光转换效率 (WPE)。得益于高质量的厚 n 型 AlGaIn 底层，在 400 mA 下，芯片的动态电阻只有 0.3 Ω。因此，在 800 mA 注入电流下，芯片的电压低至 5.87 V，同时芯片显示了 57.6 mW 的最大输出功率。根据最近的文

献报道, 尺寸约 $20 \times 20 \text{ mil}^2$ 的 UVB-LED 芯片的最大功率范围为 10-40 mW, 工作电压范围为 6-40 V。然而, 在这些研究中, 高功率和低工作电压并不能同时获得。例如, 先前报道的最大 40 mW 的功率记录 (M. A. Khan et al., Sci. Rep. 12, 2591 (2022)) 是在 40 V 的偏压下实现的; 而在低偏压 6 V 下工作的芯片只显示出 16.7 mW 的最大功率 (T.-Y. Liu et al., ACS Appl. Electron. Mater. 3, 4121-4125 (2021))。相比之下, 该实验的 LED 芯片在 5.87 V 的极低电压下, 显示出 57.2 mW 的最大输出功率。图 4 (a) 的插图展示了半对数电流坐标下的 I-V 曲线, LED 在 -5 V 偏压下仅显示了 -0.004 μA 的反向漏电流, 表现出优异的电学性能。如图 4 (b) 所示, 当注入电流从 10 mA (7.5 A cm^{-2}) 增加到 300 mA (225 A cm^{-2}) 时, LED 展示出了良好的 WPE (高于 2%) 和 EQE (高于 3%) 水平, 这种优异的性能体现了它在大电流注入下工作的潜力。图 4 (c) 为不同注入电流下的电致发光 (EL) 光谱, 在 100 mA 标准电流下, 芯片 EL 光谱的半高宽为 12.9 nm。如图 4 (c) 的插图所示, 从 10 mA 开始, 随着注入电流的增加, 我们没有观察到 EL 光谱峰位出现明显的蓝移, 说明量子限制斯塔克效应 (QCSE) 得到了有效的抑制。为了验证芯片的可靠性, 我们将芯片在 100 mA (75 A cm^{-2}) 连续电流注入下进行老化, 归一化光功率 - 老化时间曲线如图 4 (d) 所示。老化开始时, 芯片的光功率表现出快速的降低, 随后在 1000 小时老化后逐渐饱和到初始值的 83%。我们根据 J. Ruschel 等人提出的式 (3) 预测了光功率衰减的趋势, 结果如图 4 (d) 的左侧插图所示。

$$P(t) = -\beta \cdot \ln\left(\alpha \cdot j^3 \cdot t + e^{-\frac{1}{\beta}}\right) \quad (3)$$

式中, $P(t)$ 为预测的光功率, j 为注入电流密度, t 为老化时间, α 和 β 为拟合常数。对于本样品, α 和 β 取值分别为 $5.226 \times 10^{-15} \text{ cm}^6 \text{ h}^{-1} \text{ A}^{-3}$ 和 0.06391。拟合结果表明, UVB-LED 具有超过 7800 小时的寿命 (L_{70})。此外, 老化 1000 小时后, 芯片在 -5 V 下的反向漏电流保持在 -1 μA 以下, 展现出良好的可靠性。

结论

综上所述, 我们揭示了衬底应变对 UVB-LED 性能的决定性作用, 并提出了衬底驱动应变

调控方法。通过精确控制 NPSS 上 AlN 模板的应变, 我们得到了轻微张应变的 AlN 模板, 有效地抑制了 UVB-LED 中 AlGaIn 底层和多量子阱受到的压应变。利用这种调控方法, 我们在 2 μm 厚的高质量 $\text{Al}_{0.55}\text{Ga}_{0.45}\text{N}$ 底层 (弛豫度低至 20%) 上制备了高性能的 UVB-LED。UVB-LED 的峰值波长为 303.6 nm, 其电光转换效率 (WPE) 高达 3.27% (注入电流 20 mA), 最大光功率为 57.2 mW、电压低至 5.87 V (注入电流 800 mA), 同时具有优异的可靠性。该 UVB-LED 同时满足了高功率、低电压和良好稳定性的要求, 在促进 AlGaIn 基 UVB-LED 市场化方面显示出了巨大的潜力。

目前, NPSS 已经被应用于部分 UVC-LED 的产业化生长, 这主要得益于其自身所具有的以下优势: (1) NPSS 衬底相比于平片蓝宝石衬底来说, 对底面出光的 UV-LED 的光提取有显著的增强作用, 有助于提升 UV-LED 的光功率; (2) 相比于平片蓝宝石衬底上传统的 3D 转 2D 生长法制备 AlN 模板的方式, 研究人员可以在 NPSS 上通过侧向外延生长 (ELOG) 在更薄的厚度 (小于 3 微米) 下实现高质量的 AlN 模板, 一定程度上降低生长成本。本文提出的 NPSS 上高质量 AlN 模板的应变调控方法, 一方面几乎可以直接应用于衬底驱动应变调控 UVB-LED 的产业化生长, 另一方面对于 NPSS 上 UVC-LED 的应变调控也具有指导意义。

后续

本团队基于以上成果, 通过对 p 型结构的进一步优化, 大幅提高了 UVB-LED 的光功率 ($20 \times 20 \text{ mil}^2$ 芯片 $>20 \text{ mW}@100 \text{ mA}$) 以及寿命 (100 mA 老化 1000 小时光衰 $<5\%$), 同时实现了 UVB 波段 (280-315 nm) LED 外延工艺的全覆盖。后续, 本团队将继续深耕紫外 LED 的外延生长, 开发具有优异性能的 UV-LED。☞

扩展阅读

- [1] Tai Li, Xinqiang Wang*, et al. Paving the Way for High-Performance UVB-LEDs Through Substrate-Dominated Strain-Modulation, *Advanced Functional Materials*, doi:10.1002/adfm.202208171.

碳化硅促进航空电子系统设计演进

作者：罗宁胜，曹建武；CISSOID 中国代表处，深圳 518118

随着碳化硅半导体技术的进步，航空电子系统也呈现了新的发展趋势。碳化硅功率器件的成熟极大地促进了航空机载传感器、执行机构和控制系统以及电源系统设计等层面的演进，具体体现在航空电子控制系统和电源系统从集中到分布式的转变，以及执行机构从液压或气动到电机驱动的转变这一航空电子系统的总体趋势。特别是高温 SOI 半导体和碳化硅功率器件的结合，其整体的耐高温性能将能很好地满足多电和全电飞机航空电子系统的设计需求。

过去十余年以来，飞机的燃料成本增加了约 50%；2020 年之后，更因为全球供应链的剧烈变化，航空燃油价格继续飙升，预期 2022 年全球商业航空因为燃油成本造成的亏损，将会高达数十亿美元。为了增加可维性、减低重量、提高燃油效率，进而增加续航里程、降低排放，并节约商业飞行成本，飞机系统设计需要进行革命性的升级，由此，各项先进研究项目早以展开。其中，极具代表性的欧盟清洁天空联合创新项目（Clean Sky Joint Technology Initiative）肇始于 2008 年，集合了发达国家的多数头部企业，现已历经两期（Clean Sky 2008-2017 和 Clean Sky2 2014-2024），其目标不仅是降低商业飞行的运营成本，而且还要显著地降低排放，其预期到 2050 年实现降低 75% 的 CO₂ 排放、90% 的 NO_x 排放。该项目中有些部分已采用了 DO-160（Environment Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment）标准，其中已要求某些机载电子元器件在 200℃ 环境中工作寿命要达到或超过 50000 飞行小时。

越来越多的高温电子元器件的使用主要为了支持实现新型的飞机系统设计。这样，在承载同等或更高载荷的条件下，可降低飞机的自身重量；为能实施更为精细的发动机控制，提高发动机的燃油效率，因而控制系统需要从传统的集中式“全权数字发动机控制”（Full Authority Digital Engine Control, FADEC）向“分布式”FADEC 演进；

为了减轻重量和配合飞机整体分布式设计，原有的液压或气动部件也在逐渐转向电机驱动。

航空电子技术所依赖的电子元器件的工作温度范围和工作寿命，直接影响着飞机的系统设计：过去，航空应用只能在成熟的、经过验证的军标温度范围（-55~+125℃）内选择电子元器件，而高温半导体技术近年来得到了长足进步，特别是高温“绝缘层上硅”（Silicon On Insulator, SOI）技术，还有“碳化硅”（Silicon Carbide, SiC）、“氮化镓”（Gallium Nitride, GaN）等第三代“宽禁带”（Wide BandGap, WBG）半导体技术的发展，使得 -55~+175℃ 甚或 -55~+225℃，或者更高温度范围的电子器件日益涌现，给航空机载电子设备的设计打开了一扇新的窗口：这些技术使得因更小体积、更高功率密度而需耐受更高温度的航空电子设备的设计，成为可能。

航空应用对高温电子技术的需求

航空系统上的高温，通常有如下三个来源：

- 第一，来自飞机的动力系统，即飞机的引擎和排气装置。引擎燃烧室的温度可以高达几千度，飞机控制系统需要实时监测燃烧的状态，通过调节燃料和空气的比例来控制燃烧过程，以求实现最高的燃烧效率。为了实现对引擎高效的实时监测和控制，相关传感器和电子器件需要尽可能地靠近引擎，视具体配置位置，有可能需要耐受 300~600℃ 的高温；

- 第二，飞机在高速飞行时，飞机表面与空气摩擦生热。超音速飞行时，机体表面的温度可高达 200℃ 以上；超音速飞行的飞行器在大气环境中降速时，机体前端由于空气的压力和摩擦所产生的热量尤其大，往往还需要配备额外的热防护层；

- 第三，是电子元器件自身发热。所有电子元器件都有一定的内部耗散功率，如果导热和散热设计不良，特别是在高空飞行的空气稀薄的环境

境，设备内部的温升过高，将会导致非常严重的可靠性问题。

面对飞机上的热源和高温环境，为了保护其电子元器件，传统的做法是在布置电子设备时尽量规避高温区，或外加热防护系统，如配备环境控制系统（Environment Control System, ECS）。例如，在早期的集中式 FADEC 系统中，发动机周边的传感器信号，被用屏蔽电缆馈送到远端的中央处理机处，而中央处理机一般安装在有空调或冷却装置控制温度的舱室中。当所有的传感和执行信号都必须送到一个中央处理机进行集中处理时，飞机上就要布设复杂、庞大的线束，既占用飞机的宝贵体积，也增加了飞机的重量，并带来了更多的可靠性、安全性问题。

在某些受限的情况下，温度问题就成了设计瓶颈。例如，飞机的武器系统通常被安放或挂载于机翼和机体下方，其电子控制装置通常已经没有空间去配备冷却系统了；即便有些情况下可以配置冷却装置，铺设的液体管道和线束，也会带来复杂的可靠性问题。

对技术平衡点的选择历来是工程设计中的一个复杂的综合考虑过程。目前，基于传统体硅半导体性能，航空应用一般将环境温度极限标准定格在最高 110°C，而最高结温为 125°C 以下，实际上，现在许多航空应用将结温控制在约 60°C 左右，主要原因受限于体硅半导体器件的性能。要维护电子元器件的限制温度对飞机是很大的负担，尤其是在空间受限的机翼区域则更加困难。冷却系统通常需要占用飞机重量的 10%（功率约 50KW），严重影响飞机的整体性能。如果能将壳体允许最高温度仅提升至 150°C，并适当提高结温的控制温度点，也许有一些位置的冷却装置和环境控制系统就不再需要了。这样一来，体积、重量、功耗和成本都可以节省。总之，电子元器件的耐高温性能对飞机整体性能的提高有着很大的影响。

在实际设计应用系统的时候，人们总是会受到材料的限制，而必须作相应的综合考虑和妥协以实现可接受的设计。也就是通过平衡材料和技术的极限，正如通过平衡机体材料的强度和重量，怀特兄弟能够实现他们首次飞行。之后人们通过不断地采用新材料和新技术，不断在新的平衡点实现新型的飞机设计，不断改进和创造出新型飞机。航空电子系统的作用也就是如此，它作为

现代飞机的重要部件，关系到飞机的发动机和飞行状态控制、通讯遥感和导航、武器系统（如火控、制导和电子对抗）等等。飞机的应用目标和环境对电子元器件有其特殊的要求，往往新型的电子元器件不仅能提升飞机的效率，而且还能促成实现全新的设计理念。因此，耐高温的电子元器件也一直为航空航天领域所重视。

从 1970 年代起，基于机械、液压驱动和混合模拟发动机控制的数字化、集中式 FADEC 已经走过了 60 多年，目前已经是各种飞机电子控制系统的标配。近年来该领域的发展转向了“分布式 FADEC”，这主要是因为：

- 飞机减重的要求。经典的 FADEC 要求需要通过笨重的屏蔽线束回传传感器信号，经过中央计算机的计算、处理，发布指令指示执行机构进行动作，这些传输需要复杂、昂贵、笨重的多芯线束和连接器，既占用了较大的体积和重量，也带来了更多的可靠性问题；先进的飞机越来越多的采用分布式 FADEC 以获得显著的改善。在分布式 FADEC 体系中，信号经常只需使用 4 线制的轻量线束传输（一对差分数字信号，一对电源和地线），大大简化了线束，消灭了传统航空接插件的绝大多数额外的引脚，既简化了防护，又显著的减少了接插件的数目和重量；

- 分布式控制要求传感器和执行机构，甚至其电源管理系统尽量分散且接近任务现场。例如，发动机信号测量需要紧邻发动机（环境温度高达 300-600°C），而机翼动作执行机构需要贴近目标机翼，等等。这些地方往往无法配备水冷机构，只能依赖风冷或机体背板自然冷却，因而需要电气系统具备耐高温特性；

另外，执行机构的电气化也使得分布式设计越来越容易达成，其系统响应速度远远高于传统的集中式系统架构。过去飞机的调姿转向等动作主要依靠液压或气动部件实现，这些部件依赖于精密机械配合，制造成本高、故障率高而可维性差；而电机驱动式的“固态”执行器，响应速度快，重量轻体积小，故障率低而可维性高；据估计，一体化的电机执行器响应时间仅为液压执行器的五分之一以下，同等驱动功率时的体积和重量仅为后者的三分之一以下。基于体积重量和可靠性的原因，飞机中的电机系统一般不允许再配备液体冷却机构，只能依靠风冷和背板自然冷却，因此其配备的电力电子的耐高温能力面临很大的挑战。

总之，飞机系统因自身高温环境（如发动机周边）传统上需要高温器件支持之外，近年来飞机系统的分布式控制设计趋势，和执行系统由液压和气压传动向电机传动转变的趋势，都在推动着对高温电子技术的新的需求。

高温电子技术的现状与发展

提高电子设备的最高工作温度等级需要面对颇多技术挑战。这些挑战涉及高温电子技术的各个方面，包括高温半导体芯片的设计、制造和封装，耐高温的被动元件，焊接和组装的材料和工艺，以及从芯片到模块、再到电路板，乃至系统级别的热设计和热管理等等。

高温电子技术的核心是高温半导体芯片技术。当环境温度升高到 150-200℃ 时，硅基的本征载流子浓度显著升高，不仅硅基衬底几乎完全导电，而且 PN 结势垒也接近消失，从而导致半导体的基本功能崩溃，几乎完全导电而沦为“导体”。因此，普通体硅半导体是不适合高温应用的。目前成熟且已实现大规模商业化的高温半导体芯片技术主要有两种，一是高温 SOI 技术，另一是宽禁带半导体技术（如 SiC 和 GaN）。前者适合于做高温集成电路器件，后者适合于做高温功率器件，两者是很好的互补。

- 高温 SOI 技术

SOI 是一种用于集成电路制造的新型原材料和工艺，有望替代目前大量应用的体硅工艺。如图 1 (a) 所示体硅 MOSFET 结构，相比之下，SOI 工艺在衬底结构中增加了一个绝缘体夹层，其上方一层为有源硅层，而下方的硅层只是起到支撑作用，如图 1 (b) 所示。该绝缘夹层可以由 SiO₂、氮化硅、Al₂O₃ 或其它绝缘材料构建，取决于具体的实现工艺。由于硅与 SiO₂ 的结合界面性能稳定，所以 SiO₂ 成为了目前常见的主流 SOI 绝缘层材料。SOI 结构中的 SiO₂ 绝缘层，有效地

减小了 MOSFET 漏极和源极的实际 PN 结面积，使得漏极和源极的反向泄漏电流大大降低，为高温性能的提升奠定了基础。另外，可通过工艺和材料的选择来加固其高温工作的可靠性。

SOI 独特的“Si/ 绝缘层 /Si” 三层结构，带来了诸多优势：首先，“绝缘埋层”实现了器件功能有源部分和衬底的全介质隔离，减小了寄生电容，开关频率得以提高；其次，由于较小的 PN 结面积，显著降低了泄漏电流，SOI 器件的自身耗散也减小了；再者，绝缘层的存在隔断了有源部分通过硅衬底而互通的电流通道，彻底消除了“闩锁” (Latch Up) 效应；另外，绝缘夹层结构抑制了硅衬底产生的脉冲电流干扰（如辐射粒子激发等），减少了偶发错误的产生，具有很好的抗辐射特性；最后，SOI 与现有体硅工艺设备、流程基本兼容（除少数高温 SOI 器件工艺需要特殊设备外），具备极佳的商业量产可实施性。

目前，基于 SOI (Silicon on Insulator, 绝缘层上硅) 的独特高温半导体技术，已全面突破了普通体硅半导体器件的温度困境，有效地消除了温度载流子效应对器件性能的影响。通过对 SOI 器件进行适当的构造和工艺设计，如尽可能减少源漏间结面积和耗尽区宽度，可大幅地减小了反向泄漏电流，极大地提升器件的各项高温性能；同时采用高激活能材料的金属系统，实施钝化膜保护工艺等等，可大幅地提高器件的高温可靠性；目前，基于 SOI 工艺的半导体器件，商业实现普遍做到了 225℃，部分研发实现了 300℃，少数前沿探索正在向 400℃ 的稳定实现演进。高温 SOI 技术已被广泛应用于石油钻探、航空航天、国防装备等尖端领域。

- SiC 和 GaN 器件的特性

作为“第三代”、“宽禁带”半导体材料，SiC 和 GaN 器件具有若干先天的优点，这些优点来自于对应材料的本质特性，参见图 2：

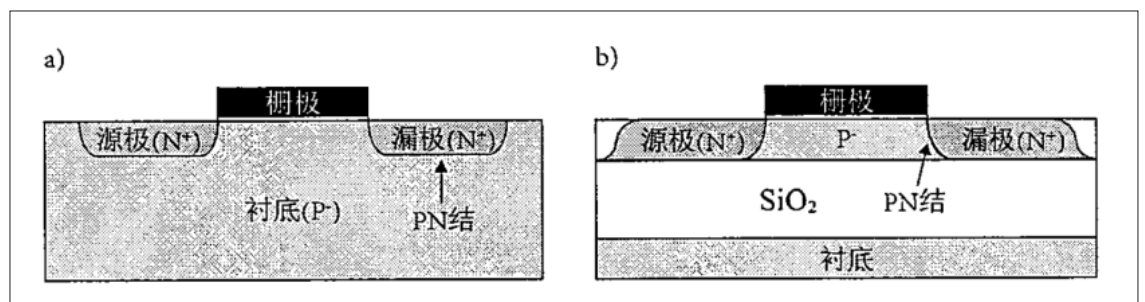


图 1：(a) N 沟道 MOSFET 体硅工艺；
(b) N 沟道 SOI 工艺

图2中可见，SiC和GaN新型半导体材料几乎在每个基础指标上都显著超越了体硅，特别是SiC材料，在热导率、熔点方面的效能，几乎为体硅的2.5~3倍。很宽的禁带宽度使得SiC和GaN天生就比体硅器件更耐高温；从现有产品的额定结温来看，基于体硅的半导体器件，例如军品级，一般都标注为最高结温125℃，而普通的SiC和GaN器件，多数都标注为175℃，少数标注为200℃；其实，SiC和GaN器件可工作温区远不止于此，其管芯本身可在500℃甚至更高温度下长期稳定地工作；而目前175℃、200℃的额定温度，是受到封装技术及应用成本的限制。随着业界高温封装产业能力的提升，更高温度等级的SiC和GaN器件将很快得到普及。

- CISSOID 的 SiC MOSFET IPM

高温SOI器件已经获得了完全的商业化生产和供应。以CISSOID公司为例，其从事高温SOI器件的设计和制造，已有20多年历史；目前已能提供10多个种类100多个型号的高温SOI器件，包括二极管、MOSFETs、电压参考器、电压调节器、PWM控制器、栅极驱动器、模数转换器、比较器、运算放大器、逻辑器件、时钟发生器和计时器等等。根据封装形式的不同，分为两大系列：CMT系列为高温塑胶材质封装，最高结温为175℃；而CHT系列则为金属陶瓷封装，最高结温为225℃。综合平衡管芯和封装的设计和现有产业化工艺条件，目前CISSOID所提供的高温SOI器件的高温工作寿命可达约15年（最高结温175℃），或约5.5年（最高结温225℃），又或约2.5年（最高结温250℃），以及约1.3年（最高结温280℃）；其规律是，近乎于温度每升高25℃，器件寿命将约减少一半；在300℃以上时，其SOI器件也还有几千小时的工作寿命。

另一方面，近年新兴的宽禁带化合物半导体（SiC、GaN等），天生具有卓越的高温性能，其工作温度已被实验证明可达500℃甚至更高，而以SiC器件的高温性能最为杰出。近期，SiC的商业化进展程度也表现尤为突出，由电动汽车应用的大量需求所推动，SiC器件已经开始了大规模量产和全面普及，必然在电力电子应用的各个领域逐步替代传统的体硅IGBT功率器件。

SiC功率器件高温应用的高温封装技术也在加速演进。为了配合这一发展的整体趋势，

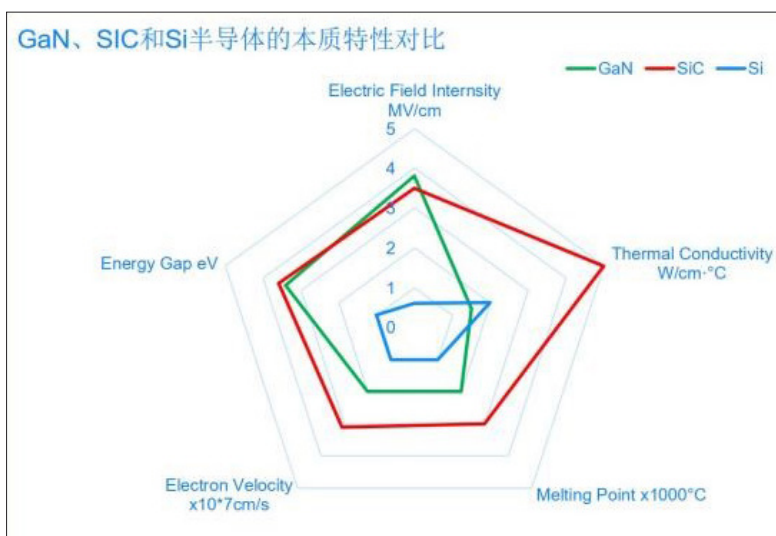


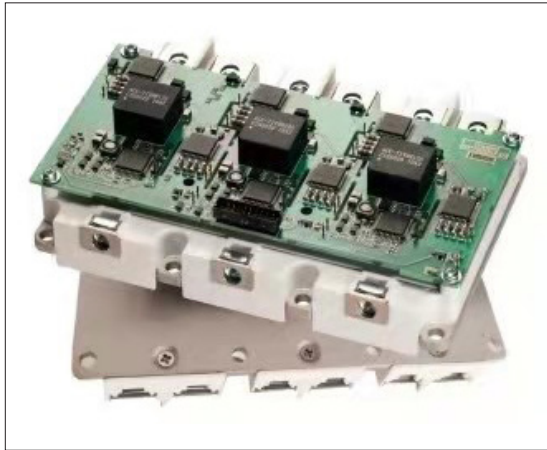
图2: SiC、GaN和体硅的本质特性之比较。

CISSOID公司利用其高温SOI的技术优势，开发了专为降低开关损耗并提高功率密度、风冷型三相全桥碳化硅SiC MOSFET智能功率模块(IPM)技术平台系列(图3)。针对航空航天领域的风冷应用，部分IPM采用了平面基板，可以方便地结合到散热器或框架结构上。该IPM技术平台可迅速调配以适应不同的电压、功率档级，极大地加速了基于SiC的功率转换器的设计，实现更高效率和更高功率密度。

智能功率模块(IPM)意味着功率模块和栅极驱动器的集成。功率模块和栅极驱动器的协同设计能够通过仔细调节dv/dt和控制快速开关固有的电压过冲来优化IPM，以实现最低开关能量损耗。CISSOID的栅极驱动器是基于高温SOI半导体技术开发的，具有独特的耐高温稳定性，可与耗散数百瓦的功率组件紧密集成。这样，有助于减少栅极环路寄生电感，实现快速开关和降低开关损耗，并避免寄生导通的风险。CISSOID的栅极驱动器配有负驱动和有源米勒钳位(AMC)、去饱和检测(DeSAT)、软关断(SSD)等保护保护机制，还有欠压锁定(UVLO)、DC总线电压监视系统及模块内部的温度监控等。通过提供匹配的整合的方案，CISSOID的IPM平台使客户能够大大加快他们的系统设计。

CISSOID的高温SOI半导体芯片技术，是高温功率风冷IPM模块成为可能的前提(型号:CMT-PLA3SB340AA和CMT-PLA3SB340CA)；这些型号是专为无法使用液体冷却，例如航空机电执行器和功率转换器的高温应用而设计的。这些型号的额定阻断电压为1200V，最大连续电流为340A；导通电阻仅有3.25mΩ和2.67mΩ，标称

图3：带有平面底板的 SiC 智能功率模块



开关损耗则仅为 8.42mJ 和 7.05mJ (在 600 V/300A 条件下)。该功率模块的额定结温为 175℃，栅极驱动器的额定环境温度为 125℃，通过 AISiC 扁平底板冷却，热阻较低、耐热性强。另外，依据应用条件和场景的需求，通过更换更高等级的被动元器件和主要芯片及模块的封装，CISSOID 的 IPM 还可以进一步提升运行温度等级。此外，CISSOID 也正在开发单相和两相的 IPM 模块，以便于灵活地组合成不同的电力拓扑结构来针对各种不同的应用。

航空领域的典型应用

- 分布式执行控制系统和配电方式

参考前文，目前先进飞机的设计越来越多地趋于采用分布式设计。分布式系统可以就地收集发动机状态，及飞机体内和蒙皮的各种传感器信号，通过数字化等处理后，经由统一的数据总线传送给主机。就地处理意味着传感器和执行器更为接近前端现场，而那些位置通常无法配备冷却系统。

因此，分布式系统更需要耐高温的传感控制驱动单元，这往往需要耐温 200℃ 以上的电子元器件，及同等温度等级的连接器、线缆等辅助材料。首先采用高温电子元器件将传感模拟信号数字化，例如有关发动机运行状态的温度、压力、燃料供给和效率等等，都需要前端采集模拟传感信号并数字化后经过数字总线上传；反之，经过中央控制器计算下达的动作指令，也通过数字总线传输到位于前端现场的执行部件。

分布式系统的益处：第一，通过数字化传输简化了飞机线束，减少了大量笨重的屏蔽线缆馈线；第二，显著减少了各部件之间的连接器数目，在减重的同时也提高可靠性；第三，控制单元分

散布局，相比集中控制，提高了飞机的生存能力；第四，减少或消除了诸多水冷装置，能够大大地减少体积和重量。

类似于执行控制系统的分布式，飞机配电也趋向采用分布式，即飞机上除了一个电源中心外，还有若干个分中心，每个电源分中心由电源二次分配组件 SPDA (Secondary Power Distribution Assembly) 和远程电源分配组件 RPDU (Remote Power Distribution Unit) 进行控制。这种配电方式的控制设备和控制逻辑会较为复杂，但大大减轻了配电导线的重量，且因负载端接近不同的电源中心，其负载电压也容易保持稳定。然而，负载端也许不具备很好的冷却环境，这样就需要其电力电子有很好的耐高温能力。

- 多电飞机的电机驱动和电源变换器

传统飞机的舵面、翼面等姿态操控，都是由液压和气压驱动的机械装置完成的；此外，在发动机转向喷口及发动机反推动作控制，以及舱门、起落架、刹车及地面转向驾驶等处，也还大量地使用了液压或气压部件。液压和气压装置的弱点在于其密封，由于采用流体或气体传递压力，因而传递效率较低，故障率高，且不适合远距离传动；仅以液压为例，液压系统对油温变化较为敏感，运动部件的速度不易保持稳定；液压系统的体积和重量庞大，受环境影响很大并且维护成本很高。目前，新型设计已趋向于部分或全部地实现电气化，用电机驱动替代机械式的液压和气压执行机构，此即多电飞机的概念。

电机驱动全固态化，响应快，并且可靠性高、可维护性强，方便冗余备份设计；电机驱动还可以大大减小部件的体积和重量，这对飞机本身尤为重要。另外，电气化也使分布式执行控制更容易实现。

然而，多电飞机上的电机和电控一般不充许再配备液冷，只能依靠强制风冷和背板散热器冷却；旧式的飞机可以利用液压油路系统兼职冷却，而现在改为电驱动执行部件，消除了液压体系，如果再专门配置液冷系统来保证散热，那就是走回头路、做无用功了。因此，实现多电或全电飞机的电控设计，第一个面对的技术挑战就是功率和驱动电路的耐高温设计；耐高温 SOI 驱动器件和电路匹配以碳化硅功率模块，为解决这一航空领域的技术难题铺平了道路。

除电机驱动外，多电飞机对电力电子变换器也提出了新的要求。多电飞机的主要电源采用变频交流电源或高压直流电源，容量可高达几十乃至几百 KW 级，用电设备大幅度增加，因此需要各种不同类型的电力电子变换器进行电能变换，包括 AC/DC、DC/DC、DC/AC、AC/AC 和 固态开关等。基于 Si 的传统电力电子器件已不再能满足多电飞机对高温、高效率、高功率密度及高可靠性的要求。因此，耐高温 SOI 及碳化硅器件融合的智能功率模块，就成为了多电飞机电源变换器的首选。

- 电动飞机

电动飞机 (Electric aircraft) 是依靠电动机飞行的飞机，其使用的电力来自蓄电池、燃料电池、太阳能电池、超级电容器、无线能量传输，或其它种类等；鉴于电动飞机减重需求压力很大，一般无法接纳体积和重量庞大的液体冷却系统和液压或气压传动系统，一般也只有风冷散热条件，

此时，电机驱动总成的热管理就面临着很大的挑战。在此，耐高温 SOI 及碳化硅器件融合的智能功率模块，又成为不二的解决方案。

类似于电动汽车，受到电池容量的限制，电动飞机也有里程焦虑，因而追求最高的能源效率，以实现最大的续航里程，因此也趋向于从体硅 IGBT 器件，转向基于 SiC/GaN 功率器件来构建电源和电控系统。如此，不仅能获得更高的能源转换效率，还能耐受更高的温升。

结语

高温 SOI 技术通过器件结构的改进，突破了体硅器件的温度困境；采用改良的金属化系统和高温加固工艺，大大提高了器件的高温可靠性。随着第三代半导体功率器件的日趋成熟和普及，其固有的高温性能与高温 SOI 集成电路形成了非常理想的搭配。由此，为飞机系统设计工程师打开了一扇新的窗口，为全面实现分布式设计和电气化设计，奠定了基础。

上接第 16 页

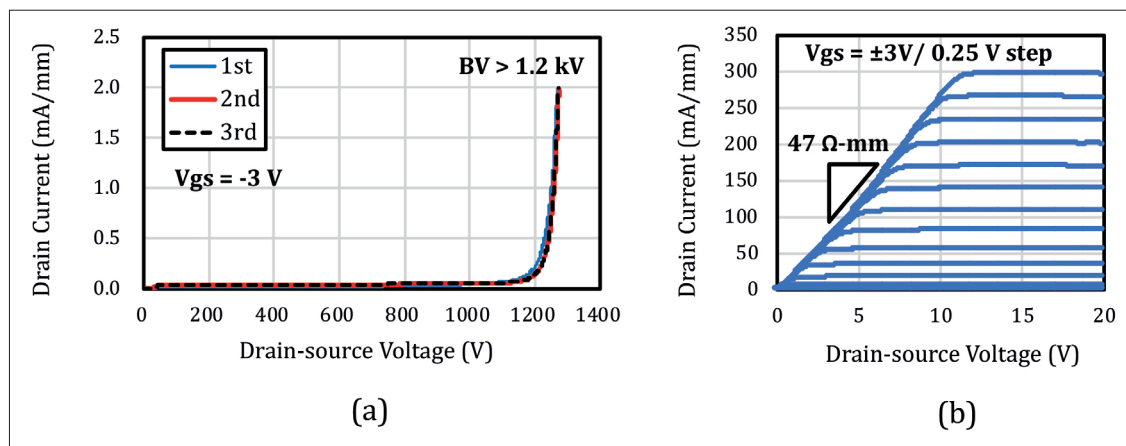


图6. (a)所制造的复合 HEMT 的实测关断状态下的击穿特性。重复的电流电压 (I-V) 扫描曲线高达 2 mA/mm，显示出对雪崩电流压力具有很高的稳定性。(b) 通态特性。由于电流流经低电阻的 2DEG，测得了 47 Ω mm 的低导通电阻和 300 mA/mm 的高饱和电流。

其它的结合

我们的复合 HEMT 具有很大的潜力，在正向和反向偏压下都有很好的特性，并且有很好的热管理特性。对于一个仍处于起步阶段的器件来说，这些都是非常令人鼓舞的迹象，在优化器件结构和制造工艺方面还有很多机会。我们下一步的目标是展示大面积的器件，额定电流为 10A 或更大，可用于实际的功率转换器中。我们还将通过与在功率器件方面有技术专长的公司合作，努力使这项技术商业化。

我们的工作是利用比硅的带隙宽得多的宽带隙材料开发功率器件，属于全球努力的一部分。

SiC 和 GaN 器件现在已经商业化，而那些具有更大带隙的材料，如很有前景的 Ga₂O₃、AlN 和金刚石，正在吸引人们的注意。在这三者中，金刚石由于其极高的击穿场强和超强的热导率，有可能成为终极半导体。然而，不同半导体的异质集成可能提供新的、非常规的机会。

我们的复合 HEMT 突出了复合器件如何能够提供单一材料所无法提供的优良性能。相信仍有许多组合可供探索，为新的器件概念打开了大门。我们的目标是研究这种方法带来的可能性，以及它如何释放新一代功率器件极限。

氧化镓晶体生长方法的选择

两种用于生产 β - Ga_2O_3 的最常用技术——提拉法和导模法的优缺点是什么？

作者：Jani JESENOVEC 和 John McCloy, 华盛顿州立大学

超宽带隙材料，如 Ga_2O_3 、AlN 和金刚石，具有非常高的本征击穿电场，这使它们成为处理高功率的特殊候选者。

在这一半导体家族中，人们对 Ga_2O_3 的兴趣呈指数级增长。它不仅在减少能量损耗的小体积高转化效率的功率开关器件方面有巨大潜力，还可以制造日盲深紫外光探测器。

对于各种 Ga_2O_3 器件的开发商来说，一个关

键的因素是选择晶体的晶型。 Ga_2O_3 有许多可供选择的晶型，但最重要的是 β - Ga_2O_3 ，它是室温稳定相，并且最有希望的特点之一是可以与氧化铝合金化，以增加带隙并将透射窗推向更短波长的紫外光。

深入理解 β - Ga_2O_3 本征性质的必须基于高质量材料的生长。这可以是体单晶，也可以是通过多种方法所生长的薄膜的形式。目前，可以用 MOCVD、HVPE 和 MBE 等方法制备高质量的 β - Ga_2O_3 单晶薄膜。

与其他超宽带隙材料不同，体 β - Ga_2O_3 的优点之一是，它可以通过熔体法来生长，如使用直拉法晶体生长技术进行生长，这种技术多年来一直用于制造硅单晶。 β - Ga_2O_3 也可以通过导模法来生长，这是一种目前用于商业生产 β - Ga_2O_3 的主流技术。此外，还有其他方法生长 β - Ga_2O_3 ，如垂直布里奇曼法和光学浮区法。

在本文的其余部分，我们将回顾使用更常见的生长方法所取得的进展，并详细介绍通过分析和对比不同生长方法的晶体物性。在本文中，我们将简要介绍来自华盛顿州立大学材料研究所的团队在该领域的进展与贡献。

在我们提到的晶体生长技术中，两种主要的方法 -- 直拉法和导模法，有许多共同之处。它们都涉及从熔融的 Ga_2O_3 中生长体单晶， Ga_2O_3 被放置在 1800 摄氏度以上的 Ir 金属坩埚中。 Ga_2O_3 生长通过提拉法倾向于生长成圆柱形的晶锭，而导模法涉及到使用 Ir 毛细管效应，它可以将材料拉成所需的自定义形状。

德国莱布尼茨晶体生长研究所的一个团队开创了用提拉法生产 β - Ga_2O_3 的先河。该研究所俗称 IKZ，已取得了显著成功，在许多出版物和多项专利中都有详细介绍。



图片来源：杰弗里·德森

Novel Crystal Technologies (NCT) 以通过导模法产生 β - Ga_2O_3 而闻名。该公司生产和销售掺杂或不掺杂 β - Ga_2O_3 衬底，他们声称这种技术生产的晶体比提拉法更优越，因为它有潜力生产大尺寸晶圆。然而，导模法晶体通常是薄片状的，因此，总体积是低于直拉法相关的体积，直拉法具有大规模生产大圆柱形单晶的潜力。

深入研究掺杂

对于所有半导体来说，纯度至关重要。当晶体中低浓度的其他原子或缺陷增加时，这会强烈影响整体晶体性质。对于 β - Ga_2O_3 ，可以通过掺杂，即故意用其他元素取代镓位上的镓原子，可以诱导各种光学或电学现象；此外，未掺杂的 β - Ga_2O_3 有可能被杂质所污染的威胁。所有方法产生的 β - Ga_2O_3 中的常见杂质包括硅、铁和铬；当这种氧化物的晶体通过提拉法或导模法生长时，铍也会引入。金属杂质往往来自合成中使用的前驱粉末，或来自坩埚，它们在高温下会污染熔体。因此，未掺杂的 β - Ga_2O_3 被称为“非故意掺杂”材料，这包含大量的背景杂质，能作为掺杂剂诱发导电。

β - Ga_2O_3 的故意掺杂是一个正在进行大量研究的课题，它提供了对这种氧化物电子行为的控制。通过掺杂硅、锗、锡、铅或铪等元素，可以形成 n 型半导体，即电子传导机制。如果需要电绝缘性能，可以选择合适的掺杂剂包括铁、镁、锌、镍和铜。事实证明，实现 p 型导电要棘手得多。一些退火实验表明，由于氢的相互作用，可能会实现终端的 p 型导电行为，但在生长的体单晶中没有观察到这种行为。也许这并不奇怪，因为这种困难在另一种透明半导体 ZnO 中早已存在。就 ZnO 而言，也正是这一弱点最终限制了该材料的应用。

华盛顿州立大学材料研究所在掺铜的 β - Ga_2O_3 中展示了一种可能会引起众人兴趣的特性 -- 光变暗。罕见的是，这种新颖的效应在铜掺杂的 β - Ga_2O_3 中长期存在，紫外线激发导致室温保存的样品变暗并保持数周的状态（见图 2）。请注意，加热会加速这种变暗的逆转。

生长的困难

β - Ga_2O_3 晶体生长所取得的进展使研究人员能够获得衬底，在衬底上沉积薄膜，并制备器件。但这并不意味着在晶体生长方面不需要进一步的

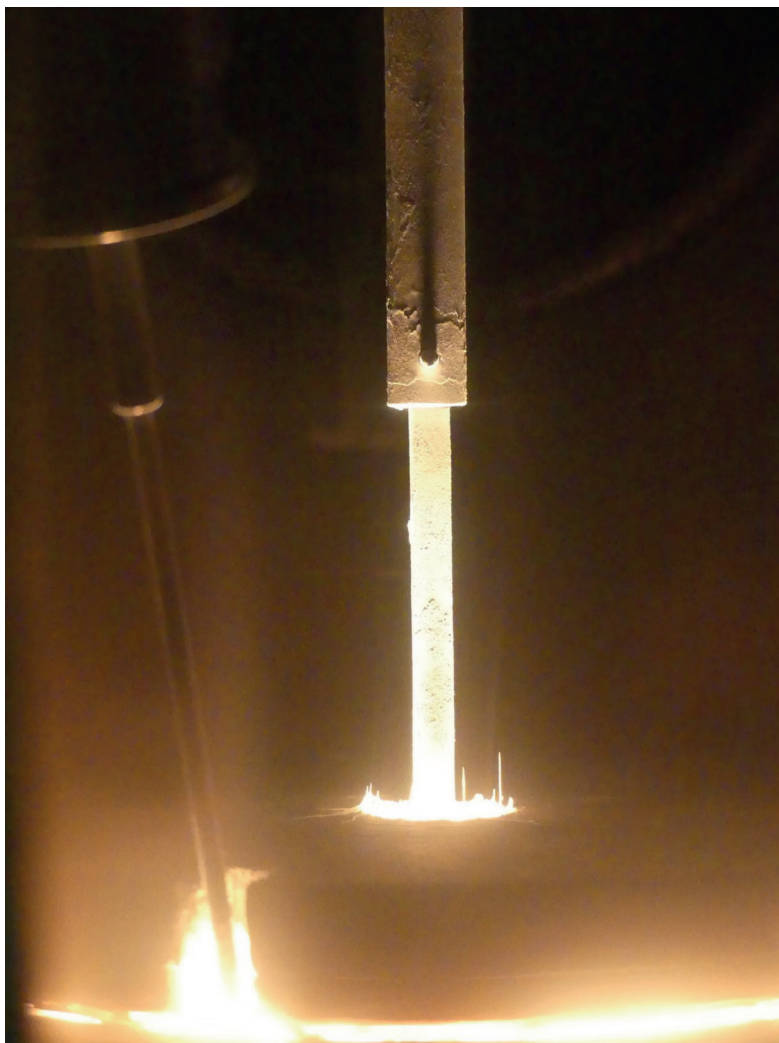


图1：保温层和生长室的外观图，用籽晶棒（中间）将氧化镓从熔体中拉出，同时用移动式高温计（左侧）监测温度。

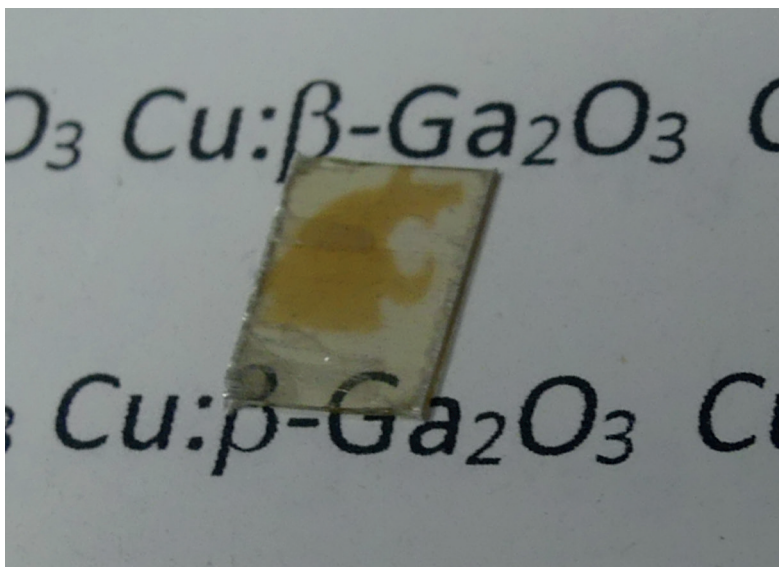


图2：华盛顿州立大学（Washington State University）的美洲狮头标志通过掩模用275nm LED在铜掺杂的样品上进行了光刻，并在那里保持了数周，然后逐渐恢复到原来的均匀颜色。

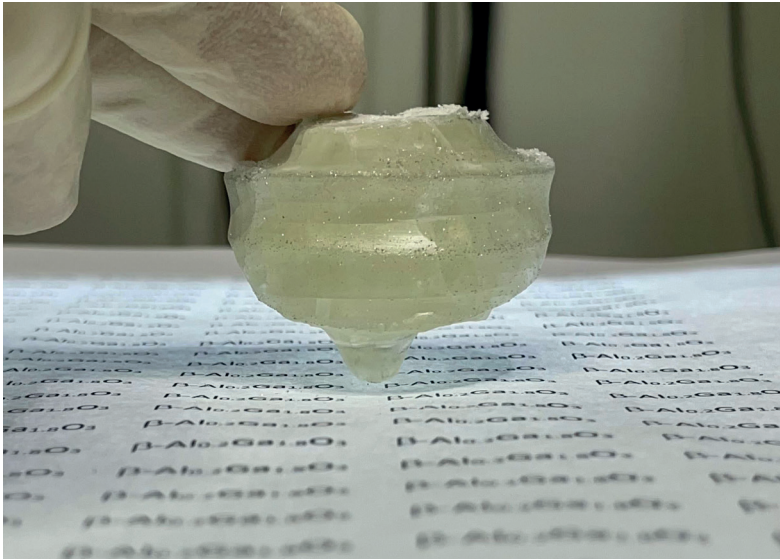


图3: 氧化镓的提拉法, 与氧化铝合金化以增加带隙。

进展。目前, 生长 β -Ga₂O₃ 非常昂贵, 部分原因是 Ir 成本非常高, 用这种金属制成的坩埚重达 0.5 公斤以上。

棘手的问题是 β -Ga₂O₃ 的分解。当这种氧化物接近其熔化温度时, 它往往会蒸发。为了抑制这种物质的损失, 生长室中需要有一个局部的氧气环境。然而, 这一措施又引入了其他问题 -- Ir 氧化和尾气, 就是在生长温度下, 因氧气氛围使得 Ir 在氧化镓熔体中变得可溶。因此, 在每次生长过程中仅仅通过蒸发就会损失许多昂贵的铱金属。

通过转向其他生长方法, 可能会取得不同进展。如垂直布里奇曼技术, 就有可能使用铂 - 铍合金坩埚。生长其他半导体材料的一个流行选择是钼坩埚, 但不太适合氧化镓, 因为 β -Ga₂O₃ 的快速分解会氧化并破坏钼坩埚。

IKZ 团队继续在提拉法上取得进展, 包括将材料尺寸增加到最大直径为 5 厘米, 长度为 6-8 厘米。他们和其他试图使用这种生长方法的人面临的一个共同问题是, 掺杂剂缺乏稳定性。添加诸如硅、锆、钨和锡等元素 (添加这些元素是为了诱导导电性) 会导致红外辐射的吸收, 这与过量的电子有关。

由于 β -Ga₂O₃ 的热导率相对较低, 这种吸收是其在生长过程中保持大量热量的原因。这是不利的, 因为晶体生长依赖于坩埚中液态材料的熔点和被拉出的晶体的温度之差来调控温度梯度。由于与自由载流子吸收相关的近红外吸收, 熔体 - 晶体界面可能变得不稳定, 形成开塞螺旋形状,

而不是典型的圆柱体。当材料动态地形成能够散热的几何形状时, 开塞螺旋就出现了。为了防止这种情况的发生, 与绝缘或未掺杂的, 即没有自由载流子吸收的晶体相比, 用提拉法生长的掺杂 β -Ga₂O₃ 晶体的长度就必然受到限制。

目前已经采用了几种策略来抑制导电 β -Ga₂O₃ 的螺旋生长。通过使用铝合金化, 我们提高了晶体稳定性 (见图 3)。从通过直拉法生长的晶体获得的衬底通常是 (100) 取向的。然而, 也可以生长抛光的 (010) 和 (001) 取向的样品。由于 β -Ga₂O₃ 的不对称单斜晶体结构, 这些不同晶体学取向具有很高的价值, 因为不同晶体取向具有不同的电子和光学物性。

通过导模法, 更容易生长导电型的 β -Ga₂O₃。这是因为当晶体被拉升时, Ir 毛细管迫使其保持特定的形状。NCT 将此技术应用于掺锡 β -Ga₂O₃ 的商业化生产。通过此法生产的材料倾向于具有与直拉单晶相似的取向。然而, 得益于这种生长技术的特点, (201) 方向也可通过导模法生长获得, 但 (201) 方向通过直拉法却更难获得。(201) 取向具有一些技术挑战, 晶体学孪晶是在导模法生长中容易形成的。但这些孪晶在直拉法中并不常见。

用于表征的手段

在科学界内, 人们一直致力于表征 β -Ga₂O₃, 研究人员对这种氧化物进行了电学、光学、结构甚至磁学的测量。高分辨率 X 射线衍射摇摆曲线广泛用于分析单晶 β -Ga₂O₃ 的结构, 其结果作为商业晶片规格的质量证明。这些测量通常考虑晶格 (400) 或 (600) 的反射, 以确定材料中是否存在任何不对称或晶面的弯曲。如果这些特征出现在测试曲线中, 则表明材料存在晶界或孪晶, 以及较差的表面质量。对于单晶片和衬底, 衍射峰的半高宽在 20 到 150 arcsec 之间。

需要用其他方法来发现点缺陷、夹杂物和不均匀性。一种常用的工具是扫描电子显微镜或透射电子显微镜, 它可以用来研究样品的原子结构, 定位点缺陷, 并分析夹杂物和均质性。

与许多其他半导体材料一样, 在体单晶上生长薄膜之前, 研究其表面粗糙度的常用方法是原子力显微镜。这项技术对于评估抛光、化学蚀刻和退火对表面粗糙度的影响非常有用。

能够确定 β -Ga₂O₃ 中的材料杂质是至关重要

的，因为除了导致绝缘或 n 型导电行为外，这些添加物还会导致发光 -- 铬和镁就是这种情况。幸运的是，许多技术可以发现杂质，包括质谱和一些光学发射光谱技术，如：辉光放电质谱；电感耦合等离子体质谱法；二次离子质谱分析；还有激光烧蚀，电感耦合等离子体质谱法。

后者对于研究 β -Ga₂O₃ 掺杂和包裹体的空间差异是非常有用的。这种光学技术涉及将激光聚焦在样品表面，光束宽度通常约为 10 μ m。由于入射辐射的高强度，激光束烧蚀或穿透样品表面。在离子被电磁分离并由探测器逐个计数之前，烧蚀材料形成极热的等离子体。

这种基于激光的技术与常用的替代方法二次离子质谱法相比具有明显优势，二次离子光谱法需要在被测基质中使用昂贵的校准标样。激光的使用可以实现样品的快速水平、垂直和图形化测量，可以采样和识别夹杂物，并且能够检测掺杂梯度。它的另一个优点是，它可以提供定量数据，使用简单的地质标准将计数率转换为每立方厘米的原子数。即使没有标准，该技术也可以提供计数的定性评估，这对于确定夹杂物的位置及其组分仍然有用。

研究 β -Ga₂O₃ 的两种互补技术是拉曼显微镜和光致发光。两者都提供了与掺杂剂和合金化相关的检测，并促进了对不均匀材料的深入分析。拉曼显微镜揭示的其他信息包括包裹体相的局部振动分析，由于合金化而引起的晶格变化的识别，以及有助于确定晶体取向。

通过光致发光的光发射可以用一些激光激发拉曼系统来获得，或者用专用系统来获得。检测发光有很大的价值，因为它可以用来识别一些杂质和掺杂。铬是红宝石激光晶体中的活性元素，在绝缘 β -Ga₂O₃ 晶体中起着非常明亮的发射体的作用；额外的镁的存在可以将铬的发光从红色转变为橙色。

有机污染物和某些其他杂质，如稀土元素，也可以通过这些技术进行识别，这使得它们非常适合于各种不同方法生长的 β -Ga₂O₃ 晶体表面的比较。例如，在光学浮区法生长的样品中，铬的发光可能不那么强烈，因为它们可以不接触坩埚。但如果用提拉法或导模法生长的晶体，不论要用于何种用途，首先必须仔细分析它们的夹杂物。

在研究透明材料如 Ga₂O₃ 时，光学特性往往

采用从 UV 到 IR 的透射光谱法。这种方法使研究人员能够识别掺杂剂和杂质的吸收，并验证是否存在自由载流子吸收，这是表明 n 型导电的佐证。

对于确定 n 型或非故意掺杂的 β -Ga₂O₃ 的电学性质，使用霍尔效应测试是理想的选择，它提供了电子体浓度和迁移率的值。有了这些测试，人们可以评估材料的导电性。对于绝缘材料，载流子缺乏阻碍了霍尔效应的使用，因此最好使用其他方法来评估电阻率，如阻抗或电流 - 电压测量。

为了研究杂质、缺陷及其在超宽带隙中的能级位置，研究人员可以求助于电缺陷光谱技术，例如深能级瞬态光谱和热电效应光谱。还有热释光光谱法，允许对缺陷进行光学分析。

同时，当需要确定缺陷浓度如何随表面深度变化时，可以求助于正电子湮没光谱。该光谱学涉及将正电子注入表面 -- 它们与电子一起湮没，其特征取决于开放体积。揭示了关键信息，特别是与薄膜或体单晶中的镓空位形成有关的信息。

展望未来

在过去的十年里，在非故意掺杂和绝缘的 β -Ga₂O₃ 体单晶的生长方面取得了很大的进展。IKZ 的努力已经实现了提拉法生长更大、更高质量的晶体，NCT 使用导模法生长也已经取得了很大进展。这些技术现在已经足够成熟，可以提供具有产品质量 (production-quality) 的衬底，这可以为薄膜生长提供衬底，也可以用于其他应用。

然而，所有这些进展仍然不够。还需要做更多的工作，包括通过提拉法促进导电 β -Ga₂O₃ 的生长，以及解决与该技术产生的晶体长度相关的问题。学术研究正致力于新型掺杂剂和合金行为，许多机构和个人将材料推向新的应用领域，并发现有趣的现象。

一个关键问题是 p 型掺杂。令人担忧的是， β -Ga₂O₃ 将面临和氧化锌一样的问题，而氧化锌缺乏诱导 p 型导电的掺杂剂。如果是这样的话， β -Ga₂O₃ 也可能根本无法进行高迁移率空穴传导。然而，有充分的理由持谨慎乐观态度，因为一些实验显示退火诱导 p 型导电的成功率微乎其微。鉴于 β -Ga₂O₃ 的巨大前景，让我们期待未来进一步的成功。☞



将 microLED 与先进 CMOS 集成

将 300 mm 硅基 GaN LED 晶圆键合到相同尺寸的 CMOS 背板上，是生产 microLED 间距仅为几微米的显示器的最佳方法。

作者：SOREN STEUDEL,
MICLEDI MICRODISPLAYS

在过去五年左右的时间里，microLED 制造一直是显示器行业的热门话题。在 Display Week 等领先的显示器盛会中，它一直处于重要议程，重点是各种显示器的平板制造，尺寸范围从智能手表到手机和电视。对于这项技术，与 microLED 的巨量转移以及缺陷芯片的修复相关的挑战，阻碍了规模化生产的扩大。

当考虑将 microLED 用于微显示应用时，会面临一系列新问题，如增强现实（AR）眼镜。为该类型应用制作 microLED 显示模块的一种方法是将 microLED 和 CMOS-ASIC 背板集成起来，后者控制和驱动 microLED。该方法消除了与巨量转移相关的问题，但却遇到了一系列其他障碍。考虑一下这项技术的主要应用，即 AR 眼镜，需要亮度超过 1 Mnits，像素间距低于 3 μm 、分辨率高达 2K 以上、超低功耗和可接受的成本，所有这些都应在一个轻型模块中实现。

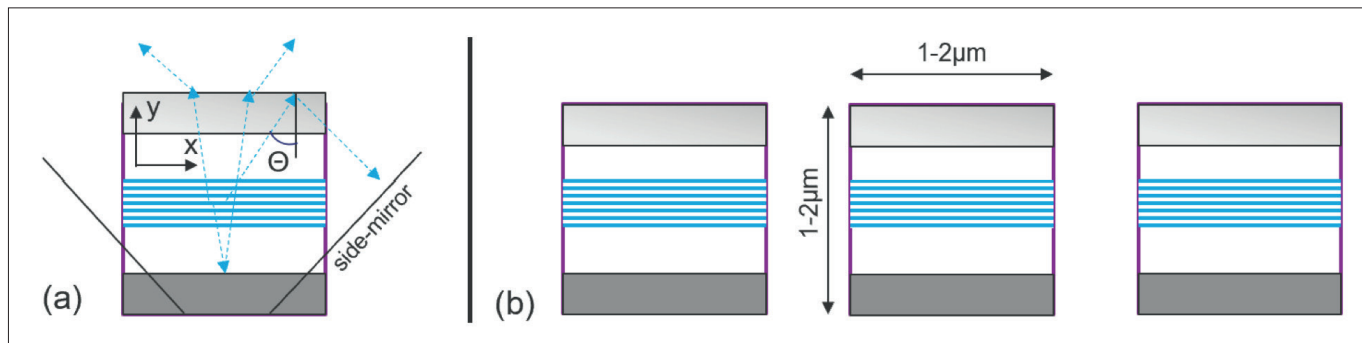
到目前为止，现有的微型显示器制造方法还不能满足所有这些规范，仍在努力中。中国上海的芯片制造商 JBD 已经推出了几款令人印象深刻的原型设计，并且正在交付适量的产品。然而，难以实现大批量生产。与此同时，比利

时鲁汶的 MICLEDI Microdisplays 公司，在解决限制 microLED 显示器亮度和分辨率的问题上取得了很大进展。为此，我们正在开发一种实现大批量、低成本制造所需的方法。请继续阅读，以了解我们所面临的挑战和我们引人注目的解决方案的细节。

亮度和效率

AR 眼镜的一个缺点是它们非常大的光学损耗。这种损耗的程度由实施情况决定，但通常只有不到 1% 的显示器发出的光子到达眼睛。由于这些惊人的损耗，显示器必须产生高达 1000 万尼特的白光，以支持户外使用高透明度眼镜。

microLED 显示器的竞争技术是类似 microOLED 的显示器，即使 OLED 的效率比 microLED 更好，在最佳情况下也可以实现 2 万尼特的绿色。法国市场分析机构 Yole Intelligence 对 2019 年最新技术的总结显示了 OLED (RGB 22%, 22%, 7%) 与 5 μm 的 microLED (RGB - 7%, 15%, 25%) 的效率数据。请注意，这些数字远远低于氮化镓 LED 的内部量子效率值，其典型值为蓝色 85%、绿色 60% 和红色不到 30%。



缩放尺寸下的效率损失主要是由于光外耦合，在较小程度上是由于台面侧壁缺陷导致的电损失，导致大量的非辐射复合和增加的漏电流。平面 LED 中的光外耦合受限于从高折射率化合物半导体材料到空气的内反射角度。这意味着，对于 GaN LED 来说，在忽略干扰效应的情况下，只有不到 10% 的光可以通过完美的背面镜提取。对于尺寸大于 100 μm 的大型 LED 来说，表面纹理采用非常好的背面镜。这使每个光子在不同的角度下都有多次输出的机会，从而使理论上的光提取效率达到 75%。表面纹理不是尺寸低于 5 μm 的 microLED 的解决方案，因为光子没有空间进行多次反射。

值得注意的是，Yole 提供的效率非常乐观，只适用于间隔很远的单个 LED。图 1 说明了这一点，该图考虑了不同的间距场景。在 microLED 中，通过透明的正面触点的直接发射非常低，通常低于 10%-- 但可以通过添加侧壁镜来提高提取率，该侧壁镜可以提取超过内部反射角度的光。然而，当将 microLED 封装在一起以确保更高的间距时，任何类型的侧壁镜都不太有效。由于这一障碍，

microLED 在极小的显示器中的外部量子效率预计将限制在不超过 8%，除非转向定向发射器架构。

因此，鉴于 microLED 效率低，这些器件仍然被视为 OLED 的可行替代品，因为它们具有非常出色的电流处理能力。由于能够维持比 OLED 高一千多倍的电流密度，这些基于 GaN 的器件可以提供目标亮度。

显示屏尺寸和分辨率

任何基于 microLED 的显示器都有两个问题：它所需要的尺寸是多少？什么分辨率是合适的？要回答这些问题，必须考虑人眼的能力。在绿色和蓝色光谱域中，人眼的角度分辨率为每度 60 像素。我们在考虑 AR 眼镜的目标视野时注意到了这个数字。正如人们所期望的那样，当增加视野或角度分辨率时，显示器中的像素数量必须增加（参见图 2，左）。在目前的一些商业头盔式 AR 中，系统支持全高清显示，但视场范围有限，只有 50°。从 5 μm 到 1 μm 的 microLED 的一个好处是，它们可以在相同的显示器尺寸下提供更大的视野（参见图 2，右）。

图1: 具有 (a) 小像素与 (b) 窄间距阵列的平面 microLED 中的光输出耦合。

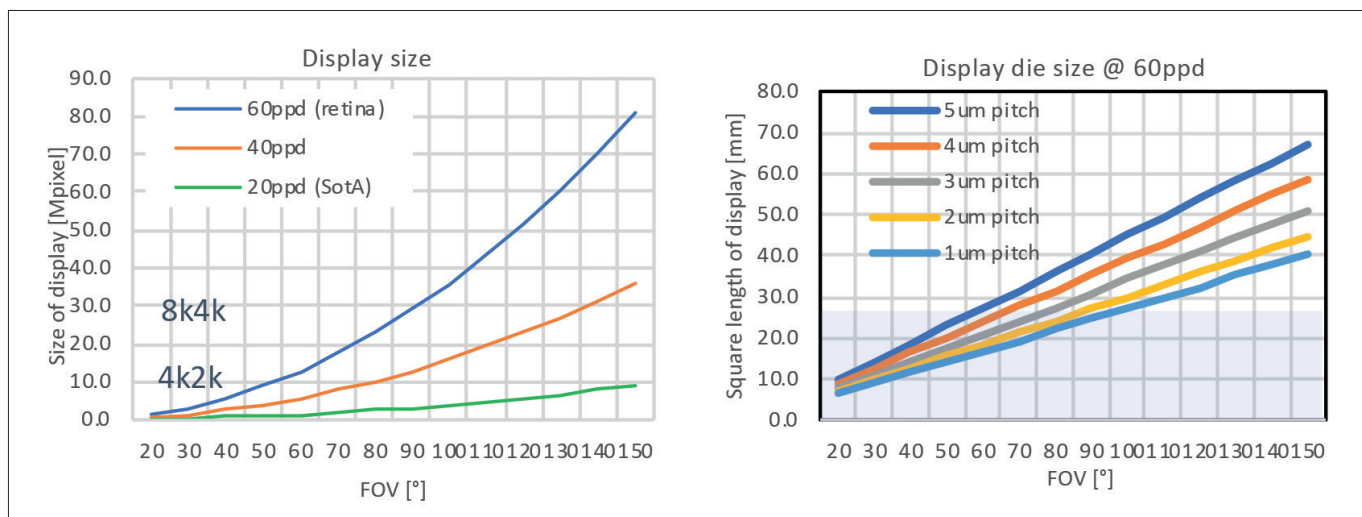


图2: (左) 不同角度分辨率下视场 (FOV) 与像素数的函数关系图(Mpixel指的是1个具有红-绿-蓝子像素的像素, 显示比例为1:1); (右) 不同子像素间距的芯片尺寸 (假设高级节点CMOS (<45nm), 具有帧缓冲区和16:9的显示比例)。

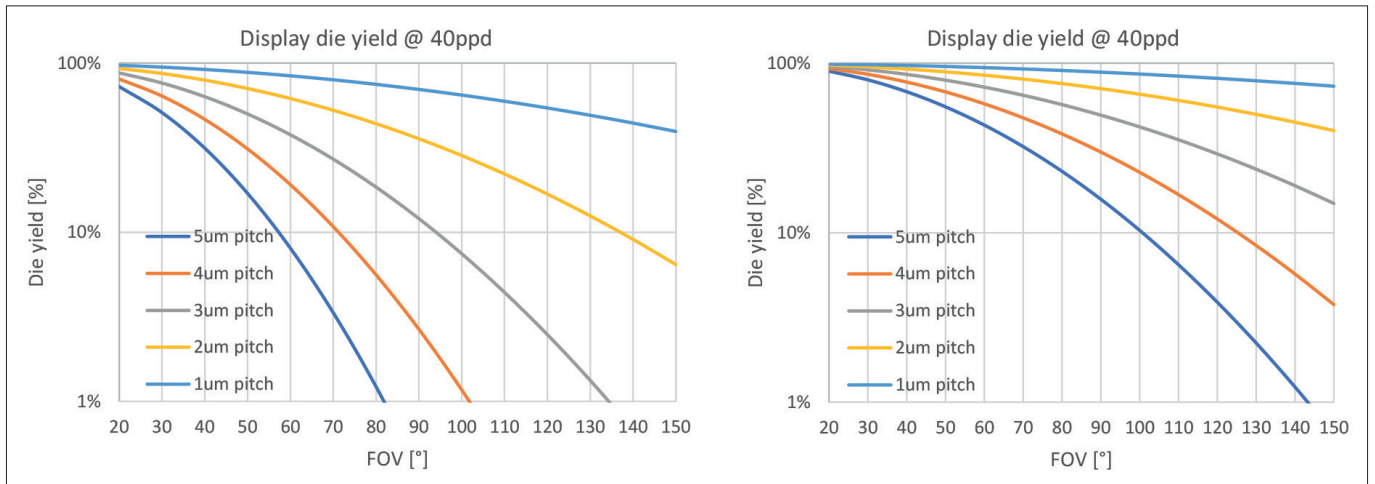


图3: 不同子像素间距的芯片成品率与视场 (FOV) 的关系。(左) 假设 RGB 逐像素; (右) 假设 RGB 逐晶粒。

尽管这种小型化水平很有吸引力, 但要想实现常规的成功却远非易事。即使是制造间距为 5 μm 的全高清显示屏, 也会接近曝光工具的视网膜尺寸极限。接近该极限的操作会影响可制造性和良率。

我们计算了不同间距对良率的影响。根据我们的制造良率模型 (参见图 3, 左) -- 假设红色、绿色和蓝色 microLED 并排集成 -- 即使目标分辨率降低到每度仅 40 像素, 也需要小于 3 μm 的间距才能超过 50% 的良率。

通过独立制造三种不同颜色的发射器, 然后将它们与光学组合器集成在一起, 可以显著放宽这些条件 (参见图 3, 右)。这就更接近于现有彩色显示技术的良率模型, 称为硅上序贯液晶显示器。

可制造性

可以采取多种方法来实现这种集成 (图 4 中总结了各种选项)。一种是晶粒到晶圆的转移, 通过一次转移和放置一个像素来创建红色、绿色和蓝色发射器阵列, 或者通过将整个阵列粘合为单个小芯片来实现。这两种晶粒到晶圆的转移都采用了钢凸点, 这种技术已经在红外成像仪的大规模生产中使用了 20 多年。晶粒到晶圆转移的另一个优势是, 它允许在标准的 CMOS 晶圆厂中制造 CMOS 背板, 而在化合物半导体晶圆厂中制造前板二极管阵列 -- 每个晶圆厂都根据特定的晶片尺寸定制, 并使用专用工具集。采用这种方法, 在出现明显的良率损失之前, 生产可以很好地扩展到 10 mm 的间距。还有其他类型的微凸点以及混合键合的晶粒到晶圆方法。

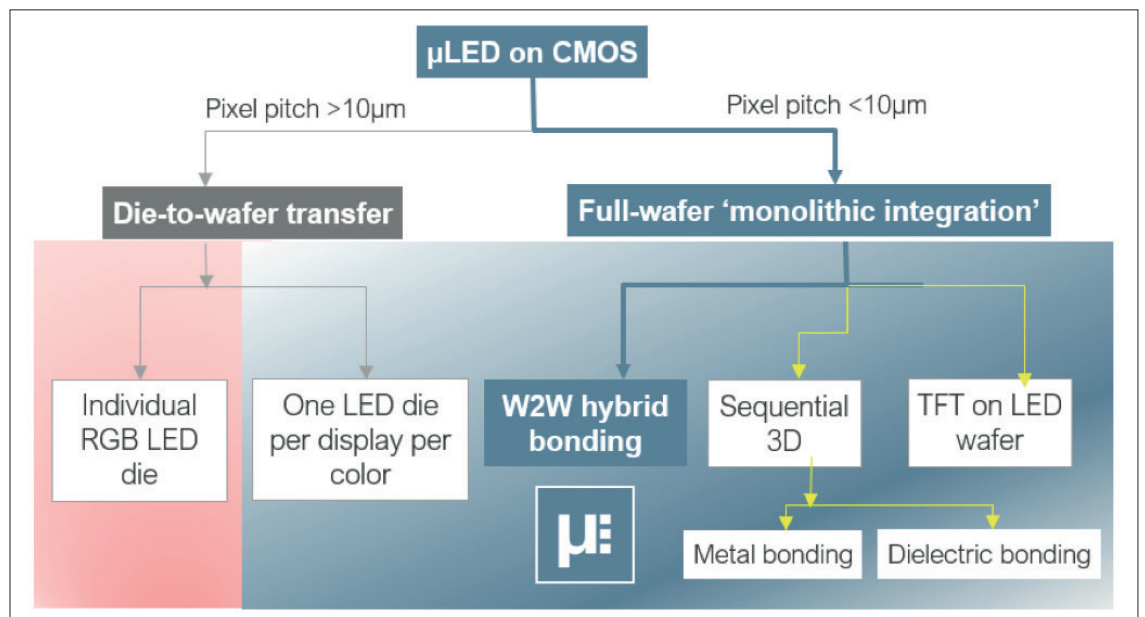


图4: microLED-CMOS集成方案概述。

对于军事和太空应用，已使用晶粒到晶圆键合生产间距低至 4 μm 的紫外和红外成像仪。

然而，良率非常低 -- 这对显示器行业来说是不可接受的。因此，对于 microLED 显示器，需要采用完整的晶圆到晶圆方法来达到 10 μm 间距以下并将 LED 与背板结合起来。如果要与顺序 3D 方法一起使用晶圆对晶圆的键合，那么 LED 阵列晶圆和 CMOS 晶圆必须具有相同的尺寸。这就带来了一个问题：与 OLED 显示器相比，microLED 需要更复杂的驱动和补偿方案，例如包含帧缓冲器，因此必须使用远低于 45 nm 的先进节点在 300 mm 晶圆上制作附带的硅电路。由于没有批量生产 300 mm 的化合物半导体外延片，目前的努力方向是将较大的 CMOS 晶圆尺寸调整为直径 100 mm 或 150 mm，从而导致昂贵的晶圆面积损失。混合键合的进展也因需要极端的表面平面性，以及非常低的晶圆弯曲度和通常低应力而受到阻碍。几乎所有通过异质外延沉积的化合物半导体堆栈都难以满足所有这些要求。

令人鼓舞的是，堆叠硅晶圆的生产工艺已经投入使用，将顺序 3D 结构与衬底通孔和晶圆到晶圆的混合键合相结合。后者通常用于生产间距小至 3 μm 的背面照明成像器，并用于研发部门，以间距小于 1 μm 的 300 mm 晶圆与小于 200 nm 的覆盖层结合起来。

显示器集成

我们公司是 imec 的子公司，于 2019 年推出，其使命是解决上述的可制造性和良率问题。在开发我们的显示器技术时，我们所做的决定遵循以下三个前提：我们的集成流程是在 300 mm 的生产设备上开发的，因此可以转移到 CMOS 代工厂；

在过去的十年中，几个研究小组已经将 microLED 的尺寸缩小到 1 μm 以下。然而，对于这些研究人员来说，考虑将 LED 像素与 CMOS 驱动电路（通常称为“背板” IC）集成通常只是事后考虑。

我们选择的材料尽可能与先进的 CMOS 晶圆厂的污染和废物管理协议兼容 -- 因此这意味着没有银、金或砷化镓；并且在制造其他产品时，尽可能采用既定的工艺步骤和模块，这些步骤和模块能够提供高良率。

考虑到这些要求，我们开发了一种 LED 集成工艺，该工艺与用于制造 3D 背面照明成像仪的工艺非常相似。然而，在我们的案例中，我们将硅光电二极管晶圆替换为填充有 GaN 二极管的晶圆（参见图 5）。我们通过从多家供应商采购同类最佳的商业外延片，克服了初始 GaN 材料的局限性，例如尺寸小、应力和弯曲度大以及颗粒密度高。在重新分布到空白硅晶片上之前，Epi 裸片被切割成最终显示器的尺寸，例如 4 mm x 6 mm 以实现全高清晰度。在去除外延生长衬底和缓冲层并对其进行平坦化处理，我们使用预先选择的已知良好外延芯片制作了直径为 300 mm 的无应力结构，从而只剩下 1.5 μm 厚的 GaN 堆叠，其特征是有一个有源区夹在掺杂层之间（见图 6 (a)）。从晶圆处理的角度来看，这种重组晶圆的行为类似于硅晶圆。

在 300 mm 的晶圆上加工出 3 μm 间距的

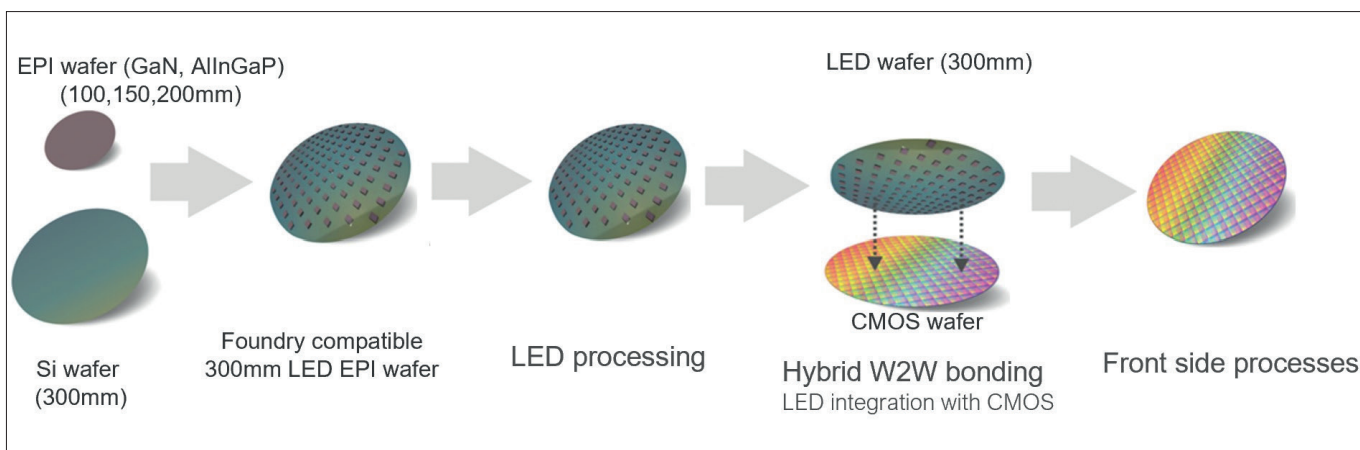


图5：从300 mm化合物半导体重构到二极管阵列与先进节点CMOS的混合键合的制造流程。

LED。随后的晶圆到晶圆的混合键合将该晶圆与 300 mm CMOS 背板 ASIC 晶圆结合在一起，其对准精度超过 250 nm。对于我们最初的工艺开发、器件表征和取样，我们使用了只有几层金属层的

硅晶片，将操作限制在对矩阵阵列的无源控制上（参见图 6 (d) 对 480 x 320 像素的无源阵列进行晶圆级测试；图 6 (c) 为封装裸片的图像；和图 6 (e) 为具有 3 μm 间距和 2 μm 台面的阵列的显微图像）。我们的下一步是用实际的 ASIC 来替换这些无源阵列。

使用这种集成方案，我们实现了高达 65% 的创纪录孔径，在 3 μm 的六角形间距配置中，孔径为 2.5 μm。这种大孔径是一个巨大的特性，对实现高亮度至关重要。首批下线的蓝色发光晶片在 5V 下的亮度为 60 万尼特。对于这些发射器，外部量子效率超过了 2%。

我们目前的方法是用光学组合器将红色、绿色、蓝色芯片的输出汇集在一起。这种方法的一个含义是，我们必须对所有三种形式的芯片使用相同的工艺流程。不出所料，最大的挑战是红色 LED。我们正在努力提高效率和色点。图 7 中可以看到由 200 mm 硅基 GaN 外延片形成的红色光源的第一个短路样品。

改进晶圆级光学器件为提高性能提供了另一种途径。通过增强对波导集成有用的顶角内的光输出耦合并抑制该角度外的光发射，应该可以将亮度提高 2 到 4 倍。在相对较短的时间内，我们已经证明，对于 5 μm 及以下的间距，转向将 300 mm microLED 晶圆键合到 CMOS 背板晶圆的单片方法有很多优点。通过与 imec 的合作伙伴合作，我们已经解决了与该工艺相关的挑战，现在我们开始将技术转让给我们的代工厂合作伙伴。

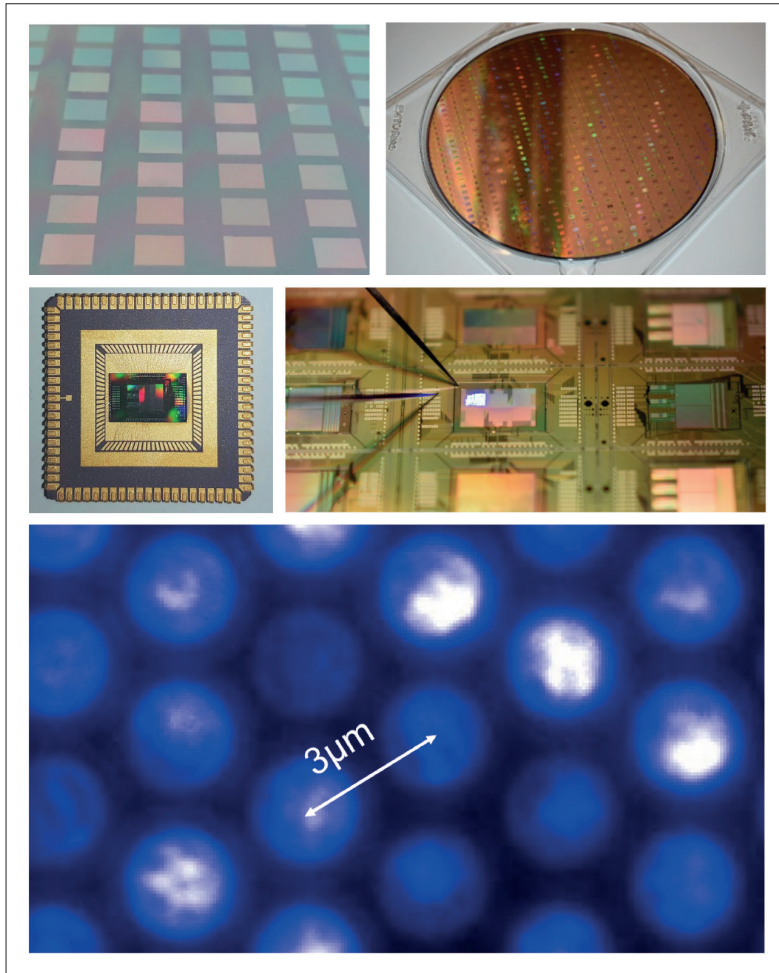


图6: 300 mm LED晶圆的图像
 (a) 在GaN重构后;
 (b) 经过完整的晶圆到晶圆的集成方案;
 (c) 封装后的裸片;
 (d) 具有 9150 ppi 的 480 x 320 无源阵列。

● 作者在此感谢与 imec 300 mm 试验线和 imec 3D 集成部门的合作。

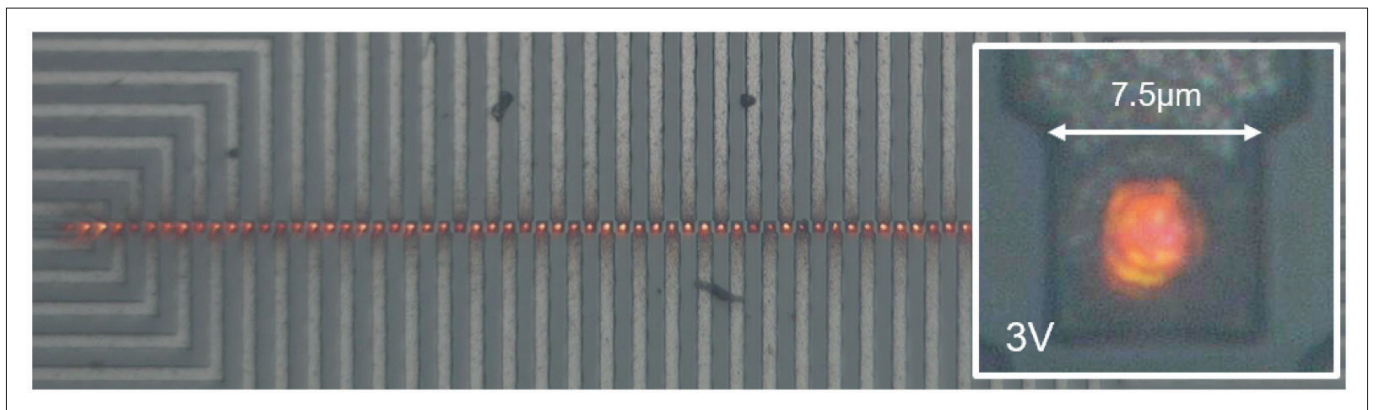


图7. 具有 7.5 μm 网格的红色硅基 GaN 线性阵列的电致发光图像。

HVPE 为高质量 AlGaN 生长提供了一条新途径

具有大范围组分配比的 AlGaN 现在可以通过 HVPE 来实现

来自日本 SCIOCS 的工程师声称，通过使用高压聚乙烯来生产几乎覆盖所有组分的高质量 AlGaN 层，他们已经取得了新的突破。

通过应用促进蚀刻和抑制寄生反应的生长条件，该团队避免了由于微观结构夹杂和形成山丘而导致的表面严重恶化。

快速生长厚膜 AlGaN 的能力有望改善许多器件的生产工艺。例如，通过在 GaN 或 AlN 衬底上生长大量的器件，可以提高在 UV、紫色和蓝色发射 LED 和 LD 的生产率，这些衬底上用 HVPE 生长厚厚的 n 型 AlGaN 层。

更重要的是，SCIOCS 技术可以为轻松获得 n 型、自支撑的 AlGaN 衬底打开大门。这可能会大幅削减由于使用非常薄的 n 型 AlGaN 覆层而导致的 UV LED 和激光器中的大量串联电阻，以避免与临界厚度相关的问题。由于抑制了自加热，确保低得多的串联电阻将极大地提高 UV LED 的输出功率，并使 UV 激光器能够实现连续激射工作。

独立的 AlGaN 衬底也可有助于宽禁带 HEMTs。这种衬底可以消除不需要的杂质，并解决与器件不稳定相关的问题。

请注意，仅仅通过加速 MOCVD 是不可能达到 HVPE 可实现的大生长速度的。该技术被广泛应用于整个化合物半导体行业的芯片生产工艺中，其速度限制在 1 毫米/小时左右。即使在较低的反应器压力下，较高的生长速度也无法抑制气相反应。SCHOS 的成功得益于其之前的突破，包括利用高压聚乙烯生长出高纯度、高度均匀的 GaN 层。然而，根据该团队发言人 Hajime Fujikura 的说法，使用 HVPE 将生长从 GaN 扩展到 AlGaN 并非易事，因为相当复杂的化学反应阻碍了这一努力。“人们需要大量的生长试验才能取得好的结果。”

成功的另一个障碍是缺乏 HVPE 系统的标准化。Fujikura 说：“各 HVPE 系统间彼此完全不同，所以很难通过阅读其他小组的论文来复制 HVPE 增长速率的结果。”

Fujikura 认为，团队成功背后的基础是

HVPE 机器及其配套的生长技术，用于生产独立的 GaN，使用极端的气体流动控制。“这种优秀的生长工具对发展良好的 AlGaN 生长条件也非常有帮助。”

SCIOCS 的工程师们开发了他们的 AlGaN 技术，通过研究在三种不同的衬底上生长这种三元化合物：在蓝宝石上生长 4 mm 厚的 GaN；在蓝宝石上生长 0.5 mm 厚的 AlN；在图形化蓝宝石上生长 0.5 mm 厚的 AlN，其特征是具有 400 nm 高的圆锥体阵列。

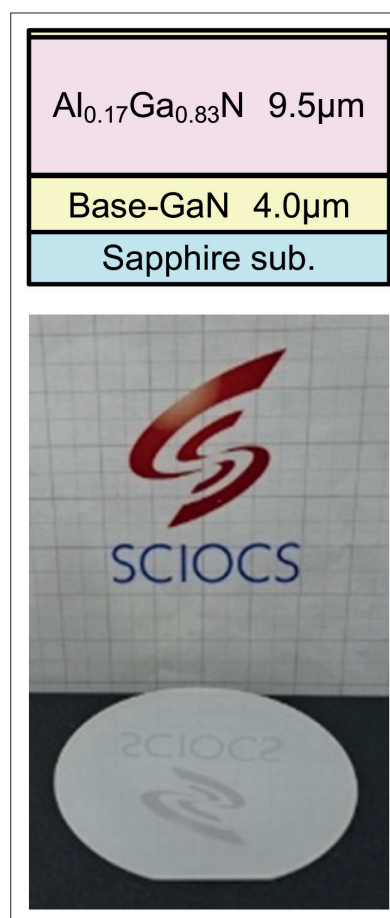
Fujikura 及其同事以铝、镓和氯化氢为原料，生产了一系列铝含量从小于 10% 到大于 90% 的样品，生长速度通常从 0.1 um min^{-1} 到 1 um min^{-1} 不等。在研究中，研究小组发现，为了确保高质量的表面，他们必须使用蚀刻来抑制寄生反应。这些不必要的寄生反应可能源于 HVPE 喷嘴和反应器壁上寄生结晶的 AlGaN，或者来自于外延表面上不规则微晶的直接形核。

该团队工作的亮点之一是在蓝宝石 GaN 模板上生长了一层 10 毫米厚、完全独立的 $\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.83}\text{N}$ 层，其表面像镜面一样光亮。根据 X 射线衍射，它的晶体质量不会因为异质外延而严重恶化。另一项成就是在 AlN 图形化蓝宝石模板上生长了光滑、高质量的 $\text{Al}_{0.67}\text{Ga}_{0.33}\text{N}$ 层，这是实现具有增强光提取紫外光 LED 的重要基础。

Fujikura 说，下一个目标是更厚的 AlGaN 层，可以用来制造自支撑 AlGaN 衬底。

参考文献：

H. Fujikura et al. Appl. Phys. Express 15 085504 (2022)



利用优化后的 HVPE 技术在 GaN 模板上形成高质量的 AlGaN 层。

SiN 降低了高速 HEMT 的电阻

SiN 降低了高速 HEMT 的电阻

中国西安电子科技大学的工程师们通过原位插入 SiN，已经显著降低了具有高铝组分 AlGaIn 阻挡层 GaN 基 HEMTs 的接触电阻。该突破有望促进 HEMTs 工作在 40 GHz 以上。这些器件中，高铝组分 AlGaIn 势垒增强了晶体管的速度，但增加了低接触电阻的难度。

根据该团队的说法，实现高频 AlGaIn/GaN HEMTs 低接触电阻，相比于已有的技术，如硅注入和重掺杂 n 型氮化镓层二次外延，该方法更简单和经济。

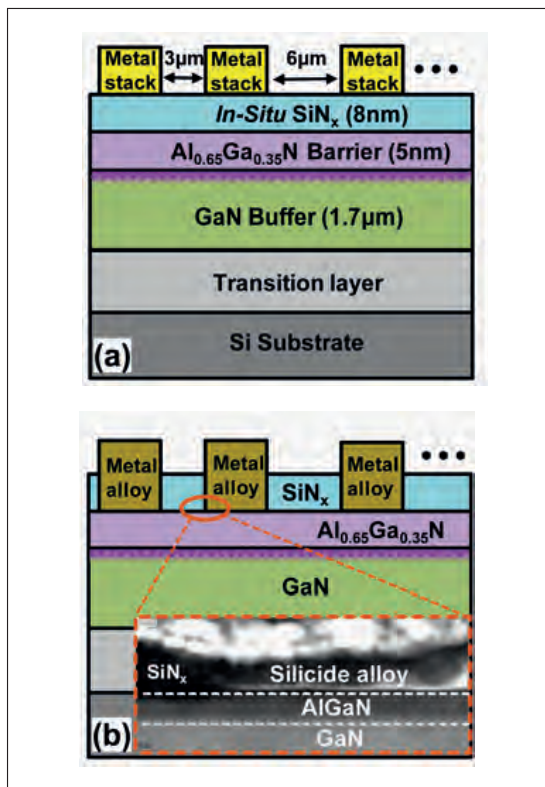
研究人员 Zhihong Liu 告诉化合物半导体杂志，插入 SiN 层的想法来自于之前的实验。他说：“我们知道一层薄薄的硅，以一定的方式沉积，可以帮助 GaN HEMTs 中欧姆接触的形成；高温会降低 SiN 的质量及成为漏电流路径——所以一层薄薄的 SiN 可能会分解，剩余的硅就会帮助欧姆接触的形成。”刘和同事们研究了这种可能性，即

Al_{0.65}Ga_{0.35}N/GaN HEMT 表面异质结构上原位生长一层薄 SiN。该研究先在蓝宝石衬底上 MOCVD 外延 1.7 微米非故意掺杂 GaN 缓冲层，然后是 5nm GaNAl_{0.65}Ga_{0.35}N 势垒和 8nm SiN 层。室温霍尔测量二维电子气体密度 $2.2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ 和 $1190 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的迁移率。经过氩离子注入的平面隔离，通过沉积 Ti/Al/Ni/Au 金属层形成欧姆接触，在 850°C 的氮气下退火 30 秒，该金属接触和退火条件已经过优化。作为比较，研究人员制备了一个无原位 SiN 层的对照样品。基于传输线法，电极间距从 3 微米到 18 微米，揭示增加 SiN 层可以使接触电阻从 0.320 欧姆降到 0.175 欧姆，对应比接触电阻率从 $2.84 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}^2$ 降到 $8.45 \times 10^{-7} \Omega \text{ cm}^2$ 。基于 300k 到 450k 之间的电阻相关测量，结合数据建模研究小组推断出了这两种器件金属-半导体接触的主要传输机制，含有 SiN 层的器件中热离子场发射是主导机制，其对氮化镓基电子器件是有益的，因为它们可以经常在较高的结温下工作。相应的无 SiN 层的器件中场发射是主导，由于 Al_{0.65}Ga_{0.35}N 层的厚度较薄，同时势垒高度也较大。高分辨率透射电镜显示 8nm 厚的 SiN 层在退火条件下分解。这表明，界面处观察到的黑色团块均为 TiN，它们部分被金包裹——通过 EDX 能谱证实。刘先生坦言，他还在优化 SiN 层厚度，这对接触电阻降低至关重要。

该团队还将其技术应用于硅基 AlN/GaN HEMT，实现了很高截止频率和最大振荡频率。这项工作已提交给另一本期刊，仍在审稿中，”刘补充道。工程师们的下一个目标是尝试通过调整 SiN 的厚度来进一步改善接触，并利用他们最近的突破来开发毫米波和太赫兹 HEMTs。☞

参考文献

D. Hanghai et al. Appl. Phys. Lett. 121 172102 (2022)



添加了金属接触层后的异质结构（插入了 SiN）(a)，退火实现 Al_{0.65}Ga_{0.35}N 势垒层金属接触合金化(b)。

剥离 AlGaIn 薄膜

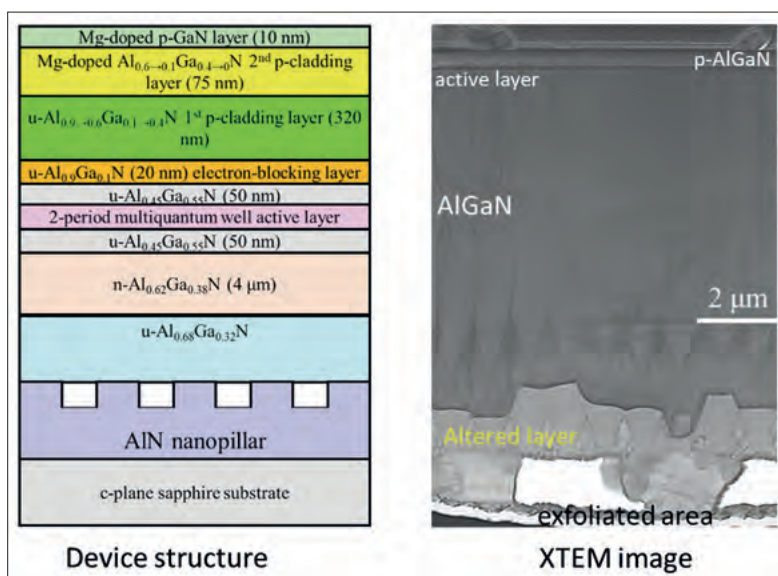
当高压水施加到 AlGaIn 异质结构的特征 AlN 纳米柱时，可以实现器件层从衬底上剥离下来。

缺少一种令人满意的剥离绝缘衬底方法，是实现 AlGaIn 垂直器件的关键障碍。但是日本的一个工程师团队创新了一种方法解决了此难题。他们将基于 AlGaIn 的器件浸入水中加热到 115°C，同时加压到 170 千帕实现了剥离。

这种方法是由明治大学、三重大学和大阪大学合作开创的。基于 AlGaIn 的 LED 起初仿照高功率氮化镓架构中所用的激光剥离技术。请注意，将激光剥离应用到基于 AlGaIn 的 LED 上并不理想，因为铝液滴形成抑制了剥离；而另一个技术途径就是电化学蚀刻，需要通电流，限制了剥离面积的大小。故该团队希望其方法，是基于高 1.2 毫米，宽 400 纳米，1 微米周期的三角形纳米柱上的异质 AlGaIn 薄膜，其适用于制造高功率 UV LED 和激光器。这样的器件可以用于多种场合，包括杀菌、生物技术、医药加工等。日本合作者明治大学的 Iwaya 告诉化合物半导体，他们这个方法起源于一个学生在器件工艺前对外延片的加热清洗操作，意外发现有部分薄膜剥落了，并在各种显微镜下发现了剥离界面有反应层的形成。只有少数文献报道过这种水和 AlN 和 AlGaIn 的单晶间的反应。“但我知道水会和粉末或多晶 AlN 发生反应，所以我想这也许是 AlN 和 AlGaIn 的氮面与水发生了反应” Iwaya 说。我想这或许可以应用于衬底剥离。”

基于这个想法，Iwaya 和他的同事们考虑水是如何渗透到只有几百纳米大小的空隙里的。任何尝试都受到表面张力的阻碍。为了解决这个问题，团队使用了一种方法，灵感来自很多年前 Iwaya 观看的电视片段，是关于如何将一种液体引入酱汁瓶 - 由研究人员将样本先浸泡在加水的烧杯里，然后再将其放置在一个密闭的聚碳酸酯容器里，抽真空，并保持真空 5 小时。因此成功的另一个关键是给水加压。“我们不确定这在实验上是否可行，所以我们用了家用电压力锅。Iwaya 补充道，这是他们想到能增加压力的装置，因为这可能会加速这个反应过程。Iwaya 相信，方法经改进 - 已实现剥离了仅有少量附加位错的 1 平

方厘米样品，根据 TEM 观察 - 这项技术可以用于 AlGaIn 器件的批量生产。目前最耗时的过程包括在纳米柱间注水。“如果水的粘度可以通过增加空隙大小来降低，或者混合粘性较小的液体，如乙醇，来实现注水所需时间的缩短” Iwaya 说。



TEM测试显示AlGaIn基异质结构的剥离发生在AlN纳米柱区域。

该团队的计划还包括：澄清剥离机制；增加剥离的直径，理想情况下达到 2 英寸晶圆；和发展垂直结构 UV LED 和 UV LD。“我们还在研究生产更薄的 LED，可以实现高光提取效率，这已经应用到蓝色 LED 上了，” Iwaya 补充道。横截面 TEM 图像，表明 AlGaIn 基异质结构的剥离需要在 AlN 纳米柱区域。

参考文献

E. Matsubara et al. Appl. Phys. Express 15 116502 (2022)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
Riber		www.riber.com	IFC
Wolfspeed		www.wolfspeed.com	5-8
2023 第 22 届成都全球芯片与半导体产业博览会		www.cwgce.com	IBC

欢迎投稿

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

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

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

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

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

文章投稿指南

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

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

新产品投稿指南

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

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

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。



www.compoundsemiconductorchina.net

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

Deputy Publisher (副社长) - China
Lisa Cheng (程丽娜)
lisac@actintl.com.hk

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

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@angelbc.co.uk
Tel: +44 (0)1923 690215

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



2023

4月26日-28日

成都全球芯片与半导体产业博览会

中国芯
芯动力
信未来

西部IC
重要行业
盛会

成 中
都 国

挺进成渝双城经济圈从这里开始

配套活动

- 2023主论坛(成都国际集成电路产业与应用发展高峰论坛)
- 2023中国IC设计与创新发展论坛
- 2023中国国际西部嵌入式系统安全论坛
- 2023中国西部集成电路封测行业技术交流会
- 2023中国西部半导体设备与核心不见制造商交流会
- 2023中国西部创新半导体器件与电源创新技术研讨会
- 2023IC新产品新技术发布会

联系人：田先生 金先生

电话：18584594618 19802738028

邮箱：318040636@qq.com

官网：WWW.CWGCE.COM

同期举办：2023第22届中国国际（西部）光电产业博览会



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



www.actintl.com



免费
订阅

扫一扫添加
ACT读者服务号免费订阅

雅时国际传媒集团成立于1998年，在高增长的中国市场上为众多高科技领域提供服务。通过其产品系列，包括印刷和数字媒体以及会议和活动，雅时国际为国际营销公司和本地企业提供了进入中国市场的机会。雅时国际的媒体品牌为电子制造、机器视觉系统、激光/光子学、射频/微波系统设计、洁净室/污染控制和半导体制造，化合物半导体，工业AI等领域的20多万名专业读者和受众提供服务，雅时国际也是一些世界领先的技术出版社和活动组织者的销售代表。雅时国际的总部设在香港，在北京、上海、深圳和武汉设有分公司。