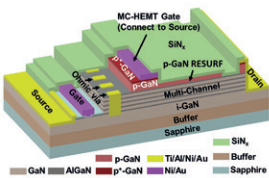


# 化合物半导体

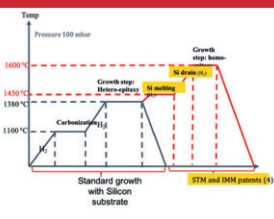
**CS** COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2023年 2/3月

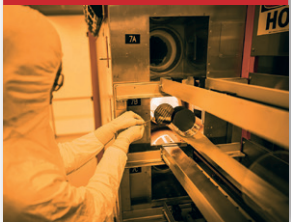
将 GaN 功率器件扩展到 10kV



立方碳化硅的魅力



用立方 GaN 消除效率衰退



推进 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂



6 寸碳化硅器件  
代工厂上路奔跑中



# RIBER's MBE 6000

## 引领MBE 大规模生产

低真空背景

低原子能量

低外延温度

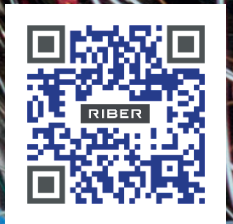
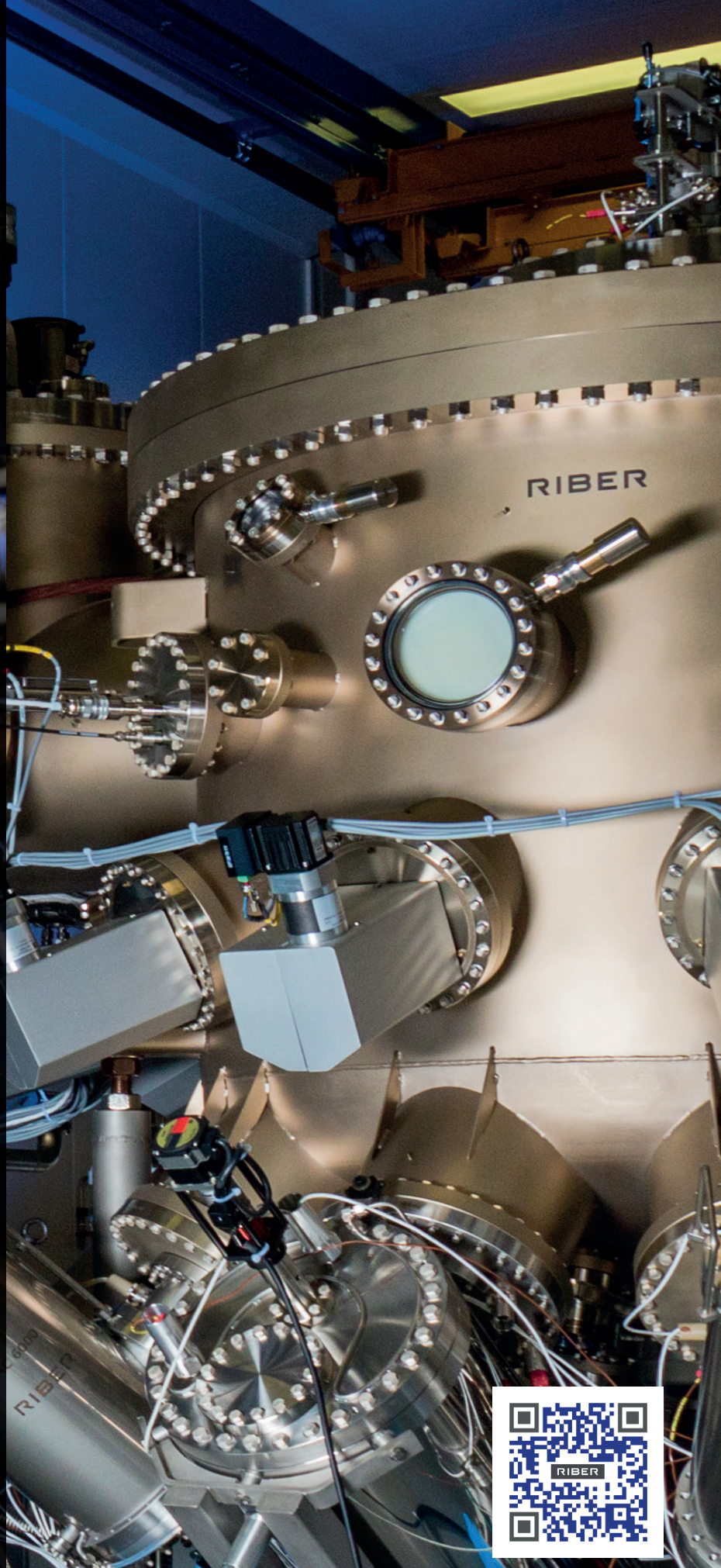
低晶体缺陷

完美晶体

高均匀性

单原子层

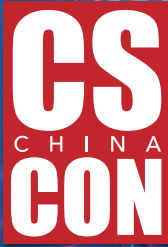
高再现性



**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 —

#### 05月 — 苏州

2023

半导体先进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

### 10 6寸碳化硅器件代工厂上路奔跑中

#### Hitting the road running of 6 inch silicon carbide device foundry

随着对 SiC 器件和材料的需求不断增长，对 SiC 晶圆代工服务的需求也越来越大。我们在 Clas-SiC 晶圆厂的团队，这是英国唯一一家量产 SiC 晶圆代工厂，正在帮助解决这一问题。我们的活动包括“工艺设计套件 (PDK)”——包括 MOSFET、结势垒肖特基 (JBS) 二极管和合并的 p-i-n 肖特基 (MPS) 二极管——以及最近与汽车行业主要企业的合作项目。在这些活动中，我们将继续加强我们的能力，以确保我们在技术、质量和速度方面的市场领先地位。所有这些都完美的时机下实现的——正如 SiC 功率器件市场正在起飞一样。

- DAVID CLARK和RAE HYNDMAN, Clas-SiC公司

## 编者话 Editor's Note

### 04 超宽禁带半导体之金刚石

#### Diamond of Ultra Wide Bandgap Semiconductors

- 陆敏

## 业界动态 Industry

### 05 英飞凌与Resonac扩大碳化硅合作范围

#### Infineon and Resonac expand SiC cooperation

### 05 晶盛机电成功发布6英寸双片式SiC外延设备

#### JSG has successfully released 6 inch dual-wafer SiC epitaxial system

### 06 MicroLED量产在即

#### MicroLED mass production on the way

### 06 天域半导体获约12亿元融资，系碳化硅外延片企业

#### TYSiC, silicon carbide epitaxial wafer enterprise received about 1.2 billion yuan of financing

### 07 Wolfspeed 宣布计划在德国建造全球最大、最先进的碳化硅器件制造工厂

#### Wolfspeed Announces Plan to Construct World's Largest, Most Advanced Silicon Carbide Device Manufacturing Facility in Saarland, Germany

### 08 苏州纳米所孙钱团队研制出国际首支1200V的硅衬底GaN基纵向功率器件

#### SINANO team has developed the world's first 1200V GaN based vertical power device on silicon substrate

### 09 Veeco收购Epiluvac AB

#### Veeco acquires Epiluvac AB

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提供服务。ACT通过它的一系列产品——包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动——为跨国公司及中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站，以及各种技术会议，服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体、半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约二十多万专业读者及与会者。ACT亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT总部在香港，在北京、上海、深圳和武汉设有联络处。www.actintl.com.hk

关于《化合物半导体》

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



扫一扫  
免费下载电子书

高端访谈 Top interview

- 15 回顾2022，展望2023  
Looking back on 2022, looking forward to 2023

技术 Technology

- 26 推进Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>掺杂  
Advancing Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doping  
- Fikadu Alema、Aaron Fine、William Brand和Andrei osinsky, AGNITRON公司
- 31 将GaN功率器件扩展到10kV  
Stretching GaN power devices to 10 kV  
- Yuhao zhang, 弗吉尼亚理工学院
- 35 立方碳化硅的魅力  
The allure of cubic SiC  
- Francesco La via, 意大利微电子和微系统研究所
- 40 用立方GaN消除效率衰退  
Quashing droop with cubic GaN  
- YI-CHIA TSAI, JEAN-PIERRE LEBURTON 和CAN BAYRAM, 伊利诺伊大学香槟分校

科技前沿 Research Review

- 45 加速HVPE生长AlN  
Accelerating HVPE of AlN
- 46 使用新型MOSFET增强Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的可信度  
Enhancing the credentials of Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with a novel MOSFET
- 47 消除深紫外激光二极管中的暗线缺陷  
Eradicating dark-line defects in deep-UV laser diodes

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
- 钮应喜博士 中国科学院半导体研究所，教授级高级工程师
- 孙 钱博士 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 研究院、博导、副主任
- 李顺峰博士 苏州半导体激光创新研究院 执行院长
- 佟存柱教授 中科院长春光学精密机械与物理研究所 常务副主任/研究
- 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 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](mailto:gengbiao@cgbtek.com)

牛沈军13911271076

[niushenjun@cgbtek.com](mailto:niushenjun@cgbtek.com)

郭生钢 13911279276

[sgguo@cgbtek.com](mailto:sgguo@cgbtek.com)



## 超宽禁带半导体之金刚石

超宽禁带半导体金刚石，禁带宽度为 5.5 eV，是立方晶体，具有高载流子迁移率、高电子饱和速度、高击穿场强和高热导率等特点，其功率器件的 Johnson's 优值为宽禁带半导体 SiC 的 10 倍，冠以终结半导体之称。近年来，对金刚石材料在大尺寸、低缺陷和掺杂等关键技术的研究有了新的突破，并带动了金刚石功率二极管、功率场效应晶体管、逻辑电路和射频功率器件的发展，同时将高导热的金刚石材料用作 GaN HEMT 散热基板又推动了高输出功率密度 GaN 功率电子的发展。

金刚石生长方法始于美国通用电气公司 1955 年采用高温高压方法 (HPHT) 通过石墨制备，上世纪八十年代提出热丝化学气相沉积方法 (CVD) 实现了异质衬底上制备金刚石薄膜。这也是目前主流的两种金刚石生长方法。降低缺陷密度一直是多年来的研究重点，近年来也有了较大的进步，HPHT 法可生长直径为一英寸优质金刚石晶体，在  $\langle 001 \rangle$  晶向生长的位错密度小于  $50/\text{cm}^2$ ；采用 CVD 同质外延的掺氮金刚石单晶薄膜的位错密度低至  $400/\text{cm}^2$ 。制备大尺寸金刚石的技术主要有同质外延、马赛克晶圆制备和异质外延技术。在微波等离子化学气相沉积 (MPCVD) 生长技术中突破了加氮高速生长、脉冲放电高效率生长和离子注入剥离等关键技术后，近年来又实现了  $100\ \mu\text{m}/\text{h}$  的高速外延生长，大尺寸、厚而无多晶金刚石边缘的生长和 200 h 无边界连续生长等创新技术。采用马赛克的拼接技术制备了 2 英寸单晶金刚石晶圆。采用异质外延技术可以在异质晶圆衬底上实现大尺寸金刚石薄膜的生长，如  $\text{MgO}$ 、 $\text{SrTiO}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、YSZ/Si 和铱 (Ir)，单晶尺寸已达 4 英寸，但缺陷密度高，与器件所需的  $10^3/\text{cm}^2$  位错密度相距甚远。不过异质外延 CVD 金刚石单晶或更低成本的多晶薄膜可作为功率电子器件热沉材料，具有广泛的应用前景，近年来采用 4 英寸 Si 基 CVD 金刚石多晶薄膜使得 GaN HEMT 的射频功率密度超过  $23\ \text{W}/\text{mm}$ ，异质外延 CVD 金刚石多晶薄膜的最大直径可达到 8 英寸。金刚石材料的有效掺杂是制备功率器件的基础，p 型重掺杂低阻和厚层材料等方面实现了关键技术的突破并趋于成熟，采用 B 掺杂剂可以实现大范围的空穴浓度调控，最低电阻率可达  $1\ \text{m}\Omega\text{cm}$ 。而 n 型高电导率实现仍然是一个难题，n 型掺杂剂 P 因激活能较高（并且与晶向有关），虽然可以大范围进行掺杂浓度调控，但最低电阻率仍高达  $300\ \Omega\text{cm}$  以上，这对 n 型欧姆接触金属化及双极功率器件形成了极大的障碍。

早在 1997 年，A. Vescan 等人首次报道了可在  $1000\ ^\circ\text{C}$  下工作的金刚石 SBD，虽然开关比仅为 10，且反向击穿退化为 30 V，但足以体现其高温工作的潜力。目前金刚石二极管已有初步的实验应用，以 SBD 为主，pn 二极管为辅，击穿电压已突破 10 kV、导通电阻低至  $1.85\ \text{m}\Omega\text{cm}$ 、高开关速率 (523 K 下的开关时间 15 ns) 和  $700\ ^\circ\text{C}$  下可工作等关键技术。金刚石晶体管以 MOSFET 为主，MESFET 和 JFET 为辅，对 BJT 开展了初步研究，击穿电压已突破了 2 kV、导通电阻低  $2.63\ \text{m}\Omega\text{cm}^2$ 、漏极电流高达  $776\ \text{mA}/\text{mm}$  和常关器件等关键技术。金刚石射频 FET 以氢终端 FET 为主，已突破了高漏极电流  $1.35\ \text{A}/\text{mm}$ 、高  $f_T/f_{\text{max}}$  ( $70\ \text{GHz}/80\ \text{GHz}$ ) 和高射频输出功率密度 ( $1\ \text{GHz}$  下为  $3.8\ \text{W}/\text{mm}$ ) 等关键技术。对金刚石 IC 开展了基本逻辑电路的初步研究，这是金刚石半导体最具颠覆性应用的一个领域，因为至今为止，还没有一种材料能够挑战 Si 在 IC 领域 (占据半导体总市场的 90% 以上) 的绝对霸主地位，作为元素半导体的金刚石很有潜力，但当务之急是必须解决 n 型高效掺杂问题 (CMOS 的基础)，或者另辟蹊径实现二维电子气。总之，金刚石材料的高成本和小尺寸仍是制约金刚石电子学发展的主要障碍，这也是任何一代半导体材料发展过程中的必经之考验，超宽禁带半导体金刚石电子学仍处于科研的热点阶段，实现商业化应用尚需时日。

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

## 英飞凌与 Resonac 扩大碳化硅合作范围

英飞凌科技与 Resonac Corporation（前身为昭和电工）签署了一项新的多年供应和合作协议，以补充和扩大 2021 年的公告。新合同将深化双方在 SiC 材料方面的长期合作伙伴关系。根据协议，Resonac 将为英飞凌提供用于生产 SiC 器件的 SiC 材料，覆盖未来十年预测需求的两位数份额。虽然初始阶段的重点是 6 英寸 SiC 材料的供应，但 Resonac 还将在协议的后期支持英飞凌向 8 英寸晶圆的过渡。作为合作的一部分，英飞凌将为 Resonac 提供与 SiC 材料技术相关的知识产权。英飞凌首席采购官 Angelique van der Burg 表示：“对 SiC 的需求正在迅速增长，我们正在为这一发展做准备，大幅扩大我们的生产能力。我们很高兴深化与 Resonac 的合作，并加强我们两家公司之间的合作伙伴关系。”“未来几年，可再生能源发电和储存、电动交通和基础设施领域的商机将

是巨大的。英飞凌正在加倍投资碳化硅技术和产品组合，以便为客户提供最全面的产品。我们很高兴与 Resonac 的合作将有力地支持我们的市场领先地位，“英飞凌工业电源控制事业部总裁 Peter Wawer 表示。“我们很高兴与英飞凌这个全球功率半导体领域的领导者合作，以满足未来几年对 SiC 日益增长的需求。我们将不断改进我们一流的 SiC 材料，并开发下一代 8 英寸晶圆技术。我们认为英飞凌是这方面的优秀合作伙伴。” Resonac 器件解决方案业务部执行顾问 Jiro Ishikawa 表示。英飞凌目前正在扩大其碳化硅制造能力，以期在本十年末达到 30% 的市场份额。到 2027 年，英飞凌的碳化硅制造能力将增长十倍。位于马来西亚居林的新工厂计划于 2024 年投产。如今，英飞凌已为全球 3600 多个客户提供碳化硅产品。CSiC

## 晶盛机电成功发布 6 英寸双片式 SiC 外延设备

近日，晶盛机电 6 英寸双片式碳化硅外延设备新品发布会圆满落幕，标志着晶盛机电在第三代半导体领域取得重大突破。



晶盛机电6英寸双片式碳化硅外延设备新品发布会现场

在全球能源转型和“双碳”目标的背景下，新能源汽车、5G 通信等新兴产业快速发展，全球市场对碳化硅功率器件需求激增，碳化硅迎来它的“高光时刻”。碳化硅在新能源汽车市场渗透率快速上升，据 Yole 预测，到 2025 年，碳化硅器件复合年增长率将达到 30%。以碳化硅为代表的第三代半导体被国家“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要列入重要发展方向。

在新品发布环节，晶盛机电外延设备研究所所长刘毅博士对“6 英寸双片式碳化硅外延设备”的核心设计理念、工艺性能等进行了详细介绍，该产品历时两年的研发、测试与

验证，在外延产能、运营成本等方面已取得国际领先优势，与单片设备相比，新设备单台产能增加 70%，单片运营成本降幅可达 30% 以上，助力客户创造极大价值，为推动我国新能



6英寸双片式碳化硅外延设备

源产业发展贡献晶盛力量。随后，晶盛机电碳化硅事业部欧阳鹏根博士重点介绍了 8 英寸碳化硅衬底片。碳化硅器件具有耐高温、耐高压、转化效率高等优点，但高硬脆、低断裂韧性对生产工艺有着极其苛刻的要求，大尺寸的碳化硅晶体制备一直是行业的“卡脖子”技术。公司经过一年的研发，成功生长出行业领先的 8 英寸 N 型碳化硅晶体，完成了 6 英寸到 8 英寸的扩径和质量迭代，实现 8 英寸抛光片的开发，晶片性能参数与 6 英寸晶片相当，今年二季度将实现小批量生产，为实现我国在第三代半导体材料领域关键核心技术自主可控作出积极贡献。晶盛机电董事长曹建伟博士表示，碳化硅全产业链从设备到工艺的创新，成本快速下降，产能快速扩张。晶盛机电持续以科技创新引领产品、工艺的迭代和突破，在先进制程及功率器件半导体装备领域，解决“卡脖子”难题，实现进口替代，助力我国加快向高端材料、高端设备制造业转型发展的步伐。CSiC

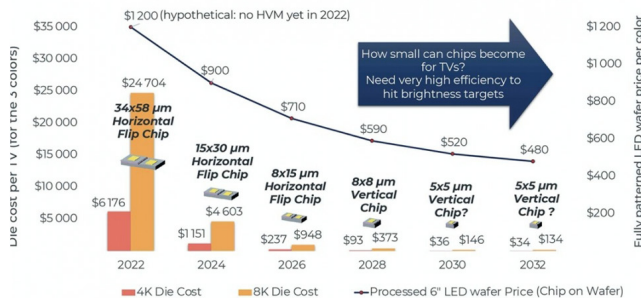
# MicroLED 量产在即

苹果、欧司朗、友达、富采、JBD、Aledia 等公司都在投资 microLED 制造，同时苹果及其合作伙伴对智能手表显示屏生产投资超过 20 亿美元，也释放了强烈信号。这其中包括 Ams-Osram 单独投资 8 亿欧元用于 8 英寸 microLED 芯片厂。Yole Intelligence 高级市场和技术分析师 Eric Virey 表示：“这将是该行业、特别是苹果公司的孵化器，拥有独特的机会来缩小技术差距、理顺供应链，如果成功，将推进智能手机或平板电脑发展。成功将大大提振行业信心，并启动供应链：Ams-Osram 也可以为电视或汽车等非苹果产品提供服务，并成为高性能、高性价比 microLED 芯片来源，为那些无法开发自己供应链的公司提供服务。

然而，MicroLED 的拥护者寥寥无几。苹果公司产量的失败或三星 VD 停止电视方面的努力可能会使该行业停滞不前。如果没有电视、手表或智能手机来推动投资，规模较小的企业将发现，仅仅为汽车和特种显示器建立有意义规模的供应链是很困难的。微型显示器的情况则不同，有 20 多家公司正在竞争。苹果公司计划在 2024 年开始生产智能手表 microLED 显示屏，这是一个激进的时机：从来没有人曾在 8 英寸蓝宝石和砷化镓上生产过 LED 或 microLED。任何进度下滑都可能意味着错过苹果通常的 9 月发布会并将其推迟到 2025 年。Yole Intelligence 成像与显示活动团队首席分析师 Zine Bouhamri 表示：“MicroLED 微型显示器已经进入各种 AR 产品。然而，在显示和光学层面的效率以及全彩方面仍然具有挑战性。然而，这并不急于求成。AR 仍在为消费者的采用寻找强大的用例，除了显示器之外，还面临着许多挑战，包括成本、功耗、处理带宽、外观、社会接受度等。因冗长而严格的鉴定过程而著称的汽车业是另一个主要的推动领域。汽车制造商正在表达真正的兴趣并对原型进行评估。PlayNitride, AUO 和 Tianma 正在大力推动，并希望在 2027 年之前实现普遍采用。电视方面的成功取决于三星大幅降低成本的意愿和能力。最早在 2027 年之前不

2022-2032 PROPOSED TV DIE SIZE AND COST ROADMAP

Source: MicroLED 2022 report, Yole Intelligence, 2022



从索尼的CLEDIS到Ams-Osram的8亿欧元晶圆厂，microLED的故事在加速展开

太可能出现有意义的产量。智能手机仍然难以捉摸。苹果在智能手表上的成功是一个必要条件，并将为这一应用注入新的希望。显示器制造商、OEM、初创公司和设备制造商已经在 microLED 开发上总共花费了近 80 亿美元。收购又增加了 17 亿美元，包括谷歌以超过 10 亿美元的价格收购了 Raxium 和 Jasper。PlayNitride 在 2022 年实现了首家 microLED 企业的 IPO。中国领先的面板制造商和 OEM 已经与 LED 制造商结成联盟，京东方逆势而上，控制了华灿光电。到 2025 年，由制造业基础设施推动的新一波支出将使 microLED 的累计支出达到约 180 亿美元。与 OLED 自 2006 年以来超过 1500 亿美元的资本支出相比，这相形见绌，但表明 microLED 的发展势头正在加速。直到 2020 年，一家愿意开发 microLED 显示器的公司还不得不发明自己的传质工艺。然而，到 2022 年，就有十几家设备制造商目前正在提供 microLED 专用工具。它们的出现将行业带入了良性循环，既降低了进入门槛，又缩短了开发周期。对于其他制造步骤，microLED 利用了显示器、半导体和 LED 行业的现有设备和技术。与传统 LED 相比，microLED 的制造需要向类似半导体的思维方式转变，这意味着高效率、自动化、端到端缺陷预防和管理策略等，所有这些都是必要的芯片尺寸和成本降低的关键因素。传统的半导体和显示设备公司，如 AMAT, KLA/STPS, LAM Research 等都在开发解决方案。OS

# 天域半导体获约 12 亿元融资，系碳化硅外延片企业

广东天域半导体股份有限公司(以下简称“天域半导体”)获约 12 亿人民币融资，投资方包括中国比利时基金、广东粤科投、南昌产业投资集团、嘉元科技、招商资本、乾创资本等。

本轮融资资金将继续用于增加碳化硅外延产线的扩产以及持续加大碳化硅大尺寸外延生长研发投入。天域半导体成

立于 2009 年，是一家碳化硅 (SiC) 外延片企业，乾创资本消息显示，该公司是国内最早实现 6 英寸外延晶片量产，20 kV 级以上的厚外延生长实现，缓变结、陡变结等 n/p 型界面控制技术，多层连续外延生长技术的企业。据悉，天域半导体已提前布局国内 8 英寸 SiC 外延晶片工艺线的建设，正积极突破研发 8 英寸 SiC 工艺关键技术。OS



# Wolfspeed 宣布计划在德国建造全球最大、最先进的碳化硅器件制造工厂

将成为全球最大的 200mm 半导体工厂，采用创新性制造工艺来生产下一代碳化硅器件。

扩展至欧洲的碳化硅器件制造布局，将支持不断加速中的客户需求，同时也将支持公司在 2027 财年达成 40 亿美元的长期营收展望。将成为公司先前宣布的 65 亿美元全球产能扩张计划的重要组成部分。65 亿美元全球产能扩张计划还包括了 John Palmour 碳化硅制造中心（即目前正在建设中的位于美国北卡罗来纳州的全球最大碳化硅晶体生长工厂）、已经落成的公司莫霍克工厂。采埃孚将向 Wolfspeed 进行重要投资，以支持项目建设。计划作为“欧洲共同利益重大项目（Important Project of Common European Interest, IPCEI）”微电子和通讯技术的组成部分，其实施将有待欧盟委员会国家援助规则的批准。

碳化硅技术与制造全球引领者 Wolfspeed, Inc.（美国纽约证券交易所上市代码：WOLF）宣布计划将在德国萨尔州建造一座高度自动化、采用前沿技术的 200mm 晶圆制造工厂。这将是 Wolfspeed 公司在欧洲的首座工厂，同时也将成为 Wolfspeed 最先进的工厂，并将在欧盟打造突破性创新碳化硅开发与制造中心，以支持满足来自汽车、工业、能源等多种广泛应用不断增长的需求。“欧洲共同利益重大项目”资金将用于支持该项目的技术开发和早期部署。同时，采埃孚也将与 Wolfspeed 达成战略合作，提供相当可观的投资以支持新工厂建设。这座欧洲工厂，将与 2022 年 4 月开业的 200mm 莫霍克谷器件工厂、以及 John Palmour 碳化硅制造中心（即目前正在建设中的位于美国北卡罗来纳州占地 445 英亩（180 公顷）碳化硅材料工厂。该材料工厂将提升公司现有材料产能 10 倍以上，其一期建设计划将于 2024 财年末完成）一道，成为 Wolfspeed 公司 65 亿美元产能扩张大计划的重要组成部分。Wolfspeed 总裁兼首席执行官 Gregg Lowe 表示：“我们不断地扩大半导体生产与创新的生态系统。这座新工厂对于 Wolfspeed 和我们的区域客户而言，都意味着向前迈出重要一大步。碳化硅器件能够带来更高的能源效率，在全球朝向可持续电气化转型中发挥着至关重要的作用。这座新工厂对于我们的产能扩充将起到关键作用，从而支持产能受限但又快速增长的产业，尤其是像整个电动汽车市场。在欧洲心脏地带建设一座工厂对于我们十分重要。这样可以更靠近我们非常多的客户与合作伙伴，从而促进下一代碳化



硅技术领域的合作。”此次信息是在计划中新工厂厂址的某重要活动场合宣布。新工厂位于德国萨尔州，其厂址前身为燃煤电厂，占地 35 英亩（14 公顷）。德国总理奥拉夫·朔尔茨（Olaf Scholz）莅临此次活动，并欢迎 Wolfspeed 的到来。德国副总理兼经济和气候保护部长罗伯特·哈贝克（Robert Habeck）、萨尔州州长安克·雷林格（Anke Rehlinger）同时出席。作为战略合作伙伴代表，采埃孚集团首席执行官柯皓哲博士（Dr. Holger Klein）、采埃孚集团董事斯蒂芬·冯·舒克曼（Stephan von Schuckmann）一并参与到此次宣布。Wolfspeed 同时宣布了与采埃孚达成战略合作。采埃孚将向 Wolfspeed 投资以及建设位于德国的碳化硅联合研发中心（在“欧洲共同利益重大项目 IPCEI”相同框架下的组成部分）。在获得欧盟委员会批准之后，工厂建设预计可于 2023 年上半年启动。萨尔州州长安克·雷林格（Anke Rehlinger）表示：“该项目是传统工业区转型驱动的重要抓手并将提升就业。此外，它与欧洲重要的专业技术知识（know-how）相结合，将为欧洲绿色协议（European Green Deal）的执行作出贡献，以减少能源消耗与降低二氧化碳排放。我们对于 Wolfspeed 和我们地区在推进碳化硅半导体创新领域所将扮演的关键角色感到骄傲。”该工厂将经过优化设计，采用开创性制造工艺，生产未来一代的碳化硅器件。这座新工厂还将采用创新性可持续发展措施，包括高百分比的循环水、降低的排放足迹等，将成为未来更可持续工厂的模范。当工厂全面运行时，将雇佣超过 600 名员工。碳化硅功率器件的采用在众多市场快速增长，覆盖可再生能源与储能、电动汽车、充电基础设施、工业电源、牵引和变速驱动等众多领域。碳化硅可带来更小型、更轻量、更具经济效益的设计，并更高效地实现能量转换，从而赋能不计其数的新型清洁能源应用。CS。

# 苏州纳米所孙钱团队研制出国际首支 1200V 的硅衬底 GaN 基纵向功率器件

氮化镓 (GaN) 电子器件具有更高耐压, 更快的开关频率, 更小导电电阻等诸多优异的特性, 在功率电子器件领域有着广泛的应用前景: 从低功率段的消费电子领域, 到中功

率段的汽车电子领域, 以及高功率段的工业电子领域, 目前 650V 级的 GaN 基横向功率器件 (如 HEMT) 已经广泛应用于消费类电子产品的快充设备、大数据中心的电源管理系统, 而有望应用到电动汽车上的 1200 V 级器件是 GaN 功率电子器件领域的研究热点和难点。

相比于横向功率电子器件, GaN 纵向功率器件能提供更高的功率密度 / 晶圆利用率、更好的动态特性、更佳的热管理, 而大尺寸、低成本的硅衬底 GaN 纵向功率电子器件吸引了国内外众多科研团队的目光, 近些年已取得了重要进展。

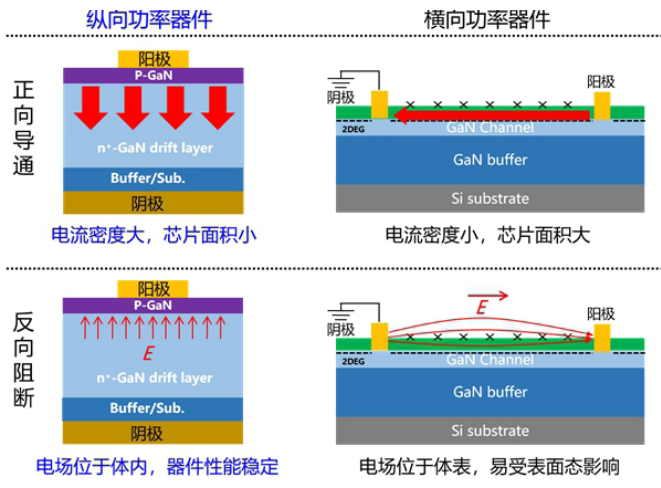


图1. GaN基纵向、横向功率器件的特点比较。

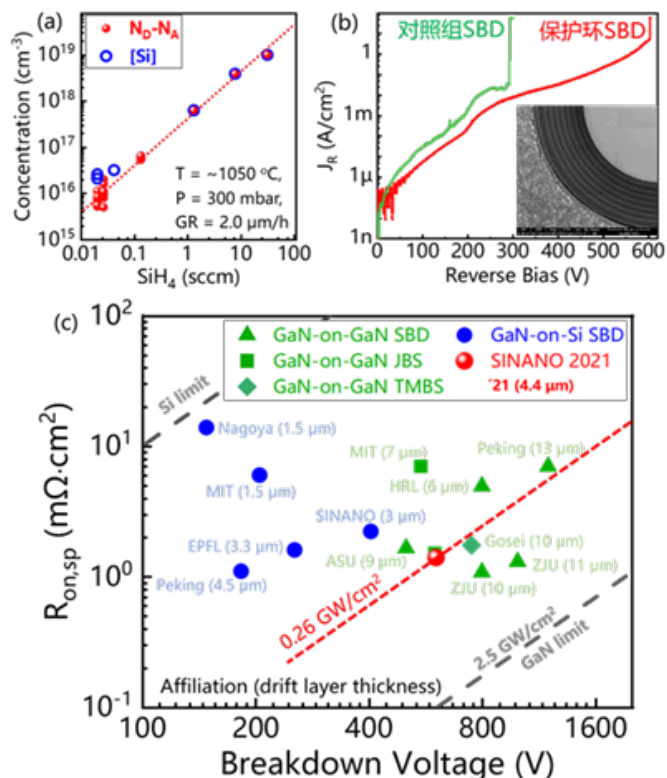


图2.(a) 受硅烷流量影响的漂移层Si的掺杂浓度(SIMS数据)和净载流子浓度(C-V数据); (b) 离子注入保护环对器件反向电学特性的影响, 插图: 离子注入保护环的SEM图; (c) GaN基纵向功率二极管的关态击穿电压与开态导通电阻 ( $R_{on,sp}$ ) 的评价体系。国内外相关研究团队的自支撑衬底和硅衬底GaN基肖特基势垒二极管 (SBD), 结势垒肖特基二极管 (JBS), 凹槽MOS型肖特基二极管 (TMBS) 器件性能的比较。

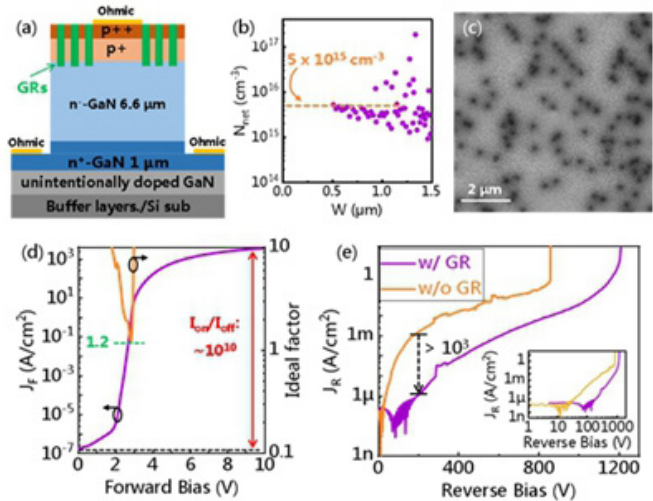


图3.(a) 硅衬底GaN纵向p-n功率二极管的示意图; (b) 随漂移区深度分布的净载流子浓度; (c) 漂移区外延材料的CL-mapping图; (d) 带保护环器件的正向电学数据; (e) 保护环对器件反向电学特性的影响。

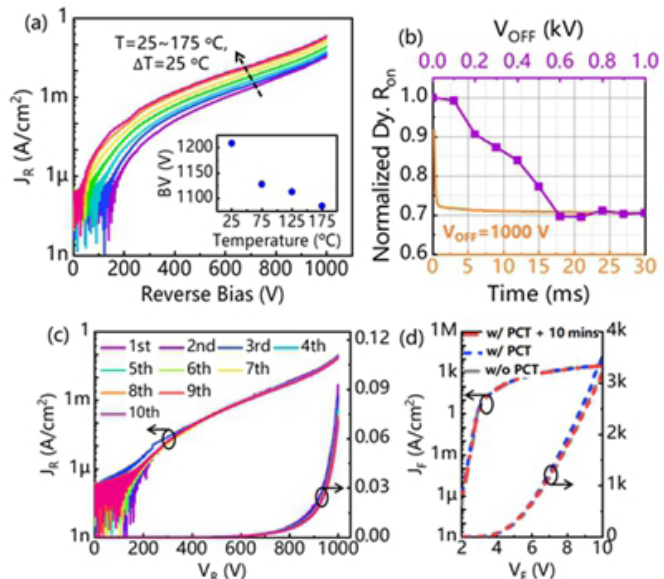


图4.(a) 温度依赖的反向电学特性; (b) 受反向偏压影响的动态导通电阻及其时间分辨图; (c) 连续的功率循环测试及其(d)测试前、后器件的正向电学特性曲线。

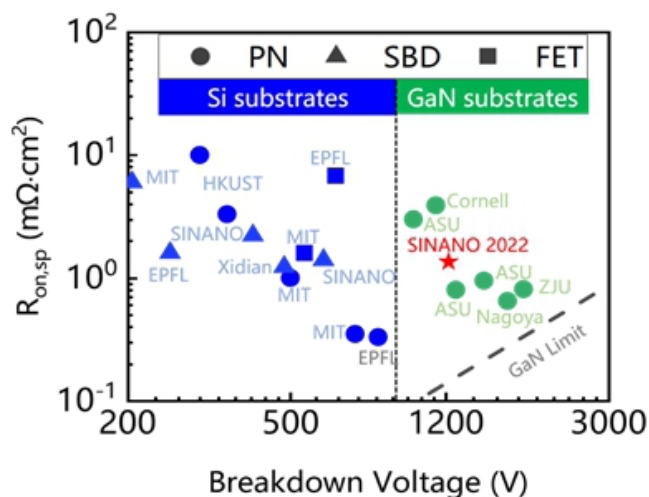


图5. GaN基纵向功率二极管的关态击穿电压与开态导通电阻 ( $R_{on,sp}$ ) 的评价体系。国内外相关研究团队的自支撑衬底和硅衬底GaN基肖特基势垒二极管 (SBD)、p-n功率二极管 (PN)、场效应晶体管 (FET) 器件性能的比较。

中科院苏州纳米所孙钱研究团队先后在漂移区的掺杂精准调控、器件关态电子输运机制及高压击穿机制、高性能离子注入保护环的终端开发等核心技术上取得突破，曾经研制出关态耐压达603V、器件的Baliga优值（衡量器件正反向电学性能的综合指标）为 $0.26\text{GW}/\text{cm}^2$ 的硅衬底GaN纵

向肖特基势垒二极管，相关指标为公开报道同类型器件的最佳值（IEEE Electron Device Letters, vol. 42, no. 4, pp. 473-476, Apr 2021; Applied Physics Letters, vol. 118, no. 24, 2021, Art. no. 243501; IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 68, no. 11, pp. 5682-5686, 2021）。

在前期工作基础上，近期团队基于 $6.6\ \mu\text{m}$ 厚、穿透位错密度低至 $9.5 \times 10^7\ \text{cm}^{-2}$ 的高质量硅基GaN漂移区材料（为公开报道器件中的最低值），成功研制了1200V的pn功率二极管。器件的理想因子低至1.2；在反向偏置电压为1000V的条件下，器件在温度为 $175\ ^\circ\text{C}$ 的工作环境，仍然能正常工作，10次功率循环的测试表明器件具有较佳的可靠性，且受偏置电压和导通时间影响的动态导通电阻降低现象得到了研究，相关工作以1200-V GaN-on-Si Quasi-Vertical p-n Diodes为题发表于微电子器件领域的顶级期刊IEEE Electron Device Letters 43 (12), 2057-2060 (2022)，第一作者为中科院苏州纳米所特别研究助理郭小路博士，通讯作者为孙钱研究员和特别研究助理钟耀宗博士。

上述研究工作得到了国家重点研发计划项目、国家自然科学基金项目、中国科学院重点前沿科学研究计划、江苏省重点研发计划项目等资助。CS

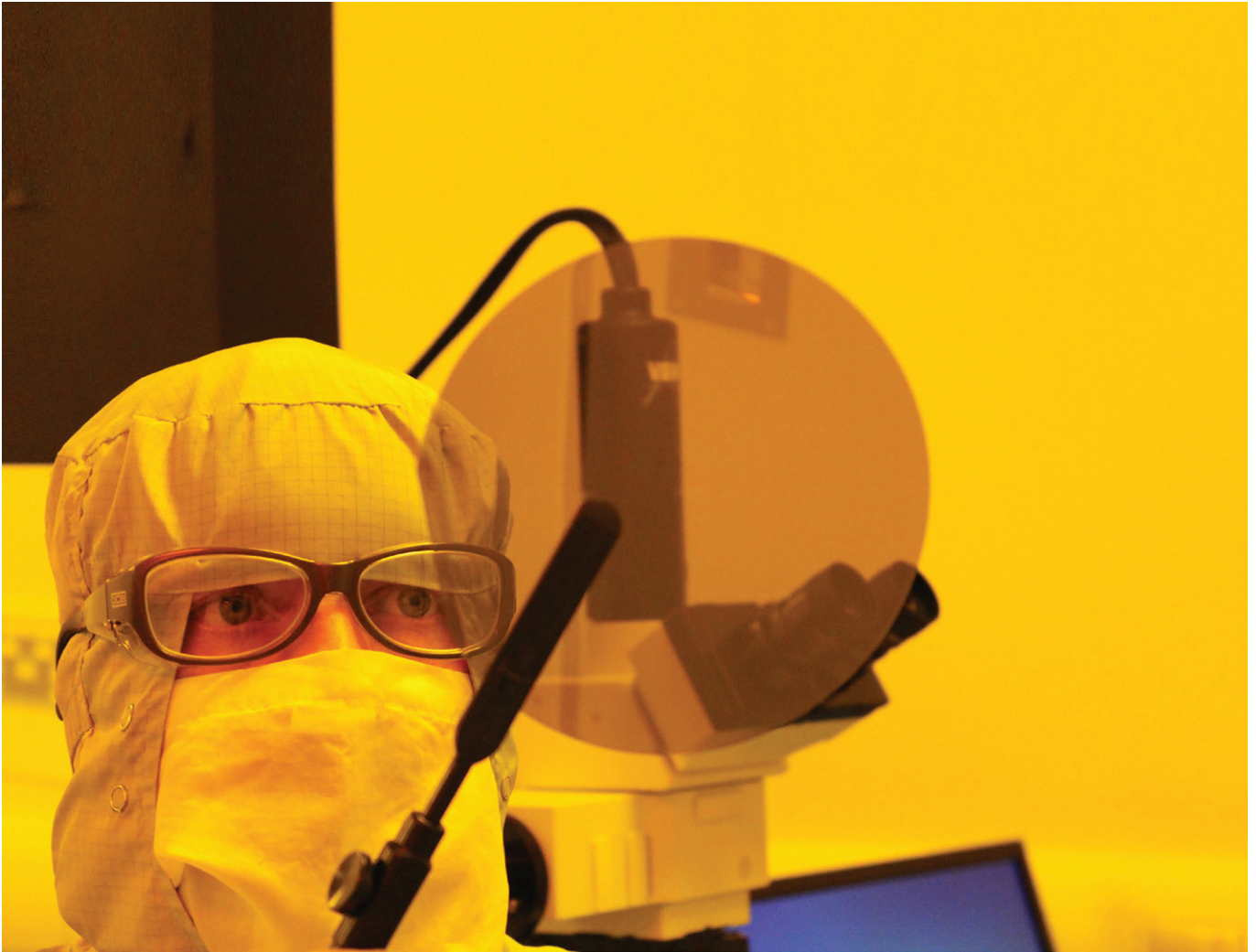
## Veeco 收购 Epiluvac AB

Veeco Instruments 收购了 Epiluvac AB，这是一家私营 CVD 外延系统制造商，可在电动汽车市场上实现先进的 SiC 应用。Epiluvac 总部位于瑞典，由一支在 SiC 领域经验丰富的团队于 2013 年创立。Epiluvac 的技术平台与 Veeco 的全球市场推广能力相结合，为 Veeco 创造了重要的长期增长动力。根据 Yole Group 的预测，从 2023 年到 2027 年，SiC 器件市场预计将以约 30% 的复合年增长率 (CAGR) 增长。因此，根据 Yole Group 和 Veeco 内部估计，SiC 外延器件市场



瑞典CVD外延公司为Veeco带来先进的碳化硅经验

预计将在同一时期内以约 15% 的复合年增长率增长。Veeco 首席执行官 Bill Miller 表示：“Epiluvac 团队开发了一个卓越的平台和工艺技术，与 Veeco 的战略目标一致。“他们精心设计的 CVD 平台实现了高生产率，易于维护，并具有卓越的工艺控制能力，使其具有独特的资质，可以生产更轻、更小、更高效的电源转换系统的器件。我们认为此次收购是对我们的 MOCVD 外延产品线的重要补充。此次收购通过缩短我们的上市时间，加快了我们的进入新兴的、高增长的 SiC 器件市场的步伐。”“我们很高兴加入 Veeco，它是半导体和化合物半导体设备领域公认的领导者，” Epiluvac 首席执行官 Per-Anders Eriksson 表示，“我们的互补技术平台，加上 Veeco 广泛的全球销售、服务和制造能力，将使我们能够很好地帮助客户加速 SiC 的采用。Epiluvac 团队在这种要求苛刻的外延工艺上投入了数十年的研发，这对于 Veeco 已经令人印象深刻的工艺能力来说将是一笔巨大的财富。” Epiluvac 是一家早期收入公司，拥有 11 名员工。该交易的购买价格全部以现金支付，在交易完成时支付了 3000 万美元，并可能额外增加 3500 万美元的绩效奖励。预计对 2023 年 Veeco 的财务业绩不会产生重大影响，预计 2024 年开始会有量产收入。CS



## 6 寸碳化硅器件代工厂上路奔跑中

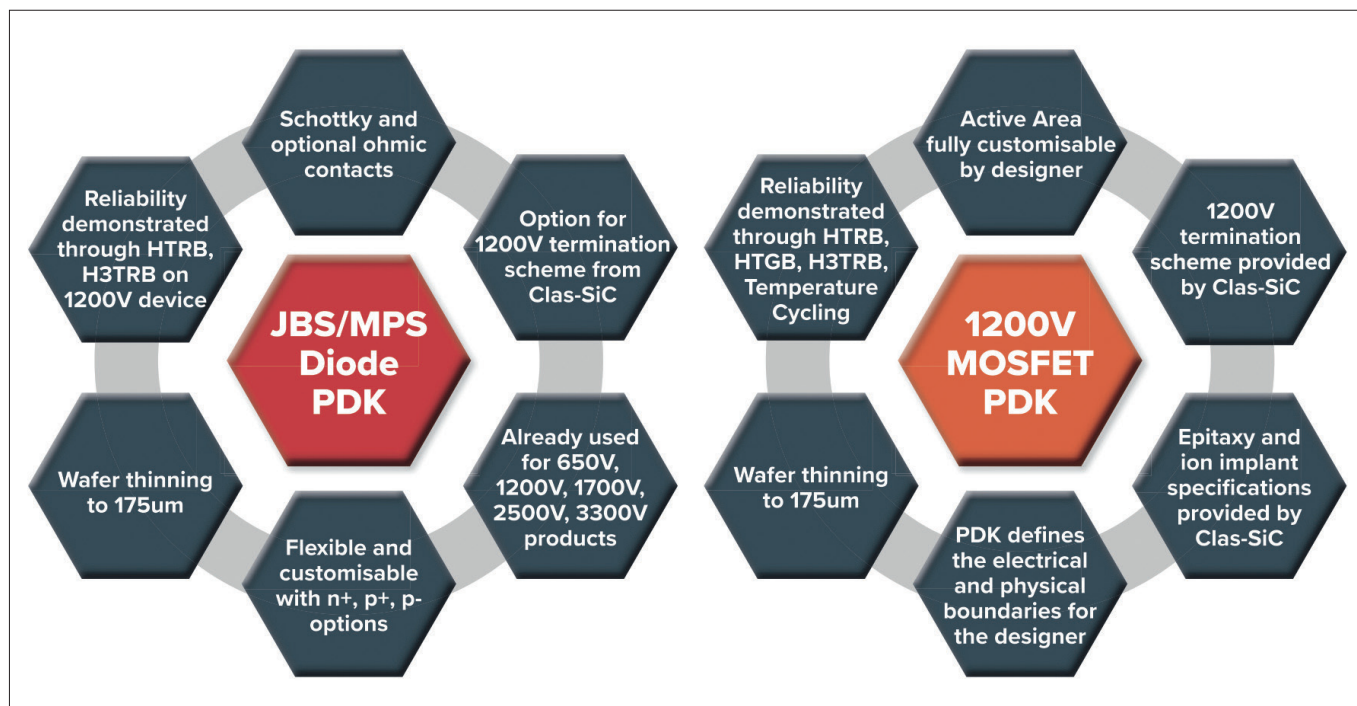
世界上第一家提供快速进入市场途径的专门的、开放的、纯功能的 150 mm SiC 晶圆代工厂，订单快速增长饱和中。

作者：DAVID CLARK 和 RAE HYNDMAN, Clas-SiC 公司

随着对 SiC 器件和材料的需求不断增长，对 SiC 晶圆代工服务的需求也越来越大。我们在 Clas-SiC 晶圆厂的团队，这是英国唯一一家量产 SiC 晶圆代工厂，正在帮助解决这一问题。我们的活动包括“工艺设计套件 (PDK)”——包括 MOSFET、结势垒肖特基 (JBS) 二极管和合并的 p-i-n 肖特基 (MPS) 二极管——以及最近与汽车行业主要企业的合作项目。在这些活动中，我们将

继续加强我们的能力，以确保我们在技术、质量和速度方面的市场领先地位。所有这些都完美的时机下实现的——正如 SiC 功率器件市场正在起飞一样。

我们公司的起源可以追溯到创始人、首席执行官和 II-VI 前董事会主席 Carl Johnson 的愿景。2017 年，他领导注册成立了我们公司，公司的成立是为了在中低产量的晶圆厂中为新型 SiC 器件



的快速原型开发提供支撑能力。通过这一努力，我们使新的市场进入者能够在我们的成熟和经验丰富的团队提供成熟技术的帮助下，迅速完成从定制器件设计到器件制造的过程。

自成立以来，我们取得了巨大的进步，首先是在爱丁堡郊区的 Lochgelly 镇从头开始建设一座 SiC 专用晶圆厂。我们管理和工程团队的核心人员来自于附近一家于 2017 年关闭的晶圆厂。30 多年来，这家 100 mm 的晶圆厂为高可靠性汽车、铁路、消防安全和医疗应用制造了数百万个硅器件，并从 2004 年开始加工 SiC 晶圆。这家 100 mm 晶圆厂完全符合 ISO9001 和 ISO TS16949 标准，使我们具备了独特的、经验丰富的血统 -- 在初创企业中很少有这样的品质。

由于这种令人羡慕的传承，我们公司与其说是创业，不如说是重新启动，在一个新工厂中使用新的工具，从头开始。

即便如此，我们仍然不得不从头开始建立一个新的晶圆厂。这是一项重大的工程，首先是确

定和采购合适的工业单位。随后进行了重大的新建扩建，提供了额外的洁净室空间和设施，使我们的原始占地面积几乎翻了一倍。我们在这里安装了符合所有现代安全标准的全新设施。这些设施支持工具集，并满足 SiC 器件制造的 ISO 5 级洁净室要求。这个项目从 2017 年开始，完成于 2019 年。

### 完整的工具集

在构建过程中，我们在晶圆制造工具集的详细规格和采购方面取得了快速进展。我们决定使用硅行业的大量工具，采用以前硅技术节点中著名的“主力”设备。其中许多工具都得到了来自曾经被亲切地称为“硅谷”的本地供应商的支持。我们已经升级了这些工具，使它们可以处理透明的 SiC 衬底，而不是设计用于处理的高反射硅衬底。我们还对其他 SiC 专用工具进行了大量投资，包括最先进的高温 SiC 离子注入机和高温注入退火炉。这使我们能够使用包括晶圆薄化、背面金属化和激光退火等工艺，从购入的外延片制造 SiC 功率器件。

图 1: Clas-SiC 为客户提供工艺设计套件，使他们能够成功地在二极管和 MOSFET 平台上生产定制器件。

Test	Diode	MOSFET
1200V HTRB at 175C	80 devices for 1000 hours	80 devices for 1000 hours
+25V/-10V HTGB at 175C	N/A	80 devices for 1000 hours
H3TRB at 80C 80% humidity	80 devices for 1000 hours	80 devices for 1000 hours
Temperature Cycling -55C/+150C	N/A	40 devices for 1000 cycles

表 1: 对作为参考的 15 A、1200 V MPS 二极管和 80 mΩ、1200 V MOSFET 进行测试，证明了 Clas-SiC 工艺平台的功能性和可靠性。

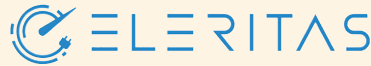
我们还对晶圆级测试进行了投资，这样我们就可以进行高达 10 kV 的阻断测试和高达 500 A 的导通模式测试。我们最先进的测试仪和自动探测器有助于快速测试。我们还拥有用于高温反向偏置和高温栅极偏置 (HTGB) 测试的可靠性测试炉，以验证我们的处理平台。

在工具采购之后，我们进入了一个全面的工程阶段，包括工具验收、资格鉴定和正式认证。我们在 2020 年展示了平面 SiC 肖特基二极管的性能，随后在 2022 年初展示了更为困难的平面 MOSFET 的性能。

我们的理念是采用参照物 15 A、1200 V 的 MPS 二极管和参照物 80 mΩ、1200 V MOSFET 作为两个载体，来展示我们工艺平台的功能性和可靠性。这两种参考器件类型都已成功地完成了一整套严格的、类似 JEDEC 的可靠性测试 (详见表 1)。利用这一成熟的技术，我们组装并发布了 PDK。我们的客户正在使用它们在我们的二极管和 MOSFET 平台上生产定制器件 (请参见图 1)。

### 先进技术项目

除了在一系列客户计划中采用 Clas-SiC 的基础技术外，该公司还参与了英国推动电力革命 (DER) 和先进推进中心 (APC) 资助的合作项目。他们包括：



● CELERITAS——与 APC 合作的项目，将 Clas-SiC 的 1200 V MOSFET 技术应用于超快速电池充电应用。



● ESCAPE (汽车电力电子的端到端供应链开发) ——与 APC 的一项合作，在 Clas-SiC 的晶圆厂正在开发领先的 SiC 沟槽 MOSFET。

● ASSiST (高级 SiC 固态变压器) ——与 DER 的一项合作，将 Clas-SiC 的 3300 V MOSFET 技术应用于固态变压器应用。

有关这些项目的更多信息，请访问：

[www.der-ic.org.uk/post/der-ic-success-in-ukri-supply-chains-for-net-zero-competiton](http://www.der-ic.org.uk/post/der-ic-success-in-ukri-supply-chains-for-net-zero-competiton)

[www.apcuk.co.uk/funded-projects/sprint-celeritas/](http://www.apcuk.co.uk/funded-projects/sprint-celeritas/) [www.apcuk.co.uk/funded-projects/mclaren-escape/](http://www.apcuk.co.uk/funded-projects/mclaren-escape/)

### 观点：Clas-SiC 的创始人 Carl Johnson

我整个工作生涯都在从事化合物半导体的工作。早在 1971 年，我们就清楚地看到，II-VI 化合物半导体材料 CdTe、ZnSe 和 ZnS，以及元素半导体材料金刚石和化合物半导体材料 SiC，将成为电磁光谱红外区域的主要光学和电光材料。基于这一观点，我与他人联合创办了 II-VI 公司，以探索、制造和供应这些精选材料的最高质量版本。

1998 年，我们意识到 SiC 将成为一种重要的电子材料，因此，II-VI 公司开始致力于成为高品质 6H 和 4H-SiC 衬底的重要供应商。II-VI 公司最初在 2000 年提供直径为 2 英寸的衬底，之后逐步增加尺寸。2016 年，II-VI 公司展示了第一批 200 mm 的衬底。

我创办 Clas-SiC 的故事可以追溯到 2017 年 3 月，当时我听说苏格兰 Glenrothes 的一家公司计划关闭其硅 /SiC 晶圆厂。我坐上了前往爱丁堡的下一班飞机。我知道，聘请技术精湛、经验丰富的前员工团队，建立一个快速原型制作和中低速生产的晶圆厂，为即将成为我们客户的大量无晶圆厂 SiC 功率器件创新者服务，这将产生协同效应。

从一开始，Clas-SiC 就采用了一套经过时间检验的七种价值观，这也是我在 II-VI 帮助建立的。

自 Clas-SiC 成立以来，这些价值观就一直指导着 Clas-SiC 的决策和文化，它们是：

- 客户至上
- 诚实正直
- 开放式沟通
- 团队合作
- 持续改进和学习
- 以事实为依据
- 安全、干净、有序的工作场所

我们重视所有的员工。我们努力维持一种环境，让每个人都有机会根据自己的技能和肩负的责任，按照自己的选择快速成长。

几乎所有的员工都有机会成为 Clas-SiC 的股东，在实现公司的目标后获得股票期权奖励，或偶尔从其他股东那里购买股票。我们相信，在 ClasSiC 这样的初创公司中，员工持股是“千载难逢”的机会，无论是员工还是公司都不应低估其价值和收益。

## 为什么 SiC 如此重要

对于大功率的能量转换应用，硅功率器件迄今一直表现出色。然而，由于最近能源供应的限制，能源效率变得越来越重要。这意味着每个人都必须尽可能高效地使用能源。宽带隙半导体，如 SiC，有利于实现这一目标。

对于需要至少 650 V 电压的应用，这种材料是绝佳选择，对于需要 1 kV 或更高电压的应用来说，这种材料也非常适合。尽管如今的 SiC MOSFET 和二极管比它们所取代的硅部件更昂贵，但通过实现更高的开关频率，

它们可以显著减少相关系统磁性元件的尺寸和重量。

这些优点显著降低了整个系统的成本和体积，并提高了效率。对于大多数应用，尤其是涉及运输的应用，仅仅调整尺寸和重量即可节省能源。

作为奖励，SiC 改进了功率转换和能源效率。更重要的是，由于其宽带隙，SiC 可以在比它所替代的硅部件更高的温度下运行，从而降低了冷却要求，这也是运输应用中尺寸和重量的又一次可喜减少。

## 使用 PDK 加速进入市场

使用我们的 1200 V MOSFET PDK 的设计人员能够充分利用他们的创新来定制其器件的有源区。我们提供 1200 V 终端方案以及所有的处理细节。为了更好的帮助设计人员，我们的 PDK 包括设计规则手册和设计规则检查平台。

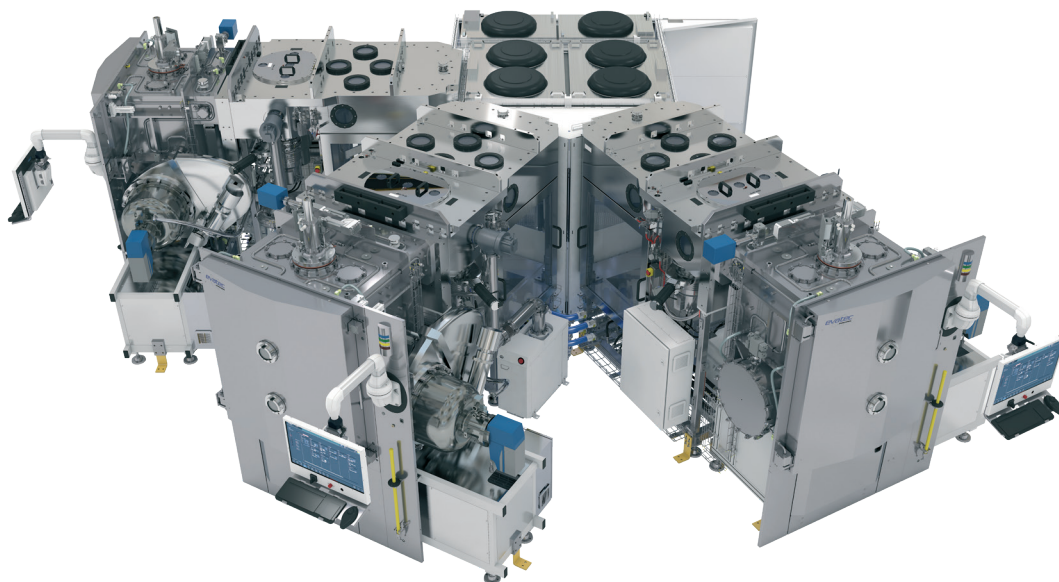
PDK 非常灵活。它甚至允许一位设计人员成功地将多个传感器嵌入到他们的 MOSFET 中。

常见的客户策略是设计多项目晶圆 (MPW) 掩膜组。这允许同时制造和评估许多设计变化，例如平面、正交和六边形架构。

由于我们提供了全面的服务，所有的加工都是在一个通用平台上进行的，具有标准流程和模块。这带来了最小的非重复性工程和原型 MOSFET 的快速制造。这些器件可以在 12 周内生产出来，为客户提供了更快进入市场的有利条件。

我们的 JBS/MPS 二极管 PDK 甚至更加灵活。我们的二极管 PDK 提供 1200V 终端，也被用来设计 650V-3300V 范围内的器件，具有完全定制的高压终端方案。与 MOSFET 一样，生产是在一个通用加工平台上进行的，使用标准流程和模块。

这样可以在短短八周内最大限度地减少非重复性工程，并为二极管原型制造提供了直接、可靠的途径。



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

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

[www.evatecnet.com/cn](http://www.evatecnet.com/cn)

Footnote: 实际产量依据工艺决定

### 人力资源投资

Clas-SiC 在人力资源方面投入了大量资金。虽然在当今紧张的劳动力市场中，招聘是一项挑战，但通过以下方式取得了出色的进展：

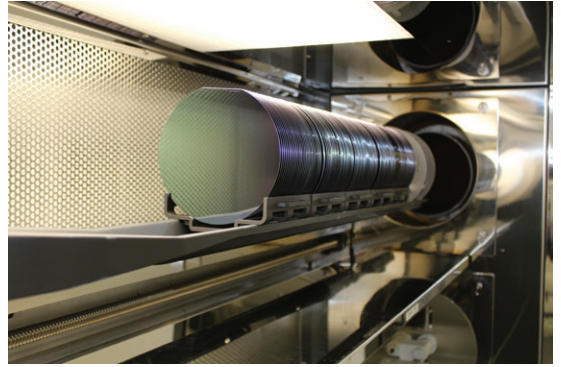
- 基于态度 / 能力招聘操作人员。
- 雇用现代学徒来培养面向未来的器件工程人才库。这很受操作人员的欢迎，为他们提供了职业发展的途径。
- 招聘研究生学徒，他们在大学里参加脱产学习，同时获得实践经验，所有这些学徒都将适合从事工艺工程职业。
- 通过 UKESF 计划资助最有能力的电子专业本科生，为他们提供实习，并在他们毕业后提供就业机会。
- 为当地高中提供总计 23 万美元的 STEM 资金，以鼓励年轻人从事科学 / 工程职业。

我们还展示了 1700 V 和 3300 V MOSFET 技术。Alpha 级 PDK 现已上市，一旦完成可靠性测试，1700 V 和 3300 V MOSFET PDK 将全面发布。

应该注意的是，支持我们 PDK 的标准流程和模块可以并且已经与其他流程技术一起使用。这有助于快速制造高度定制的器件，且无需重复工程。

通过采用 PDK，我们可以保持我们作为纯代工厂的地位，并对知识产权 (IP) 进行明确划分。工艺知识产权仍然属于 Clas-SiC，而设计知识产权则严格属于我们的客户。

工具和材料供应商对我们的参考器件很感兴趣，用它们来研究新概念。这方面的一个例子是我们与牛津仪器公司 (Oxford Instruments) 的合作，该公司利用我们的参考器件来验证一种可以取代化学机械抛光的非接触式 SiC 等离子体抛光方法。



该合作伙伴感谢我们的支持，公司技术营销经理 Grant Baldwin 将该项目描述为“出色的合作”。

### 未来的计划

由于对我们的 SiC PDK 的高度关注，我们的客户需求急剧增长。

受此鼓舞，我们最近将员工人数增加了一倍，达到 50 多人，而且我们还计划再增加一倍。与此同时，我们的 ISO9001 认证正在积极进行中，计划于 2023 年获得 ISO TS16949 认证。此外，我们正在进行一轮股权投资，为需求驱动的产能扩张提供 2.5 倍的资金，并提高运营弹性，所有这些都是建立在现有设施的基础上进行的。

我们有很多值得期待的事情，包括来自当前和潜在客户的令人兴奋的销量预测。

为了在这些预测实现时履行我们的义务，我们正在积极与能够处理大批量、对产能要求很高的客户产品的潜在 SiC 晶圆厂合作伙伴接洽。当这些产品超出我们的产能时，我们将移交给准备好提供高速生产能力的合作伙伴。

从一开始，我们就没有停滞不前的打算。我们的下一个目标包括：鉴定 1700 V 和 3300 V MOSFET 平台；继续逐步完善我们现有的 1200 V MOSFET PDK；继续与我们的设计合作伙伴合作开发第二代 1200 V MOSFET PDK，这将显著降低 MOSFET 的特定导通电阻，同时提高短路耐受时间；以及将于今年晚些时候推出的平面 JFET 平台的开发。

我们密切关注技术趋势。对它们的观察使我们决定，高压器件和沟槽 MOSFET 技术是我们开发计划的下一个领域。这将使我们能够为利用这些先进技术的高度定制应用工艺提供 PDK。我们客户的需求决定了我们的路线图，并将继续这样做。SC



# 回顾2022 展望2023

在 2023 年，请您展望一下化合物半导体行业的发展趋势？在新的一年里有哪些可以预见的突破或创新？



周利民 博士

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

随着 5G 通信、电动车、绿色能源成为主流、国防与航天等新应用领域兴起，化合物半导体正在成为重要的战略领域。SEMI 预测全球功率及化合物半导体器件晶圆厂产能 2023 年可望首次攀至千万片晶圆大关，达 1,024 万 WPM（月产能，8 寸晶圆），并于 2024 年持续增长至 1,060 万 WPM。中国是最大的化合物半导体市场，具有很大的优势，比如可以定制化，拥有较好价格控制能力。中国早在多年前就投入了化合物半导体的研发。预计到了 2023 年，中国将占全球产能的 33%，其次是日本的 17%，欧洲和中东地区 16%，以及台湾 11%。

在 2023 年，除了碳化硅功率器件产能的进一步提升和技术上的创新，硅光技术与新型化合物半导体激光器的结合将进一步提升通信网络的速度和降低网络功耗，随着 VCSEL 性能的提升将带来更大范围的应用，GaN 有望在功率效率方面挖掘出更大的潜力，新的 MicroLED 技术会带来更广泛的应用前景。产业模式方面，化合物半导体产业链目前多以 IDM 模式为主，即单一厂商纵向覆盖芯片设计、芯片制造、到封装测试等多个环节。然而，随着衬底和器件制造技术的

成熟和标准化，以及器件设计价值的提升，器件设计与制造分工的趋势日益明显。材料、设计、工艺与设备方面的创新随着专业化技术分工将会带来更加快速的迭代。MRSI 作为化合物半导体芯片封装设备的领先供应商也在积极进行封装设备的迭代和升级，以使我们设备能够支持新材料和新工艺对更高精度、更大压力和更加灵活的高速封装设备需求。



陈明祥 教授

华中科技大学机械学院教授、博士生导师  
武汉利之达科技创始人

鉴于中美科技脱钩，半导体产业和技术竞争更加激烈。今后产业投资和技术研发将会“下沉”，更加关注行业基础原材料和核心装备等底层技术，替代进口。但这方面发展道阻且长，需要时间和持续投入，但假以时日，一定可以有所作为。



陈凯轩

厦门乾照光电股份有限公司技术总监

化合物半导体行业将朝着“长、短、大、小”四个方向发展。

长：在激光雷达等领域，为了提高探测

距离并减小对人眼的伤害，半导体激光器和探测器将逐步向长波长的方向拓展。

短：在杀菌消毒领域，为了提高杀菌效率，UVC LED 从 280nm 和 275nm 向 265nm 甚至 222nm 的短波长方向拓展。265nm 的 UVC LED 杀菌效率最高，并且杀菌效率随着波长的增加或减小而迅速降低（在相同的辐照剂量下，265nm 的 UVC LED 比 275nm 的 UVC LED 杀菌效率高 20%，比波长 280nm 的 UVC LED 杀菌效率高 43%）。

大：伴随着新能源汽车行业的发展，LED 向着大功率照明（汽车前大灯）、功率器件向着大功率电驱（大功率快充）的方向发展。

小：LED 显示器件从传统显示屏朝着 Mini-LED、Micro-LED 这样越来越小的微缩化方向发展。



刘红超 长飞先进首席科学家

中国晶体学会第二届理事、上海半导体照明工程技术协会理事、兼任上海第二工业大学教授

作为中国化合物半导体产业的一份子，

我也看到我国在此领域的前所未有的挑战和隐忧。技术竞争上，以 SiC/GaN 为代表的第三代化合物半导体虽然有着相较于硅的非常明显的优势，但其成本和 Si 器件相比，还需大幅下降；同时，还面临着 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为代表的新一代半导体材料带来的挑战。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 经过近十几年的快速发展，成本和性能优势初现，大概率在 2023 年开始进入 6 吋技术时代；而 SiC 虽已经有 8 吋技术可用，但成本优势还需要进一步体现。地缘政治上，我国三代化合物半导体领域，无论是产品技术和专利布局，还是产品良率和可靠性，甚至成本和产能，和欧美日相比，都有比较大的空间去提升。我们电动汽车所需要的 SiC MOSFET，尤其是主逆变用 SiC MOSFET 晶圆，是隐性的被掐脖子，供应链安全亟待提高。产业链布局上，我国现有三代半产业链沿用成熟的硅基产业链分工态势，在衬底、器件设计、晶圆代工等环节分别布局，这虽得到国内资本市场的认可；但对以 SiC 为代表的三代半导体这个新兴产业以及其现阶段所专注的新能源市场是否合适，值得商榷。反观欧美日的头部公司，都是产业链拉通布局，这虽然与他们的资本和技术实力是分不开的，但这种布局确实也更有利于这个新型产业领域技术的快速迭代和发展，以及即将而来的成本控制，使他们占据先机和主动。要快速提升我国在化合物半导体领域的地位，尤其是在所谓三代半的 SiC/GaN 上补链强链，需要我们产业生态中每一位同仁的携手努力，包括学术界、衬底生产商、晶圆制造商、封测服务商、设备厂商、用户端，甚至是资本圈的同频共振，深刻理解产业发展规律，做出最有利于中国化合物半导体的最优选择。

中国半导体革命还远未成功，需我们全体同仁笃行不怠，踔厉奋发。期待我国化合物半导体人借双碳大政策和资本东风，早日抬头挺胸，当潮立于世界下一代半导体研发和产业化的前列。



周贞宏 博士

BelGaN CEO

小米雷军总早在 2020 年初推出氮化镓手机快充产品引爆了硅基氮化镓市场。目前，硅基氮化镓市场经历了 2-3 年的快速发展，同时也验证了氮化镓功率器件的质量和可靠性十分重要。近几年，氮化镓正在快速地往更高功率的产品和手机快充以外的应用领域渗透，预计 2023 年的增长会更大，Yole 也是历史上第一次调高了 GaN 的市场预期。氮化镓不像碳化硅受到上游昂贵材料的瓶颈限制，它的下游应用从汽车到数据中心、太阳能、新能源等领域涉及面非常广，该领域的初创公司和资本市场都很活跃，因此，我预计氮化镓在 2023 年应该是潜在的巨大的爆发点。

氮化镓市场的发展基于新型公司、分工合作、产业生态等方面一直在不断创新，不像碳化硅是 IDM 模式，一般的小公司根本拼不过。因为 IDM 把精力全部都聚焦在碳化硅，所以对于国内的初创公司来讲是一个比较好的机会实现弯道超车。如果能把握好这个机会，在氮化镓的赛道里面，我相信可以培养出更多的世界级的公司，Navitas, GaN Systems 已经是世界的领头羊了，我们期待未来有更多的中国初创公司可以成长为世界巨头。

过去几年，碳化硅半导体的供应链向上游整合发展的趋势非常明显，ST 收购 Norstel、Rohm 收购 Si Crystal、Onsemi 收购 GT Advanced、Navitas 收购 GeneSiC，不仅可以保证供应链的安全和稳定，也可以大幅的控制成本，因为上游材料占据了整个碳化硅的 6-7 成成本。预计 2023 年这一趋势会愈演愈烈，国内的厂商也注重上游材料的投资扩产从而加速材料的降本。



孙海定 博士

中国科大微电子学院研究员，博士生导师

2023 年，化合物半导体技术将继续为我们带来振奋人心的技术进步和产业机遇。而且，相较于传统的硅基集成电路落后好几代国外的技术，我们国内的化合物半导体技术在很多领域是跟跑，并跑甚至有几个细分领域是领跑的阶段。化合物半导体行业中，最难的几个方向是设备研发，原材料研制，工艺摸索，芯片制备这四个部分，我们国内接下来的攻关和发展将继续围绕着这几个核心要点进行。一些关键材料的合成，如

高质量可控的单晶衬底（氮化镓，磷化铟，砷化镓，碳化硅，氧化镓）的合成与制备值得期待。一些新型光电器件如电注入紫外激光器，VCSEL 以及高效 microLED 的研制及其在微显示领域的应用，也将取得新的进步并进一步被市场所验证。在电力电子领域，高频，高压，可靠性高的硅基功率电子器件的研制一直是永恒的主题，但是不同材料体系，尤其是 GaN 基功率电子和 SiC 基功率电子在市场竞争中的竞争也会愈发的激烈，如果找到合适的市场准入和切入点，并研制出高稳定性的器件和模组，是企业占领某个细分应用领域的关键。



倪炜江  
芯塔电子创始人，总裁

由于第三代功率半导体具有一代功率半导体无可比拟的技术优势，碳化硅、氮化镓等材料在新能源汽车、清洁能源等领域将会快速增长。新能源汽车厂商纷纷推出或计划研发搭载碳化硅器件的新能源车型，同时碳化硅器件在光伏储能、充电桩功率模块、军工、高端电源等诸多领域快速渗透。

中国目前电力电子产业已经占据全球市场 50% 左右，成为电力电子终端的应用中心。可以预见，未来中国一定会成为全球碳化硅创新和研发的中心。这是因为国内碳化硅全产业链齐全，并且已经初具规模和竞争力。在良好国家政策和产业环境下，中国的碳化硅产业链必将发挥全产业链的优势快速发展，若干年以后会成为全球第三代半导体器件的创新和供应中心。

经过短短两年，安徽芯塔电子的碳化硅器件在市场上已建立了良好的口碑和品牌知名度，成功进入新能源汽车、光伏、储能、充电桩、高端电源等领域头部客户，2022 年全年营收迎来爆发性增长，增长率行业领先。

2023 年，碳化硅芯片需求和产能矛盾依旧突出，功率器

件国产化普遍被终端客户接受。以国产化和自主创新为特色的安徽芯塔电子，具有强大长期保供能力，发展机遇非常好。



冯雷  
英诺赛科首席市场营销官

有相关调查显示，近三年以来，受到疫情等因素影响，全球经济向中低速增长回归，半导体行业缺乏基础驱动力，2023 年全球半导体行业或将迎来 5%-10% 的负增长，会出现供应链效率低下，人才供应不足，企业加速并购或重组等状况。但对于化合物半导体，尤其以氮化镓和碳化硅为代表的第三代功率半导体而言，市场仍处于从起步到大规模应用的加速阶段，其市场并没有受到直接冲击。氮化镓和碳化硅分别在其优势领域继续拓展应用的深度与广度。从英诺赛科自身的情况来看，业绩也是呈现持续增长的态势。除了在消费电子领域的路越走越宽，氮化镓在数据中心、可再生新能源、汽车等领域的应用已经形成了多点开花的局面。我们相信可再生新能源会成为氮化镓的下一个爆点，这是一个非常大的领域，涉及到能量的转换、存储、分配等各个环节，都是氮化镓能够发挥优势的地方，相信在 2023 年会取得不错的突破和进展。在数据中心的全功率链条解决方案上，我们也已经在与上下游的客户共同推进氮化镓的应用。



孙聂枫 博士  
中国电子科技集团公司第十三研究所 首席专家

化合物半导体种类众多，目前比较热的 SiC、GaN 将快速发展，氧化镓等也将逐步显露出优势，磷化铟、砷化镓等的应用越来越广，快速进入消费类市场，相关技术创新将进一步加速各类产品的推广。

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



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

在过去的一年里，化合物半导体行业并购案持续发生，一些比较大的并购案例如 ASM 收购意大利 SiC 外延公司 LPE；氮化镓功率芯片行业领导者纳微半导体宣布收购碳化硅行业先驱 GeneSiC；BelGaN 收购安森美半导体比利时工厂；Lumentum 完成 NeoPhotonics 收购等等都是行业比较有影响的事件。行业中的强强联合更值得关注，例如 Vitesco 和 Infineon 在 SiC 领域达成合作；日立和恩智浦合作开发 SiC 模块；意法半导

体与 Soitec 就碳化硅衬底制造技术达成合作；Qorvo 和 SK Siltron CSS 签署 SiC 协议；IQE 宣布与 SK siltron 达成战略合作协议；英飞凌与台达双强联手以宽带隙技术抢占高端服务器及电竞电源市场；CSA Catapult 与西门子建立功率领域合作伙伴关系；Lucid Motors 与 Wolfspeed 强强合作，在屡获殊荣的 Lucid Air 车型中采用 SiC，所有这些化合物半导体行业的强强联手与合作，将使得化合物半导体行业的技术领先企业强者更强，产业上下游之间的合作也将带来更广阔的技术应用前景，但这也将对国内新兴的化合物半导体企业带来更大的竞争压力。



郑小鹿 博士  
营口天维半导体制造有限公司创办人

随着汽车 800V 母线系统的采用，1200V 高压氮化镓功率器件的推出势在必行。过去一般认为 900V 是区分蓝宝石基或者硅基的分界线。Transphorm 的 900V 车规产品是硅基的，去年初其宣布了今年将推出蓝宝石基的 1200V 产品；国内的能华也刚推出 1200V 的蓝宝石基的产品。但是硅基一直是人们的不懈追求，2022 年 GanPower 推出了业界首款 1200V 硅基的 e-mode 器件，晶湛发表了 12 英寸的符合 1200V 器件要求的硅基的外延片，Transphorm 又紧锣密鼓地在十月宣布了其 1200V 的硅基产品。硅基的寄生漏电是高电压下的杀手，人们采取对硅基的过渡层的增厚、改进以及各种调控措施，看来 1200V 电压等级的硅基产品已取得了进步。

目前 650V 电压等级的商品化的氮化镓器件的导通电阻能降到 25 毫欧姆，通流 60A (GaN Systems) 和 22 毫欧姆，通流 100A (VisIC)。这与碳化硅器件还是有差距的。两者相比，氮化镓功率器件有较小的开关损耗，但是较大的导通损耗。前者允许氮化镓器件有更高的开关频率，后者却限制了通流。晶湛和弗吉尼亚理工在氮化镓器件上做了多层二维电子气平面通道，总的导通电阻由于并联得以减小。该实验结果的重大意义，人们期待后续商品化的成功。在中低压等级的赛道，氮化镓器件也有其优势，英诺赛科的 100V 电压等级的导通电阻降到 3.2 毫欧姆，最近获 AspenCore 的全球电子成就奖。



陈明祥 教授  
华中科技大学机械学院教授、博士生导师  
武汉利之达科技创始人

随着化合物半导体产业发展，对器件小型化、集成化和高可靠提出了新要求，相关封装基板产业和技术发展迅速，但竞争也更加激烈。在过去的 2-3 年里，功率半导体封装用陶瓷基板领域投资（含企业兼并）超过过去 10 年总和，国内高性能陶瓷基板（如电镀陶瓷基板 DPC、活性烧结陶瓷基板 AMB 等）技术实现从无到有，产业规模不断提升，逐渐实现进口替代。



陈凯轩  
厦门乾照光电股份有限公司技术总监

2014 年诺贝尔物理学奖获得者 Hiroshi Amano 教授带领的研究团队首次成功实现了室温条件下 AlGaN 深紫外激光器的连续输出。这项突破距离 GaN 蓝光激光器问世已过去 27 年，由此

可见其难度之高。这项研究是半导体激光器在全波段拓展进程中的一个重要里程碑。



刘红超 长飞先进首席科学家  
中国晶体学会第二届理事、上海半导体照明工程技术协会理事、兼任上海第二工业大学教授

2022 年是第三代半导体激情澎湃的一年。从学术的角度看，Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 高压功率器件，GaN、AlN 基紫外器件都取得惊人进展，氢离子注入抑制 SiC 缺陷延展让我们看到新一代半导体在更大范围更多种类器件应用的希望。从产业的角度看，随着新能源产业及纯电动汽车的市场发展，对 SiC、GaN 功率器件需求不断扩大，供应越来越紧张，全国各地都在尽可能快速扩大产能，每月甚至每周都会有此类消息宣告。持续的技术进步和新技术的不断导入，包括激光切割、薄片以及新型晶体生长技术等也使材料和器件成本持续下降成为可能，必然提升三代半器件在功率和射频等领域替代传统 Si 基器件的速度。市场需求急剧增长为我们每一个从业人员，每一个公司提供了持续快速增长的机会。



周贞宏 博士  
BelGaN CEO

2022 年春节，BelGaN 成功完成了安森美比利时车规产线的并购，也是我提出通过建立产业生态打造“氮化镓谷”的元年。BelGaN 通过一个开放式第三代半导体代工平台联合 IMEC 全球领先的氮化镓科研机构建立“氮化镓谷”，我们愿意和产业上下游公司和 IDM 建立长期合作共赢的生态，把最先进的材料、工艺、技术、产品产业化，通过车规级工厂批量生产提供给市场和客户。“氮化镓谷”概念也得到了国内外产业认可，有多家氮化镓公司包括英诺赛科、博世、英飞凌等都宣布或在探索设立“GaN Valley”研发中心。只有上下游密切合作共赢才能实现产业聚焦，把氮化镓产业做强做大。



倪炜江  
芯塔电子创始人，总裁

我们可以看到，在过去的一年里，国内碳化硅产业链都在积极扩产，但产能还未真正大规模释放，与海外巨头相差较大。在 2022 年，芯塔电子完成了全产业的国产化和自主可控，新的一年，我们将继续与产业链合作伙伴推进更深度和更全面的合作。同时，凭借芯塔电子对客户终端应用的深刻理解，提前挖掘终端应用蓝海市场，精准定义新产品，开发出有特

色的功率器件和模块，确保早期蓝海市场的红利。

艰难方显勇毅，磨砺始得玉成。春天终将回馈每一个在冬天里的抱薪者、坚守者、发光者。希望每一位行业伙伴都能向前奔跑，向着新年的曙光奋力前行。产业化爆发的拐点已至，中国必将成为第三代半导体的创新和供应全球中心！芯塔电子目标成为碳化硅功率器件和解决方案全球领航者的初心不变！



孙聂枫 博士

中国电子科技集团公司第十三研究所首席专家  
多个厂家发布 8 英寸 SiC 单晶，多个单位开展了溶液法生长 SiC 单晶，立方砷化硼等所谓完美半导体被研制出来，磷化铟合成进入 20Kg 级的水平，这些都为未来化合物半导体的发展起到深刻的作用。

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



潘尧波

中电化合物半导体有限公司董事

由于碳化硅在电动汽车、光伏等领域的大规模应用势不可挡，所以碳化硅的市场不错，资本也非常看好这一赛道；所以很多碳化硅的项目，获得了高的估值，融资也相对容易；但是产业仍然面临亟待克服的难点：

- 1、6 吋高质量衬底的批量供应；现在国内少数几家企业可以批量供应 6 吋高质量衬底，但是供应缺口仍然较大。
- 2、车规主驱用的 1200V MOS 器件的量产；现在国内少数几家企业已开发出车规主驱用的 1200V 的 MOS 器件，但是面临良率偏低，成本偏高的问题。
- 3、8 吋 SiC 衬底的量产；现在国内少数几家企业已可提供 8 吋 SiC 衬底的样品，8 吋衬底同比 6 吋可用面积提升 70% 左右，有望大幅降低 SiC 器件的成本，但是 8 吋衬底存在量产困难的问题。



周贞宏 博士

BelGaN CEO

首先，碳化硅最主要的应用是新能源汽车，大概占整个下游应用的 80%，而在新能源汽车领域里面，大部分的价值量都在主驱逆变器内。目前，国内企业还没有能量产完全达到车规级碳化硅 MOSFET 的性能、质量和可靠性的厂商。大部分公司刚刚建厂，在做碳化硅材料（6 寸）和器件领域从 0 到 1 的工作，而国外 IDM 主要聚焦在做 1 到 100 的扩产。量产和车规级的可靠性验证是比从 0 到 1 更难的一项工作，所以 SiC MOSFET 的量产和车规可靠性认证，我认为国内最需要解决的一个难题。

从产业链协同方面，IDM 的优势巨大，做设备的需要 Fab 给他反馈数据来调设备，做衬底的希望做 Fab 给衬底反馈需求，因为很多细节工艺的处理是靠下游长期快速反馈不断优化打磨，做久了就知道哪些地方需要注意和优化，所以

能有高度紧密的产业链上下游协同的 IDM 的优势是巨大的。

从市场方面，汽车由 400V 升到 800V 使得碳化硅成为了一个必备品。充电时间长一直是新能源汽车的一个痛点，而 800V 的架构以及碳化硅材料的应用都可以良好的解决这个问题。碳化硅器件的成本现在是硅的 3 倍以上，随着良率的提升碳化硅的成本逐年也在下降。我们期待碳化硅的成本下降之后，除了高端车之外，能有更多的中端车也能用上碳化硅，实现耐高压、耐高温、高频的性能。

从资本方面，仅 2022 年 6 月到 12 月，化合物半导体领域的大型融资事件就有 40 起，平均每月，就有 7 家公司完成新一轮融资，有些明星公司一年内融资 2-3 轮，可见资本市场对化合物半导体领域的热度非常之高。我认为，在这样一个高热度下估值一定是偏高的，但大量的资本一定会推动产业的发展，我们也期待中国能跑出几家真正能有科技自主的企业。



倪炜江

芯塔电子创始人，总裁

目前国内 SiC MOSFET 产品主要还依赖国外进口。因此，实现碳化硅功率器件的 SiC MOSFET 全产业链自主可控成为亟待解决的问题。芯塔电子一直致力于国产化的推进，积极整合优势资源，打造国内产业联盟的建立。牵头通过与国内头部 Fab 厂签订产能绑定协议以保证代工的产能，另外与产业中的头部材料厂签订 1 年的材料订单，以锁定产能，同时在 2022 年已经完成国产衬底的验证工作，形成了完整的国产供应链体系，克服国外供应链很难控制的消极影响，充分保障产品的交付能力。

芯塔电子在全国国产化方面身体力行，已经成为碳化硅产品国产化的成功典范。芯塔电子国产化的成功故事极大地鼓舞了国内众多碳化硅同行，引起了国内碳化硅上下游产业链和投资界的极大关注。我们相信越来越多的碳化硅公司跟芯塔电子一样大力推动国产化进程，从而形成国产化的巨大浪潮，中国碳化硅浪潮最终会席卷全球。

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



郑小鹿 博士  
营口天维半导体制造有限公司创办人

这几年来氮化镓器件在快充产品上的应用成功，在国内催生出了十余家涉及驱动芯片设计或者合封的企业，其中大部分还仅限于制作 65W 及以下的小功率的准谐振反激电路 (QR)。横向氮化镓 HEMT 器件的优点是无反向恢复电荷，在更大功率的应用中，半桥的氮化镓器件用于构成无桥的图腾柱的 PFC 以及 LLC 的电路的拓扑都是其特有的优势。这样，快充市场的延伸自然是数百瓦的电脑电源和适配器。氮化镓器件在高频高压工作条件下，电压变化大又快，其压摆率  $dv/dt$  就高。要限制其低于相应的栅极驱动器的共模瞬态抗扰度 (CMTI)，还要限制其不超过氮化镓的较小的栅极电压允许范围，这样对氮化镓的栅极驱动器提出了更高的要求。

更大功率的数千瓦的应用市场当属数据中心的服务器电源。几个主要的器件厂家与其合作伙伴正在进入这个市场：GaN Systems 首推 3KW，功率密度大于 6.1W/cc；Navitas 推出 3.2KW，功率密度大于 4W/cc；镓未来推出 3.6KW，满载时效率 >96%，出货量已有 100K 台/年。这些数据中心的服务器电源需要满足 80PLUS® 钛金级效率认证（满载条件下效率达到 >91%，半载条件下 >96%），这可能是当前在 2KW 到 5KW 的功率范围内的最大市场。2023 年全球数据中心用电量将是 1KTWh，还将持续增长，到 2030 年达 3KTWh（国内的数据中心用电量占全球的 31%）。假定单机功率为 3.2KW，可以估算出全球的一次性的装备量是 1.14 亿台电源，每三、四年要更换一次。每台电源采用 6 颗导通电阻为 35 毫欧左右的 650V 氮化镓器件，再进一步考虑电源的输出电压从 48V 继续降压，也还需要提供相应的低压的氮化镓器件。

镓未来也看好户外便携式储能的市场，该产品功率 2KW 左右，不同于大的充电宝，其 AC 端也能输出逆变的工频电压，其 DC 端与 48V 蓄电池的充放电相连，所以是个离网的双向变流器 (PCS)。氮化镓器件构成的无桥图腾柱的拓扑正好胜任双向逆变。目前国内的几个主要生产厂家的生产总量大约在 400 万台/年，每台需要采用 6 颗导通电阻为 50 毫欧左右的 650V 氮化镓器件。其实真正庞大的电力储能市场所用的 PCS，其 AC 端取电或者送电都是要与三相电网相连，其 DC 端口与 400V 以上的类似于动力电池的电池组相连，还可能有第二个 DC 端与光伏板的输出端相连。2022 年全世界的 PCS 装机总量 4480MW，目前全都采用了 IGBT 的器件。即便假定全部采用分布式的氮化镓的 3.2KW 的小型 PCS，

一年的全球的装机量折合为 140 万台。

2022 年我国新能源汽车销量有 688.7 万辆。一般说来，可以期待每一辆电动汽车配置一个车载充电器 (OBC)。GaN Systems 与合作伙伴近几年来推出了 7.2KW 和 22KW 的 OBC，最近获得德系车企的 3 亿欧元的订单。VisIC 也正在推出 6.6KW 的 OBC，其中使用了 6 颗 22 毫欧的 D-mode 器件。GaNPower 于几年前就重点研制成功了 3.3KW 和 6.6KW 的 OBC，最近他们还特别指出：1200V 的氮化镓芯片是车载的 OBC 的主力器件。随着 800 伏汽车总线电压的推行，1200V 的氮化镓器件，不论是硅基的还是蓝宝石，也正应时而生，不乏用武之地。

不久前氮化镓器件开始应用于光伏逆变器，浙江贝尼刚推出全球首款微型逆变器的成熟产品，2.8KW 功率，最大持续输入电流为 20Ax4。2022 年全球光伏装机量是 220GW，即便全部采用这种分布式的 2.8KW 的微型逆变器，全年的装机量为 7800 万台。对于采用输出电压上限为 1100V 的光伏板，是需要 1200V 电压等级及以上的氮化镓器件，所以光伏逆变器是高压氮化镓器件的又一个用武之地。

在中大功率的应用中，特别是在汽车电子的应用，氮化镓的 d-mode 器件（耗尽型、常通型）比较 e-mode 器件（增强型、常断型）在栅极驱动的可靠性上占有优势，我们知道 e-mode 器件的软肋是其栅极的电压范围太窄，而且最佳的工作电压太靠近临界电压。在低电压小功率的使用条件下，问题还不大；但是在高电压大功率高频的使用条件下，电压变化会快，或者说压摆率  $dv/dt$  会大，其反馈到栅极，就可能造成误触动，也可能超过了栅极的安全电压范围。一种解决的方案，是采用集成共封的设计精准的栅极控制器，其中还要有集成有快速的过流传感器和执行器件。这个高难度的方案是 Navitas 的方案。另一种方案，是回归到 d-mode，特别是在大功率的应用中。从已获得车规论证的高压器件看，e-mode 器件的只有 GaN Systems 一家，而 d-mode 的就有多家了：Transphorm、Nexperia、TI 和 VisIC。看国内的企业，镓未来注重千瓦级以上的应用，推出的全是 d-mode 相关的 cascode 器件；远山新材料所开发生产的也是 d-mode 相关的高压器件；能华虽有 e-mode 的产品，主打的也是 d-mode 相关的 cascode 器件。能华的 d-mode 的栅极结构中采用了独特的 MIS，含有绝缘介质层。笔者实测了能华的 d-mode 管的栅压范围，居然超过 (-50V, 30V)。由于 d-mode 安全启动的问题通过 cascode 或者 direct drive 的路径已经实质性在实际中解决了，在中大功率的高压应用中，可以预期 d-mode 相关的器件更易于渗入市场。



孙海定 博士

中国科大微电子学院研究员，博士生导师

从 GaN 基功率器件技术本身来看，目前主流的技术都聚焦于横向 HEMT 器件，主要基于蓝宝石、硅、碳化硅三种衬底。

SiC 基 GaN 器件研发时间较长、外延质量较高，且由于 GaN 在工作频率上具有无可比拟的优势，所以这一技术在通信基站、数据中心等应用中优势较为明显。对于这一技术，现阶段的主要任务在于继续提高工作频率和输出功率以满足逐年增长的能效需求。

蓝宝石基 GaN 器件受限于衬底的尺寸、导热性、导电性等问题，在大功率密度的电力电子应用中略显劣势。目前在实验室中已诞生了一些开拓性的创新技术解决蓝宝石基 GaN 功率器件的问题，如无损的衬底剥离技术、原位热沉蒸镀技术等，下一步如何将这些技术在量产中实现，得到高良率的芯片，是蓝宝石基 GaN 能否抢占市场的关键。

硅基 GaN 是综合成本和性能后的电力电子市场的最优选择，这也是目前行业内布局最多、发力最猛的一项技术。得益于此，硅基 GaN 电力电子器件在 650V 以下的中低压应用中的成本优势逐渐显现。但硅基 GaN 电力电子器件的研发时间较晚，现阶段该技术仍存在尚未克服的外延、工艺、器件可靠性问题，包括大尺寸外延的翘曲、缺陷控制、产线中碎屑裂片问题、芯片良率有待提高、动态退化较为严重等，都在一定程度上制约了硅基 GaN 的产能，使得当前 GaN 市场仍处于导入期，对下游应用的供给不充足。

相比之下，作为 GaN 在电力电子市场诸多领域的竞争对手 SiC 基功率器件，其研发时间较长、外延质量较高，器件可靠性问题基本得到有效解决，已达到行业标准，这也使其在市场份额较大的新能源汽车领域以及 1kV 以上高压领域取得了初步应用。因此在未来短时间内，科研和工业界应着眼于硅基 GaN 中低压应用的关键根本问题，在外延和器

件两大方向中的良率和可靠性方面着重发力，以性能优势巩固优势领域，抢占市场份额。当然，对 1kV 以上高压应用中，垂直型 GaN 功率器件的发展也颇有潜力，后续通过优化 GaN 同质衬底生长、外延结构设计和器件终端方案，GaN 垂直器件也有望在耐压、输出功率等指标上达到 SiC 的水平，但如何解决成本和尺寸问题以求进入市场应用仍需耐心、细心和长期的研发工作。



冯雷

英诺赛科首席市场营销官

在数据中心的服务链条上，我们提倡全氮化镓解决方案，从 AC/DC 变换，到 DC/DC 隔离变换和 POL 非隔离变换，我们都有高中低压的产品供给市场。我们的应用团队也为市场和客户准备了 PFC, LLC, Buck, Buck-boost 等各种应用参考设计。

新能源汽车上的功率变换应用也是一个巨大的市场。我们目前已经供货或者与客户共同开展的项目应用囊括了激光雷达驱动模块，轻混车 48V-12V 双向变换模块，支持 Type C 充电电路的 Buck-boost FET 等等。其他如车载 DC/DC，多种电机驱动电路都会是氮化镓产品发挥其体积小，开关速度快，延时低等优势的应用。

过去几年英诺赛科在器件设计、生产工艺、产品方案等环节上做了大量工作，2022 年正式发布了 40V, 100V, 150V 技术平台，同时进一步深入布局大功率高压产品，为氮化镓进入全面应用做好了产品和产能的准备。

同时我们也在氮化镓行业生态方面进行了规划和布局，已经与诸多合作伙伴开发基于氮化镓性能最优化的专用控制器和驱动器 IC，以及针对特定应用场景的参考设计。我们也需要和所有的终端客户、直接客户、相关的主动和被动元件厂家共同协作，保证整个方案的性能优势和市场可行性。

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



周利民 博士

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

研究机构 Yole Developpement 预测，磷化铟 (InP) 器件应用领域正从传统的数据通信和电信市场向 C 端消费市场扩展，预计到 2027 年下游应用规模将达到约 56 亿美元。磷化铟具备饱和电子漂移速度高、导热性好、光电转换效率高、禁带宽度较高等特性，使用磷化铟衬底制造的可穿戴设备具备脉冲响应好、信噪比好等特

性。磷化铟衬底非常适合用于制造可穿戴设备中的传感器，用于监测心率、血压、血氧浓度、甚至血糖水平等生命体征。此外，使用磷化铟衬底制造的激光传感器发出的光对人视力无损害，可应用于虚拟现实 (VR) 眼镜、以及固态车载激光雷达等产品中。磷化铟在消费市场的应用刚刚兴起，无论是可穿戴智能传感的应用，还是用于无人驾驶或辅助驾驶的激光雷达应用，市场前景都是非常可期的。这一潜在的巨大应用市场引起众多 InP 器件厂商开始积极寻找商机从传统的数通和电信市场向 C 端消费市场扩展，这两年光通信器件厂商

都在寻找这方面的机会。对这一业务的拓展，我想提出几点应注意的。第一，是目前C端消费市场远没有数通和电信市场成熟，从预测看短期内也没有那么大的市场规模和市场需求。第二，是C端消费市场的产品可靠性，以及产品特性与封装特性等要求与光通信领域应用有很大差别，需要对新的应用有深入的认识和了解。第三，是拓展C端消费市场，需要分析自身技术、市场、资金等的优势，避免一窝蜂式的盲目投资与盲目转型。只有理性看待新兴应用市场的发展才能合理参与并推动一个新兴应用产业的健康发展。



孙聶枫 博士

中国电子科技集团公司第十三研究所首席专家

随着高质量、大尺寸磷化铟单晶生长技术的不断突破，相关成本也在不断下降，消费类磷化铟基器件方兴未艾。iPhone14及 AirPods 耳机等将磷化铟探测器应用于皮肤感知，77GHz 毫米波雷达用于非接触心电图，激光雷达，毫米波雷达等应用于智能驾驶，都将积极的促进磷化铟材料和器件的蓬勃发展，预计未来几年将是磷化铟快速发展的关键时期。

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



郑小鹿 博士

营口天维半导体制造有限公司创办人

通常我们说的氮化镓功率器件是指硅基横向的 HEMT 器件，其有优势也有弊端。横向的 HEMT 器件利用了氮化镓材料所特有的极化特性，使电流集中于接近表面的薄层中而易于受控。这也带来一些缺点：栅极边缘尖峰电场在表面易于诱导材料击穿，表面缺陷态会导致电流崩塌产生动态电阻。日本 PowDec、丰田合成和国内远山新材料采用 GaN 外延层作盖帽层，再次利用材料极化的特征产生电场屏蔽，克服了横向器件的上述缺点，制作出了高达 6000V 的蓝宝石衬底的器件。国外也有在硅基衬底上生长 1 微米左右的 3C-SiC 构成复合衬底的实验，如法国 NovaSiC、日本名古屋理工和 Air Water。在此复合衬底的基础上继续制作氮化镓的横向或者垂直器件，绝缘强度和晶体的质量得以提高。垂直器件的路线是类似硅的 VDMOS 的路线，通过制作厚的外延层作为漂移区，换来高耐压和低比导通电阻，也就舍弃或者部分舍弃了氮化镓的极化优势。由于垂直器件中电流方向与位错方向同向，加剧了断态漏电，这样在厚的外延层中降低氮化镓材料的位错密度成为提升器件性能的关键。终端保护也是个新的课题。国内不少研究机构（苏州纳米所、北大、南大、深圳大学、浙江大学）和港科大采用了不同的衬底材料正在开展这方面的研究，苏州纳米所孙钱研究组在硅基上取得了垂直的肖特基二极管 SBD 和 PIN 二极管的进展，比导通电阻和击穿电压的指标在业内领先。晶湛的硅基氮化镓垂直功率外延片具有低的位错密度和高的电子迁移率，通过合作方也制作了业内领先的 PiN 二极管。这些垂直器件的研究关系到将来的高压电网的大电流开关器件，具有好的应用前景。

QST 衬底是美国 Qromis 公司以 AlN 陶瓷材料为基础构造的复合层状结构的 8 英寸晶圆，与 GaN/AlGaIn 的热膨胀

系数非常接近。QST 衬底使得生长低位错密度的 GaN 缓冲层和厚膜变得易行，特别有利于 GaN 垂直型功率器件。台湾世界先进进一步产业化了这个技术，目前正在导入器件的生产工艺流程，开始量产。遗憾的是，尚未见到国内有企业或者机构开展类似的研究开发工作。氮化镓横向 HEMT 器件的最显著的特点是没有体二极管，也就没有了反向恢复电荷，开关速度就可以更快，开关转折过程就安全，用于半桥和桥式的拓扑电路也尤为高效，这是好的方面；但是它也缺失了可逆的雪崩击穿，缺失了短路承受能力，这恰好是一般器件赖以自身保护的手段。在断态时，不可能无损伤地去在线追踪介质击穿发生时的电压；通态时的更早的过电流的检测和短路保护就尤为重要。目前做到最快的是 Navitas，达到 30ns 的响应和执行时间，但是在其他厂家的器件结构中难以复制，人们还在寻找更好更简单的手段和办法。



王琦 博士

北京大学东莞光电研究院常务副院长

国内专业从事氮化镓衬底制造的，主要代表的有苏州纳维、东莞中镓、镓特等企业。量产尺寸均在 2-4 英寸。经过近十年的努力，量产衬底的位错密度已经进入 10 的 5 次方量级，偏角均匀性小于 1%，已经达到较好的一致性。氮化镓衬底的器件应用方向主要有两个大方向：一是蓝绿光激光器应用，二是功率电子器件应用。衬底的应用研究主要以科研院所与企业联合为主要形式。两大方向应用均取得了一定的成果。

目前氮化镓衬底主要面临的技术难题：在衬底制造方面 1、衬底尺寸太小，与硅衬底和蓝宝石石制备方法原理不一样，氮化镓衬底制备属于异质外延，大尺寸很难克服异质外延应力，导致 4 英寸及以上氮化镓衬底的均匀性较差，容易碎裂，良率极低，成本极高，不利于后端应用及推广。



- 生产氮化镓衬底的设备目前基本是少片机，小于6片。从设备层面，氮化镓离规模量产和低成本工业化之路还有一段较长的研究阶段。
- 氮化镓激光器应用方面，主要面临的是量子阱受到氮化镓极性影响产生的量子限制斯塔克效应，在内建极化电场的作用下，半导体的能带发生倾斜，电子-空穴对发生空间分离、波函数交叠量减少，引起发光效率下降、发光峰（吸收边）红移的现象。
- 氮化镓垂直功率电子器件应用方面，主要是面临高压耐压及低导电电阻特性相互制约的问题。高耐压特性需要更厚的外延厚度及更低的载流子浓度要求，低导电电阻则需要薄层的外延厚度及更高的电子迁移率及载流子浓度。  
无论是激光器应用还是功率电子器件应用，在可靠性方面还需要投入大量的研究，才能达到应用的要求。

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



陈明祥 教授  
华中科技大学机械学院教授、博士生导师  
武汉利之达科技创始人

历史总会惊人的相似，UV-LED 将遵循蓝光 LED 技术和产业化发展趋势。随着资源（资金和人员等）不断投入，UV-LED 发光效率不断提升，器件性价比提高，市场规模不断扩大，从而突破产业“甜蜜点”。



陈凯轩  
厦门乾照光电股份有限公司技术总监

在深紫外 UVC LED 领域，学术界和产业界仍在为提升 UVC LED 的光电转换效率而持续努力，目前规模量产的平均水平大约在 3-4% 左右，预计 2023 年可达到 4-5% 的量产水平。随着 UVC LED 电光转换效率的提升，其市场应用也将逐渐从小功率的表面杀菌（如杀菌棒等消费级产品）向大功率表面杀菌（如冷链物流等）和流体杀菌（如中央空调、商用净水等）领域渗透。在外延生长方面，采用 nPSS 衬底和高温退火（HTA）技术制备高质量 AlN 和 AlGaN 外延层成为近几年的研究热点之一，但受制于成本方面的原因目前尚未大规模导入量产，未来在产业链上下游的共同努力下或许能够逐渐规模化量产。此外从目前的 2 英寸衬底升级到 4 英寸衬底也是进一步降低 UVC LED 生产成本的途径之一。在芯片制备方面，理论上“透明 P 型层 + 反射电极”可以有效提升出光效率（LEE），但实际上如何生长透明 P 型层并与反射电极形成良好的欧姆接触，则需要外延端和芯片端共同努力攻克诸多难题。在封装方面，随着 UVC-LED 逐渐从小功率器件向大功率器件方向发展，如何解决散热、透光、气密性、可靠性等技术问题，并在性能和成本之间取得平衡，将成为封装厂需要重点考虑的课题。在应用方面，UVC LED 将逐步从面向消费者的 To C 市场（主要是小功率的表面杀菌）逐步进入面向商业应用的 To B 市场及面向

公共领域的 To G 市场（主要是中大功率的表面杀菌及流体杀菌），或许可以借鉴当年类似“十城万盏”这样的公共工程进行普及推广。

在 Micro-LED 领域，将有越来越多的企业推出搭载 Micro-LED 的显示产品，并且产品的成本和价格将越来越亲民。在外延生长方面，氮化物 InGaN 红光 LED 将继续成为 Micro-LED 的研究热点之一，但目前氮化物 InGaN 红光 LED 的半波宽（FWHM）仍然远大于传统磷化物 AlGaInP 红光 LED，并且其电光转换效率仍然较低，期待在 2023 年能够在这方面有所突破。在芯片制备方面，如何降低表面复合（surface recombination）对器件光效的影响，仍然是业界在努力解决的问题，更好的表面钝化处理将是可能的解决方案之一。在巨量转移和巨量修复方面，业界已逐渐把目光聚焦到激光的解决方案上，我们将看到有越来越多的国产设备厂商参与其中，这对产业的发展将有极大的促进作用。



涂涛  
晶能光电（江西）有限公司外延总监

在 2021 年底，大家讨论微显示 Micro LED 的时候，普遍认为全彩化难度太大，技术难以实现。一年过去了，已经有多家公司发布了不同路线的带 CMOS 驱动的 0.11~0.39 英寸全彩显示模组。资本的涌入极大地加快了技术进步，LED 微缩化时代正在到来，我们对实现 Micro LED 作为终极显示方案更有信心。

当前 Micro LED 的实现路径有两种：芯片巨量转移和高 PPI 的晶圆直接键合方案。从 Micro LED 生长衬底来分，也存在两种技术路线：一种是 4/6 英寸的蓝宝石衬底外延，利用激光剥离技术制备 Micro LED；另一种是 8 英寸及以上硅衬底 LED 外延，利用湿法无损去硅和类 IC 工艺制备 Micro LED。在大屏电视上用蓝宝石做巨量转移的为主，业界普遍认为大尺寸硅衬底方案将更适合生产晶圆直接键合、高良率、

高 PPI、低成本、面向 AR 应用的 Micro LED 微显模组。

Micro LED 的大规模应用需要大幅度降低成本，对大屏电视来说，大约要下降 90%；对微显示应用，需要下降 50%。从长远来看，选择一条工艺相对简单、良率稳定、可靠性好的技术路线，是抢占市场的重要因素。

当前研究硅衬底 Micro LED 的国外企业有 PLESSEY, ALLOS、Apple 等，国内很多初创企业也在深度开发硅衬底 GaN 基 Micro LED，硅衬底的大尺寸加上天然的垂直结构工艺，这是大家看好硅衬底 Micro LED 技术的两个重要因素。但硅衬底全彩 Micro LED 的成熟应用还有一段路要走，首当其冲的是硅衬底红光 InGaN MicroLED 的外量子效率需从目前不足 1% 提升至 10%，这需要跨越巨大的技术鸿沟。当然业界也寄希望于 QD 色转全彩方案。目前，晶能光电及其合作伙伴在这两方面的研究都有不错的进展。目前晶能的 8 英寸 Micro LED 外延片已经量产，8 英寸芯片产线正在完善中。晶能光电在传统硅衬底 LED 生产过程中积累的产业化经验将极大地推进硅衬底 Micro LED 产业化，未来一段时间，量产的产品将以 8 英寸为主，后续将根据市场和技术的成熟度适时推进 12 英寸工艺验证。

Micro LED 会重塑一个产业链，硅衬底技术应当抓住这个机会，和中下游企业、科研机构一起合作开发，加速硅衬底 Micro LED 技术和产业的发展，顺利完成从普通 LED 制造到 Micro LED 半导体制造的转变。



王琦博士  
北京大学东莞光电研究院常务副院长

对于 UV LED 相关产业，目前属于市场需求稳定的发展阶段，受限于 UV LED 的发光效率较低及光强容易衰减等可靠性问题，现在应用还集中在终端消毒应用领域。而工业应用设备级别的应用还没有突破，例如曝光机应用、医疗应用等，这个应用领域潜力较大。结合以上两点的需求，如何有效提高 UV LED 的发光效率及可靠性应是 UV LED 相关行业的研究及发展的方面。

Micro-LED 具有更轻薄、更少耗材、更低功耗、更高分辨率等特点。在车载屏幕、AR/VR、手机平板等领域具备较好的应用场景。目前 Micro-LED 主要面临的产业挑战主要表现在良率问题，如何实现更高良率的巨量转移是 Micro-LED 应用的主要瓶颈。提高良率，降成本是 Micro-LED 行业的主要发展方向。其次，氮化镓的红光发光效率及可靠性也是 Micro-LED 应用的技术难点之一，离蓝光和绿光还有一定的距离，需要行业投入研发，突破瓶颈。驱动集成也是 Micro-LED 行业在应用端的发展趋势，符合更小更轻便的产业需求。



孙海定博士  
中国科大微电子学院研究员，博士生导师

近年来，外部环境复杂，行业竞争激烈，自从固态照明 LED 市场渐渐形成红海趋势之后，新型 LED 技术和产业这两年已经逐渐发展起来了，已经具有形成新蓝海市场的势头，其中 UV LED 和 micro LED 是其中两个最耀眼的氮化物光电领域的新星代表。

UV LED 是指发光波长在 400 nm 以下的 LED，根据波长又分为 320 nm 到 400 nm，我们称之为 UVA，280nm 到 320nm，称之为 UVB，200nm 到 280nm，称之为 UVC。其中 UVA LED 技术发展最为成熟，在工业固化和植物照明领域，UVA LED 市场份额正在呈爆发式增长。UVB 和 UVC 波段的 LED 主要聚焦在杀菌、消毒，医学光疗等领域的应用，其中 UVB 以光疗为主，UVC 则主要应用于杀菌消毒领域，但是 UVB 和 UVC LED 无论是外延生长，还是工艺上做好良好的欧姆接触，封装上做好散热都还具有较大的挑战。因此还需要整个产业链，高校研究机构和企业的深度合作，共同努力，我们相信，在未来几年时间里，随着技术逐渐成熟，产品逐渐渗透，UV LED 将会开启一个新的规模化增量市场。尤其是随着研发的不断投入，电光转换效率的不断提升，从 2020 年的 3~4% 以及提升至 5~7%，甚至个别波段的深紫外 LED (270-285nm) 的电光转换效率已经突破 10% (量产型)。但是我们也认识到，如果要将深紫外 LED 的电光转换效率达到或者接近目前蓝光 LED 的效率 (60% 及以上)，还有非常长的一段路要走，这也是为什么目前从国家层面 (重点研发计划等国家级项目) 和地方政府都在加大研发投入，以期最终实现节能环保廉价的固态紫外光源。除了技术层面，紫外或深紫外 LED 的市场挑战也不小。目前紫外，尤其是深紫外的主要应用领域还是在消费电子产品及水和空气净化杀菌等。三年前，由于疫情的爆发，同时也自然引爆了对紫外 LED 的市场需求，紫外 LED 进入大家的日常生活中，被广泛应用于消费或者家用电子产品中。然后，随着后疫情时代的到来，消费端对紫外 LED 的需求也趋于饱和，同时也随着很多家紫外 LED 创业公司的不断涌现，在其电光转换效率没有完全突破的情况下，LED 芯片本身价格的竞争则会趋于白热化，市场竞争也会很激烈。

Micro LED 是以微米量级的 LED 作为发光像素单元的新型显示技术，与传统的显示技术，比如 LCD 还有 OLED，micro LED 在分辨率、亮度、能耗、使用寿命、响应速度等方面都具有明显的优势。目前 micro LED 在技术上还具有很多难点，比如说，巨量转移难点，随着芯片尺寸的减小，目前很多公司和研究机构已经从 50 微米做到 2 到 3 微米，像素点的数量会以数量级增加，还是相当有挑战的；另外除

了巨量转移问题，在前端和后端工艺都还有问题，比如说，晶圆的良率问题，像素点显示驱动问题，坏点监测返修问题等等。但是这种挑战中也蕴含了机遇，micro LED 超高清显

示技术的市场前景，尤其是在高清显示，AR 和 VR 微显示领域的应用是非常值得期待的。

**化合物半导体国产设备一直在迭代追赶中，对比国际竞品贵司的产品或技术还有哪些提升空间？（可就某一类型设备具体陈述）**



周利民 博士

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

相比于国际品牌，国内半导体芯片封装设备主要集中在中低端的 LED 固晶机，目前已经占据了主要的市场份额。但对化合物半导体封装设备，占有绝对市场份额的主流封装设备依然是进口设备。对于化合物半导体核心器件来说，芯片封装工艺技术是保证器件长期可靠性的关键技术。中国作为化合物半导体封测的大国，化合物半导体封装设备国产化进程正在加速，化合物半导体芯片封装固晶设备的国产化具有很大的意义。目前化合物半导体芯片封装固晶设备国产化方面，主要的差距来自几个方面：第一，高端设备的核心部件，如运动，驱动，视觉，传感等 90% 以上来自欧美日发达国家。核心部件方面的追赶需要时间和耐得住寂寞。第二，国内设备制造商主要采用比较快速的抄袭或仿制为主要开发模式，以快速实现产出和获取利润，缺乏在核心技术和核心工艺方面的创新。这方面的追赶也需要时间积累与沉淀，以及研发的投入。这根本不是靠申请几个专利就可以称之为具有核心技术的。第三，国内设备制造商对设备参数的不实宣传，这也许是某些导向要求对标国际品牌，企业不得已而为之，但是这极大影响国产品牌的企业信誉。国产高端固晶机设备的技术指标与进口设备没有差别，但行业普遍对国产设备指标不信任，原因就是虚高太多。由此，国产化化合物半导体封装设备提升的空间主要是在脚踏实地和精益求精的观念上，想挣快钱的思维模式是不适合做高端设备类产品。MRSI 从成立至今近 40 年的成功历史，就是我们专注于化合物半导体芯片封装。MRSI 认为有机会进行本地化的研发与制造，以提升 MRSI 产品的性价比与市场响应度。迈锐斯自动化(深圳)有限公司是瑞典 Mycronic AB 在中国注册的独资子公司，是全自动、高速、高精度、灵活全自动固晶机全球领先供应商 MRSI Systems 在中国地区业务本地化的战略举措。公司延续 MRSI 在华业务，同时进行本地化的应用与新产品开发，正试图为中国客户提供具有更高性价比的高端产品。



潘尧波

中电化合物半导体有限公司董事

长晶炉是 SiC 材料产业的核心设备，目前国产长晶炉设备的性能已完全达到国际竞品的水平，并且价格优势明显；下一步需持续降低成本。



周贞宏 博士

BelGaN CEO

随着第二、三代半导体产品在新能源汽车、光伏、消费电子、射频等领域应用的推广，化合物材料、MEMS、功率器件等领域对刻蚀设备的需求必将快速增长。目前在 4/6/8 寸等中端刻蚀市场，主要被一些小型的国内外厂商以及二手刻蚀设备商占据。随着零部件短缺、功能过时等因素影响，二手设备会逐渐萎缩，4/6/8 寸刻蚀设备市场的供求关系将进一步失衡，供不应求的问题将更加显著。

目前中国化合物刻蚀市场主要充斥着一些小型外国企业以及部分中国初创企业，国外刻蚀设备制造商的服务影响速度慢、设备价格及服务价格昂贵，这些问题都严重降低了下游生产商的使用体验。国内企业在性能稳定性上与国外头部巨头还存在一定的差距。

我认为，未来设备厂商，首先要深度挖掘客户的需求，针对特定材料开发定制化的刻蚀工艺，来提供更贴合客户的服务，通过差异化竞争保持竞争优势。



孙聂枫 博士

中国电子科技集团公司第十三研究所首席专家

检验检测类设备国产化率一直不高，这些产品基础性强，精度高，体现的是综合实力，需要我们踏踏实实的努力前行，更需要同行用户的积极支持。人工智能，大数据在材料生长和加工中的作用需要进一步加强，设备智能化是设备设计制造的必然趋势，需要同行更加重视。

# 推进 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 掺杂

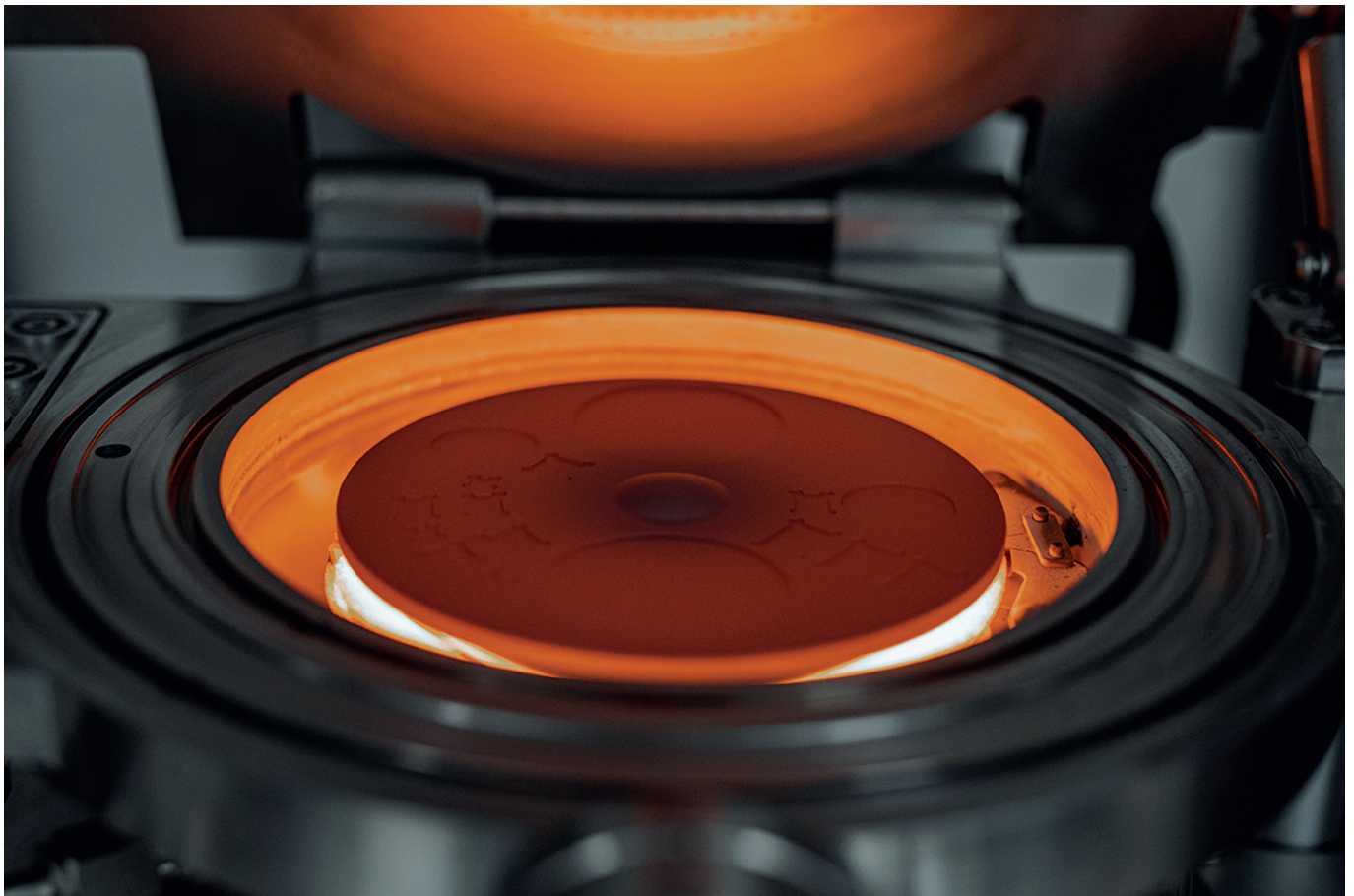
一氧化二氮、氨和几种含碳分子是掺杂氧化镓的有力竞争者。但哪一个是最好的呢？

作者：Fikadu Alema、Aaron Fine、William Brand 和 Andrei osinsky, AGNITRON 公司

**G**a<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有很多令人喜欢的地方。由于其带隙约为 4.8eV，这种半导体有望提供比目前热门的 SiC 和 GaN 更有效的开关器件。更重要的是，可以从熔体中生长 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体，这表明它有低成本生产超宽带隙器件的潜力。然而，前景并不乐观。如除了担心 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有限的热导率之外，还有与掺杂相关的重大问题<sup>[1]</sup>。由于价带的能量色散很小，而价带态的有效质量很大，在 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中进行有效的 p 型掺杂的可能性很小。这些固有的缺点将 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件结构限制为单极器件。尽管研究

人员已经研究了诸如镁、铁和氮等杂质是否可以打开 p 型导电性的大门，但所有的尝试都产生了深能级。

但这些尝试仍然很有价值，因为深受主有利于设计 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 功率器件。当 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衬底没有被故意掺杂时，它们仍然表现出非故意的 n 型导电性，这与背景杂质硅的显著水平相关。可以通过在 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 熔体中加入受主杂质，如镁或铁，来补偿这一缺陷 -- 这样就可以生产出半绝缘或高电阻的 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衬底。深受主杂质的加入导致平衡费



来自 Agnitron 的 Agilis 500 MOCVD，可放置各种形状和尺寸的晶圆。

米能级远离导带边缘，并更接近受主掺杂状态。费米能级的这种转变允许与相邻的 n 型材料形成结，从而为实现潜在的电压阻断的势垒打开了大门。最终，这可以实现具有受主掺杂沟道的增强型 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET。

硅不只是在 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层中起作用。此外，正如二次离子质谱 (SIMS) 所示，无论生长方法、工艺条件和衬底中的掺杂物如何，硅元素都会在外延膜和衬底之间的界面处积累。人们认为硅的存在是由于衬底的二氧化硅抛光液抛光所致，是一种麻烦，会降低器件的性能。例如，在 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 场效应晶体管中，在衬底外延层界面处积累的硅会产生寄生导电沟道，阻碍器件关断。

Agnitron Technology 是位于明尼苏达州 Chanhassen 的用于 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 生长的 MOCVD 设备供应商，我们充分意识到了这些问题，并正在为解决这些问题发挥我们的智慧。我们认为自己不仅仅是设备供应商 -- 我们积极参与开发 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的生长和加工技术，并且通过与许多领先的研究小组合作，我们正在帮助研究与故意掺杂这种氧化物相关的许多挑战的解决方案，以及消除不必要的杂质的影响。在下面我们将提供和其他公司在该领域合作的成功经验。

### 通过蚀刻精益求精

调整外延层 - 衬底界面处硅浓度的一种常

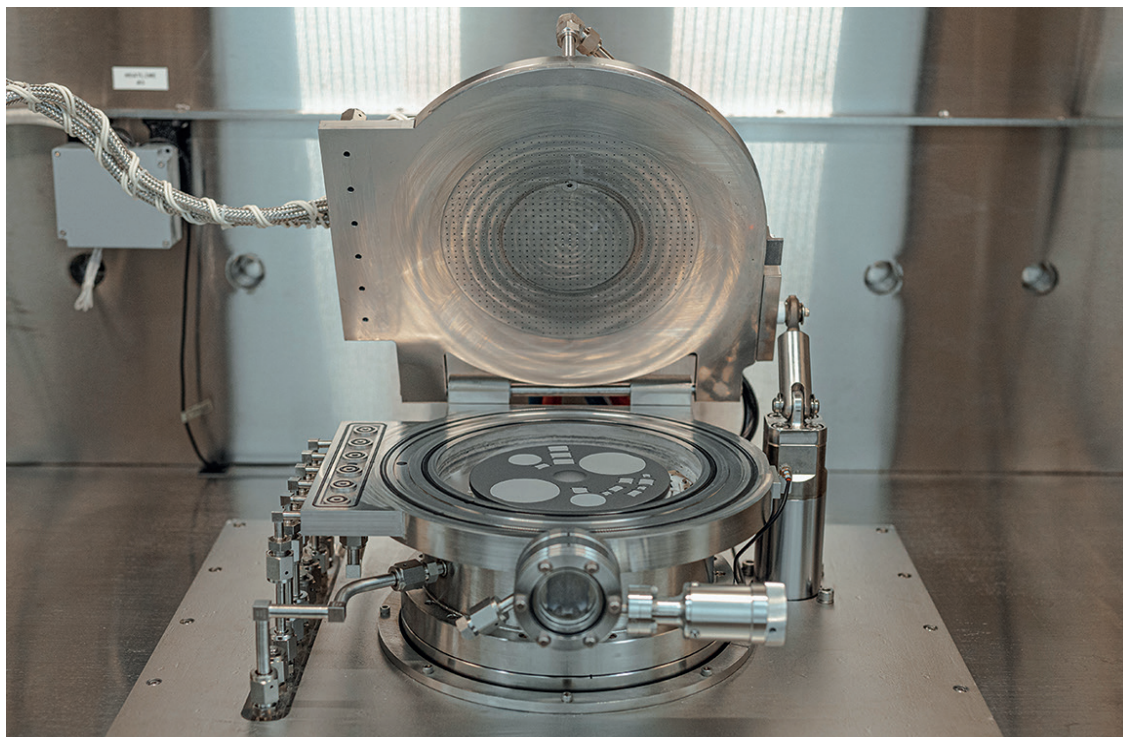
见方法是，在生长之前在浓缩的 HF 酸中腐蚀 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衬底约 30 分钟。虽然这一步骤不能根除界面处的硅，但它的浓度会下降。这导致受主杂质（镁或铁）在外延生长过程中从半绝缘衬底扩散到薄膜 / 衬底界面中进行部分补偿。器件结果表明，这种方法阻止了界面处硅到达器件有源沟道的威胁。去年，我们与加州大学圣巴巴拉分校 (UCSB) 的 Krishnamoorthy 团队合作，报告了高性能、几千伏级 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MESFET，其功率因数超过 350 MW/cm<sup>2</sup> [2]。

由于 30 分钟的腐蚀无法去除所有的界面硅，因此有必要增加该工艺步骤的时间。但这并不是好方法：HF 会损伤衬底的表面，导致粗糙的外延膜表面带有凹坑，进而破坏器件性能。更好的办法是通过改变生长过程或通过离子注入，用深受主掺杂物补偿界面。

### MOCVD 的优点

在这两种选择中，基于生长的方法可以带来更好的结果。注入镁、氮和铁等物质需要能量巨大的离子束，它会破坏 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料的晶体结构并引入额外的缺陷 [1]。虽然热退火可以修复晶体质量，但它会导致杂质在注入区域内向外扩散开并重新分布。这对实现均匀、界面清晰的掺杂分布是一个障碍。

MOCVD 和 MBE 都可以提供均匀的横向



来自 Agnitron 的 Agilis 500 MOCVD 反应器，带有开放式喷头和装载到晶圆载体上的各种形状和尺寸的晶圆。

## Agnitron 公司的 MOCVD 产品组合

本文报道的实验结果是使用 Agnitron 公司生产的  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOCVD 系统获得的。这家原始设备制造商很自豪能够让其 MOCVD 系统在与开发  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料和器件相关的大多数科学期刊和会议报告（超过 100 篇）中发挥了关键作用。Agnitron 的这些贡献突出了其在生产创新和可靠的  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOCVD 系统方面的专业知识。

每个 Agnitron Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOCVD 反应器的核心是一个专有的高速旋转盘式反应器（RDR）垂直生长室，具有允许高速运行的附加功能 - 速度超过每分钟 1300 转。通过材料科学和工程设计，整个腔室的沉积颗粒不太容易到达晶圆表面。高速 RDR 的独特之处在于它的流体动力学，它抑制了颗粒的再循环，使晶圆上方的区域清洁无沉积。

远程流入气体输送系统具有无意的相反应，这是由于与晶圆的喷射距离增加，在薄膜的生长表面留下了不需要的颗粒。这是由于在  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 生长过程中的高氧化率，因此很难利用远程流入气体输送系统，因为该过程会产生难以避免的颗粒。如果颗粒到达晶圆表面，就会影响到器件的性能。

Agnitron 通过引入高速旋转来解决这一问题。通过这种改进，可以在表面仔细管理颗粒，并消除不必要的沉积。然而，由于与晶圆的距离而导致的过量气相反应仍然是一个挑战。

Agnitron 通过使用紧密喷射气体分配系统来应对这一威胁，该系统将颗粒的消除与气体和前驱体的良好混合结合起来。高速 RDR 以及紧密注入气体输送系统可减少多余颗粒的形成，并防止不需要的颗粒到达或粘附在晶圆表面。

RDR 高速旋转的另一个优点是它的控制程度更高，确保了出色的厚度分布均匀性。

Agnitron 的许多系统都具有极大的灵活性，允许操作人员在几个小时内远程和近距离喷射气体分布配置之间进行切换。Agnitron 还提供了添加升级后的紧密喷射气体分配系统的能力，该系统可确保在整个晶圆载体上均匀地流入氧气，而不仅仅是集中流入。

由于人们对 Agnitron 的  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 反应器越来越感兴趣，它的所有系统现在都能够在直径达 4 英寸的晶圆上进行 MOCVD 生长。对于更大的尺寸，还有 Agilis 500/700。

和深度掺杂，无需额外的生长后处理。对于 MOCVD，研究人员已经证明了用镁、氮和铁深受主掺杂物对 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 进行掺杂。在这三种物质中，Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中的两种阳离子位点受主物质 -- 即铁和镁 -- 受到了更多的关注，部分原因是它们在 GaN 中取得了成功。可以使用 Cp<sub>2</sub>Fe 和 Cp<sub>2</sub>Mg 来充当这些掺杂物前驱体，这些前驱体在室温下是固态的，并且具有低蒸汽压<sup>[4,5]</sup>。通过摩尔流速来控制掺杂物的浓度。

来自 Agnitron 的 Agilis 500 MOCVD，可放置各种形状和尺寸的晶圆。

对于这两种前驱体，工艺工程师必须处理表面骑行问题。存在一种威胁，即在生长过程中，掺杂物会延伸到不打算掺杂的层中。当采用高衬底温度来生长薄膜时，这种情况会加剧<sup>[6,7]</sup>。

我们牵头努力开发氮掺杂，因为这种方法受热扩散的影响较小。氮掺杂通过替代 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中的氧格点来实现深受主传导<sup>[8]</sup>，可以用多种氮源来实现，包括氧化亚氮（N<sub>2</sub>O）和稀释氨。请注意，分子氮（N<sub>2</sub>）是不合适的，因为它的高度稳定性阻碍了活性氮物质的产生。

## 氧化亚氮还是氨？

N<sub>2</sub>O 的主要用途是作为 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 MOCVD 的替代氧源。需要注意的是，切换到 N<sub>2</sub>O 并非易事，需要与通常用于纯氧生长完全不同的生长条件，包括更高的生长压力和温度，以确保这种氧化物的有效分解<sup>[7]</sup>。当用于 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的生长及其氮掺杂时，氮的掺入效率取决于工艺条件，例如 N<sub>2</sub>O/III 比率、衬底温度和腔室压力。据 SIMS 分析，通过改变这些工艺条件，已经实现了氮浓度从不可检测的水平到大约  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。提高生长温度会降低氮的浓度，但其掺入伴随着氢，也遵循类似的分布<sup>[5-7]</sup>。

用检测不到的氮浓度生长的薄膜也显示出超过  $150 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的室温迁移率，自由载流子浓度低至约  $2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。实现低自由载流子浓度，同时实现与使用纯氧生长的材料相媲美的迁移率，对于高压垂直功率器件来说是至关重要的。不幸的是，根据低温霍尔测量，氧化亚氮生长的薄膜的纯度比使用纯氧生长的薄膜要差。这被认为可能与高补偿有关，与薄膜中的氮有关，尽管 SIMS 无法检测到这种元素。在室温下，霍尔迁移率不受氮的影响，因为声子散射是最主要的机制。

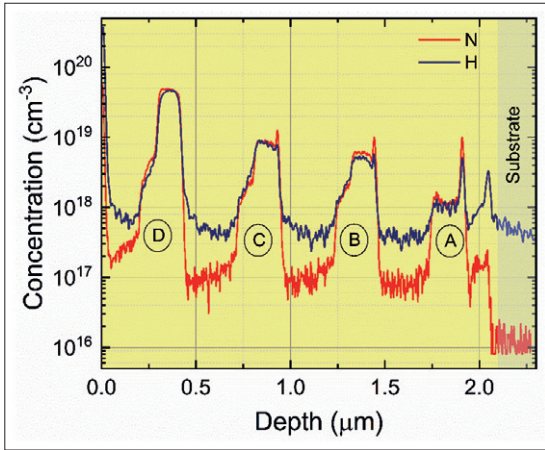


图1: 使用NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>作为氮掺杂源掺杂的Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>中的氮和氢的SIMS深度分布。A、B、C和D标识显示了通过引入0.8、4、6和30 sccm的氮流量生长的层。增加氮的流量会增加氮和氢在薄膜中的结合。

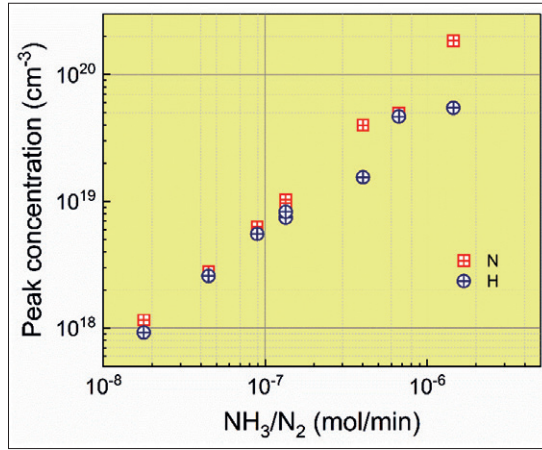


图2: 氮和氢掺入量与稀释在氮中的氨摩尔流量 (NH<sub>3</sub>/N<sub>2</sub>) 的线性关系。

在外延层中掺入氢远非理想，因为它作为浅施主，补偿了氮<sup>[9]</sup>。这个问题，以及氮掺入对工艺条件的高度敏感性，使得实现可控的掺杂具有挑战性。这促使我们探索一种替代的掺杂剂——氨，它被广泛用于 GaN 基器件的生长。此外，氨在相对较低的衬底温度（约 600℃）下分解，这让它成为在不改变 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 典型生长条件的情况下用于氮掺杂的良好候选者——使用 N<sub>2</sub>O 时情况并非如此。

使用氨而不是 N<sub>2</sub>O 的主要优点之一是流速可以控制薄膜中氮的浓度（见图 1）。

这种关系是理想的，氮浓度随着氨的摩尔流速而线性增加（见图 2）。不幸的是，当氨被用作前驱体时，在 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的典型生长温度下形成薄膜时，氢的水平会跟随氮的分布。移至更高的生长温度是有益的：这增加了氨的热解效率，根据 SIMS，当这种气体用于在这些高温下掺入 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜时，这会降低氢浓度。在比典型生长温度高 100℃ 的条件下生长薄膜，会导致氢浓度降低了约 7 倍。在减压环境中高温退火可能会提供另一种方法来降低这些薄膜中的氢浓度，但它的存在仍然可能导致氮的补偿行为。

我们的实验支持了这一点。我们在氮气浓度超过  $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  的情况下生长了一些氮掺杂的单层 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。所有的样品都有很高的电阻，

电阻比对照样品（在相同的生长条件下生产的非故意掺杂的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜）高三个数量级以上。氢-镓空位也可能导致电钝化<sup>[10]</sup>。

基于这些发现，我们认为现在是探索用于生长氮掺杂、无氢 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜的替代前体的时候了。我们的计划是研究一氧化氮 (NO)。

### 碳掺杂

在诸如 GaN 的材料中，当碳提供掺杂剂时，它会充当深受主。然而，碳在 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中的表现尚不清楚。有些人预测它充当深 DX 中心<sup>[11]</sup>，而另一些人则认为它充当带正电的浅施主<sup>[12]</sup>。

在 MOCVD 过程中实现碳掺杂有几种候选材料。一种选择是向反应器中引入简单的碳氢化合物，例如丙烷，但也有可能用前体三甲基镓 (TMGa) 掺杂碳，用于薄膜生长。与使用 TMGa 生长 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相关的一个常见挑战是，由于在热解过程中形成高活性甲基自由基，导致大量碳掺入生长层。然而，碳掺入的程度取决于工艺条件——主要是氧气与 TMGa 的比例。调整这一点可以生长掺杂或未掺杂碳的 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。

我们使用 Agilis MOCVD 反应器系列来研究氧与 TMGa 的比例在碳掺入中所起的作用（见图 3）。这涉及到在恒定的压力和衬底温度下生长堆叠层，但改变 VI/III（氧与 TMGa）的比例。根据 SIMS，

Samples	Carbon (cm <sup>-3</sup> )	Hall electron mobility results		
		n <sub>RT</sub> (cm <sup>-3</sup> )	μ <sub>RT</sub> (cm <sup>2</sup> /Vs)	μ <sub>T</sub> (cm <sup>2</sup> /Vs)
#1	No carbon (<6.0×10 <sup>16</sup> , DL)	1.1×10 <sup>16</sup>	106.0	12,600 @ 35K
#2	2.0×10 <sup>17</sup>	2.1×10 <sup>16</sup>	136.2	9,593 @ 35K
#3	2.0×10 <sup>18</sup>	3.2×10 <sup>16</sup>	89.0	227 @ 125K

表I: 通过改变O<sub>2</sub>/TMGa比例生长的碳掺杂薄膜的电特性。

当我们把 VI/III 的比例从 170 增加到 1220 时，这导致碳掺入量几乎呈线性下降了两个数量级——从大约  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  下降到大约  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

我们与空军研究实验室的研究人员合作，研究了使用氧与 TMGa 的比率超过 2000 生长的薄膜。这产生了基本上不含碳的薄膜——如果有碳掺入，也超出了 SIMS 的检测极限，即大约  $6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ——具有创纪录的超过  $23,000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的低温迁移率和低至  $2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$  的受主浓度<sup>[13]</sup>。

我们的研究表明，调整反应器压力和衬底温度对碳掺入没有影响。这一点从我们在不同的压力和温度下，使用超过 2000 的 VI/III 比例，生长了许多层中可以看出。通过 SIMS 对这些测试样品的测量表明，薄膜中的碳含量仍然低于仪器的检测极限。这使我们得出结论，控制  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜中碳浓度的方法是调整氧气和 TMGa 之间的比例。

在此研究的基础上，我们探讨了与碳和硅共掺杂的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  薄膜的电学特性。使用用于图 3 所示工作中采用的  $\text{O}_2/\text{TMGa}$  比例，我们外延了薄膜，并使用霍尔测量了它们的室温和低温迁移率。研究表明，当碳的浓度低于  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时，这种掺杂剂的含量对迁移率没有影响；但当它从这个极限增加一个数量级时，迁移率就会明显降低（见表 1）。在较高的碳浓度下，镓格点上有更多

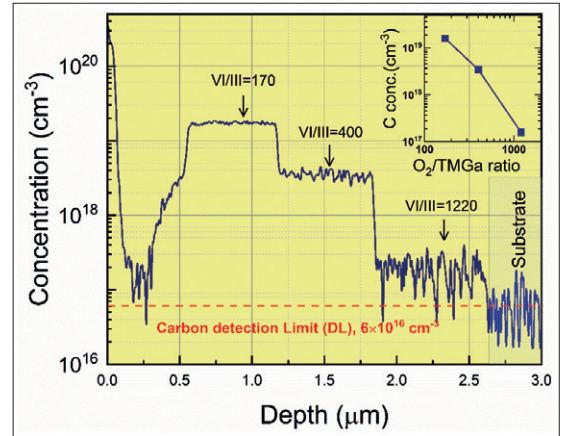


图3: 通过调整 $\text{O}_2/\text{TMGa}$ 的比例，从TMGa掺杂的 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 样品中碳的SIMS深度分布。从插图所示，碳的浓度随着 $\text{O}_2/\text{TMGa}$ 比例的降低而增加。

的替代物，导致晶格变形和电补偿——这两个因素都会影响室温和低温迁移率。

尽管仍有许多进步空间，但我们的努力表明，掺杂  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  有许多不同的方法。结果取决于掺杂剂的选择和生长条件。

本文讨论的工作大部分由海军研究办公室 (ONR) 通过 STTR 第二阶段计划资助的，合同号为 N6833518C0192，由 Lynn Peterson 先生指导。Agnitron 还感谢来自加州大学洛杉矶分校的 James S. Speck 教授和 Sriram Krishnamoorthy 教授的支持和协作贡献，这对 Agnitron 团队的  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  相关进展非常重要。CS

### 扩展阅读

- [1] J. L. Lyons, "A survey of acceptor dopants for  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ," *Semicond. Sci. Technol.* 33 05lt02 (2018)
- [2] A. Bhattacharyya et al. "Multi-kV Class  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  MESFETs With a Lateral Figure of Merit Up to  $355 \text{ MW/cm}^2$ ," *IEEE Electron Device Lett.* 42 1272 (2021)
- [3] M. H. Wong et al. "Acceptor doping of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  by Mg and N ion implantations," *Appl. Phys. Lett.* 113 102103 (2018)
- [4] Z. Feng et al. "Mg acceptor doping in MOCVD (010)  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ," *Appl. Phys. Lett.* 117 222106 (2020)
- [5] F. Alema et al. "Low  $10^{14} \text{ 1/cm}^3$  free carrier concentration in MOCVD grown epitaxial  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ," *APL Mater.* 8 021110:1-9 (202).
- [6] F. Alema and A. Osinsky, "Metal Organic Chemical Vapor Deposition 1 – Homoepitaxial and heteroepitaxial growth of  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  and related alloys" in *Gallium Oxide - Materials Properties, Crystal Growth, and Devices*, M. Higashiwaki and S. Fujita, Eds. 293 Cham, Switzerland: Springer, 2020, p. 141.
- [7] F. Alema et al. "MOCVD Growth of  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  Epitaxy," in  *$\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ : Wide-bandgap Semiconductor Theory and Applications*, J. S. Speck and E. Farzana, Eds.: American Institute of Physics, 2022.
- [8] H. Peelaers et al. "Deep acceptors and their diffusion in  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ," *APL Mater.* 7 022519 (2019)
- [9] J. B. Varley et al. "Oxygen vacancies and donor impurities in  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ," *Appl. Phys. Lett.* 97 142106 (2010)
- [10] J. B. Varley et al. "Hydrogenated cation vacancies in semiconducting oxides," *J. Condens. Matter Phys.* 23 334212 (2011)



# 将 GaN 功率器件扩展到 10kV

GaN 功率整流器和晶体管结合了超过 10kV 的击穿电压和低于 SiC 极限的特定导通电阻

作者：Yuhao zhang, 弗吉尼亚理工学院

**实**现碳排放达到净零的关键之一是提高电能处理的效率。这可以通过引入具有更低导通电阻、更快开关速度和高击穿电压的半导体功率器件来实现。

它的推出必须包括运行在 1 kV 和 35 kV 之间的器件，这一范围通常被称为中压，但在许多情况下也被称为高压。在这个范围内运行的器件广泛用于电网、可再生能源、工业电机驱动和电气化运输。在这种广泛应用的推动下，中压功率器件的市场规模已经超过了 100 亿美元，并且还在快速增长。

主导当今中压功率器件市场的是一对硅器件：

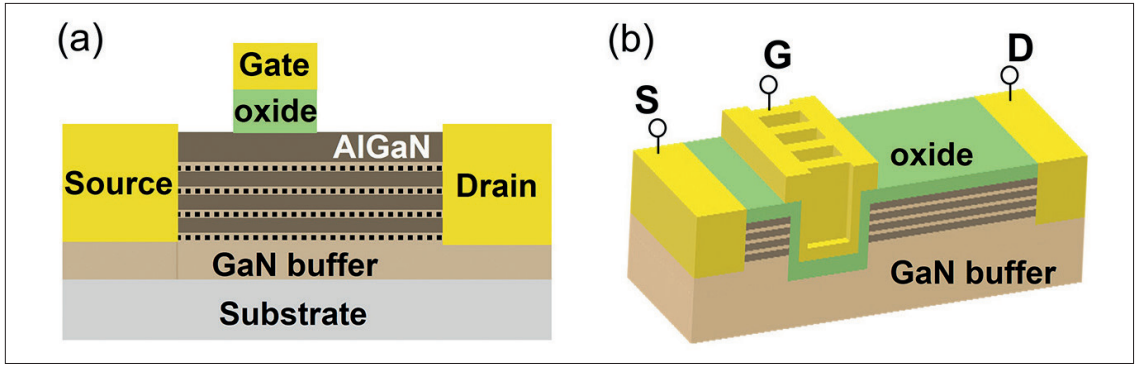
绝缘栅双极晶体管和 p-n 二极管，最高电压等级为 6.5kV。由于双极性操作，两者的开关速度都很慢，因为电子和空穴有助于电流传导，所以在器件开关期间必须移除或提供两种形式的载流子。

通过转向单极 SiC MOSFET 和 SiC 结势垒肖特基二极管，可以实现优异的性能。这些能够实现更快切换速度的替代方案正在覆盖越来越广泛的电压范围。它们已商业化至 3.3 kV，而工业研发器件已至 10 kV。

但这并不是最终的解决方案，因为使用 SiC 的宽带隙竞争对手 GaN 可以获得更好的结果。GaN 提供了更高的临界电场和更高的电子迁移

Yuhao zhang在10kV探针台前手持 GaN 功率晶体管晶圆

图 1: 具有平面栅极 (a) 和三栅极架构 (b) 的多通道 AlGaIn/GaN HEMT。



率，能够制造出具有横向或垂直结构的器件。  
 在高达 900V 的电压下工作的横向 GaN HEMT 已经上市，而工业化的垂直 GaN 晶体管已经在 1.2 kV 级别上得到了证明。在更高的电压下也取得了进展。一些研究小组报告了阻断电压接近 10 kV 的 GaN 器件。然而，特定的导电电阻远高于 SiC 的同类产品，这让许多人得出结论，GaN 仅在低电压范围内具有优势。

但我们弗吉尼亚理工学院和州立大学（更为人熟知的是弗吉尼亚理工大学）的人却不敢苟同。我们与南加州大学、剑桥大学、Enkris 半导体公司和 Qorvo 公司的工程师合作，开发了基于多通道 GaN 平台的新一代横向中压器件，性能优于硅和 SiC 的同类产品。

我们使用由垂直堆叠的异质结构组成的多通道 AlGaIn/GaN 晶圆生产我们的器件，从而能够制造出具有高迁移率二维电子气体 (2DEG) 通道的二极管和 HEMT。由于堆叠通道（见图 1(a)），这些器件具有高功率处理能力，并且可以利用垂直器件的一些优势，例如空间分布的电流。

### 多通道器件的挑战

很容易理解为什么引入多通道会降低器件的导电电阻。使用 Enkris 半导体公司生产的 4 英寸多通道 GaN 晶圆，我们制造的器件具有五个通道，导致薄层电阻仅为 120 Ω/sq-- 这大约是目前由单通道晶圆形成的商用 GaN HEMT 的三分之一到四分之一。结果是，切换到多通道可以显著降低特

定的导电电阻。  
 不幸的是，享受这种好处远非易事。多通道器件存在两个基本挑战。

第一个挑战是，当器件阻断电压时，堆叠通道中有大量的电荷，会导致电场快速下降。这是一个基本问题，从简单的泊松方程中可以看出。由于电荷量很大，在整个器件长度的平均电场很低，并且增加这个尺寸并不能确保阻断电压的放大。请注意，对于这些净电荷，即使存在能够在器件边缘区域产生大峰值电场的良好边缘终端（参见 Compound Semiconductor 27 3 44），多通道器件的阻断电压往往比具有相同长度的单通道对应器件低得多。

多通道器件面临的第二个挑战是确保足够的栅极控制。在常规 HEMT 中，通常采用平面栅极来调制 2DEG 通道。这在多通道器件中不是一个好主意，因为顶部的 2DEG 沟道将屏蔽栅极静电，使其无法到达掩埋沟道。如果采取这种方法，则会出现很大的负阈值电压，

甚至低至 -100V，而且跨导性非常差。简而言之，这样的器件不适合于电力电子应用，因为电力电子应用应该具有通常是关闭的器件。

解决这个问题的方法是转向 FinFET 或三栅架构，类似于那些应用在深度扩展的硅 CMOS 器件中的架构。引入三栅极设计（参见图 1(b)）会导致多通道鳍片围绕栅极堆叠缠绕。在这种配置下，侧壁栅极控制掩埋的 2DEG 沟道。然而，由于 2DEG 密度高，鳍片必须窄到 10-15 nm 左右，以确保多通道 HEMT 的常关工作。由于当今的功率半导体行业主要依赖于 180 nm 或更大长度尺度的加工，因此很难在工业规模上制造三栅极多通道 HEMT。

### 减少表面场

使多通道架构中的电荷分布复杂化的是存在多个极化电荷源。总体而言，净施主往往是存在

通过利用一系列器件创新，我们已经证明了 10kV 的 GaN 肖特基势垒二极管和常关型 HEMT，它们在特定导电电阻和阻断电压之间的折衷方面超过了一维 SiC 单极器件极限。

的，这在一定程度上是零偏压下多通道中 2DEG 的起源。为了在高阻断偏压下平衡这个净施主，我们引入了 p 型 GaN 帽层，提供一个减少的表面场 (RESURF) 结构 (参见图 2 (a))。在二极管中，这个 p-GaN RESURF 层延伸到阴极附近，其受主电荷平衡了净施主电荷 (见图 2 (b))。我们能够设计适当的 p 型掺杂浓度，或通过可控 p-GaN 蚀刻来调整 p-GaN 的厚度，从而在实验上实现这种电荷平衡。

值得注意的是，这种 p-GaN 帽的增加降低了 2DEG 密度，特别是在顶部沟道。我们使用的晶圆是由 Enkris 提供的，采用 MOCVD 工艺生产，p-GaN 层以五通道结构连续生长。它的薄层电阻为  $178 \Omega/\text{sq}$ ，仍然高于没有 p-GaN 层的等效晶圆。然而，与单通道晶圆相比，薄层电阻要小两倍多。结果是导电电阻略有增加，但由于 RESURF 层的作用，阻断电压实现了巨大增加。

RESURF 技术的引入使我们能够制造出导电电压仅为 0.6 V 的肖特基势垒二极管 (见图 2(c))，低于 SiC 结势垒肖特基二极管。通过明智地选择阳极 - 阴极的距离，p-GaN RESURF 肖特基势垒二极管的阻断电压可以比仅有 p-GaN 端接的肖特基势垒二极管的阻断电压高约 1.5 倍 (见图 2(d))。

对于 RESURF 肖特基势垒二极管，平均横向

电场可以高达  $1 \text{ MV/cm}$  左右。这使得阳极到阴极距离为  $123 \mu\text{m}$  的肖特基势垒二极管能够实现超过  $10 \text{ kV}$  的阻断电压和仅为  $39 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  的特定导电电阻，这比最先进的  $10 \text{ kV}$  SiC 结势垒肖特基二极管的特定导电电阻低 2.5 倍。

### 常关型 10 kV HEMT

为了在不需要亚微米光刻技术的情况下实现常关操作，我们正在追求一种新的器件概念：多通道单片共源共栅 HEMT，我们将其称为 MC2-HEMT。由于其共源共栅配置，常关的低压晶体管与常开的高压晶体管相连。由此产生的复合晶体可以以类似于独立的、常关的、高压晶体管的方式进行操作。请注意，共源共栅配置已经非常成熟，商用器件采用 GaN 和 SiC，其中硅 MOSFET 与 GaN HEMT 或 SiC JFET 共同封装。

这些共源共栅器件与 MC2-HEMT 之间的关键区别在于后者构建在单个芯片上。单片集成了具有单个 2DEG 通道的低压常关 HEMT 和基于堆叠 2DEG 多通道的高压常开 HEMT (参见图 3(a))。

在这个设计中，有多个欧姆通孔，它们作为单通道低压 HEMT 的有效漏极，以及多通道高压 HEMT 的源极。该架构的其他特点是在低压 HEMT 中引入了栅极凹槽，以确保常关操作，并

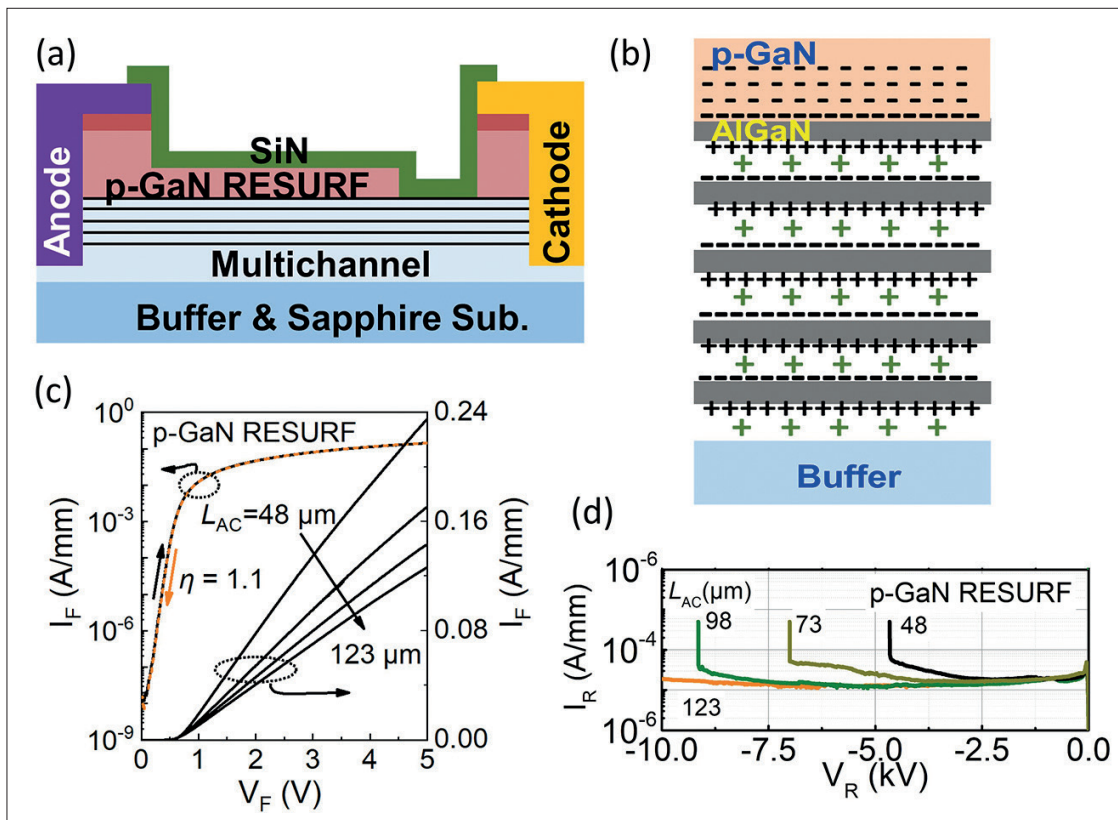
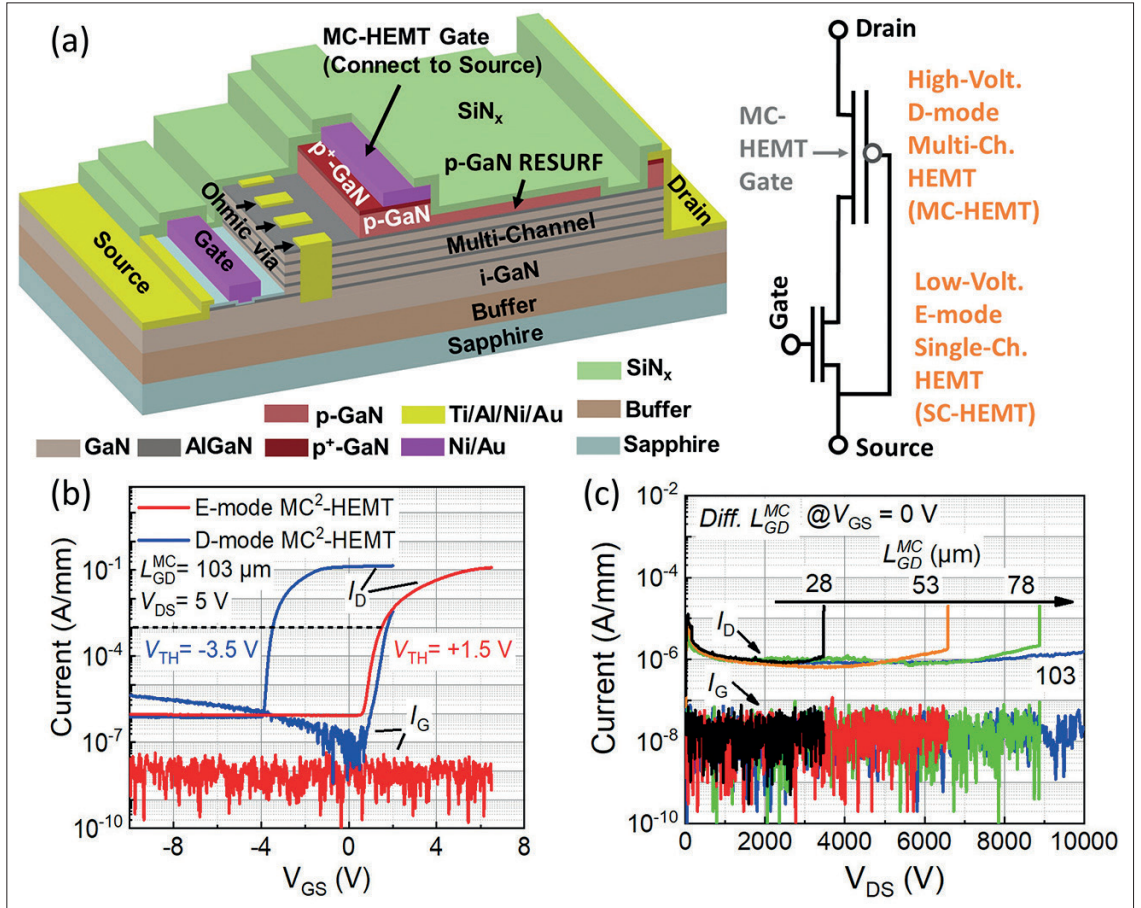


图2: (a) p-GaN降低表面场(RESURF)架构通过电荷平衡提高了肖特基势垒二极管的性能。(b) 反向偏压下的电荷平衡示意图。具有不同阳极-阴极距离(LAC)的器件的正向(c)和(d)反向电流电压特性。

图3: (a) 多通道单片共源共栅HEMT, 简称为MC2-HEMT, 将来自多通道区的导通电阻和阻断电压与由单通道区主导的栅极控制相结合。MC2-HEMT的设计与它的等效电路一起显示。(b) 在低压HEMT中有和没有栅极凹槽的MC2-HEMT的传输特性。(c) 具有不同长度的多通道区域的MC2-HEMT的关闭状态I-V特性。



对高压HEMT使用RESURF结构来提高阻断电压。

MC2-HEMT 在多个方面提供了强大的性能, 将来自多通道区域的导通电阻和阻断电压与由单通道区域主导的栅极控制相结合。

由于这些特性, 我们的MC2-HEMT可以利用源于多通道的低薄层电阻, 同时实现常关栅极控制, 并享受栅极区域与高电场的完全屏蔽。这种设计还消除了对亚微米鳍栅的需求, 显著放宽了光刻要求。

器件传输特性的测量(见图3(b))表明, 在低压HEMT中引入栅极凹槽可以使阈值电压超过1.5V。同时, 关断状态的电流电压特性(见图3(c))验证了我们的说法, 即阻断电压随着多通道区域的长度而变化, 最高可达10kV以上。

对于10kV的MC2-HEMT, 特定导通电阻

只有  $40 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ , 这比10kV的SiC MOSFET小2.5倍, 并且远远低于一维SiC单极器件极限。我们的MC2-HEMT的另一个重要结果是, 它们在6.5kV或更高电压下运行的功率晶体管中具有最高的Baliga品质因数。

我们的进展有助于证明, 高达10kV的中压GaN功率肖特基势垒二极管和HEMT将使GaN功率技术进入一个新时代。这些器件在许多方面都取得了突破: 除了提供更高的电压外, 它们还为导通电阻和击穿电压之间的权衡设定了一个新的基准, 超过了一维SiC的单极器件极限。

这些结果质疑了人们普遍认为的SiC在中高压电力电子中优于GaN的观点。虽然SiC现在正在电力电子领域取代硅, 但未来肯定属于GaN。

扩展阅读

- ▶ M. Xiao et al. "Multi-Channel Monolithic-Cascode HEMT (MC2-HEMT): A New GaN Power Switch up to 10 kV" 2021 IEEE International Electron Devices Meeting, 5.5.
- ▶ M. Xiao et al. "10 kV, 39 mΩ · cm<sup>2</sup> Multi-Channel AlGaIn/GaN Schottky Barrier Diodes" IEEE Electron Device Lett. 42 808 (2021)
- ▶ Y. Zhang et al. "GaN FinFETs and trigate devices for power and RF applications: review and perspective" Semicond. Sci. Technol. 36 054001 (2021)

# 立方碳化硅的魅力

立方 SiC 优异的电子和机械性能使这种晶型碳化硅在医疗器件、MEMS 和电力电子应用领域取得了快速发展。

作者：Francesco La via，意大利微电子和微系统研究所

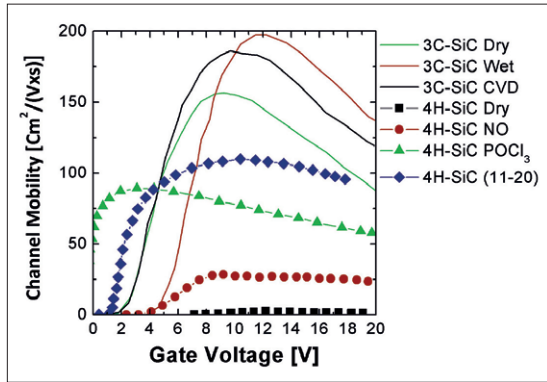
SiC 具有许多有吸引力的机械和电气特性。由于这些特性，它是制造可应用在许多环境中的电子器件和传感器的有力候选者。由 SiC 制成的芯片在可持续能源系统、混合动力汽车、低功耗逆变器、植入式医疗器件、光学器件以及在高温下高效运行的 MEMS 中都是强有力的竞争者。

SiC 器件的设计人员面临的主要考虑因素之一是哪种晶型的 SiC 最适合他们的目标应用。这种宽带隙半导体在自然界中存在于多种晶体结构

中，通过四面体键合的 Si-C 双层的堆叠顺序进行区分。通过这种堆叠顺序的变化，SiC 采用了不同的原子排列和对称性，从六边形到立方体和菱形体，每一种都具有不同的物理特性。

如今，由于电动汽车市场中二极管和 MOSFET 的数量激增，4H 晶型 SiC 抢占了先机。然而，尽管取得了这些成功，但在许多重要方面它并不是最好的晶型。这一殊荣应归于立方 3C-SiC，它具有最高的电子迁移率和饱和速度，

图1: 3C-SiC和4H-SiC中沟道迁移率的比较



这得益于更高的对称性导致的声子散射少，较低的带隙（仅为 2.3eV）和良好的热力学稳定性，能够在较低的温度（例如低于 1500 °C）下生长。不幸的是，低温下的热力学稳定性实际上是一把双刃剑。

它的缺点是减少了生长所需的热预算，从而限制了可靠的 3C-SiC 体材料生长技术的发展，以实现器件级 3C-SiC 外延所需的同质衬底。由于缺乏这样的衬底，器件开发人员被迫在不同的衬底上进行 3C-SiC 异质外延生长。很多努力都集中在优化两种常见的六方多型体 6H- 和 4H- 上的 3C-SiC 异质外延生长，但制造成本高得令人望而却步。

由于在同质衬底上生长暂时不切实际，从技术和科学的角度来看，人们强烈希望能够在尽可能大面积的异质衬底上生长高质量的 3C-SiC 外延层。硅是显而易见的候选材料：除了其广泛的可用性、大尺寸和低成本之外，它还可以通过 CVD 生长，从而确保所得产品的纯度非常高。

**功率器件**

3C-SiC 制备功率器件的能力如表 1 所示，该表将这种晶型碳化硅的电气特性与 4H- 和 6H-SiC 的电气特性进行了比较。为了便于比较，硅也列在其内。3C-SiC 的优异特性激发了研究界（在

表1: 硅、3C-SiC、6H-SiC和4H-SiC最相关的电性能。

Property	Si	3C-SiC	6H-SiC	4H-SiC
Bandgap (eV)	1.12	2.35	3.08	3.28
Intrinsic carrier concentration at 300 K (cm <sup>-3</sup> )	0.3	1.5	2.2	2.3
Breakdown field (MV cm <sup>-1</sup> )	1 x 10 <sup>10</sup>	1.5 x 10 <sup>-1</sup>	1.6 x 10 <sup>-6</sup>	5 x 10 <sup>-9</sup>
Electron mobility (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	1350	900	370	300
Hole mobility (cm <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	480	40	80	120
Saturated electron velocity (x 10 <sup>7</sup> cm s <sup>-1</sup> )	1	2	2	2
Thermal conductivity (W cm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	1.5	3.2	4.9	3.7
Dielectric constant	11.7	9.7	9.6	9.6

功率器件行业的支持下) 对开发击穿电压范围为 600 V 至 1.2 kV 的 3C-SiC 器件的持续兴趣。

人们都在期待它的成功。在硅上生长将为更大的晶圆和更低成本的生产打开大门，同时由于晶体内更高的对称性，器件将受益于高电子迁移率。

有报道称，采用标准加工工艺生产的结构中，3C-SiC 的通道迁移率可以达到 (0001) 4H-SiC 的 10 倍（见图 1）。结合 3C-SiC 较低的带隙，较高的沟道迁移率应导致较低的导通电阻值，从而减少正向偏压 MOSFET 的导通损耗。根据一些器件模拟，导通电阻应下降约 2 倍，在相同导通电阻的情况下，可以减少器件面积，从而降低器件成本。

3C-SiC 的另一个特性是其有限的本征载流子浓度——它们比在硅低约 11 个数量级。

这种与 2.3eV 的带隙相关的微小浓度，有助于降低反向偏压下的器件漏电流，即使在低功率和中等功率状态下也是如此。

除了这些优点外，3C-SiC 还具有高导热性和优异的机械性能。这些特性确保了基于这种晶型的传感器和器件能够在 250°C 以上的温度下工作。对于以非常高的功率运行或在极端环境中运行的器件，如混合动力汽车发动机和航空涡轮发动机中的器件，需要在这种条件下运行。

尽管毫无疑问 3C-SiC 有很多优点，但由于与高性能器件的开发相关的许多挑战，使这种材料产业化远非易事。为了促进电子器件的市场化生产，材料质量必须提高，成本必须降低，而且必须大幅增加晶圆尺寸。硅上 3C-SiC 的异质外延为后两个必要条件提供了理想的解决方案，但是如果这个生长过程要对立方 SiC 的机会产生真正的影响，就需要降低外延层中晶体缺陷密度。

这些缺陷源于晶格常数（室温下相差 19%）和热膨胀系数的显著差异。对于后者，3C-SiC

和硅之间的差异在沉积温度为 23%，在室温下为 8%。

在 3C-SiC 和硅之间的界面上产生了各种平面和体缺陷。这些缺陷包括外延层中的微孪晶、反相边界和堆垛层错，以及异质界面下的硅空隙（见图 2）。这些缺陷是器件杀手。然而，可以通过生长几十微米的 3C-SiC 来减少它们的威胁。这种相对较厚的薄膜降低了它们的密度，一些缺陷完全消失了。请注意，缺陷密度和表面形态在很大程度上取决于硅衬底的晶向。

在过去的 30 年中，人们一直致力于开发 3C-SiC 体材料生长的工艺。这样做的动机是，在非常厚的层中，已经观察到缺陷密度足够低，足以实现功率器件。

我们来自意大利卡塔尼亚的微电子和微系统研究所的团队正朝着这个目标努力。我们协调了一个名为“挑战”的四年期项目，该项目推动了三种不同的体材料工艺的开发，可以在电力电子器件方面产生突破。通过合作，我们参与这个欧洲项目的人员已经开发了一种用于批量生长 3C-SiC 的工艺。在装载到水平热壁 CVD 反应器中的硅 (100) 衬底上形成这种晶型的晶种，然后再生长出厚度为 70 μm 的外延层。随后温度升高超过了硅的熔点（参见图 3 中的工艺温度曲线），导致该衬底在 CVD 反应器内完全熔化。然后，剩余的自支撑 SiC 层可以作为种子层，使用低压状态和不同的温度（1600°C 和 1700°C 之间）进行同质外延生长。

我们的团队以 60μm/h 的速度生长两小时，增加了衬底厚度，最后 10 μm 低掺杂用于器件

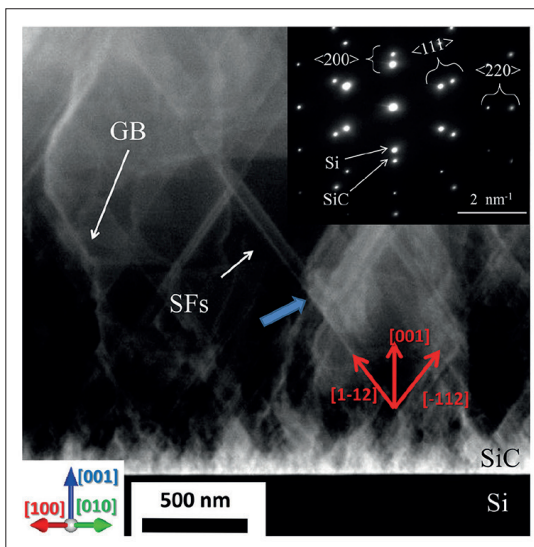


图2: 硅和3C-SiC界面的透射电子显微镜截面。可以观察到几个扩展的缺陷。

实现。通过这种方法，使用氮和铝来形成 n 型和 p 型层，我们的团队生产了厚度约为 200μm 的 3C-SiC 同质外延样品，以及直径为 100 mm 和 150 mm 的晶圆（见图 3）。

使用这种方法，我们将薄层的层错密度降低了两个数量级，通常只有  $10^2 \text{ cm}^{-1}$ 。通过这种方法形成的几个 p-n 结的测量显示出合理的特性（见图 4）。二极管的漏电流仍然很高，因此必须努力进一步降低缺陷密度，以便 3C 功率器件能够在 600V 和 1200V 的击穿电压范围内提供与 4H 同类器件相比具有竞争力的性能。

### 制造 MEMS

3C-SiC 具有非常好的机械性能（见表 2）。它们包括高杨氏模量、高断裂和抗弯强度以及低密度。由于杨氏模量和密度之间的高比率，

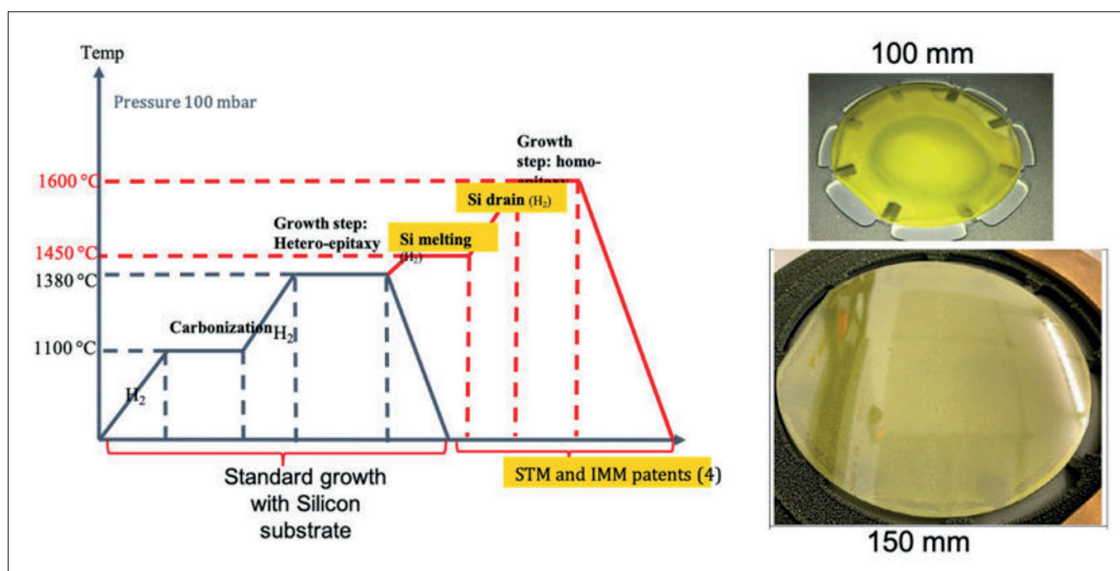


图3: 用于3C-SiC的批量生长的CVD工艺的温度示意图。也报道了100 mm和150 mm的晶圆。

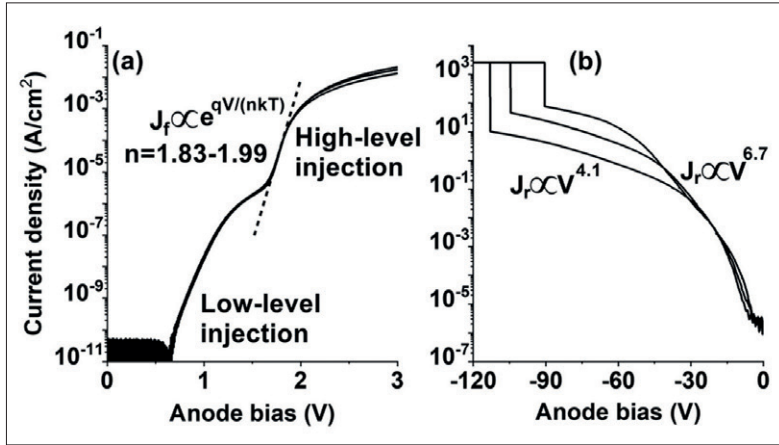


图4：通过CVD生长的块状晶圆上的3C-SiC p+/n结的正向 (a) 和反向 (b) 特性。虽然正向特性几乎是理想的，但由于高缺陷密度，反向特性显示出高泄漏电流。

由 3C-SiC 制成的器件有希望实现非常坚固的 MEMS，可以在高频率下工作。更重要的是，这些 MEMS 可以在非常高的温度下运行，例如 600 °C，因为即使在这种情况下，杨氏模量也不会大幅降低。

开发微型和纳米机械谐振器的努力是由于它们可以在工业和支持基础科学方面有广泛的应用。这些谐振器可用于质量的精确感应，以及测量超声波、磁场、惯性和应变。对于许多这些应用来说，实现高谐振器品质因数至关重要。

最近，提高在硅衬底上形成的高应力、薄非晶薄膜（尤其是非晶 SiN）制造的微米和纳米机械谐振器的品质因数方面取得了显著进展。通过从这些非晶薄膜转换为晶体材料，可以取得进一

步的进展，晶体材料具有一系列优势，可以带来性能的阶跃性变化。

高纯度晶体材料的优点之一是它们的缺陷密度相对较低，可以显著提高内在品质因数。据报道，高纯度金刚石、CaF 和 3C-SiC 的品质因数超过  $10^5$ ，而当消除表面损耗后，品质因数可以超过  $10^6$ 。这个数值远远超过了非晶 SiN 的 25,000 和非晶硅的 1,000 的品质因数。更重要的是，晶格失配是一种好处而不是坏处，因为具有高内应力的晶体材料更适合耗散稀释。

然而，尽管有这些显著的优势，薄膜晶体谐振器仍有待证明其比非晶谐振器性能的显著提高。由于制造的复杂性增加，以及在硅衬底上生长时，界面附近的位错和高密度的堆垛层错，部分阻碍了进展。这些缺陷降低了机械品质因数和杨氏模量。

在过去的几年中，由于生长工艺、加工和设计方面的发展，3C-SiC MEMS 取得了很大进展。有几个项目取得了成功，其中包括我们协调的一个项目，名为 SiC nano for picoGeo。通过解决许多潜在的缺陷，这个欧洲项目已经实现了极好的材料性能，即使对于厚度接近 1 μm 的薄膜也是如此（见图 5，左）。

我们对具有相同尺寸和设计的结构中 Q 因子的测量表明，对于 3C-SiC 的 (111) 取向，残余

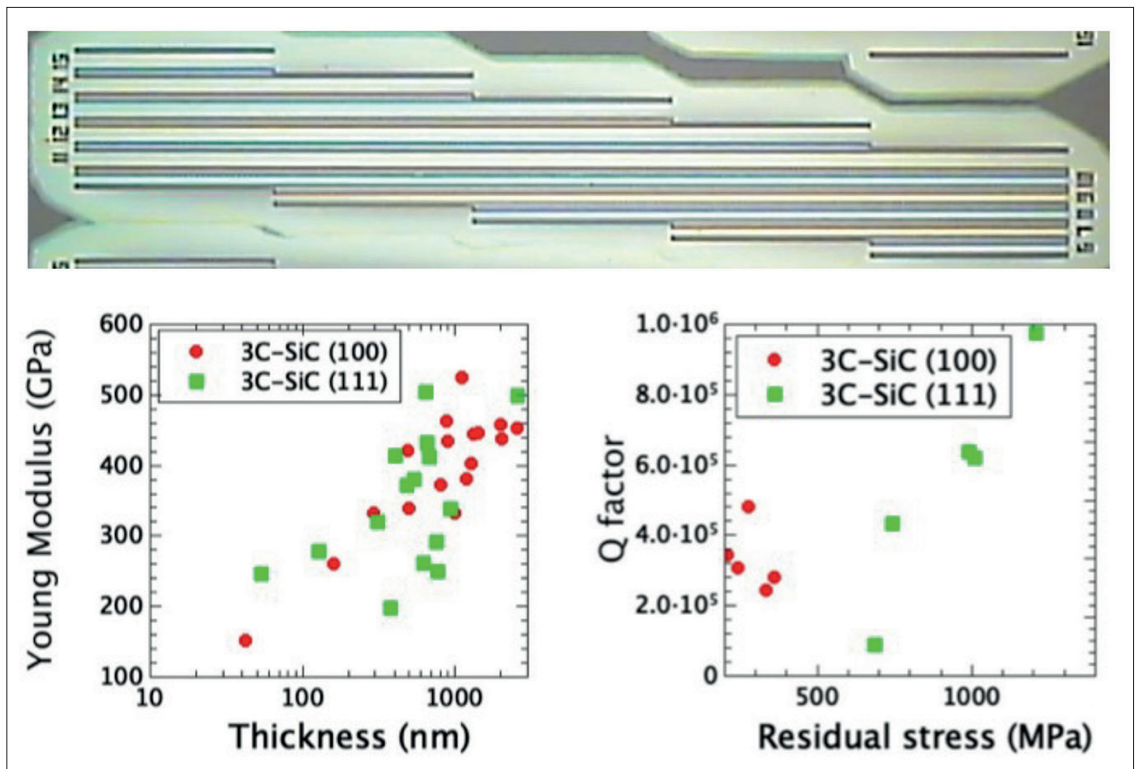


图 5：(上) 具有不同长度和宽度的双夹梁阵列。(左) 在 (100) 和 (111) 3C-SiC 中都观察到杨氏模量随厚度的增加而增加。(右) 在高残余应力下 Q 因子的增加基本上在 (111) 3C-SiC 中。在 (100) 3C-SiC 中，残余应力较低，Q-因子也是如此。



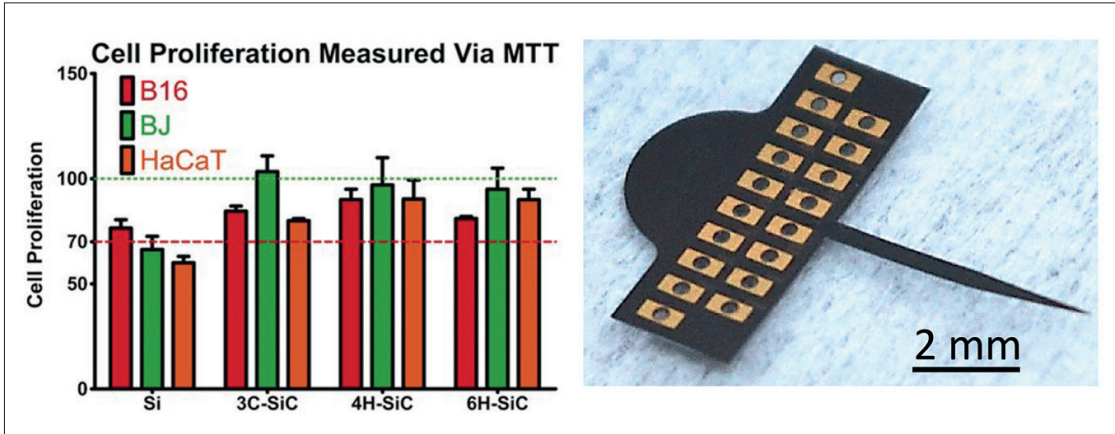


图6: (左) 硅和SiC的细胞增殖。(右) SiC的神经探针。

应力存在明显的线性依赖，而对于(100)变体，这种依赖性并不明显。由于这一特性，我们能够用(111) 3C-SiC生产非常有效的谐振器、极其灵敏的应变仪和其他高性能的MEMS器件。

在SiC nano for picoGeo项目中，我们的团队生产了一种非常灵敏的应变仪，能够在 $10^{-12}$ - $10^{-13}$ 范围内进行检测。如此高的灵敏度使这种传感器能够检测到火山爆发前或地震前几小时发生的非常小的变形。这些应变仪也可以测量大坝或桥梁的变形。

值得注意的是，当使用3C-SiC制造MEMS时，由于其良好的机械特性，只需要薄薄的一层材料。由于这一点，制造工艺相当容易，因为它涉及到对硅衬底进行更深的蚀刻之前，先蚀刻SiC薄层，这可以使用硅MEMS的标准工艺来完成。

### 植入式医疗器件

3C-SiC可以做出宝贵贡献的另一个重要应用是植入式医疗器件。硅对人体组织具有剧毒，导致研究人员追求新型化合物半导体，例如

3C-SiC，以提供更健康的解决方案。几个小组的实验工作表明，SiC具有极强的生物相容性，是这类器件的不错选择(见图6，左)。

在SiC多晶型系列中，3C-SiC似乎是比其六方同类产品更好的选择，因为它可以通过蚀刻硅衬底来实现薄的植入式器件。这种方法已经实现了神经探针的制造(见图6，右)。

这项工作还处于起步阶段，仍有一些问题需要克服。其中最大的问题是将器件与衬底隔离来抑制器件结处的高漏电流。一旦解决了这个问题，3C-SiC就可以用于制造医疗领域的神经探针。

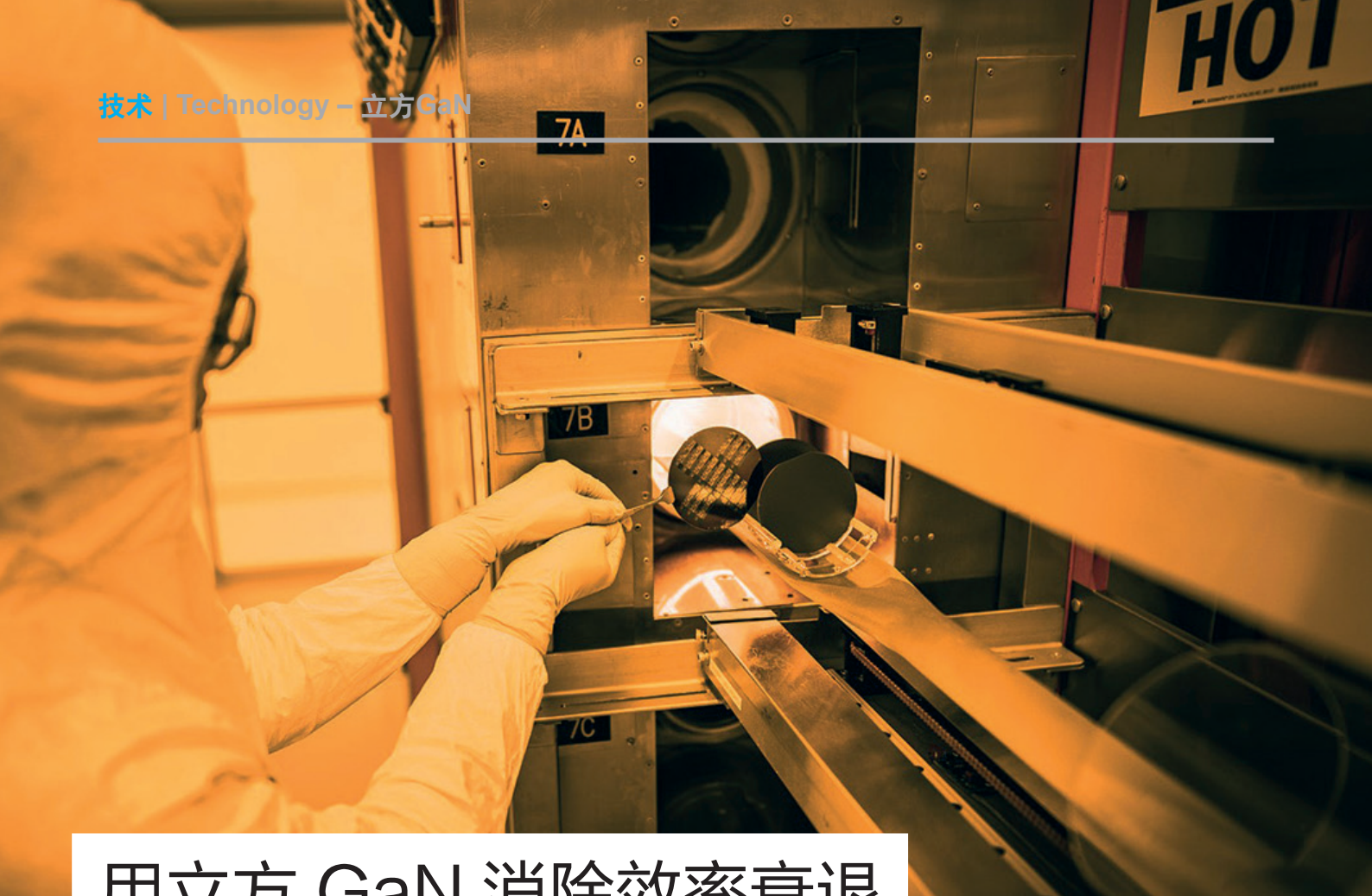
立方SiC显然对功率器件、MEMS和医疗器件方面有很大的应用前景。在过去的几年中，在改进这种材料的结构质量方面已经取得了很大的进展，从而使它能够开始发挥其潜力，提供出色的性能。由于这些进展，我们很快就能在市场上看到第一批商用3C-SiC器件。

### 扩展阅读

- ▶ <http://h2020challenge.eu/>
- ▶ <http://picogeo.eu/>

Property	Si	SiC	Diamond
Lattice constant (Å)	5.43	4.35	3.57
Cohesive energy (eV)	4.64	6.34	7.36
Young's modulus (GPa)	130	450	1200
Shear modulus (GPa)	80	149	577
Hardness (kg mm <sup>-2</sup> )	1000	3500	10000
Fracture strength (GPa)	1	5.2	5.3
Flexural strength (MPa)	127.6	670	2944
Friction coefficient	0.4-0.6	0.2-0.5	0.01-0.04
Relative wear life	1		10000

表2: 硅、SiC和金刚石的物理特性。



# 用立方 GaN 消除效率衰退

立方 GaN 通过消除内部电场和减少有效空穴质量来对抗效率衰退

作者：YI-CHIA TSAI, JEAN-PIERRE LEBURTON 和 CAN BAYRAM, 伊利诺伊大学香槟分校

**1**962 年是 LED 发展的一个重要里程碑。那一年，已故的小尼克·霍洛尼亚克发明了世界上第一个可见的 LED，发出红色光，预测这种器件将成为有史以来最高效的照明形式。

三十年后，通过引入一种基于 InGaN 实用的蓝光发射源，朝着这一目标迈出了重要的一步。从那时起，人们可能会觉得我们非常接近享受固态照明的终极形式，包括高效、直接发射的红、绿和蓝色光源的混色。但这个梦想还没有实现，因为高性能的绿色 LED 仍然难以实现。

乍一看，这个终极解决方案实际上似乎不再那么重要了。毕竟，世界现在基本上已经摆脱了白炽灯，这是一种低效、不可靠的光源，其将 90% 的电力转化为了热量。但人们当然不应自满。根据全球照明挑战，照明仍然占世界电力总消耗的 15% 和所有温室气体排放的 5%。Northeastern University 的 Moira Zellner 的研究小组预测，由

于人口增长和住房规模的增加，未来 50 年，家庭照明的平均能源消耗将增加两倍。因此，迫切需要向更节能的照明方式过渡，因为这将在遏制碳足迹方面发挥关键作用。

当今固态照明的核心是一大批基于 InGaN 的 LED，每个 LED 都有一个由 InGaN 量子阱 (QW) 组成的有源区，并与 GaN 量子垒交错。该有源区被夹在 n 掺杂和 p 掺杂 GaN 层之间。这种异质外延堆栈的另一个关键成分是 AlGaN 电子阻挡层。它位于有源区和 p 掺杂 GaN 之间，目的是为了阻止电子溢出到 p 型区 (见图 1 的 LED 示意图)。

在这种标准形式的 LED 中，在正向偏置下工作，电子和空穴被驱动到量子阱有源区，在那里它们重新复合释放能量以发光。然而，这是对实际发生的事情的粗略简化，载流子传输实际上受多个过程控制，包括量子受限斯塔克效应 (QCSE)、辐射复合、Shockley-Read-Hall 复合、俄歇复合、

载流子泄漏和一些与镁相关的过程(有关所有这些现象的说明,请参见图1的左下图)。

所有这些效应的结果是导致转化效率下降,这是在低电流密度(小于  $35\text{ A cm}^{-2}$ ) 下外部量子效率达到峰值后的一种弊病,以及在高注入水平下的下降(见图1的右下图)。效率衰退显然是非常不受欢迎的,在传统固态光源中,在光源的输出功率及其效率和成本之间强加了一种权衡。

**LED 效率衰退：不可避免还是可以避免？**

为了揭示基于 InGaN 的 LED 效率下降的根源,人们做了大量的工作。成功并不容易,因为通过实验分离出每一种非辐射机制是具有挑战性的。已经提出了许多机制,包括但不限于俄歇复合、载流子泄漏、内部极化和相空间填充。然而,没有一个机制可以单独解释效率下降。

在一些最新的实验工作中,来自 InGaN 基 LED 有源区的热载流子发射强烈地指向俄歇复合。但还有一些实验使研究人员将电子发射光谱中的中能和高能峰值的混合归因于 InGaN 基 LED 中逃出量子阱的次级俄歇电子和载流子泄漏的共存。

理论研究能把这件事搞清楚吗?好吧,现在还不能。一些模拟表明,InGaN 基 LED 的俄歇电流大于载流子泄漏电流,声子散射、合金散射和界面粗糙度散射可以解释  $10^{-30}\text{ cm}^6\text{ s}^{-1}$  的大俄歇系数。但这一解释与 GaAsP 基 LED 的低效率下降不一致,因为 GaAsP 基 LED 具有相似的俄歇系数。

也有模拟指出载流子泄漏。它们表明,当晶

体生长切换到非/半极性衬底、势垒掺杂增加或电子阻挡层被设计为与衬底具有内部极化匹配时,效率下降和载流子泄漏会减小。对这一观点的支持来自针对效率下降的补救措施,这些措施已被证明可以减少载流子泄漏。然而,由于尚未同时研究对俄歇复合的影响,存在对下降内在原因的误解。为了试图找出这一问题的真相,我们在伊利诺伊大学香槟分校的团队开发了一种新的量子校正漂移扩散 LED 模拟器,称为开放边界量子 LED 模拟器,简称 OBQ-LEDsim。

我们的模拟器使我们能够揭开俄歇复合、载流子泄漏和内部极化之间的相互作用,以及它们各自对效率下降的贡献。值得注意的是,与传统的 LED 模拟器相比,OBQ-LEDsim 通过变分原理求解薛定谔方程,其中基态波函数在无穷远处消失。虽然我们的变分方法与传统的  $k \cdot p$  方法完全一致,但它的优点是消除了量子阱和经典连续介质之间的人为边界。这提供了对阱外任意位置的量子波载流子间相互作用和量子波载流子之间的高精度建模。得益于这一能力,我们的 OBQ-LEDsim 模型捕捉到了有源区以外可能导致效率下降的非辐射过程。

描述 LED 内部量子效率的一种常见而简单的方法是 ABC 模型。这假设了载流子的对称性,即电子密度与空穴密度相同。在这个假设下,测量的俄歇系数称为双极俄歇系数 ( $C_a$ ),其值等于电子-电子-空穴(eeh)和空穴-空穴-电子(HHE)通道的俄歇系数之和 ( $C_a = C_n + C_p$ )。

将这种 ABC 模型应用于像 InGaN 这样的压

图1: (a)基于InGaN的LED结构。(b)基于InGaN的LED中的竞争机制。(c)传统蓝绿LED的效率下降

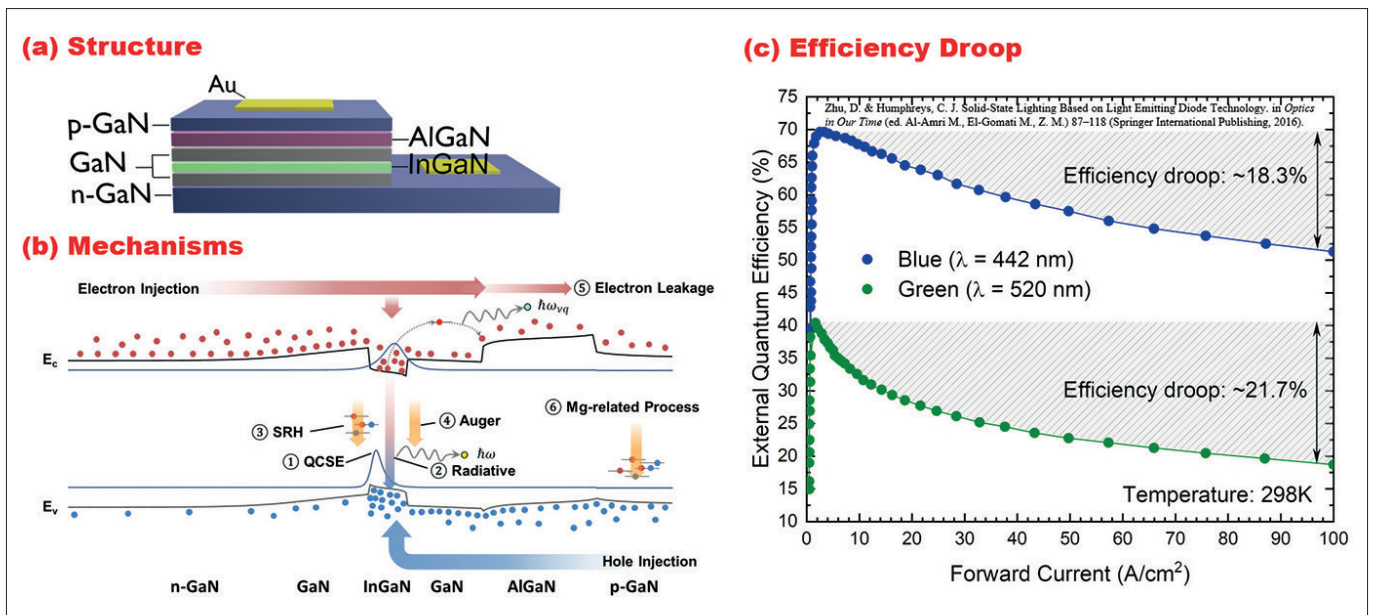
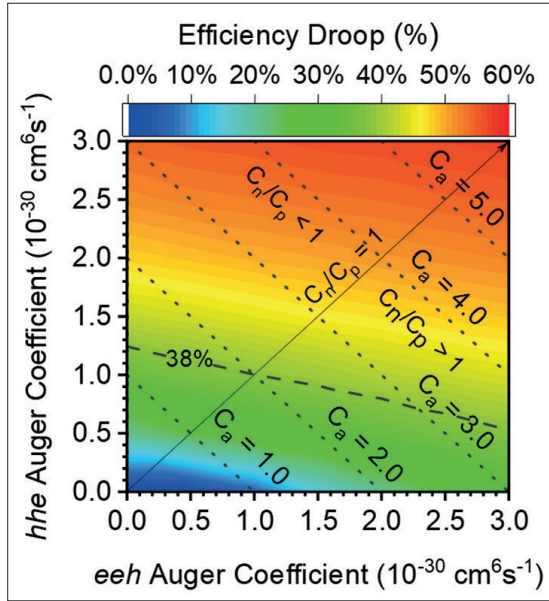


图2: 电流密度为  $200 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  时, 效率随  $\text{eeh}$  ( $C_n$ ) 和  $\text{hhe}$  ( $C_p$ ) Auger系数的变化而下降。以  $2 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$  为单位的  $\text{eeh}$  Auger系数 ( $C_a$ ) 如彩色图上的虚线所示。对于效率下降值, 存在 ( $C_n, C_p$ ) 的多个解决方案。



电材料是有问题的, 因为载流子对称性受到内部极化的困扰。我们的研究表明, 效率下降的主要原因是强烈的内部极化和大的空穴有效质量的共存。内部极化导致电子-空穴波函数的分离, 进而促进载流子局域化, 虽然这降低了辐射复合, 但增强了俄歇过程。

再加上强烈的内部极化的影响, 存在一个大的空穴有效质量, 进一步增强了量子阱中的空穴局域化。其结果是, 存在比电子密度更高的空穴密度, 因此, 与  $\text{hee}$  俄歇电流相比,  $\text{hhe}$  俄歇电流更大。在这些因素的作用下, 俄歇电子-空穴不对称值——即  $\text{eeh}$  与  $\text{hhe}$  俄歇系数之比 ( $C_n/C_p$ )——在效率下降和量化双极俄歇系数方面都起着关键作用。不幸的是, 在实验和模拟中有一种忽略俄歇电子-空穴不对称性的倾向。

当俄歇电子-空穴不对称性增加时, 它会淬灭  $\text{hhe}$  俄歇复合并增强  $\text{eeh}$  俄歇复合。我们团队的计算表明, 当电流密度为  $200 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 双极俄歇系数为  $2 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$  时, 随着俄歇电子-空

穴不对称性的值从 0 增加到无穷大, 效率下降从 48% 减少到 25%。这种效率衰减的下降表明,  $\text{hhe}$  俄歇过程是主要的俄歇复合通道 (见图 2)。

我们将这种优势归因于电子的局域化程度低于量子阱中的空穴。正是内部极化效应导致了载流子分布的不对称, 导致了效率下降对俄歇电子-空穴不对称性的强烈依赖。由于双极俄歇系数通常是通过假设载流子对称的 ABC 模型来提取的, 所以提取的双极俄歇系数也受载流子不对称 (即俄歇电子-空穴不对称) 的影响。

为了突出俄歇电子-空穴不对称性对双极俄歇系数的影响, 我们在图 2 中包括了一条虚线, 表示效率下降了 38%。我们选择这个值作为参考, 因为它假定俄歇电子-空穴对称性和双极俄歇系数为  $2 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ 。从曲线图中可以清楚地看出, 有多个  $\text{eeh}$  和  $\text{hhe}$  Auger 系数的值对应于相同的效率下降。例如, 对于小于 1 的俄歇电子-空穴不对称值, 双极俄歇系数比假定俄歇电子-空穴对称时的俄歇系数要小。同时, 当俄歇电子-空穴不对称值等于 0 时, 双极俄歇系数最小为  $1.24 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ ; 当俄歇电子-空穴不对称值大于 1 时, 双极俄歇系数大于假定的俄歇电子-空穴对称性; 当俄歇电子-空穴不对称值设置为无穷大时, 最大双极俄歇系数为  $5.20 \times 10^{-30} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ 。

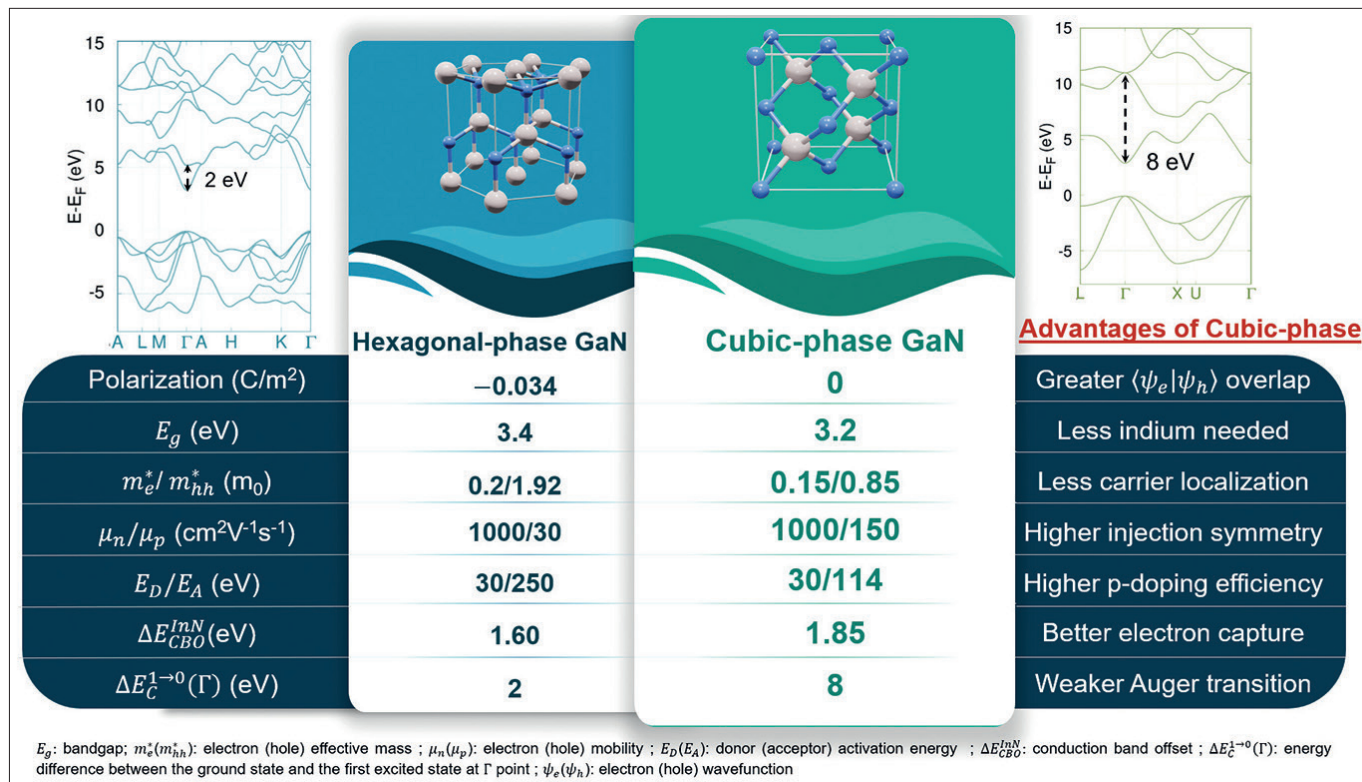
根据第一性原理计算, 俄歇电子-空穴不对称的实际值约为 0.4。利用这个图, 我们发现假设俄歇电子空穴对称时得到的双极俄歇系数, 与常见但简单的 ABC 模型一致获得的结果一样, 相比于实际值被高估了多达 62%。

### LED 的下一阶段

我们的计算表明, 内部极化和大的空穴有效质量的共存解释了为什么传统的六方  $\text{InGaN}$  基 LED 的俄歇复合比  $\text{GaAsP}$  基 LED 的俄歇复合大得多, 尽管它们的俄歇系数相似。注意, 不可能通过修改器件设计或改变  $\text{InGaN}$  基 LED 中的晶体取向来避免内部极化和大的空穴有效质量的共存, 因此这些都是解决效率下降问题的有限杠杆。我们的观点是, 通过转换到立方相可以获得更多的好处, 这使得基于  $\text{InGaN}$  的 LED 的设计可以对抗效率衰退, 这要归功于没有内部极化以及其小的空穴有效质量 (见图 3)。

还有许多其它属性与基于  $\text{InGaN}$  的 LED 的立方相相关联。与六方相  $\text{GaN}$  相比, 这种形式的

人们应该意识到, 除了立方相 III 氮化物的 LED 相关承诺外, 它们在其它杰出的应用中也有很大的潜力。这类氮化物在无偏振光子学、室温铁磁性、高温自旋电子学方面具有巨大潜力, 还可以用于常关晶体管和单光子发射器。



LED 具有三倍的空穴迁移率，将镁的激活能减半，为 InGaN/GaN 量子阱提供了更高的量子垒，并且预计具有更小的俄歇系数。立方相还具有非常有利的能带结构：接近导带最小值和价带最大值的能态相对较少，在 Γ 点第一和第二导带之间的能量差至少为 8 eV (见图 3)。所有这些强度的顶峰应该允许立方 GaN 基 LED 阻碍直接和间接的俄歇跃迁，导致其与六方 GaN 相比，有更小的俄歇系数。

我们模拟了三种不同形式的基于 InGaN 的 LED——传统六方、非极性六方和立方相——因为这使我们能够从大的空穴有效质量对效率下降的影响中挑出内部极化的影响 (见图 4)。我们的结果表明，在 100 A cm<sup>-2</sup> 驱动的传统六方相的 LED 中，由于结构中存在强内极化和大的空穴有效质量，效率衰减率高达 46%。

一个显著的改进来自于转变为非极性取向的六方相，晶体取向垂直于 [0001] 内部极化矢量。具有这种几何形状的 LED 猝灭了内部极化，并且具有与传统 InGaN 基 LED 相似的空穴有效质量值。由于电子-空穴波函数的重叠和载流子离域的增强，这些变化导致在 100 A cm<sup>-2</sup> 处的效率下降到 13%。

更大的成功来自于向立方相的转变。采用这种基于立方相 InGaN 的 LED，效率衰减率被

抑制到仅有 3%，载流子有效质量减少，电子和空穴离域，并促进带间辐射复合。我们将最小的下垂归因于内部极化的抑制和空穴有效质量的降低——我们假设俄歇系数不变。通过借鉴我们的见解，我们预计 LED 领域将投资于立方相 InGaN 基的 LED，这将为固态照明革命带来绿灯。

### 最后的想法

我们的工作追随着 20 世纪 90 年代研究人员的脚步。当时的工作主要集中在立方衬底上直接沉积，如砷化镓、硅 (100)、3C- 碳化硅和氧化镁。这些基础性难题困扰着立方氮化镓：令人难以置信的高缺陷水平，远远超过 10<sup>10</sup> cm<sup>-2</sup>；结构亚稳性，如相混合；以及化学亚稳性(易分解的趋势)。此外，还出现了化学不兼容的问题，例如与砷化镓的不

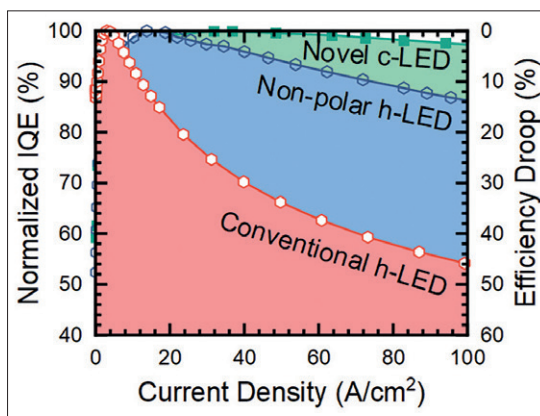
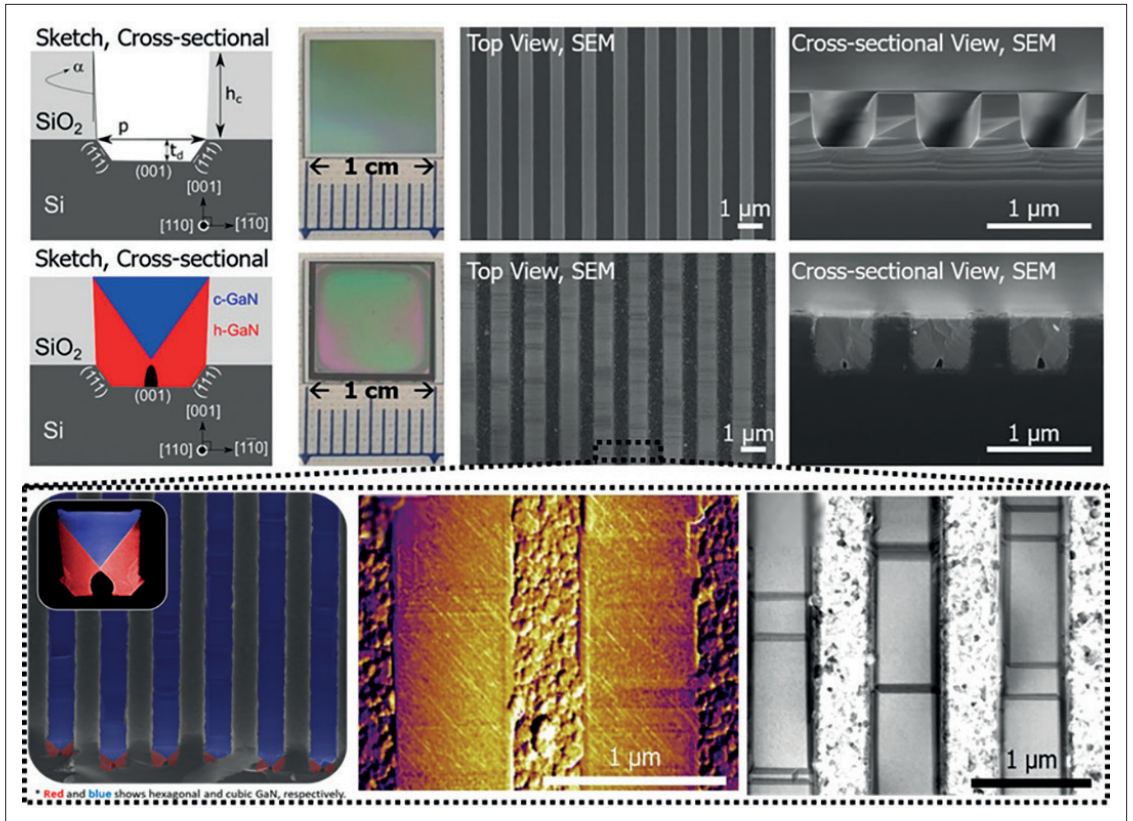


图3：六方相和立方相 GaN 参数以及立方相的优点。

图4：归一化内部量子效率 (IQE) (左 y 轴) 和效率下降 (右 y 轴) 作为电流密度的函数。红色开口六边形和蓝色空心六边形是指传统的和非极性的六方相 LED，而绿色实心正方形代表新的立方相 LED。

图5.展示了在大面积 (~1cm<sup>2</sup>)U槽硅(100)管芯上的立方GaN外延。(顶排)U型槽硅(100)和(中排)立方GaN。(从左至右)横断面图、俯视图照片、俯视扫描电子显微镜(SEM)图像和横断面图。(底排)立方GaN结构表征。(从左至右)相位mapping、轻拍模式原子力显微镜和明场俯视扫描隧道电子显微镜(STEM)图像。平面图扫描电子显微镜显示立方GaN表面没有穿透位错或其他类型的位错。观察到层错密度为  $3.27 \pm 0.18 \times 10^4 \text{ cm}^{-1}$ 。



兼容。考虑到所有这些挑战，立方相 InGaN LED 在很大程度上仍未被开发也就不足为奇了。

最近，我们发明了一种新的立方相 GaN 合成方法，这是一种新的突破。我们所取得的成功在于有效利用了六方相晶体的 <0001> 和立方相晶体的 <111> 方向的等效性。我们发现，如果两个六方相生长前沿在约 110° 的角度内合并，即六方四面体成键中两个 Ga-N 键之间的夹角，则将形成立方相。在这一发现的基础上，我们刚刚证明了通过在纳米图形化的、与 CMOS 兼容的硅 (100) 衬底上生长，可以形成面积约为 1 平方厘米

的立方氮化镓。这使我们现在能够探索用立方相 LED 解决传统和高级固态照明中的效率衰退和绿色间隙问题的潜在机会。

人们应该意识到，除了立方相 III 族氮化物与 LED 相关的前景之外，它们在其杰出的应用中也有很多可提供的东西。这类氮化物在无偏振光子学、室温铁磁性、高温自旋电子学等方面具有很大的潜力。它还可以用于常关型晶体管 and 单光子发射器。因此，在未来的几年里，我们可能会回顾 2022 年，因为这一年开启了 III 族类氮化物的一个新的重要阶段。CS

### 扩展阅读

- <https://www.globallightingchallenge.org/>
- L. Hicks, T. L. Theis and M. L. Zellner, “Emergent Effects of Residential Lighting Choices: Prospects for Energy Savings,” Journal of Industrial Ecology 19 285 (2015) <https://obqledsim.ece.illinois.edu>
- Y.-C. Tsai, C. Bayram, and J.P. Leburton, “Effect of Auger Electron–Hole Asymmetry on the Efficiency Droop in InGaN Quantum Well Light-Emitting Diodes,” IEEE J. Quantum Electron. 58 1 (2022)
- Y.-C. Tsai, J.P. Leburton and C. Bayram, “Quenching of the Efficiency Droop in Cubic Phase InGaN Light-Emitting Diodes,” IEEE Trans. Electron Devices 69 3240 (2022)
- Y.-C. Tsai, C. Bayram and J.P. Leburton, “Interplay between Auger recombination, Carrier Leakage, and Polarization in InGaN Multiple-Quantum-Well Light-Emitting Diodes,” J. Appl. Phys. 131 193102 (2022)
- J. Lee, Y. C. Chiu, M. A. Johar, and C. Bayram, “Structural and Optical Properties of Cubic GaN on U-grooved Si (100),” Appl. Phys. Lett. 121 032101 (2022)
- U.S. Patent 10,027,086 (issued July 17, 2018)

# 加速 HVPE 生长 AlN

## 抑制寄生反应使 HVPE 能够加快高质量 AlN 的生长

日本和波兰的研究人员之间的合作声称，在开发具有优异紫外线透明的高结构质量 AlN 衬底生长方面取得了重大突破。

该团队使用了一种新型的可抑制寄生反应的 Taiyo Nippon Sanso 反应器，使氮化铝以 150-170 微米每小时的生长速度沉积，所生长的氮化铝可与 PVT 生长的质量相媲美，同时降低了阻碍深紫外光透明度的杂质密度。

该团队由东京农业科技大学、德山公司、富士通有限公司和波兰高压物理研究所的研究人员合作组成，希望其进展将有助于提高自支撑氮化铝衬底的生产效率。据说，它们是生产深紫外光 LED 和激光二极管的诱人衬底，可以用于灭活病毒、杀菌、树脂固化和加工。

如今，这些深紫外发射器要么生长在单晶块状 AlN 衬底上，要么生长在工程衬底上，后者是通过在单晶蓝宝石上生长一层 AlN 薄膜形成的。后者由于低成本、大直径蓝宝石的供应而确保了更高的生产率，但位错高达  $10^7$  到  $10^{10} \text{ cm}^{-2}$ ，损害了器件的性能和可靠性。用 PVT 方法生长的块状 AlN 具有低得多的位错密度，通常为  $10^3 \text{ cm}^{-2}$ ，但衬底价格昂贵，可获得性有限，并且含有高浓度的碳、氧和硅杂质，使透明度降低到 300 nm 以下。

参与这项最新工作的一些研究人员以前有过使用 HVPE 生长氮化铝的经验。在之前的一项研究中，使用了 PVT 生长的籽晶和选择性地生成不与石英反应的  $\text{AlCl}_3$ ，借助 HVPE 方法获得了具有深紫外光透明度和约  $10^3 \text{ cm}^{-2}$  数量级的位错密度的体 AlN。然而，寄生反应将生长速度限制在几十微米每小时——这远远慢于 PVT 的生长速度，后者在 2230°C 时的生长速度可以达到 150-170 微米 / 小时。

该团队的 Taiyo Nippon Sanso HVPE\_A111 基于石英的卧式反应器抑制了这些寄生反应。它的特点是由电炉加热的上游源区和由 RF 感应加热的下游生长区。

使用  $\text{AlCl}_3$  作为铝源，通过由 BN 制成的喷嘴供应以抑制寄生反应，使用  $\text{NH}_3$  作为氮源，团

队从 PVT 制造的直径 35 mm 的 HexaTech 晶片上切割出  $6 \text{ mm} \times 7 \text{ mm} \times 0.52 \text{ mm}$  的 AlN (0001) 面上生长 AlN 薄膜。这些材料为氮化铝以高达 156 微米 / 小时的生长速度生长奠定了基础。

用光学显微镜观察了约 50  $\mu\text{m}$  厚的薄膜，发现生长速度对薄膜的形貌有影响。当速度为 7.6  $\mu\text{m}/\text{h}$  时，表面非常光滑，而在 50  $\mu\text{m}/\text{h}$  或更高的速度下，会导致向三维生长模式的转变，产生六角锥形小丘。然而，即使在 156  $\mu\text{m}/\text{h}$  的最快生长速度下，虽然这会导致典型的宽度和高度分别为 250  $\mu\text{m}$  和 2  $\mu\text{m}$  的 AlN 小丘，但也没有发现 AlN 微晶落在表面上。

根据沿对称和斜对称面的 X 射线衍射摇摆曲线，即使在生长速度超过 150  $\mu\text{m}/\text{h}$  的情况下，也可以生长出结构质量与 PVT 生长的 AlN 相当的同质外延层。

二次离子质谱分析表明，随着生长速度的增加，氧和氯的浓度下降，而硅的浓度上升。研究人员认为，硅杂质浓度更高，生长速度更快，可能是因为表面出现了小平面，或者  $\text{AlCl}_3$  的含量相对于  $\text{AlCl}_3$  增加了。由于 HVPE 工具中的石英与  $\text{AlCl}_3$  反应生成掺杂气体  $\text{SiCl}_4$ ，研究小组建议将石英玻璃从生长室中移除，以最大限度地减少硅杂质的添加。

为了评估 HVPE 生长的 AlN 的光学特性，研究人员通过去除 PVT 生长的 AlN 衬底，然后进行化学机械抛光，生产了 40  $\mu\text{m}$  厚的自支撑薄膜。该样品在 207 nm 处具有陡峭的光学吸收边，在较长波长处具有较高的透过率。在 450 nm 附近没有由于氧杂质水平较高而引起的吸收带，在以较低生长速度生产的自支撑 AlN 薄膜中观察到了该吸收带。

该团队目前正在研究以高于 150 微米 / 小时的速度生长更厚的同质外延层。☞

### 参考文献：

Y. Kumagai et al Appl. Phys. Express 15 115501 (2022)

# 使用新型 MOSFET 增强 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的可信度

具有 U 形栅沟槽和电流阻挡层的垂直 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET 结合了良好的性能和 E 模工作

来自中国的工程师们宣称，他们推出了首款具有 U 形栅沟槽的  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET，从而开创了新局面。

中国科技大学的 Guangwei Xu 表示，这种垂直的 MOSFET 比具有横向几何结构的 MOSFET 具有关键优势，该团队包括同系的同事和苏州纳米技术与纳米仿生研究所的 Yongjian Ma，Xu 评论说：“对于 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 横向 MOSFET，沟道厚度被限制在数百纳米，”他补充说，在这类器件中，衬底往往只提供结构支撑，对器件性能没有贡献。

“因此，横向 MOSFET 的漏源电流横截面远小于垂直 MOSFET，这意味着横向 MOSFET 需要更大的电流密度才能达到与垂直 MOSFET 相同的电流水平。”

垂直 MOSFET 的另一个优点是在不牺牲芯片面积的情况下增加其击穿电压，因为击穿电压会随着漂移层的厚度而变化。垂直晶体管还受益于更均匀的热分布，以及将峰值电场掩埋在体中——这可以防止由表面击穿引起的过早器件故障，并减轻由表面态引起的性能不稳定性。

Xu 和他的同事们并不是第一个生产垂直  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET 的人。曾经有关于垂直鳍状沟道场效应晶体管、垂直扩散屏障场效应晶体管和垂直电流孔场效应晶体管的报道——但所有这些

都有其弱点。鳍状沟道场效应晶体管实现了超过一千伏的击穿电压，但其制备过程复杂、成本高。同时，与 U 型沟槽 MOSFET 不同，垂直扩散屏障场效应晶体管和电流孔场效应晶体管具有 JFET 区域，导致内阻较高。

Xu 表示，在所有的变体中，U 型 MOSFET 的单元间距可以做得更小，从而实现更高的封装密度。

实现 U 型沟槽  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET 并不容易，因为要形成有效的电流阻挡层是一个挑战。徐及其同事借鉴了热退火如何产生高电阻率层的工作，通过热氧化引入了电流阻断。这导致了具有  $6 \times 10^4$  的开关比的增强型 MOSFET 的形成。

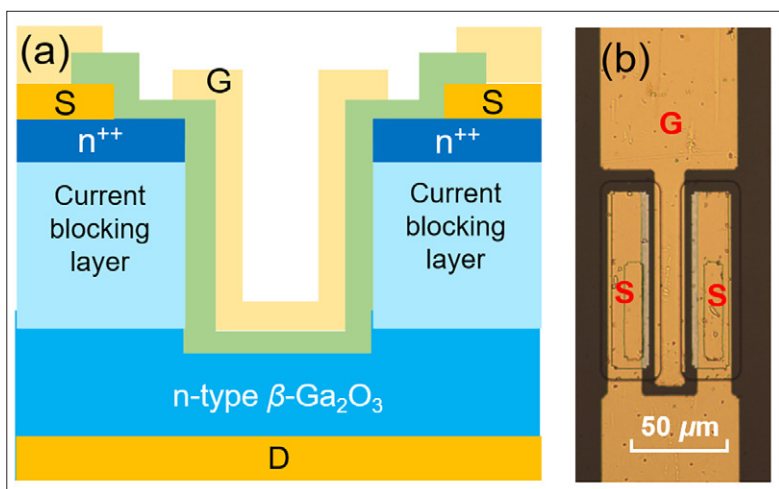
为了制备该 U 型沟槽  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET，研究人员首先采用掺杂浓度约为  $3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  的 (201) 晶向衬底，并在 1200 °C 的氧气下将其退火 6 小时以形成电流阻断层。注入浓度约为  $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的氧气，引入 n<sup>++</sup> 层，该层在 950 °C 下通过热退火 5 分钟来激活。晶片背面的机械研磨去除了高电阻率层，然后蚀刻确定了沟槽和台面。进行原子层沉积形成栅极之前，电子束蒸发法能够增加源极和漏极接触，最后使用磁控溅射形成栅电极。

器件的电学测量显示，在栅-源电压为 0 V 时，关断电流低于  $10^{-4} \text{ A cm}^{-2}$ ，表明是常关的。阈值电压为 11.5V，这一高值归因于厚电介质。优化这层电介质可以实现更理想的阈值电压。

Xu 透露，该团队的下一个目标是通过 HVPE 再现他们的成果。最新器件的击穿电压受限于相对高掺杂衬底的小耗尽深度。“为了提高导通状态和关断状态的性能，未来的工作将集中在基于高掺杂衬底上的轻掺杂外延层。”

## 参考文献

X. Zhou et. al. Appl. Phys. Lett. 121 223501 (2022)



(a) U 型沟槽  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MOSFET 具有有效的电流阻挡层，通过氧气退火形成。(b) 该器件的光学图像。



# 消除深紫外激光二极管中的暗线缺陷

通过消除暗线缺陷，倾斜的台面几何结构有望获得卓越的深紫外激光二极管

来自日本的一个团队通过引入倾斜的台面几何结构，消除了富铝的 AlGa<sub>N</sub> 基激光器的暗线缺陷。消除这些缺陷应该能够产出更可靠、更高效的激光二极管，其波长范围为 100 nm 至 280 nm。

据名古屋大学和旭化成公司的工程师称，由于效率低、寿命短和缺乏可靠性，目前的 AlGa<sub>N</sub> UVC 激光器是不实用的。

造成这些弱点的是暗线缺陷，它会破坏台面边缘的有源区域。一种解决方法是将 p 型电极放在远离台面边缘的地方，这样电流路径就会避开这个区域 -- 但这会导致更高的电阻，进而导致器件发热和阈值电流升高。

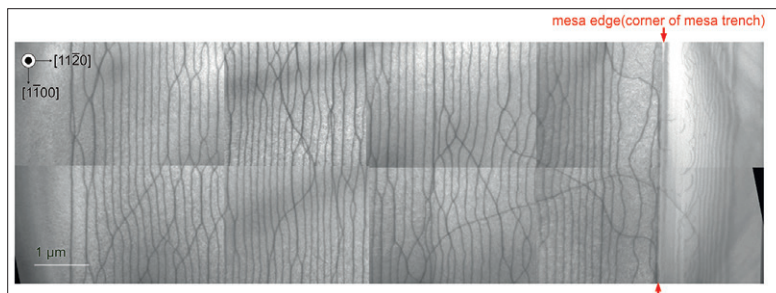
采用这种方法，该团队最近制备了一种 272 nm 的激光器，可在 5℃ 下进行连续工作。

对于这个 600 微米长的激光器来说，与台面角的距离每增加 5 微米，n- 电极和 p- 电极之间的电阻就会增加 2.6 Ω，由此产生的高电阻导致了焦耳热，从而阻碍了室温下的发光。由于与晶圆生长相关的限制，工程师无法通过加厚 Al<sub>0.75</sub>Ga<sub>0.25</sub>N-n 型包覆层或降低其铝含量来降低该电阻。打破这些规则将导致有源区中更高的缺陷密度，从而抑制辐射复合。

该团队的 272 nm 激光器的一个弱点是它布满了暗线缺陷。

为了研究它们的起源，该团队的最新工作涉及在单晶 AlN 衬底使用 MOCVD 生长的激光结构。这种异质结构包括：350 nm 厚的 n 型 Al<sub>0.7</sub>Ga<sub>0.3</sub>N 包层；具有多个量子阱的 100 nm 厚的 Al<sub>0.63</sub>Ga<sub>0.37</sub>N 波导层；320 nm 厚分布极化掺杂，平均铝含量为 85% 的 p 型覆层；和 p 接触层。干法蚀刻隔离了 p 接触层，并沿 [1100] 方向定义了台面条。

为了帮助分析，该团队避免在他们的器件上添加金属电极。然而，他们仍然对外延结构进行了金属电极制造过程中使用的热处理，这可能会影响其材料质量。



平面透射电子显微镜显示了具有常规几何形状的 AlGa<sub>N</sub> 激光二极管的暗线缺陷。

这种结构的平面透射电子显微镜图像清楚地显示了暗线缺陷 (见图)，观察到的暗线缺陷最远在台面边缘的 12 μm 处。对这些图像的检查显示，不存在部分位错和堆垛层错，这强力证明了位错起源于垂直于台面条纹的力所导致的滑移。

这些位错也发生在其他材料系统中，如 InGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> 和 AlN/SiC 异质结构，其中由于晶格失配而存在巨大的应变，平面应力的对称性被台面沟槽所破坏。

该研究团队通过有限元建模揭示了该结构内的作用力，并指出将面层坡度角减少到 50° 以下可以显著降低台面沟槽拐角处的剪切应力的集中。

该团队已经对这一发现进行了测试。"AlGa<sub>N</sub> 的蚀刻速度很慢，所以我们担心能否获得所需的形状，" 团队发言人 Maki Kushimoto 承认道，"然而，在尝试了几种抗蚀剂和回流条件之后，很明显我们可以稳定地形成台面。"

根据平面透射电子显微镜，与表面倾斜 15° 的结构没有暗线缺陷。

该团队的目标包括对位错的进一步研究。"我想弄清楚位错向有源层传播的机制、热膨胀的影响，以及晶面取向的影响，" Kushimoto 透露。SC

## 参考文献

M. Kushimoto et al. Appl. Phys. Lett. 121 222101 (2022)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
Aixtron		www.aixtron.com	BC
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
Evatec AG		www.evatecnet.com	13
Riber		www.riber.com	IFC
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](http://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 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



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

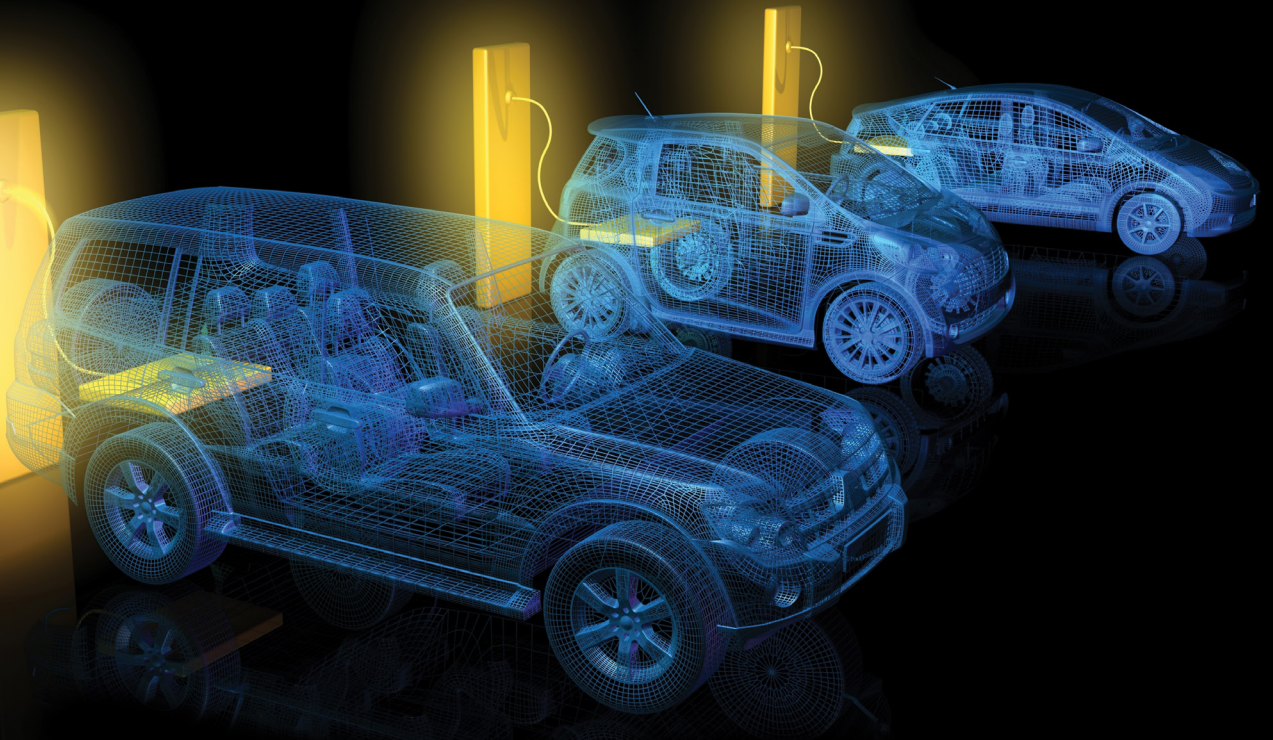
联系人：田先生 金先生

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



# 实现下一代碳化硅功率器件最佳的性能 为全球大趋势提供新的解决方案

## AIX G5 WW C

- 电动汽车：车载充电器，逆变器
- 基础设施：充电桩
- 再生能源：太阳能和风能
- 工业应用：马达驱动器，电源
- 配电管理：HVDC

发现全新碳化硅外延量产工具  
实现单片机的性能和多片机的成本



Made  
in  
Germany



# AIXTRON

info@aixtron.com  
www.aixtron.com