

# 化合物半导体



# • CHINA

2022年2/3月

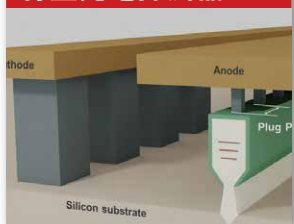
II-VI: 第一个领导者的里程碑



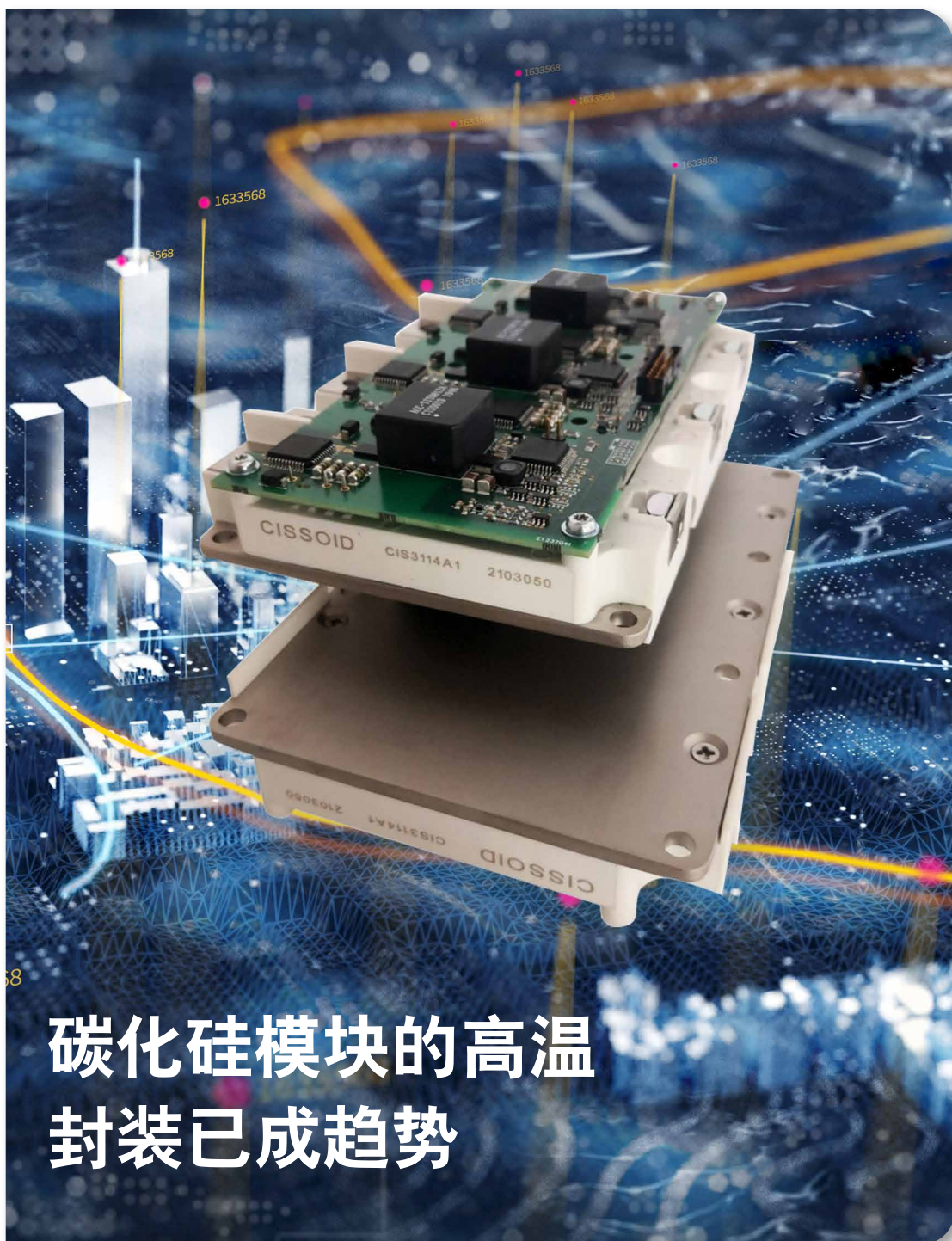
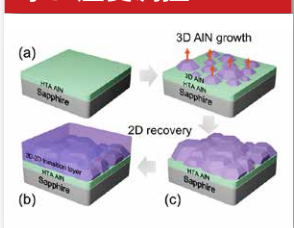
最佳鸡尾酒



在硅上构建III-V族化合物半导体纳米脊型光电探测器



UVC-LED进入低成本4英寸时代的推手: 应变调控



## 碳化硅模块的高温封装已成趋势



# 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

CS  
CHINA  
CON  
2022

# 化合物半导体先进应用大会

Compound Semiconductor Advanced Technology & Application Conference



## 化合物半导体线上研讨会

04月 | microLED的多个市场

05月 | 打造价值数十亿美元的SiC产业

07月 | 发挥GaN的巨大潜力

09月 | VCSEL如何发展以提供更好的性能

10月 | 毫米波5G的设备技术

12月 | UV-LED技术突破及产业趋势



## 化合物半导体先进应用大会（线下）

06月 苏州 | 化合物半导体先进应用大会

08月 深圳 | 化合物半导体先进应用大会

\*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



扫码关注公众号



扫码添加客服号



**LODAS-CI8**  
次世代晶圆缺陷検査

第三代半導體  
碳化硅錠・衬底・外延  
缺陷検査  
新常識 一台三役



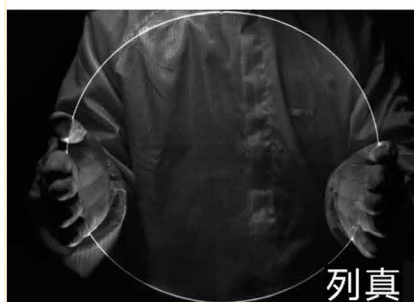
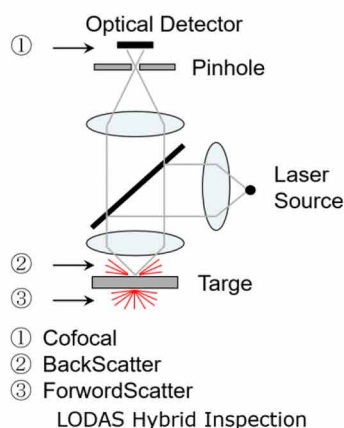
碳化硅錠  
内部缺陷検査



衬底  
表面划伤、顆粒



Epi  
结晶缺陷、顆粒



列真

日本 (总部)  
列真株式会社: LAZIN CO.,Ltd  
地址: 〒140-0003 东京都品川区八潮1-1-2 八潮中一大厦3F  
TEL: +81-03-6451-4379  
FAX: +81-03-6451-4469  
email: info@lazin.jp  
https://lazin.jp



中国分公司  
山东列真激光科技有限公司  
地址: 中国山东省济南市高新区创新谷园区Z2-1205-3  
TEL: +86-13156150118

## 封面故事 Cover Story

### 08 碳化硅模块的高温封装已成趋势

**High temperature packaging of silicon carbide modules has become a trend**

在比之于硅基的IGBT, 碳化硅 (SiC) 器件的基础特性是导通内阻较低, 而耐压、开关频率和耐受结温较高。当今的移动应用对功率密度提出了极高的要求, 原有的模块封装型式已经日益落后于半导体芯片技术的进展。因此, 在应用需求的推动下, 近年来在基础材料、核心连接技术及模块构型等方面都出现了较大的发展, 其中, 碳化硅模块的高温封装, 已然成为了封装技术发展的必然趋势

- Abel Cao, CTO, CISSOID 中国

## 编者话 Editor's Note

### 04 超宽禁带半导体之Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

**Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> of Ultra Wide Bandgap Semiconductors**

- 陆敏

## 业界动态 Industry

### 05 纳微成立全球首个电动汽车 GaN芯片设计中心

**Navitas Opens World's First EV GaN Chip Design Centre**

### 05 博世批准量产 SiC 芯片

**Bosch Gives Go-ahead For Volume Production Of SiC Chips**

### 06 II-VI的SiC MOSFET获得了车规认证, 扩展了与通用电气的合作关系

**II-VI Qualifies SiC MOSFETs For Cars And Extends GE Relationship**

### 06 中国GaN公司英诺赛科走向国际

**Chinese GaN Firm Innoscience Goes International**

### 07 InGaN 红光LEDs外延温度提升

**Epitaxial temperature increase of InGaN red LEDs**

### 07 ST 推出第三代碳化硅功率芯片

**ST launches the third generation of silicon carbide power chips**

关于雅时国际商讯 (ACT International)

**ACT** 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

**About ACT International Media Group**

ACT International, established 1998, serves a wide range of high technology sectors in the high-growth China market. Through its range of products -- including magazines and online publishing, training, conferences and events -- ACT delivers proven access to the China market for international marketing companies and local enterprises. ACT's portfolio includes multiple technical magazine titles and related websites plus a range of conferences serving more than 200,000 professional readers and audiences in fields of electronic manufacturing, machine vision system design, laser/photronics, RF/microwave, cleanroom and contamination control, compound semiconductor, semiconductor manufacturing and electromagnetic compatibility. ACT International is also the sales representative for a number of world leading technical publishers and event organizers. ACT is headquartered in Hong Kong and operates liaison offices in Beijing, Shanghai, Shenzhen and Wuhan. www.actintl.com.hk

## 高端访谈 Top interview

- 13 **II-VI: 第一个领导者的里程碑**  
**II-VI: Milestones of its first leader**
- 17 **回顾2021, 展望2022**  
**Looking back on 2021, looking forward to 2022**

## 技术 Technology

- 26 **最佳鸡尾酒**  
**Optimal cocktails**  
- RICHARD STEVENSON
- 32 **在硅上构建III-V族化合物半导体纳米脊型光电探测器**  
**Constructing III-V nano-ridge photodetectors on silicon**  
- 来自IMEC和根特大学的CENK IBRAHIM OZDEMIR和DRIES VAN THOURHOUT, 以及来自IMEC的YANNICK DE KONINCK, DIDIT YUDISTIRA, MARINA BARYSHNIKOVA, NADEZDA KUZNETSOVA BERNARDETTE KUNERT, MARIANNA PANTOUVAKI和JORIS VAN CAMPENHOUT
- 36 **UVC-LED 进入低成本4英寸时代的推手: 应变调控**  
**Drive High Power UVC-LED Wafer into Low-Cost 4-Inch Era: Effect of Strain Modulation**  
- 刘上峰, 袁冶, 黄黎杰, 张晋, 王涛, 李泰, 康俊杰, 罗巍, 陈兆营, 孙萧萧, 王新强

## 科技前沿 Research Review

- 41 **HVPE制备垂直GaN p-n二极管**  
**HVPE yields vertical GaN p-n diodes**
- 42 **用金刚石层解决氧化镓导电性差的问题**  
**Tackling gallium oxide's poor conductivity with diamond layers**
- 43 **GaN HEMT与SiC SBD的集成原型单芯片**  
**Single Chip Integrated Prototype of GaN HEMT and SiC SBD**
- 44 **广告索引 Advertisement Index**

### 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。

### About Compound Semiconductor China

Compound Semiconductor China (CSC) is the 'sister' title to Compound Semiconductor - the world's most respected and authoritative publication. It is also the unique and authoritative publication dedicated to the Compound Semiconductor industry in China, introduce advanced global technology information and manufacturing experience, support the growth of the industry in the China market. Our content covers the technology development of crystal characteristic, design of IC structure, and materials, equipment, software, metrology, facilities for manufacturing, as well as market analysis & trends.



扫一扫  
免费下载电子书



## 超宽禁带半导体之 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

氧化镓 (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 作为继 GaN 和 SiC 之后的超宽禁带半导体材料, 其禁带宽度约为 4.8eV (直接带隙), 理论击穿场强为 8MV/cm, 电子迁移率为 300cm<sup>2</sup>/Vs, 具有 4 倍于 GaN, 10 倍于 SiC 以及 3444 倍于 Si 的 Baliga 技术指标。同时通过熔体法长晶技术获得单晶, 大尺寸、高质量、生长速度快、可实时观察、可采用缩颈工艺降低缺陷密度等优势。使得 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 器件的成本有望比 GaN 以及 SiC 器件更低。随着高铁、电动汽车以及高压电网输电系统的快速发展, 全球急切的需要具有更高转换效率的高压大功率电力电子器件。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 功率器件在与 GaN 和 SiC 相同的耐压情况下, 导通电阻更低、功耗更小, 能够极大地节约上述高压器件工作时的电能损失, 因此 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 提供了一种更高效更节能的选择。

氧化镓 (Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) 的历史始于 1875 年, Bolisbaudran 发现了新元素镓 (Ga) 及其化合物。1952 年, Roy 等首次实现了 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 的相平衡系统, 确定了 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的多相结构并提出了这些相之间转变的方式。Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 共有五种晶相: α 相 (刚玉结构)、β 相 (单斜晶系)、γ 相 (类尖晶石)、δ 相 (斜方晶系)、ε 相 (六方或斜方), 在这五种相当中, β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是最稳定的。β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的熔点为 1820℃, 其粉末呈白色三角形结晶颗粒, 密度 5.95g/cm<sup>3</sup>, 不溶于水。早期氧化镓的研究主要关注其结构、相变等性质, 相关应用和研究热点集中在催化、气敏传感器、荧光、电致发光等领域。随着单晶及薄膜生长技术的成熟, β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 逐渐被应用于新的场景—日盲深紫外光电探测器及电力电子器件。

熔体法长晶技术只能获得 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 主要方法有 Cz 法 (提拉法)、EFG 法 (导模法)、VB 法 (垂直布里奇曼法) 和 FZ 法 (浮区法)。Cz 法和 EFG 法都需要一个加热用的铱 (Ir) 坩埚, Cz 法蒸发和离解熔体显著, 易形成金属间相 GaIr 损坏铱坩埚。EFG 法熔体区域很小, 因此, 可以最大限度地减少离解和蒸发的熔体, 并通过生长气氛组分及压力优化调控来抑制铱氧化损失, 生长速度高达几十 cm/d, 是现在的主流方法, 已经实现产业化。FZ 法不需要坩埚和模具, 生长得到的晶体较纯净, 但由于热区小, 大直径生长困难。VB 法通过一定温度梯度的 Pt/Rh 合金坩埚的立式炉中实现单向凝固结晶, 空气气氛, 坩埚材料可重复使用, 该技术仍处于起步阶段, 有望实现量产大直径 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 单晶的技术。

氧化镓外延有同质外延和异质外延。因目前只有 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 同质衬底, 同质外延就是在 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衬底上外延 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, 外延方法有 MBE、MOCVD 及 HVPE, 基于生长速率及界面特性考量, MBE 对于商业应用的最大缺点是生长速率很低, 因此不适合垂直结构功率器件的厚漂移层的生长, 可能适合于横向结构器件采用。而 HVPE 因其高生长速率而较能胜任垂直结构功率器件, 若能发展多片机台就更具成本优势了。MOCVD 因其适中的生长速率及界面性能, 加上具有成熟的多片技术平台 (如行星反应器及喷淋头技术等), MOCVD 在未来功率器件外延中定会发挥主导作用。异质外延的衬底主要是蓝宝石, 包括 MBE、MOCVD、HVPE 生长 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜, Mis-CVD 及 HVPE 生长 α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜。亚稳态 α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是间接带隙, 比 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 在禁带宽度、电子有效质量、临界击穿场强和 Baliga 品质因子等重要性质上更胜一筹, 意味着更适合于发展高性能、低功耗和低成本功率电子器件。更为重要的是, α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 晶体结构相同, 可通过异质外延获得更高质量单晶薄膜, 并可解决基于 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 单晶衬底热导系数小导致功率器件散热性差的严重问题。因此异质外延 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 薄膜尽在日盲深紫外光电探测器有价值, 在功率器件方面的产业化意义就不是很大了。β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 同质外延及 α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质外延是目前电力电子器件的两条技术路线, 目前因 β-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衬底并未达到理想的低成本 (因高昂的铱金坩埚成本), α-Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 异质外延路线更具性价比优势。

综合分析当前氧化镓材料生长及器件制备的现状, 仍有几大关键问题亟待解决: 大尺寸高质量低成本 Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 材料仍有待发展、有效的 P 型掺杂难于实现和热导率低的问题需要进一步寻找高效低成本解决方案。



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

雅时国际资讯 ACT International

香港九龙 B,13/F, Por Yen Bldg,

长沙湾青山道478号 478 Castle Peak Road,

百欣大厦 Cheung Sha Wan,

13楼B室 Kowloon, Hong Kong

Tel: (852) 2838 6298

Fax: (852) 2838 2766

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200

Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 25988573

Fax: 86 755 25988567

武汉 Wuhan

Tel: 86 27 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

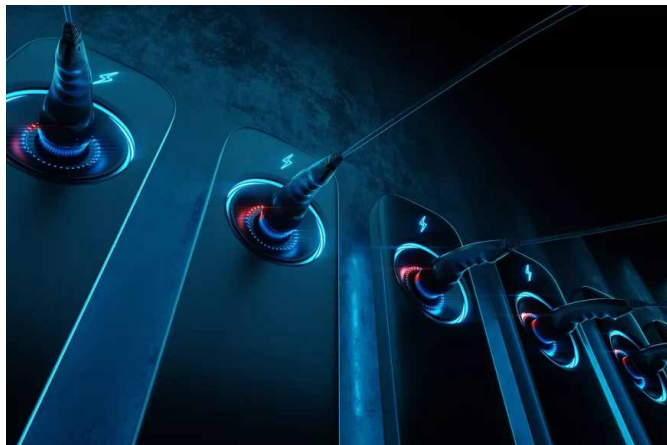
stephen.whitehurst@angelbc.com

Tel: +44 (0)2476 718970



## 纳微成立全球首个电动汽车 GaN 芯片设计中心

纳微半导体宣布成立一个新的电动汽车 (EV) 设计中心, 进一步扩展高功率 GaN 市场。



公司将与 OBC、DC-DC 和牵引系统公司合作

该设计中心位于中国上海, 拥有一支由电力系统设计团队, 他们具备电气、热力和机械设计、软件开发以及完整

的仿真和原型制作能力。新团队将在全球范围内为电动汽车客户提供支持, 从概念到原型, 再到全面认证和大规模生产。

行业专家、上海设计中心新任高级总监孙浩 (Hao Sun) 表示: “设计中心将为全功能、可生产的电动汽车动力系统开发原理图、布局和固件。纳微将与 OBC、DC-DC 和牵引系统公司合作, 创建具有最高功率密度和最高效率的世界级创新解决方案, 以推动 GaN 进入主流电动汽车领域。”

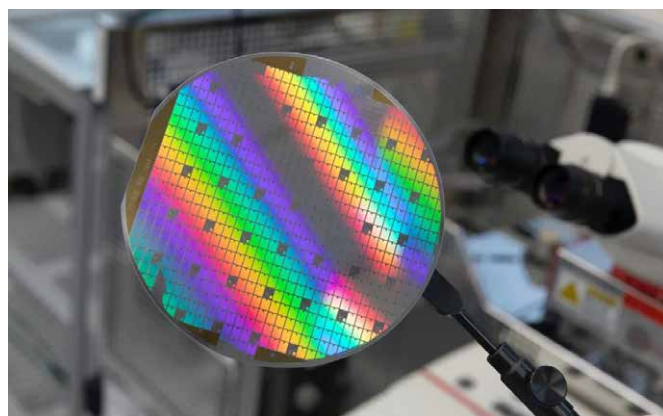
为 EV 应用量身定制的高功率 650V GaN IC 已于 12 月向 EV 客户提供了样品。在最近的小米产品组合演示日上展示了 6.6kW OBC 概念, 并在 CES '22 上展出。

“纳微电动汽车团队在提供动力系统方面拥有丰富的人才和成熟的经验,” 纳微半导体副总裁兼中国区总经理查莹杰说, “对于 GaN 来说, 电动交通是一个令人兴奋的扩展市场, 估计在每辆电动汽车上的潜在应用价值为 250 美元。按市场划分, Navitas 正在向更高功率的应用快速推进, 如电动汽车、数据中心和太阳能。”

## 博世批准量产 SiC 芯片

经过几年的发展, 博世现已开始量产 SiC 功率半导体。“碳化硅半导体的未来是光明的。我们希望成为电动汽车碳化硅芯片生产的全球领导者,” 罗伯特·博世有限公司管理委员会成员 Harald Kroeger 说。两年前, 这家技术和服务供应商宣布将推进 SiC 芯片的开发并进入生产阶段。为此, 博世开发了自己的制造工艺, 自 2021 年初以来一直在使用——最初用作客户验证的样品。Kroeger 说: “由于电动汽车的蓬勃发展, 我们的订单已经满了。”

未来, 博世打算将其 SiC 功率半导体的产能扩大到数亿单位的规模。考虑到这一点, 该公司已经开始扩大其 Reutlingen 工厂的洁净室空间。与此同时, 第二代 SiC 芯片的工作也在进行中, 该芯片将更加高效, 应该可以在 2022 年实现量产。作为“欧洲共同利益重要项目 (IPCEI) 微电子”计划的一部分, 博世正在接受德国联邦经济事务和能源部 (BMWi) 对开发这些 SiC 半导体创新制造工艺的支持。“几年来, 我们一直在提供支持, 帮助在德国建立半导体生产。博世高度创新的半导体生产加强了欧洲的微电子生态系统, 是在这一关键数字化领域实现更大独立性的又一步。”德国联邦经济事务部长 Peter Altmaier 说。在全球范围内, 对 SiC 功率半导体的需求正在上升。市场研究和咨询公司 Yole 的预测表明, 从现在到 2025 年, 整个 SiC 市场将平均每年增



量产将于 2021 年 12 月开始

长 30%, 超过 25 亿美元。大约 15 亿美元的 SiC 汽车市场预计将占据最大份额。为了满足对这些半导体不断增长的需求, 2021 年, 博世在 Reutlingen 的晶圆厂已经增加了 1,000 平方米的洁净室空间。到 2023 年底, 将再增加 3,000 平方米。新的空间将拥有最先进的生产设施, 使用内部开发的工艺制造 SiC 半导体。为了实现这一目标, 博世的半导体专家正在利用他们在芯片制造方面数十年的专业知识。未来, 该公司计划在 200 毫米晶圆上制造半导体。与今天的 150 毫米晶圆相比, 这将带来可观的规模经济。毕竟, 一块晶圆需要几个月的时间才能在无数台机器上通过几百个加工步骤。Kroeger 说: “通过在更大的晶圆上生产, 我们可以在一次生产中制造更多的芯片, 从而为更多的客户提供服务。”

## II-VI 的 SiC MOSFET 获得了车规认证，扩展了与通用电气的合作关系

II-VI 公司宣布其 1200V SiC MOSFET 平台已符合汽车电子委员会 AEC-Q101 标准，甚至超过了它达到了 200 °C。它还扩展了与通用电气 (GE) 的关系，与通用电气研发中心签署为期三年的技术协议 (TAA)，以获得该中心世界一流的 SiC 模块技术和专家团队支持，加速基于客户需求的设计研发。


“这项认证资格是一个重要的里程碑，使我们能够开始对我们应用于工业电机和可再生能源市场的器件加强商业活动，同时在电动汽车市场启动长期的设计活动。”创新事业与宽禁带电子技术部执行副总裁 Sohail Khan 说，“2020 年通用电气技术的许可使我们能够提前实现我们的资格认证这一里程碑。技术授权协议将加强我们与通用电气的合作关系，并进一步加快我们的产业化时间，因为我们将继续执行我们之前宣布的增长计划，在未来十年内投资 10 亿美元用于我们的 SiC 平台的产能和创新。”

与通用电气研发中心签订的 TAA 扩展了与通用电气的关系，它是建立在早期协议的基础上，在该协议中，II-VI 获得通用电气的技术授权，制造用于电力电子的 SiC 器件和模块。TAA 将涉及通用电气研发中心的十几名 SiC 器件和



公司与通用电气研发中心签署了技术协议，以获得该中心的 SiC 模块技术和专家支持

系统专家以及测试设施，它们将致力于 II-VI 的 SiC 器件和模块的下一阶段商业化。

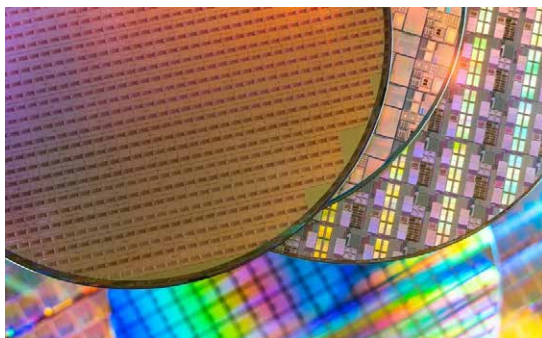
“我们很高兴签署这项新协议，这将使 II-VI 能够在汽车、工业和其他领域的功率电子方面把握住数十亿美元的新市场机会。”通用电气首席技术官 Vic Abate 表示，“在我们与 II-VI 合作扩大其市场基础的同时，我们还将利用 SiC 功率器件和模块的新进展来提升通用电气的 SiC 产品在航空市场的地位，并支持通用电气在能源和医疗保健领域的其他产品，它们将受益于这些功能更强大的功率电子器件。” 

## 中国 GaN 公司英诺赛科走向国际

制造硅基氮化镓电源解决方案的中国公司英诺赛科宣布正式启动其在美国和欧洲的国际业务。英诺赛科总部位于中国苏州，现在准备通过在加州圣克拉拉和比利时鲁汶增加设计和销售支持设施来支持客户。

英诺赛科成立于 2015 年 12 月，总部位于中国苏州，拥有两个晶圆厂，包括一个大型 8 英寸 GaN-on-Si 专用工厂。目前，该公司拥有每月 1 万片 8 英寸晶圆的产能，今年晚些时候将增加到每月 1.4 万片 8 英寸晶圆，到 2025 年将达到每月 7 万片 8 英寸晶圆。该公司拥有从 30V 到 650V 的器件组合，并已出货超过 3500 万个器件，应用范围包括 USB PD 充电器 / 适配器、数据中心、手机和 LED 驱动器。


英诺赛科生产常关型 e-mode GaN FET。该公司表示，通过引入应力增强层，它显著降低了  $RDS_{(on)}$ ，而不会影响



公司在美国加州圣克拉拉和比利时鲁汶增加了设计和销售支持设施

包括阈值电压和漏电在内的其他参数。外延和器件工艺都经过优化，以获得高再现性和良率。器件已通过超过 JEDEC 标准的质量和可靠性测试。

英诺赛科欧洲公司总经理 Denis Marcon 评论道：“GaN 的时机已经成熟，英诺赛科已准备好向全世界供货。我们将在同等器件的价格上超越任何对手，我们巨大的制造能力意味着我们的客户可以对供应放心，鉴于目前芯片短缺，这通常是人们最关心的问题。我们期待与任何公司合作，以在全球电子行业推广 GaN。”

英诺赛科美国公司总经理 Yi Sun 解释说：“对于我们的客户来说，这是一个激动人心的时刻，他们可以从英诺赛科的应用理解和演示板中受益，以开发他们独特的解决方案。这将使我们能够更好地支持我们在美国的客户，尤其是湾区客户”。 

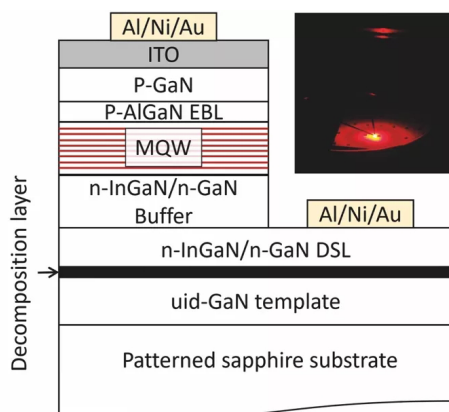


## InGaN 红光 LEDs 外延温度提升

众所周知，GaN 基长波长 LEDs 的外延需要低生长温度，以提高 InGaN 量子阱中的 In 组分，因此红光量子阱的生长温度一般明显低于蓝绿光量子阱的生长温度。但是，低生长温度降低了原子的迁移能力，提升了缺陷密度，表面容易粗化，导致发光效率下降。

毫无疑问，高发光效率的 GaN 基红光 microLEDs 对显示领域具有重要的意义。当前显示使用均为 AlInGaP 基红光 mini-LEDs，虽然它发光效率高，但是当尺寸进一步减小，尤其到几微米尺

度，表面复合加剧，效率将大幅下降。但是，氮化物半导体 LEDs 表面复合速度低，在该方面具有优势。但是氮化物红光 LEDs 外延极为困难，高 In 组分 InGaN 和 GaN 之间的晶格失配很大，失配位错密度高，同时在生长时 In 组分提拉效应降低了量子阱中的 In 组分。为了克服上述组分提拉效应，可以引入弛豫的 InGaN 缓冲层，以降低应变从而实现更高的生长温度。UCSB 在前期工作中使用通过电化学刻蚀方法制作了多孔 GaN 作为弛豫缓冲层。然而，根据新论文作者 Philip Chan 的说法，上述方法有下述缺点：制作工艺复杂，只能部分弛豫缓冲层的应力，并且会导致衬底可用面积大幅



加州大学圣巴巴拉分校 (UCSB) 的研究人员声称可提高 InGaN 红光 LED 外延温度，从而打开红光 LEDs 研究的新篇章。这一突破来自于引入弛豫 InGaN 缓冲层。

减少。

Chan 和他的同事开发了一种利用 InGaN 热分解层实现弛豫方法。该团队在 GaN 外延层上在 720 °C 下生长 3nm 厚的 InGaN 分解层和 4nm GaN，之后升温至 930 °C 生长了包括 5 个周期的分解停止层，每个周期包括 18nm 厚 InGaN 和 2nm 厚 GaN。在高温生长过程中，高 In 组分 InGaN 分解层分解形成空洞，使分解停止层实现应变弛豫从而作为后续 LED 外延的模板。在该模板上，团队先生长了一层 InGaN 缓冲层，之后

生长了如图所示的器件结构。(见图，该图标出了分解层位置，插图是 100A cm<sup>-2</sup> 下 LEDs 的发光照片)。器件测试显示，当电流密度从 5A cm<sup>-2</sup> 增加到 50A cm<sup>-2</sup> 时，LED 的峰值波长从 770nm 蓝移到 660nm。Chan 认为这种大幅度的蓝移是“相当标准”的，其原因是工作电流增加时的极化场屏蔽效应，可以通过后续的精准确掺杂研究来改善。但是，该工作让大家看到红色 InGaN micro-LEDs 商业化的曙光。”当然，现在实现的红光 LEDs 半峰宽过大，为 69nm，不能满足显示应用要求。n 型层的电流扩散不良是原因之一，有望在以后研究中优化改善。CS

## ST 推出第三代碳化硅功率芯片

STMicroelectronics 正在推出其第三代 STPOWER SiC MOSFET，用于电动汽车 (EV) 动力系统和和其他将功率密度、能效和可靠性作为重要目标标准的应用。

随着电动汽车市场的加速发展，许多汽车制造商和汽车供应商现在都采用 800V 驱动系统来实现更快的充电并帮助减轻电动汽车的重量。ST 的新型 SiC 器件针对这些高端汽车应用进行了优化，包括 EV 牵引逆变器、车载充电器、DC/DC 转换器以及 e-climate 压缩机。新一代还通过提高电机驱动器、可再生能源转换器和存储系统以及电信和数据中心电源的效率来适应工业应用。

“我们将继续通过器件和封装级别的创新推动这项激动人心的技术向前发展。作为一家完全集成的 SiC 产品制造商，



最新的 STPOWER SiC MOSFET 旨在提高电动汽车 (EV) 动力系统和工业应用的效率

我们能够为客户提供持续改进的性能，”意法半导体 (STMicroelectronics) 汽车和分立器件集团功率晶体管宏观部门总经理兼集团副总裁 Edoardo Merli 说，“我们正在不懈地投资以支持我们的汽车和工业项目，预计 2024 年 SiC 收入将达到 10 亿美元。”

ST 已完成第三代碳化硅技术平台的认证，预计 2021 年底大部分衍生产品将走向商业成熟。标称额定电压为 650V 和 750V 至 1200V 的器件将上市，为设计人员提供更多选择，以解决从普通交流线路电压到高压电动汽车电池和充电器的应用。首批可用的产

品是 650V SCT040H65G3AG，售价为 5.00 美元，以及一个 750V 芯片型号的器件 (数据表和报价单应要求提供)。CS

# 碳化硅模块的高温封装已成趋势

Abel Cao, CTO, CISSOID 中国

比之于硅基的 IGBT，碳化硅 (SiC) 器件的基础特性是导通内阻较低，而耐压、开关频率和耐受结温较高。当今的移动应用对功率密度提出了极高的要求，原有的模块封装型式已经日益落后于半导体芯片技术的进展。因此，在应用需求的推动下，近年来在基础材料、核心连接技术及模块构型等方面都出现了较大的发展，其中，碳化硅模块的高温封装，已然成为了封装技术发展的必然趋势。

## 碳化硅器件的特点

碳化硅器件的本质特点主要表现在电场强度、导热系数、熔点、电子迁移速度、禁带宽度等几个方面，参见图 1。这些基础特性决定了其导通内阻较低，而耐压、开关频率和耐受结温较高等基础特性。

碳化硅器件的导通内阻较小而耐压较高，决定了其芯片的尺寸可以做得很小，一颗典型的 1200V150A、第四世代 IGBT 片芯，面积约为 142mm<sup>2</sup>，而一颗类似指标的 13mΩ 碳化硅片芯，面积只有 30mm<sup>2</sup>，前者是后者的 5 倍；纯粹的硅

基半导体，其最高耐受结温一般不超过 125°C，而碳化硅导热系数和熔点较高，所以耐受结温可以轻易超越 500°C，今天绝大多数碳化硅器件的标称最高结温为 175°C (少数标称为 200°C)，是受到了现有封装技术的限制；过去 IGBT 功率模块的开关频率多数为 6~12KHz，一般不会超过 15KHz，而碳化硅器件的开关频率高，100KW 级的大功率逆变器可以做到 250KHz，电力牵引驱动的也可以做到 100KHz 以上。目前已有客户使用 CISSOID 的 IPM 尝试 180KHz 的 DC/DC 变换器和 80KHz 的电机驱动。

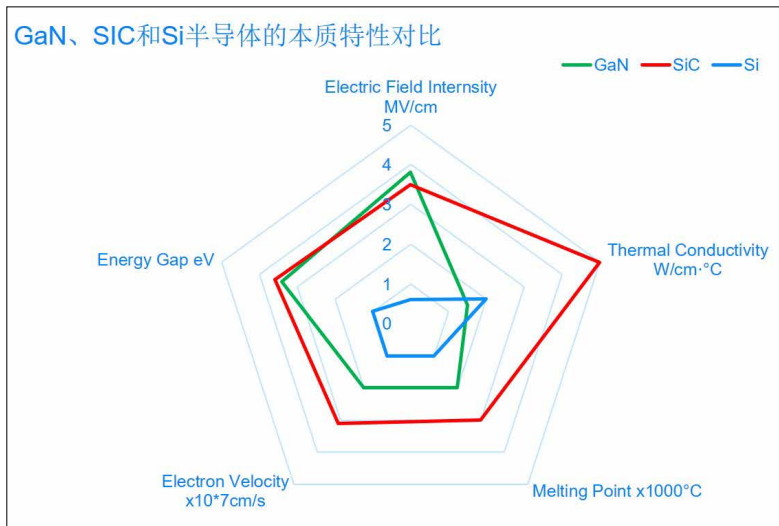
碳化硅的导通内阻较低，因而单位面积的过流能力大约提高了 5 倍；碳化硅的开关损耗较小，但极高的开关频率还是带来了显著的内耗增加；碳化硅的耐受结温较高，但其短路耐量较小大约只有 2.5μs，大约只有 IGBT 的一半。所以，比之于 IGBT 时代，碳化硅器件要求模块封装能够为单位面积提供 3~7 倍的导热散热能力。

更高的开关频率可以有效地降低应用系统的体积，提高功率密度，但要求封装的杂散电感较低以便有效抑制高压开关过冲，进而保证昂贵的功率器件的安全。此外，碳化硅器件还要求 die Attach、DCB Attach 和邦定等各种连接的剪切力值更高，以便耐受更宽幅度的热冲击和热电联合功率循环，保证模块的工作寿命。

## 来自应用的指标压力

2014 年以来，美国能源部在 DoE2025 和 USDRIVE 项目序列资助了 ADEPT、SWITCHES、CIRCUITS 等一系列宽禁带半导体 (WBG) 的基础材料、器件设计和应用系统的探索性研究，其中 USDRIVE 对电机驱动类应用 (ETDS) 提出了极高的功率密度指标，要求到 2025 年功率驱动总成本部分 (含电机和牵引驱动器) 要达到 33kW/L，

图1.氮化镓、碳化硅和硅半导体的本质特性对比。



是2020年已有实现的8倍(4kW/L)；同时，要求成本下降到6USD/kW，从而实现与内燃机动力的可比性，参见图2。

今天仍然有很多工程师质疑 USDRIVE 的指标定得太高，商业化无法实现。但有些研究显示，基于基础材料创新的新型高速电机在碳化硅器件的加持下，极有希望做到这个目标。例如，基于SiC器件的耐高温特性，美国橡树岭国家实验室(ORNL)和德国弗劳恩霍夫 IISB 研究所等，不约而同地把电力牵引驱动系统离散化，并融合到了电机的轴端或筒体上，实现了深度集成的机电一体化，从而显著地缩小了电力驱动总成的体积，提高了功率密度，参见图3。

图中可见，不仅是功率“模块”本身，就连 DCLINK 电容和门级驱动电路也被集成到了电机的轴端，因而，这些零部件都要耐受 150°C 或以上的高温；为了提高电机转速，进而缩小体积并提高效率，ORNL、美国国家可再生能源实验室(NREL)和伊利诺伊理工学院(IIT)，以及德国的一些研究机构和企业，都在探索高温电机及其融合式的驱动系统，从而对直流电容和门级驱动都提出了耐高温的要求。

### IGBT 模块的封装

在 IGBT 时代，封装技术基本可以用“焊接”和“邦定”加以概括。首先，功率芯片的表面金属化多为铝质(Al)或铝掺杂硅(AlSi)；焊接的材料多为“锡银铜”(SnAgCu, SAC 焊料)，工艺多为各类钎焊(Brazing)；邦定，功率引线多用粗壮铝线或铜带(或编织铜网)等；图4显示了一个沿用传统的 IGBT 封装工艺的 SiC 模块(单相)。

该封装工艺的 die Attach 及 DCB Attach，使用了钎焊技术，熔点仅为 220°C 上下。SiC 芯片使用铝质表面金属化，因而铝基同质邦定(Al-Al)的寿命尚可，但 die Attach 和芯片顶部到 DCB 的邦定是铜铝结合(Cu-Al)，剪切力在 20~30MPa 左右，其宽幅度热冲击(TST)和热电联合功率循环(Power Cycling)的周次能力不足，因而在碳化硅的高耐受结温应用的情况下，寿命不足。

### 碳化硅模块的封装发展

在发展的早期阶段，碳化硅功率模块自然而然地继承和沿用了 IGBT 的封装技术，但由于碳

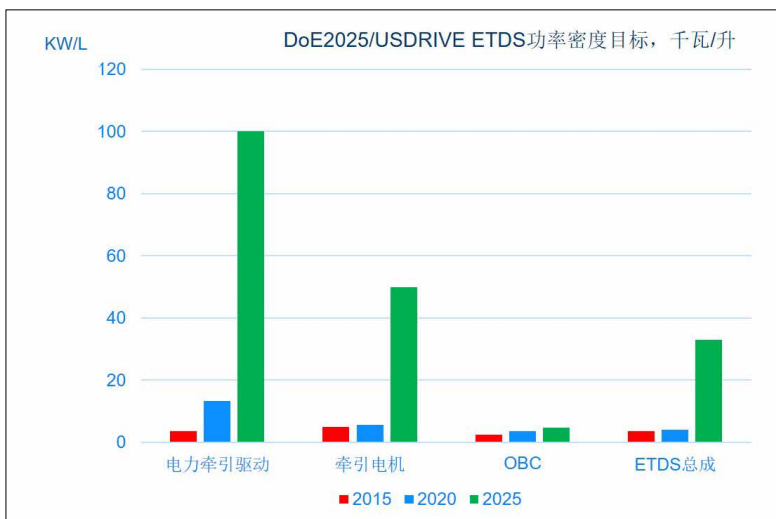


图2. DoE2025/USDRIVE 的ETDS功率密度目标。

化硅器件的不同特性，且随着应用需求的相应提升，旧有的封装技术越来越难以满足要求，主要表现在：

◎ **更高熔点**：过去各类焊接的熔点大约都在 220°C 左右；现在碳化硅器件的最高耐受结温普遍都在 175°C，不久将会普及到 200°C，因而，要求各类连接的熔点必需超过 300°C，最好达到 400°C 以上；

◎ **更佳热导**：虽然碳化硅芯片内阻和开关损耗都显著的降低了，耐受结温也高于 IGBT，但



图3. Fraunhofer IISB的ETDS深度集成。

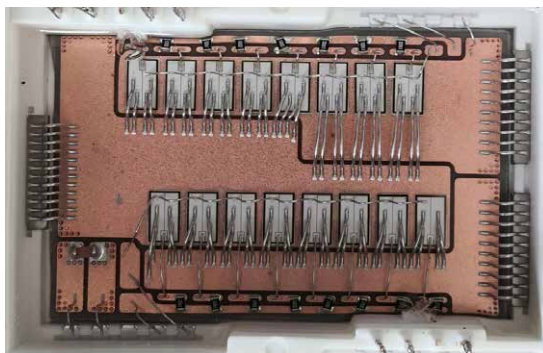


图4. 模块内部的焊接和邦定，可见铝质粗线邦定。

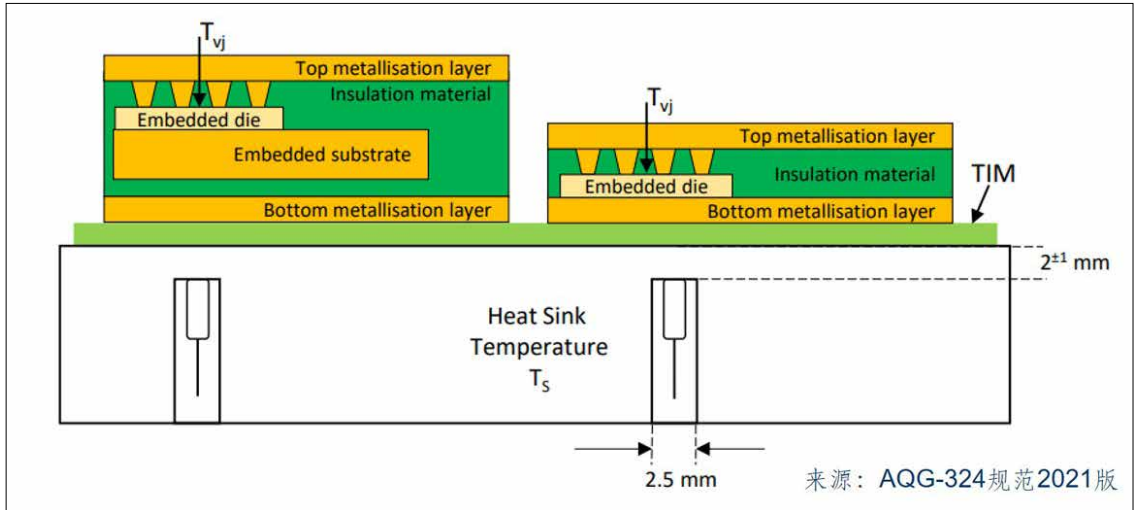


图6. 嵌入基板（左）和无基板嵌入叠层（右）的结构（均未画出顶部散热器）。

是开关频率的提高和芯片面积的减小，还是导致发热密度急剧增加。这样，在同等功率条件下，要求单位面积的导热能力提高 3~7 倍；因而，碳化硅模块需要更佳的导热结构设计并采用先进的材料，使得模块总体热阻最小，热导率最大；

◎ **连接更坚固**：碳化硅功率模块需在更大温度范围内工作，因而需要把各个连接的剪切力提高到 60MPa 或以上；具体实现，同样涉及到新型材料和工艺过程设计和实施；

◎ **降低连接电阻**：连接的电阻要降低，以便在有限的面积（IGBT 的 1/5）上承载相当的电流，降低耗散；

◎ **缩小体积**：缩小的封装体积有助于降低杂散电感（提高开关频率）并提高功率密度。

为了解决这些问题，近期封装技术的发展表现在以下几个方面。首先，芯片的表面金属化转向了铜和银，有的公司直接在 SiC 半导体表面溅射沉银或沉铜，有的则采用旧有的铝质表面镀铜来做为过渡方案。其中，被泛称为“邦定缓冲层”（Bonding Buffering Layer）的技术，与“片芯顶部系统”（Die Top System, DTS）类似，以铜基



图5. 一种DTS实现，可见功率连接基于铜，但芯片表面仍为铝质，控制引线也为铝质。

同质连接为核心，实现了双面散热，据报道与传统封装技术相比，导热能力提高 10 倍，电流能力提高 15 倍，热冲击和热电联合功率循环能力也提升了 15 倍。

其次，在连接工艺方面，出现了“固液相互扩散”（Solid Liquid Diffusion, SLD，一种扩散焊）和“瞬时液相烧结/焊接”（Transient Liquid Phase Sintering/Soldering, TLPS）等；最为突出的发展，还是各种高压和中压“铜烧结”（Cu Sintering）和“银烧结”（Ag Sintering）工艺，目前已有一些设备厂家可以提供全套的自动化烧结设备，覆盖了从大学实验室到中等规模量产的各种应用。由于铜在封装工艺过程及后期使用过程中容易氧化，因而处理工序更为复杂，设备昂贵，而银在 200°C 以上高温时可以自洁去氧化，银烧结工艺相对简化，处理速度更快，因而被视为封装技术的主要发展方向。

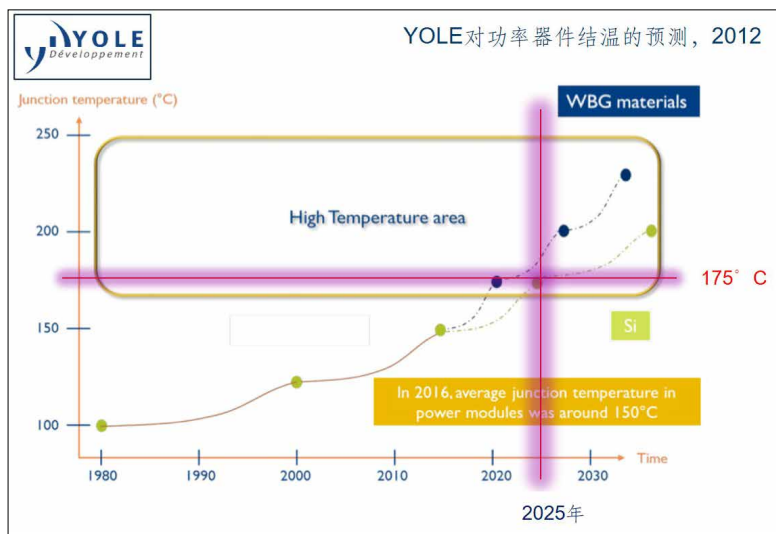
作为连接和结合辅料的“粘性导电环氧树脂”（Adhesive Conductive Epoxy Resin）或“掺杂微米银聚合物”（Polymer with Micron Silver）近年来也获得了极大的进步，过去老式的环氧树脂导热能力只有 1~7W/mK，现在已经提高到 20~100W/mK 以上，除了导热改善，还可以帮助减少连接电阻，减缓热胀冷缩带来的机械应力等；与之类似，作为模块封装填料的“绝缘导热有机硅胶”（Insulative Thermal Conductive Silicone）、热固性树脂（Thermoset Resin/Epoxy）等材料也有很大的进步，特别是其导热能力大幅增加了。最后，外壳模料（Mold Compound）的发展，对于封装的整体散热也有贡献。这些辅料的选择和工艺过程（Curing Process）对封装的整体性能具有相当

重要的影响。

### 未来展望

除了“封装离散化”的趋势（参见图3），SiC 功率模块的叠层结构也有创新出现，有些研究机构和公司尝试了“嵌入式基板”（Embedded Substrate）概念，把芯片及基板（Substrate）都埋入某种载体中，芯片和嵌入基板都使用了双面银烧结进行连接，由此可以实现双面散热；更为激进的“无基板封装”（Embedded Package without Substrate）概念则取消了“嵌入基板”，嵌入芯片通过载体的金属化层直接连接到散热体上，参见图6。

嵌入式基板和无基板嵌入式叠层的目的是，是提高各个结合界面的导热能力或减少接合面的数目，以降低模块的总体热阻，提高导热能力。还有一些研究尝试了封装与模组一体化的尝试，有的公司开发了“多层烧结技术”（Bond Free），有的开发了“p2Pack”、“ECP”（Embedded Component Package）、“Open Constructure Module”等多种新型的封装架构；有的架构甚至



允许在 PCB 表面安装控制系统零件，而在 PCB 内层集成了引线框架，其间的空腔用以容纳功率器件、门级驱动及其他分立元器件。目前，领先的 SiC 模块封装技术都做到了 400°C 的熔点，高于 IGBT 时代 10 倍以上的散热能力，以及  $8 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}^2$  或更低电阻率。这些发展一方面改善了热电性能，另一方面，也是为了即将到来的高温应用时代做好了准备。

图7.法国技术市场趋势调查公司YOLE对功率器件结温的预测。



# 打开这扇门 —解锁未来



从功率器件应用中的高产量背面金属化，到未来传感器的高性能压电，以及我们的数据通信网络和生物识别传感器的光学堆栈，新的 CLUSTERLINE® 系列在功率器件、MEMS、无线和光电领域为今后的新应用提供了全新的薄膜沉积工艺性能。Evatec 在单一或批量工艺模块技术方面的专业知识使您能够灵活地配置蚀刻、PVD、PECVD 和 PEALD 工艺能力，为您在未来几年提供最广泛的可能性。今天就联系我们……用 Evatec 的 CLUSTERLINE® 系列开启您的未来！

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

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



图8. CISSOID风冷型高温SiC IPM外形。

SiC 模块高温应用首先是基于碳化硅的耐高温性能。除了前述的离散式封装（参见图3），越来越多的应用不允许携带液冷系统，只能使用自然或强制风冷（Air Cooling），这在航空、移动储能应用较为普遍，在电动汽车应用上也开始出现，例如某些超轻量级的 miniEV，就没有使用水冷系统，而是依靠自然风冷（半强制风冷）实现功率驱动的散热。在多电和全电飞机应用中，使用液冷不仅带来了经典的可靠性问题，液冷系统的恒定重量也是额外负荷，会带来移动能源的“无功”消耗，因而是应用系统设计所要取消的首要目标。

当然，Air Cooling 的热交换率显著低于液冷，故此要求电力牵引驱动系统必须能耐受更高的工作温度，因而，SiC 模块将会工作在更高的温度环境中。过去车用电子设备的最高环境温度仅为 85°C，现在 ORNL 等要求提高到 125°C（近期）和 150°C（中期）；法国著名的技术市场趋势调查公司 YOLE 早在 2012 年就指出了这个趋势，参见图 7。

从 1980 到 2015 年，硅基功率半导体的最高结温从 100°C 提高到了 150°C；由于 WBG 半导体的出现，进一步加速了结温的上升趋势，现在，SiC 器件的结温普遍做到了 175°C，到 2025 年将会普及 200°C，而到了 2030 年，则会探高到 225°C 左右。SiC 器件本身的耐受结温可以轻易的超越 500°C，目前常见的 SiC 器件标称结温为 175°C（少数标称 200°C）是由于传统封装技术的限制所致。目前，SiC 模块的高功率密度和高温应用越来越受到重视，SiC 模块的高温封装已经成为了明显的趋势，将会给整个功率电子产业带

来深刻影响，并推动封装技术的持续进步。

针对这些结温上升的需求并配合碳化硅应用，CISSOID 公司推出了耐高温的 SiC 门级驱动芯片和方案（CMT 系列，结温 175°C；CHT 系列，结温 225°C）。CISSOID 长期从事高温半导体器件的设计制造，拥有 20 年以上的专业经验，其核心技术包括两个主要方面：第一，高温芯片技术，基于耐高温的芯片结构设计，及先进的“绝缘层上硅”（Silicon on Insulator, SoI）工艺；其二，高温封装技术，其金属陶瓷封装的高温器件系列，最高耐受结温可达 225°C 以上。绝大多数普通硅基器件最高仅仅只有 1000 小时左右的高温寿命（在 175°C 结温工作），而 CISSOID 的特种 SOI 硅高温器件可在 175°C 结温条件下长期稳定连续运行达 15 年之久。

此外，为了顺应新型应用的发展和诉求，CISSOID 已经推出了 2 款风冷型耐高温 SiC IPM 功率模块产品，分别为 CMT-PLA3SB12340AA（基于进口 SiC 片芯）和 CMT-PLA3SB12340CA（基于国产 SiC 片芯），二者均为 3 相 6 臂全桥结构，参见图 8。鉴于成本考虑，目前该两款 IPM 的额定工作环境温度均为 125°C，但更换一小部分零件后，可以方便的升级到 150°C，甚至更高温度。后续，CISSOID 将陆续推出 2 相 4 臂的 H 桥结构，及单相半桥结构的 IPM 功率模块，以满足市场的多样化需求。

碳化硅器件的新特性给高温高密度应用打开了一扇新的窗口。过去工程师们一直头痛于风险极大的热管理失效问题，绞尽脑汁地去降低 IGBT 模块的工作环境温度。现在，航空、新能源汽车、移动储能以及电动船舶等应用的系统设计师们有了新的选择：过去有些设计思路，基于硅基的 IGBT 很难做到甚至根本不可能做到，现在采用 SiC 功率模块，却是可望而可及的了。此外，在 SiC 半导体基本特性和封装技术进步的支撑下，高温高密度 SiC 模块已经达到商用的门槛；由此，碳化硅模块的高温封装，已经成为了必然的发展趋势。☞

● Abel Cao, CTO, CISSOID China  
e-mail : abel.cao@cisoid.com



## II-VI：第一个领导者的里程碑

在纪念化合物半导体巨头 II-VI 成立 50 周年两个专题中的第一个专题中，Richard Stevenson 与联合创始人 Carl Johnson 讨论了公司的成长岁月

**RS** Carl，你是怎么认识你的联合创始人 James Hawkey 的？是什么推动了这一冒险历程？

**CJ** 当时我正在寻找一种高质量的碲化镉晶体，用于我在伊利诺伊大学的博士论文工作。我从 1967 年到 1969 年都在那里。我在宾夕法尼亚州匹兹堡附近找到了一家两人组成的晶体生长公司，Hawkey 是那里的晶体生长者。他们提供的晶体支持了我在伊利诺伊州用远红外激光和光谱学研究碲化镉的电光特性时所做的测量。

1971 年，我毕业并在其他地方工作了几年之后，我联系了 Jim Hawkey。我们开始交谈并产生了共同兴趣，希望成立一家公司来商业化生产 CO<sub>2</sub> 激光级碲化镉光学零件。1971 年春天，我们在一个晚上共进晚餐，离开时留下了公司的名字—II-VI 公司。我们还在餐厅的餐巾纸上记录了第一年的粗略预算—我们认为筹备和开始会花费多少。

**RS** 您是如何资助这项计划的？

**CJ** 我开始从家人和朋友那里筹集了 12.5 万

美元，包括前教授和商业伙伴。大约一年后，第十三位股东入股，并以 12.5 万美元的投资达到顶峰。他是我们工厂的老板。他一直很好奇，观察了我们在做什么，并决定投资。

**RS** II-VI 最初的产品是什么？它们瞄准了哪些市场？

**CJ** 我们设想的第一个产品只是碲化镉材料。我们打算制造这种材料并将其出售给光学商店，他们将数百瓦的 CO<sub>2</sub> 激光器制造良好的光学部件。当时最高功率的实验激光器大约为 1 千瓦，但在 300 至 700 瓦范围内有几种型号。

无一例外，我们尝试的每一家薄膜镀膜供应商都未能成功制造这些光学部件。我们别无选择，只能通过垂直整合来解决这个问题并自己做。一旦我们有了相当好的光学镀膜，我们就开始为 CO<sub>2</sub> 激光器的制造商和用户 提供透镜、窗户、反射镜、输出耦合器等。

一年后，我们能够提供单晶、碲化镉、电光

普克尔斯盒。这些将允许人们调制或脉冲切割 CO<sub>2</sub> 激光束，及时调整光束形状，并打开和关闭它。您可以使用这些普克尔斯盒在频率和振幅上进行调制。

我们是 Los Alamos CO<sub>2</sub> 激光聚变项目的几个光学部件的唯一供应商，该项目于 1972 年秋季开始。他们在 20 世纪 70 年代使用了很多这种晶体，他们是我们最大的客户。

这些调制器目前仍然是 II-VI 产品的一部分。II-VI 向供应链销售大量高功率、高性能 CO<sub>2</sub> 激光器。在极紫外光刻的情况下，波长短至 13.5 纳米，CO<sub>2</sub> 激光器是锡液滴发射波长过程的关键部分。所以这个产品创意已经有五十年的历史了。

当我们开始时，我们会用多晶碲化镉光学产品线来打开市场，但利润来自那个电光调制器。我们可以为这个器件收取合理的价格。如果我们一个月内卖出了五个，那就是一个非常好的月份。

**RS** 你和你的联合创始人有互补的技能吗？

**CJ** 绝对有。我们的技能组合非常匹配，Hawkey 领导晶体生长活动和设备创新。他非常亲力亲为，在电子、电气、管道、焊接、建筑等方面有很多经验，你能想到的。我会分析和评估 Jim 生长的晶体，研究结果并建议我们联合合作中的后续实验，以不断改进生长过程和材料。

当 Jim 高中毕业时，他负担不起上大学费用。他一路走来，通过大量的自学，掌握了他所有的技能。在 1960 年代后期，他有机会与卡内基理工学院的一位教授合作，培育大块碲化镉晶体。在那里他学会了生长化合物半导体晶体，后来在 III-V 经验的基础上发展成 II-VI 化合物。

我们的知识、技能、经验和决心与我们面临的意想不到的挑战非常吻合，因为我们作为一家公司要生存就需要快速学习如何切割、研磨、抛光和将薄膜涂层应用于碲化镉材料。我们在四到五个月内完成了那个项目。

**RS** 对于初出茅庐的公司来说，最初几年可能会很棘手。II-VI 是否经历过什么特别不稳定的时期？

**CJ** 我大概可以列出二十个左右发生的此类事件。您可以同时处理一两个问题，但不能同时处理很多问题，因此我们尝试尽快解决遇到的问题。



II-VI 最初租用了一家提供 5,300 平方英尺空间的前金属加工和焊接车间。公司第一年向房东支付了 2,500 美元，第二年支付了 5,000 美元，第三年支付了 7,500 美元，房东最终成为了我们创始股东集团的第十三名成员。由 II-VI 设计和建造的第一台立式布里奇曼炉，用于生产碲化镉材料。操作熔炉的是联合创始人 James Hawkey

1972 年，在我们尚未盈利的时期，Hawkey 和我自己有几个月没有领工资，但我们的两名车间员工都按时领到了工资。

事实上，我们在碲化镉元件的成型、抛光和薄膜涂层方面及时取得了成功，导致 1972 年后期光学元件和 Pockels 盒的销售量增加。这拯救了公司。

在早期，我们确实弄炸了几台立式布里奇曼熔炉，没有人受伤。但你不能每运行三次就关闭你的炉子，并且存活。我们最终解决了这个问题，通过找到一种不同的方法来合成这种材料。Jim 知道如何解决这些问题，而我非常擅长重建炉子。我可以让损坏的炉子在 24 小时内重新准备好，大约是 Jim 准备下一批运行所需的时间。

我们 1987 年的首次公开募股是在 10 月股市崩盘前五天启动的。到那时，我们已经累积了 50 万美元或更多的法律、会计和投资银行账单。如果没有成功 IPO，可能甚至无法支付这些账单。那真是又一次的千钧一发。

**RS** 你和 James Hawkey 扮演了什么角色？

**CJ** 从一开始我就领导着公司。我筹集了种子资金，组织了一个专业的董事会，并在启动期间领导了销售和客户关系活动。

Jim Hawkey 在担任材料制造和开发领导者方面做出了重



1972 年秋天，II-VI 投入大量精力学习如何切割、研磨和抛光碲化镉（左），对该材料进行光学测量（中），并应用光学薄膜涂层（右，图为联合创始人 Carl Johnson）。





II-VI 的 Saxonburg 站点包含以前由 KDKA 拥有的建筑物，KDKA 是世界上第一个获得商业许可的无线电广播电台，于 1928 年左右风靡一时。到 1940 年代后期，卡内基理工学院和美国核管理委员会对该站点进行了扩建，成为世界一流的 400 MeV 同步回旋加速器研究设施。II-VI 于 1978 年左右收购了该地产，并再次扩建了该场地，如三年前拍摄的这张航拍照片所示。



要贡献。他不断提高碲化镉的生产能力，这是非常重要的硒化镉的生产能力。他在材料领域的成就使 II-VI 成为一个独特的定位于高功率、中波长和长波长红外激光领域的供应商。

Jim 的遗产体现在今天公司的标语中：重要的材料。

**RS** 1986 年，James Hawkey 离开公司，与他的儿子一起创立了 Keystone Crystal Corporation。是什么促使他离开 II-VI 并从事这项事业？

**CJ** 至少对我来说这是一个不想要的离开。当你们并肩工作 15 年时，你们会想念彼此。

这是真实的故事。我们已经尽我们所能，通过有根据的猜测、切入和尝试的经验方法。甚至空军也在鼓励我们将更多的工程和科学应用到他们希望我们解决的材料问题上。当我们开始引进材料科学思维和人才来推动公司的进一步发展时，Jim Hawkey 感到不舒服了——他有一种亲力亲为的做法，并且有就像你希望任何人都能有的直觉，但他仍然是一个敢于尝试的人——所以他选择了离开。

**RS** II-VI 在股票市场的上市让它实现了什么？

**CJ** 两件事。首先，这是我们让股东获得公平价格的唯一途径。对于其中一些人来说，出售股票的压力相当大，因为 16 年持有该股票是很长的一段时间。我们能够让他们得到最初投资额的 56 倍。

第二个是我们没有足够的资金来继续建造额外的昂贵的硒化镉化学气相沉积炉。我们想尽快建造三四个。首次公开募股使我们能够积极而明智地推进我们的硒化镉制造产能的扩张。

**RS** 在 1990 年代和 2000 年代初期，II-VI 开始通过收购实现增长。在第一个 SiC 二极管推向市场的前一年，您决定购买 Litton System 的碳化硅集团。你很有远见，不是吗？

**CJ** Litton System 的碳化硅小组来自宾夕法尼亚州丘吉尔的西屋科技中心，该小组的活动大约在 1997 年关闭。他们离我们的基地只有 35 英里。我去那里试图购买他们的设备并雇用其中一些人，这就是我对碳化硅产生兴趣的原因。但西屋电气公司并不乐意将人员出售并转移到 Pennsylvania 州 Saxonburg 的一家小公司。他们选择将其出售给 Litton。Litton 为他们位于 New Jersey 的 Morristown 的工厂增设了一个翼楼，并将尽可能多的团队成员转移到那里。

两年后，Litton 被 Northrop Grumman 公司收购。他们在电子材料市场出现很多麻烦的时候，也决定关闭这家碳化硅集团。他们试图将砷化镓组和碳化硅组一起出售，但 II-VI 对砷化镓的活动不感兴趣。

我试图找人与我们合作；他们会选择砷化镓，而我们会选择碳化硅。砷化镓一方没有参与者，而 Litton 实际上已经

## 早期的主要里程碑

II-VI 的第一任领导人 Carl Johnson 从 1970 年代和 1980 年代选择了六个关键里程碑：

- 从一开始就拥有平衡、专业的董事会和董事会批准的预算。到 1984 年，五年计划开始实施。
- 根据俄亥俄州代顿赖特 - 帕特森空军基地空军材料实验室 1972 年的测量，为碲化镉的质量设定了新的基准。竞争对手来自包含休斯飞机公司、德克萨斯仪器公司和麻省理工学院等四个团队，他们都受益于军方提供的数百万美元以上的合同。
- 在运营的第 19 个月实现财务收支平衡。
- 1973 年实施了基于绩效的全员工激励计划，这是第一个盈利年。
- 在 1980 年代初期，出口销售额增长到总销售额的 40% 以上。到那时，大部分工业 CO<sub>2</sub> 激光器制造商和用户都位于日本或德国，因此 II-VI 必须成为全球性企业才能蓬勃发展。开始努力建立海外销售和市场营销。随后是现场服务和工程，然后随着 1988 年 II-VI/ 新加坡出现后的制造业。到 1990 年代中期，II-VI 已经牢固地确立了自己作为全球性公司的地位。
- 1985 年实现了大功率激光级硒化镉生产的自给自足。这对公司产生了巨大的影响，使其成为世界上最好的激光级硒化镉供应商。

停止了这项活动。我追求碳化硅，最终能够买到它。

我们已经在 Saxonburg 建立了一个碳化硅集团，在那里我们有三台生长炉在运行。在一两年内，我们将这两项活动结合起来。我们关闭了 Saxonburg 的炉子，并将它们全部转移到 New Jersey 州的 Pine Brook，该集团的许多人仍然在那里。这是最理想的。我们能够将 II-VI 学到的东西与 Northrup Grumman 正在做的事情以及他们学到的东西结合起来。因此，II-VI 当今碳化硅能力的遗产实际上可以追溯到 1990 年代初，并感谢 Jim Choyke、Don Barret 和他们的 Westinghouse 同事。

**RS** 您认为您所在时代的其他重大收购是什么？

**CJ** 有两个。

在一家公司的历史上，你能收购你最大和最强的竞争对手的次数并不多。我们做到了，在 2000 年收购了 Laser Power Optics。在之前的十年中，我们在世界各地与他们相遇。在 1990 年代后期，他们遇到了一些麻烦，他们的董事会决定出售公司。此次收购对 II-VI 产生了巨大影响，使我们在红外光学领域比其他任何人都强大。II-VI 当时的 CEO Fran Kramer 非常支持这次收购，我们一起完成了它。然后，在随后的几年里，Fran Kramer 出色地领导了两家公司的整合，并实现了所有可能协作的潜力。

对 II-VI 的发展同样重要的是 2010 年收购 Photop，当

时我担任董事会主席。Chuck Mattera [ 现任 CEO] 由于他的光子学背景，深入参与这个项目是非常合适的。这次收购为我们提供了我们正在寻找的光通信领域的起点。

**RS** 当您在 2007 年卸任 CEO 一职时，您的公司已从仅有的两名员工发展到 6000 多人。除此之外，您还为 STEM 社区提供了 II-VI 基金会。可以告诉我一些关于后者的事情吗？

**CJ** 我的妻子和我有兴趣建立一个基金会，该基金会会出去寻找对科学和技术有兴趣的孩子，并让他们尽早参与。我们做的第一件事是设立一个奖学金计划，以资助即将进入科学或工程领域并具有一定行业经验的本科生。之前，II-VI 已经创建了一个实习项目，我们可以去美国工厂附近的一些高中，告诉科学和数学老师我们想知道他们表现最好的学生是谁，并询问这些学生在高中三年级后是否有兴趣在 II-VI 做暑期工作。我们分别在这些地方开设了实习项目：Pine Brook, New Jersey; Saxonburg, Pennsylvania; Dallas, Texas; and Temecula, California。这些项目为我们刚刚起步的本科奖学金项目提供了有效的渠道。最终，奖学金获得者不必在 II-VI 工作，但他们确实需要每年在行业环境中工作 9-10 周。2021-2022 学年共颁发了 54 个本科奖学金。

然后我们说：如果这些孩子从大学毕业并想继续攻读研究生学位——硕士或博士学位，我们该怎么办？因此，我们与基金会一起启动了“BlockGift 计划”。我们与一所大学的教授共同赞助一项博士项目，该项目吸引了非常优秀的学生，并拥有一个强大的团队，致力于公司感兴趣的技术领域。我们不支付大学的管理费用。我们坚持将所有资金都转到教授的账户上，用于技术开发。平均每年大约有 12 个奖项。

2007 年，我和妻子捐赠了 II-VI Incorporated 的股份，为 II-VI 基金会设立了 2000 万美元的捐赠基金，这是一个获得 II-VI 批准使用 II-VI 名称的私人基金会。多年来，由于 II-VI 的增长和业绩，我们已经分配了 3400 万美元的收益，基础资产仍然在 2000 万美元左右。☞



2007 年，在掌权 37 年后，Carl Johnson (右) 辞去 II-VI 领导人的职务。他继续担任公司董事长直至 2014 年。Francis Kramer (左) 在 2007 年至 2016 年期间担任首席执行官一职。



**1. 2022年已经到来，你如何看待在新的一年里，化合物半导体行业的发展趋势？哪些事情可能会发生？哪些进展可以预期？过去的2021年，有人称之为“第三代化合物半导体的发展元年”，请例举出一些已经发生的你认为对行业有重要影响的事件或者进展，可以有那些总结和感悟？**



迈锐斯自动化（深圳）有限公司总经理  
周利民博士

化合物半导体市场在新的一年里依然会持续2021年的增长势头。我们的这个判断是基于化合物半导体广阔的应用市场前景和其需求的持续快速增长，同时MRSI是化合物半导体封装设备的领先供应商，也是基于我们封装设备在化合物半导体应用领域近年业务发展的实践和展望。随着新能源、5G、IoT物联网时代的来临，以砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)氮化镓(GaN)、碳化硅(SiC)为代表的化合物半导体市场正在快速崛起。另外，射频功率在航空航天、国防和军事应用中的使用显著增加，进一步推动了化合物半导体市场的增长。化合物半导体行业在下游需求及产业政策推动下，大量资金涌入化合物半导体行业，从上游衬底、外延生产，中游制造、封装到下游产品应用。进入2022年，化合物半导体在政府的产业政策导向和大量资本涌入的环境下，仍然会是资本投资的一个热点领域。可以预期的是在新的一年里，一些掌握了核心技术和专注于核心技术研发的企业会在某些技术与应用上会有突破，在打破国外的技术封锁和垄断方面取得较大的进展，同时，也可以预测的是全球化合物半导体产业的产能扩张与并购会持续发生。

2021年第三代化合物半导体行业在全球的确发生了很多重要事件。例如，在中国总投资160亿元的湖南三安半导体基地一期项目正式点亮投产，是国内首条、全球第三条碳

化硅垂直整合产业链，可月产3万片6英寸碳化硅晶圆。另外，苏州纳维科技第三代半导体产业基地奠基，深圳青铜剑第三代半导体产业基地奠基，中电科半导体材料有限公司南京外延材料产业基地项目签约，晶湛半导体总部大楼正式奠基等等大手笔的投资计划正在实施中。在国际上，英飞凌科技公司和松下公司协议共同开发和生产第二代GaN技术，提供更高的效率和功率密度水平；博世开启碳化硅芯片大规模量产计划；ST与CREE扩大SiC长期供应协议，超51.9亿元；安森美半导体(Onsemi)宣布收购碳化硅(SiC)供应商GT Advanced Technologies；昭和电工(SDK)斥巨资扩产SiC，并与东芝、罗姆、英飞凌签订长期合同；SK集团宣布将继续投资7000亿韩元扩大碳化硅晶圆业务等等国际上的扩产并购。

总结来说，以SiC和GaN为代表的第三代半导体材料，已经成为化合物半导体行业发展的重要关注对象。特别是在新能源汽车与PD快充领域，第三代半导体材料SiC和GaN的使用极大地推动了产品革新与迭代，化合物半导体行业迎来了前所未有大发展的机遇。中国第三代半导体专利申请量已占全球第三代半导体专利总申请量的56.79%，全球第三代半导体行业市场价值最高TOP10专利的申请人中却无一来自中国。从这个数据可以看到第三代化合物半导体产业在中国的热度，但是也可以看出中国在技术方面还是不够强大，还需要更多实干的科学家与企业家去做强这个行业。



Soitec公司中国区战略负责人 张万鹏

2022年，在下游应用的驱动下，化合物半导体行业，尤其是碳化硅和氮化镓等材料在5G射频、电动汽车和光电子等领域应用将会获得快速增长，以满足传统硅材料无法实现的巨大需

求。在过去的一年中，全球化合物半导体的产业链不断发展壮大，无论从生产规模、技术提升和成本优化等方面，国际大厂也逐步实现全产业布局，如美国 Cree、欧洲英飞凌和日本的罗姆，而台湾厂商则以代工为主，国内企业如三安等在化合物半导体材料和器件也发展迅速，国内与国际领先水平仍有一定差距，在材料和器件等细分领域的研发投入也有较大差距。



Cissoid 公司 罗宁胜博士

2021 年碳化硅器件全面走向大规模商业化应用，其市场领头羊是电动汽车。全球已有许多电动汽车生产商推出了采用碳化硅功率器件的车型，其碳化硅器件不仅用在车载充电及电源转换方面，而且还被用在更核心的电机动力驱动方面。电动汽车对碳化硅功率器件的需求量巨大，以至于整个 2021 年普遍缺货，供不应求，且供货周期很长。随着全球各碳化硅器件厂商扩大产能到位，期望 2022 年也许稍会有所改善。总之，今后几年电动汽车将一直是推动碳化硅产业蓬勃发展的主力军。



芯塔电子 倪炜江博士

2021 年是化合物半导体真正“爆发”的一年，政策导向以及很多新兴应用正在推动化合物半导体快速发展。在碳化硅行业，我认为主要体现在以下三个方面：

首先，新能源车厂纷纷推出或者计划研发搭载碳化硅器件的新能源车型；

其次，碳化硅器件在光伏、储能、充电和高端电源等诸多领域的渗透率快速提升；

第三，碳化硅新企业不断涌现。地方政策对碳化硅扶持力度空前，纷纷出台对应的产业扶持政策。

在 2021 年，由于国际局势和疫情影响，我国半导体供应出现空前的紧张局面，尤其是国外品牌大量缺货，导致下游终端苦不堪言。这恰恰给了国产品牌快速崛起的机会。面对近几年半导体产业的风云变幻，国产替代进口势在必行。

芯塔电子坚持不断自主创新，已经成为国内为数不多掌握核心技术领先企业之一。芯塔电子引领国内碳化行业，致力于上下游产业链协同合作，以实现全产业链自主可控。

截至目前，芯塔电子已发布了 40 余款碳化硅二极管，产品性能对标国际先进企业最新产品。新一代 1200V SiC MOSFET 芯片尺寸减少 30%，已经通过可靠性测试，即将发布。优化的米勒电容提升了 SiC MOSFET 在终端应用中的可靠性。同时，今年将推出 1700V SiC MOSFET 与 2 款全 SiC 功率模块。SiC MOSFET 已获得众多客户的咨询和明确需求，预计今年营收会有爆发性增长。芯塔电子已成为国内

产品种类最齐全的公司之一，已获得客户普遍认可。

在 2021 年下半年，我们在下游终端领域市场也取得了重大进展，产品在高端电源领域通过验证，进入了行业标杆客户，全年营收近千万。



芜湖启迪 钮应喜博士

在过去的 2021 年里，全球新冠肺炎疫情和缺芯的大环境，不仅给化合物半导体行业带来挑战同时也带来发展机遇。由于缺芯问题，更多应用方转为使用化合物半导体器件如 SiC 二极管、SiC MOSFET，甚至很多应用端（车企）开始涉足投资化合物半导体行业，从战略上来保障未来供应链安全；新冠疫情也为深紫外 LED 打开了新的赛道；同时我们看到国产 SiC MOSFET 突破了样品研制，开始进入产业化关键技术攻坚阶段，这阶段最大的挑战还是工艺稳定性、产品一致性、可靠性等关键问题，尤其是车规级。所以，2021 年，在一大批化合物人的努力和坚持下，行业取得了进步，赛道也更加明确。

2022 年，相信在 2021 年基础上国产器件的技术会更上一层楼，性能会更加稳定，可靠性会越来越强，器件端和应用端交流会更加密切，市场渗透率也会越来越高。但是也存在很多的不确定性，我们要做的就是坚持，坚持提升技术，坚持产品持续改进，坚持上下游的高效合作，“行而不辍，未来可期”。



六甲电子社长 小林秀守

在去年起源于欧洲的绿色革命中世界汽车制造商开始转向 EV。我认为今年是由于 EV 的 N 掺杂导电 SiC 相关的产业将开始快速发展的一年。

**2. 随着电动汽车、5G 通信、智慧物联网 (AIoT)、新能源、氢能源、元宇宙等技术领域的快速发展，将会为化合物半导体带来诸多机遇，你认为化合物半导体行业将面临哪些挑战与机遇？有人说第三代半导体提供了一个弯道超车的机遇，你是否赞同？认为还存在有风险？风险在那里？如何避免？**



迈锐斯自动化（深圳）有限公司总经理 周利民博士

化合物半导体市场前景广阔，在下游需求持续向好以及国内产业政策大力支持的背景下，为化合物半导体企业带来了许多实现快速崛起和发展的机遇。MRSI 也是看好化合物半导体产业在中国的发展前景，在中国成立了迈锐斯自动化（深圳）有限公司。我们认为：机遇之一是化合物半导体材料优越的特性，在

新兴的应用领域可极大提升产品的性能以促进新兴领域的发展。同时，新兴领域的发展又为化合物半导体产业带来更广阔的应用需求机遇；机遇之二是中国是全球瞩目的大市场，无论是在 5G 通信，物联网和新能源等热点领域均占有着全球最大的市场份额，这为产业的发展奠定了一个庞大的需求市场机遇；机遇之三是中国具有非常好的人才优势，而且近年国家的人才政策吸引了大量海外人才回国创业，而且国内大学和研究机构也培养了大量的人才，为化合物半导体产业的发展奠定了人才基础；机遇之四是国家的产业政策的支持，从国家到许多地方都把化合物半导体产业的发展列为了重点支持领域，吸引了海量的资金投入。在这样一个百年难遇的机遇下，挑战也是并存的。挑战之一一是中美贸易战带来很多的限制，无论从材料，工艺和设备方面都面临着技术的封锁，为产业的发展带来很大的挑战；挑战之二是在大机遇的背景之下，出现了一些盲目投资，一些项目仓促上马重复建设，发展前景令人担忧；挑战之三是一些地方政府和投资人对化合物半导体产业缺乏专业知识和产业化经验，对市场定位把握不准和产业化发展困难认识不足，想挣快钱的思想与化合物半导体产业发展的不适应；挑战之四是市场化的竞争，化合物半导体的头部企业基本上是国际大企业，他们已与很多下游企业有深度合作关系，要想在这样激烈竞争的环境中占有一席之地，在技术和管理方面都面临着较大的挑战。

所谓第三代半导体提供了一个“弯道超车”的机遇，我是不认同这个说法。MRSI 近四十年的发展只做一个产品，我们一直服务于化合物半导体产业的发展，从来没有想过要“弯道超车”去超越别人，几十年扎扎实实做好我们的产品，服务好我们的客户，我们逐步成为了国际行业领先的企业。而且我本人非常反感“弯道超车”这个词语。难道别人都是傻瓜不会弯道超车吗？这是典型的投机取巧，忽悠领导的说法。这个说法对化合物半导体产业的发展会带来引入歧途的风险。个别人不是扎实的去做研发和去做市场，总想着如何“弯道超车”。换个名词说法就忽悠出一个创新，以国产化的名义来骗取政府补贴和市场保护，用廉价低质的产品来抢夺市场，最终只会是造成行业的低劣币驱逐良币，不利于行业的健康发展。这里还有一个更大的风险就是行业的过度和这种“弯道超车”的思维会盲目投资造成产能过剩，让行业大而不强缺乏竞争力。要避免这些现象的发生，我们一是要鼓励那些埋头苦干，扎实创新的企业和创业者，用真正创新的技术来获得市场和客户的长期认可。另外，国家和投资人在这个行业中要摒弃赚快钱的思维，行业的发展没有一蹴而就，需要大家有一定耐心共同努力。可喜的是我们国家和投资人已经开始意识到这些风险，企业家和创业者也在开始更加务实，在化合物半导体行业正在涌现出越来越多创新型快速成长的企业。



Cissoid 公司 罗宁胜博士

新能源汽车大规模采用碳化硅器件经几次叠代后，将释放出巨大的产能，也使碳化硅器件的价格降得足够低。这样也会带动碳化硅器件广泛应用于其它领域，特别是一些对节能有追求的应用，如太阳能、风电、储能及充电桩等领域。相对较低端应用的充电桩就极富挑战性，碳化硅的价格必须足够低，以至于它所带来的节能效益可对冲它与硅器件的价差，才会被广泛应用。

中国碳化硅行业最大的痛点是缺乏成熟的 IDM 作为行业的领头羊，无成熟的大军团核心，以至于整体显散兵游勇之势。半导体制造的代工模式能决定一部分问题，但由于在大规模生产时器件设计者无法直接控制工艺品质和稳定性、产能及先进工艺开发，而受到很大的局限。一般数字器件生产，因工艺十分标准化而非常适合代工模式。然而，碳化硅器件属模拟类器件，主流生产制造模式仍然是 IDM。然而，造就一个成熟的 IDM 需国家的重视、巨大的产业资金投入、人才的集聚及长时间技术开发和积累，以及足够的试错机会。国内已有几家正努力走 IDM 模式，谁将成为国内碳化硅行业的领头羊，将拭目以待。



芜湖启迪 钮应喜博士

电动汽车在快速发展过程中，自身还面临许多挑战，比如续航、充电时间等，以及自身技术的升级，比如 400V 到 800V 带来的难题；这些挑战和难题恰恰是化合物半导体 (SiC) 的机遇，或者说 SiC 是解决这些难题的有效方案之一。难度在于这是两个新兴产业的融合，传统汽车企业开发 800V 的系统是新的挑战，对器件需求还不是很明朗，或者对化合物半导体器件的性能优势还不是很明确；化合物碳化硅企业也需要了解下游对器件的特殊需求。所以需要产业的上下游协同攻关、深度交流，共同促进产业快速发展。

**3. 碳化硅 (SiC) 大规模应用爆发在即，特别是在电动汽车和 5G 基站应用方面，已经受到资本及产业界的极大关注。你如何看待碳化硅的市场发展？如何能推进碳化硅及其应用技术的升级和发展？**



Soitec 公司中国区战略负责人 张万鹏

对于 SiC 行业而言，目前整体市场规模较小，但是下游需求巨大，目前大部分主流车企都开始采用碳化硅的电驱方案，这会极大地促进碳化硅的规模应用。对于碳化硅材料和器件，还有很多需要解决的问题，比如降低生产成本，提高良率，实现

材料供应的稳定性以及提高器件可靠性等，而这些问题对推进碳化硅及其应用技术的升级和发展至关重要，需要全产业链的紧密合作，包含研究机构到材料、设计和应用厂家等。



Cissoid 公司 罗宁胜博士

碳化硅功率器件替代硅基 IGBT 的明显益处是提高效率和减小体积。然而，这仅仅是碳化硅全面替代硅基 IGBT 获益的初始。更为重要的进步将是充分发挥碳化硅所具备的大大超越硅基 IGBT 之性能，从而能实现原本 IGBT 所难做或不能做的应用，为系统应用设计者展现全新的设计空间。

Cissoid 公司基于 SOI 的特种硅高温半导体技术，全面突破了普通硅半导体器件的温度困境，其寿命可达 175℃ 结温下连续工作 15 年之久，而且明显地规避了硅器件的温度载流子效应（本征载流子浓度随温度升高而升高）和结温效应（有效结势垒随温度升高而缩减）的影响，不仅能耐高温并长期工作，而且在全温度范围保持良好的性能一致性。随着第三代半导体如 SiC 功率半导体器件的日趋成熟和普及，其固有的耐高温性能与 Cissoid 高温半导体封装是非常好的搭配，以充分发挥 SiC 功率器件的性能，使高功率密度和高温应用成为可能。因此，Cissoid 的特种 SOI 硅高温半导体技术与 SiC 功率器件相配合，将大大改变电力系统设计的格局，为设计工程师提供全新的拓展空间。这些 IGBT 所难及或不能及，而由碳化硅可实现的典型应用大致涉及航空电气化、电动汽车动力深度集成、移动储能等等领域。



芯塔电子 倪炜江博士

新能源汽车与 5G 通讯是国家重点发展产业，新能源汽车中使用碳化硅功率器件带来众多优势，例如：提高效率，增加续航里程，减低整车成本，加快充电速率。5G 基站中使用氮化镓作为射频器件，可以提高射频频率，降低功耗，提高功率密度。过去的 2021 年，碳化硅器件已经在新能源车领域中的应用已经呈现爆发式的增长。氮化镓在 5G 中应用潜力巨大。碳化硅功率器件的应用，必定会推动终端电力电子产品的更新换代。为了在应用中充分发挥碳化硅器件的优势，芯塔电子成立了应用研发中心，加大对应用研发的投入，对碳化硅应用中的关键技术进行研究，并且跟客户分享。同时我们对客户提供高效和专业的应用技术支持，帮助终端客户深刻地理解碳化硅器件特性和使用要求，优化终端应用设计，加快碳化硅器件应用导入，更好地发挥碳化硅器件的优势，最大程度地降低整机的成本和提高整机的性价比。

凭借十多年研发和工艺经验积累，芯塔电子开发出了性能卓越品质可靠的碳化硅产品。产品的设计及验证均按照车

规级标准执行，技术参数可对标国际一线公司的最新产品，满足高端终端应用领域的国产化替代需求。

供应方面，我司通过与国内的 fab 厂、碳化硅衬底厂商、碳化硅外延厂商以及整车厂的深度战略合作，打造完整的供应链体系，降低国外供应链影响，保障产品的交付能力。

同时，我们正在计划车规级碳化硅模块封装线建设。当前碳化硅基本采用传统硅基封装方案，需要新的 layout 布局、工艺技术和封装材料，才能充分发挥碳化硅器件优势。新建的模块封装线将紧密结合新能源汽车对新型 SiC MOSFET 模块的需求。



芜湖启迪 钮应喜博士

碳化硅的市场前景毋庸置疑，尤其电动汽车这个赛道，得到了资本、产业、政府极大关注，行业扩产、新建项目不断爆出。同时从社会效益方面看，在双碳的目标下，各个国家都开始重视碳排放问题，也是化合物半导体成为当下产业投资新宠儿的主要原因。我们也十分看好碳化硅市场，尤其是电动汽车，为此在 2021 年我们开发了 SiC MOSFET 器件的全套工艺技术，同时还通过 IATF16949 体系的认证，巩固第三代半导体的代工能力。



泰科天润半导体科技（北京）有限公司董事长 陈彤

第三代半导体凭借着天然的材料优势已经在电动车和 5G 基站批量使用，随着第三代半导体更大规模化的生产与应用，性价比进一步提高后，还将应用于更多能体现材料优势领域。比如在 2021 年我们看到碳化硅已经从工业和车载类进入了消费类，白色家电和大功率 PD 快充领域都已经实现了批量。

让更多的领域接受并且实现碳化硅的批量，推动原因之一在于产品性价比，不论是面对国内外同行的竞争还是和瓜分硅的部分市场，产品性价比是企业的核心竞争力！综合而言，提高产品性价比就涉及到上游原材料的性价比，芯片的设计，工艺，产能怎么优化怎么提升，怎么批量生产出来良率稳定的产品，这些都是产业界的难题，需要上下游相互配合才能实现。

推动原因二，也在与上下游产业的沟通配合。下游用户愿意为国产半导体开放试错，只有产品和用户进行磨合，才能帮助厂商进步，发现问题解决问题。这部分因为这两年国外友商的供应紧张，下游用户针对国产半导体基本都是持开放的态度，这对不单单是第三代半导体的国产半导体厂商，都是一个很好的自我提高的机会。随着更多客户了解碳化硅材料特性，客户也会提出一些使用方面的痛点问题，比如泰

科解决客户痛点问题而开发的 650V/1200V 1A SOD123 以及 650V 4 /6/8/10 DFN 5\*6/ DFN8\*8 都是碳化硅原厂中少数不多进行自主研发的创新产品，主要针对工业以及消费类领域做的突破。

对于功率半导体这个行业，对于国产化的大趋势而言，最根本、最基础的核心问题还是批量生产的工艺能力，因为不论 IDM 还是设计公司找代工厂代工，工艺条件以及工艺窗口至关重要！IDM 一般掌握核心工艺条件，设计公司主要参考代工厂的工艺条件，好的产品必须要将设计和工艺磨合到一个最优的状态，脱离工艺平台的设计，都不是最优设计；好的工艺平台也可以进一步进行设计的优化。而这个一定是碳化硅这样的新材料功率半导体，最有价值的产业门槛。

无论是衬底、外延还是晶圆制造，工艺能力的提升，决定了大批量生产的稳定性、决定了生产良率，这些是控制成本、提升性能的主要关键所在。而整体行业的发展，也是靠产业链上的各个企业，尽快的把工艺能力全面提升上来，只有这样，才能让碳化硅器件，变得又便宜、又稳定、又可靠，最终能够吸引下游客户，多用点碳化硅，少用点硅器件。要解决生产工艺问题，其实没有什么捷径，就是使劲地跑线，让整个生产工艺团队有更多的投入，从而有更多的实践，这样无论如何，都会积累更多的经验。

未来 1-2 年，瓶颈主要还是来自于批量稳定的产品供应能力。受到国外友商的供给不足影响，下游客户这两年针对国产第三代半导体都是持以开放状态，加快测试导入节奏，但是实际上能批量交付的厂商还是少之又少。

首先从原材料方向，全球能批量供应稳定的碳化硅材料的厂商就屈指可数，不做上游绑定，芯片厂也无米下锅。其次从芯片厂商角度，国外友商都纷纷被车厂绑定，电动汽车中电机控制器上应用的均为大电流的 SiC MOSFET 器件，较为消耗产能加之所在国家疫情影响封测进一步导致供给不足。

国内厂商中设计公司还要看代工产能情况，受限于能分到的代工产能；芯片 IDM 厂家实际可实现稳定批量生产的也是屈指可数，这些可以从象高温离子注入机这样的核心设备订单的全球交付情况计算。

这是一个鸡生蛋蛋生鸡的过程，只要有了下游的需求支撑，上游厂家不论芯片，材料还是设备，经过一段时间的努力，通过扩产还是互相合作也好，会逐步缩小供给问题。



三安集成电力电子事业部市场销售负责人  
张真榕

在化石燃料资源和环境问题面前，各国都发布了“双碳”计划。欧盟各国决定在 2040-2060 年间彻底禁止燃油车，拜登政府也计划拿出超过 600 亿美元用于推动家用和公交车的电动化，日本则是通

过提高行业燃油经济性标准以促进新能源车普及。

碳化硅功率器件以其出色的能源转换效率，在充电桩、车载充电器、逆变器等新能源汽车高压充放电环节发挥着关键作用。在由特斯拉掀起的碳化硅“上车”的行业革命中，国内外新能源车企纷纷响应，可谓新能源汽车的“碳化硅元年”。碳化硅功率器件市场有望在 2022 年突破 10 亿美元的大关。

随着汽车平台高压化趋势愈演愈烈，预计 2025 年新能源汽车市场对 6 英寸碳化硅晶圆需求将超过 200 万片，其中新能源汽车的主驱逆变器、车载充电器、电源模块将成为主要驱动力，在 2025 年有望占据 62% 的碳化硅应用市场份额。

中国第三代半导体行业整体发展成熟度不足，在衬底材料生产效率、芯片性能效率、封装水平和良率等重要方面都存在着诸多挑战。尚待健全的产业链可能导致“缺芯”潮在车用功率器件领域重演。

为更好发展第三代半导体，助力碳达峰、碳中和目标的实现，要实现关键材料、核心芯片和模块的产业化，做好产业的优化布局并通过示范和规模化应用，加速全产业链的自主可控发展，其中包括：实现高性能 6 英寸、8 英寸碳化硅单晶衬底和外延材料及其功率器件的量产，6 英寸、8 英寸硅基氮化镓外延材料及其功率器件的量产，高性能封装的器件和模块量产，以及核心检测仪器和装备的国产化。同时，促进研发与应用结合，在终端应用领域开展应用示范，加快实现产品迭代，打开市场应用需求通道，使产品加速成熟。

三安坚持全产业链整合模式，实现产能、成本及质量验证的全方位管控，加速碳化硅和氮化镓功率器件在细分行业客户的产品应用，推动产业化和规模化生产。湖南三安部署的 6 寸碳化硅晶体产线，生产的晶体厚度可对标国际水平，同质外延具备自主研发专利；2021 年正式发布了纯自研 1200V 碳化硅 MOSFET 平台和器件；1200V 和 650V 碳化硅二极管获得 AEC-Q 车规级可靠性认证。

全球碳化硅公司大举扩产，迎接需求大时代，部分新能源车企担心全球碳化硅产能扩张低于市场需求快速增长，已提前布局上下游企业的强化合作，及供需订单战略协议。三安有信心将全产业链整合的优势发挥到最大，给客户id提供高质量准时交付的保障。



六甲电子社长 小林秀守

我司计划 2023 年开始 8 英寸 SiC 加工（Si 面外延抛光、背面减薄 -CMP、磨边防止刀刃加工）。设备上我们不仅专注于加工设备，还专注于检测设备，包括划痕 / 颗粒检查机、金属污染检查机、BOW/WARP 测量机、表面粗糙度测量机、潜在划痕 / 堆叠缺陷检查机。特别是潜在划痕 / 叠层缺陷检查机，

我司在日本最早导入的民间企业（目前仅在工业科学技术综合研究所持有此设备），我们目前正在研发可以减少潜在缺陷的抛光技术。我司导入此设备后可以将量测好的晶圆提供给用户。今后我们将与器件厂一起研究潜在划痕的减少将如何影响良率，但我们预计会有相当大的改善。

另外，关于背面的减薄，如果做成 8 英寸的话，会有翘曲的问题。但是在新工厂，我们将提供一种服务，我司提供减薄后也不会有翘曲问题的加工。



安森美电源方案部市场营销经理 袁光明

SiC 能提供 Si 无法达到的高性能，介电击穿场强高 10 倍，电子饱和速度高 2 倍，能带隙高 3 倍，热导率高 3 倍，汽车、5G 等高压、高功率、高频率、高导热率的应用将推动 SiC 的大幅增长，尤其在电动车加大普及后对 SiC 的需求会更高。SiC 有助于缓解电动车里程焦虑，优化充电效率，加快充电，让驾驶员花更少的时间充电，把更多的时间花在驾驶上，用于 5G 服务器背板电源转换器则可显著提高能效。SiC 适用于 650 V、900 V 和 1200 V 的大电流应用，这些应用的开关频率低，而且在第一和第三象限操作中都要求有出色的导通损耗。SiC 也适用于 1200 V 的较高开关频率。安森美 (onsemi) 的 SiC 战略市场包括电动车 / 混动车及电动车充电桩、5G 电源和太阳能逆变器，如已发布的三代 SiC MOSFET，每一代都针对一种特定的应用，其中 M1 系列 1200 V 针对的是工业和汽车应用，在 20kHz 范围内运行，经优化可实现最低导通损耗和最高稳定可靠性；M2 系列 650 V 和 900 V 针对较低电压的工业和汽车应用，具有针对这些电压优化的新型单元结构；M3 系列 1200 V 针对快速开关应用。所有器件都已达到最高的可靠性水平，可应对大批量生产。

SiC 的技术发展走向是更低阻抗、更低压降、更低电容。虽然 SiC 并不新鲜，但由于其物理特性的本质，仍存在一些挑战，而且与 Si 方案相比，价格还是偏高，没有达到转换的甜蜜点。像安森美这样拥有数十年硅制造技术的公司，在将 SiC 以最佳性能和质量、合适的成本大批量推向市场方面走在前列，提供从衬底 / 外延、晶圆、裸片 / 器件、模块到系统的一条龙应用支持，和垂直整合的生态系统以降低价格并加快上市时间，并在 2021 年 11 月完成收购 SiC 晶圆生产商 GT Advanced Technologies ("GTAT")，未来还将持续扩产，以增强 SiC 供应能力，在整个 SiC 供应链全部环节，包括基板衬底到最终产品到封装相关的技术都会进行比较大的投入，以支持我们与客户签订的 25 亿美元的长期供应协议。此外，安森美还积极保持与客户密切沟通，从而为客户提供专门配套的 IC 和参考设计，乃至创建高度定制的系统方案，使客户能充分利用 SiC 的优势，推动 SiC 的应用和发展。

#### 4. 氮化镓 (GaN) 器件在快充细分行业中作为首个消费者市场应用得到了快速增长。你如何看待 GaN 的这个细分行业的应用前景，下一个可期待的将会爆发的主要应用会在哪里？当下如何把握这些市场机遇？



芜湖启迪 钮应喜博士

氮化镓电子器件具有高频、高转换效率、高击穿电压等特性，使氮化镓在手机快充领域得到了快速发展，一线手机厂家如华为、苹果、三星、小米等，均采用 GaN 电源适配器，预计 2024 年全球 GaN 功率半导体市场规模将超过 7.5 亿美元。未来氮化镓的新赛道还是集中在低压领域，如小功率电源 (LED 驱动电源、电动工具电源、消费电源等)，会成为市场的主要驱动力。

#### 5. 氧化镓作为超 / 极宽禁带材料，备受学界关注，并在日本产业界也得到极大的青睐，贵公司如何看待氧化镓相关技术和未来产业化发展？



芜湖启迪 钮应喜博士

氧化镓是一种无机化合物，带隙为 4.8 至 4.9eV，材料价值比硅大 3000 倍，比碳化硅大 8 倍，比氮化镓大 4 倍，还具有 8MV/cm 的高击穿场和良好的电子迁移率，理论上有很大的优势。

从产业的发展情况来看，氧化镓产业尚处于发展初期，还不具备与氮化镓和碳化硅抗衡的实力。

#### 6. 近年来 mini/microLED 快速发展，并有一些产品陆续推出，贵公司如何看待 mini/microLED 现实应用的困难和挑战？mini/microLED 技术未来发展的趋势如何？制作 microLED 的最大的技术困难是巨量转移。这个困难是否已经被克服了？元宇宙概念是否会依赖 microLED 的 VR 装备？



广东省科学院半导体研究所，教授，首席科学家 龚政

Mini 和 MicroLED 产业有着高度的同源性，但是面临的挑战是不同级别，Mini-LED 与现有技术的兼容性较高，产业化已经近在咫尺，特别是在 Mini-LED 背光显示领域，成本下降，市场需求大幅增加。但当尺寸缩小至 20 um 以下，所谓“量变引起质变”，Micro-LED 面临的是全产业链的技术革新，未来的挑战除了大家熟知的巨量转移之外，在外延技术、芯片制备、检测返修、键合技术等方面都面临挑战。比如，外延方面，Micro-LED 要求的均匀性更高且红光 Micro-LED 外延面临的问题也较



大，如 GaN 基红光外延技术；在芯片检测返修方面，与巨量转移路线兼容且高效低成本的芯片筛选和返修技术也是重大的挑战等等。Micro-LED 未来主要发展趋势是朝高分辨率、全彩、低功耗方向发展。将主要面向于中小尺寸的 VR/AR、车载系统、可穿戴市场，以及面向大尺寸的巨型高清电视、会议系统等。

关于巨量转移技术，现在依然没有完全成熟的产业化路线，各厂家依然百花齐放，虽有厂家展出样品，但是各转移技术均有其难点，现在依然没有成熟产业化的 Micro-LED 产品。在众多转移方案里，激光转移和印章转移技术成熟度相对较高，但仍面临良率及成本问题。

现在大热的元宇宙概念，是众多先进技术的综合体。在元宇宙显示硬件方面，Micro-LED 显示因其高亮度、高响应以及低功耗等优势确实是其完美的技术路线。但现在由于 Micro-LED 在高分辨彩色化显示依然存在技术难点，没有大规模应用于 AR/VR 设备，所以现在高分辨 OLED 显示依然是主流。因此在现阶段，元宇宙概念预计不会过度依赖 Micro-LED；但随着 Micro-LED 技术的不断成熟和元宇宙的资本和市场的推动，相信最终基于 Micro-LED 的 VR 装备会胜出。



复旦大学 田鹏飞博士

Micro-LED 显示是下一代关键显示技术，近年来已经获得行业广泛认可，部分厂商已经尝试把 micro-LED 显示安装到可穿戴设备比如智能眼镜上，但是还存在产业化的一些关键难题。

Micro-LED 的效率仍需提高。研究人员已经在致力于提高 micro-LED 在低电流密度下的效率，克服尺寸效应对 micro-LED 效率的影响，并发展新型 InGaN micro-LED 试图取代 GaAs 系列红光 micro-LED。

全彩色大面积 micro-LED 显示也面临制备和检测的难题。行业采用了巨量转移、量子点色转换、垂直方向或者光学集成 RGB 显示、外延材料生长 RGB 显示等方法实现 micro-LED 全彩色显示，但是每种方法都存在需要解决的难题。

Micro-LED 显示与通信、能量收集、图像识别、生物医学等功能结合形成“micro-LED 显示+”集成芯片应用，逐步吸引了大量研究人员的关注。相信 micro-LED 的优良热扩散能力、超高调制带宽、局域化发光等将不断得促进更多的 micro-LED 应用发展，希望更多的科研人员能够加入 micro-LED 研发领域，促进 micro-LED 的高速发展。



六甲电子社长 小林秀守

microLED 基板有 8 英寸的硅片，客户端最终会丢掉这硅片部分。关键是如何以低成本和稳定的精度加工硅片。我们在这领域

有相当好的实绩。

## 7. 紫外是氮化物光电领域除 Microled 以外的另一个创新和产业的增长点，因紫外 LED 的诸多特点，备受产业和资本的关注。从市场和应用层面，请贵公司谈谈未来 UV-LED 相关技术和产业化发展趋势？

也请谈谈在技术层面上，紫外 LED 遇到的困难和挑战，例如，AlN/AlGaIn 的外延生长、结构设计、掺杂、光提取等难点。



山西中科潞安紫外光电科技有限公司总经理，中国科学院半导体研究所 研究员博导 闫建昌

紫外 LED 堪称当前氮化物光电子领域的重要产业创新增长点。

从产业发展角度，紫外 LED 可以应用于杀菌消毒、固化、生物医疗、仪器分析等许多领域，产业价值巨大。尤其是 UVC (200-280 nm) 波段的深紫外 LED，可以高效广谱杀灭多种细菌病毒，在 2020 年以来的疫情环境下倍加受到关注。中科潞安的深紫外 LED 光源在武汉病毒所的测试结果表明，合理使用 UVC LED 光源，可以在秒级时间实现对“新冠”病毒超过 99.99% 的灭活效果。因此，深紫外 LED 可以对当前的疫情防控助一臂之力。市场上先后推出了从便携式紫外 LED 消毒器、紫外 LED 消毒包、紫外 LED 杀菌水杯等消费级产品，也推出了适于公共环境杀菌消毒的深紫外 LED 包裹快递消毒机、空气消毒机、消毒机器人等产品，从个人生活到公共卫生，深紫外 LED 的应用发展迅速。以海尔为代表的白色家电企业已经在空调等产品上采用深紫外 LED 消杀，开启了深紫外 LED 在白色家电这一巨大市场的应用之门，接下来几年内融合采用深紫外 LED 的白色家电产品品类和数量都将迅速增长。而在公共环境卫生领域，不管是机场、高铁，还是医院、学校，深紫外 LED 产品都已经开始示范应用，极大地促进了很多人对于深紫外消杀的一些认知和接触，在接下来的几年内，在政府的有力支持和引导下，深紫外 LED 可以在公共环境中的卫生防疫发挥越来越大的作用，同时促进深紫外 LED 产业的快速发展，一如十年前科技部“十城万盏”工程对于半导体照明产业的极大促进。总体上，我们认为，在接下来的三五年内，将是深紫外 LED 产业大发展的黄金期。

当然，紫外 LED 产业的发展离不开技术创新和进步的支撑。尤其是 UVC 深紫外 LED，具有巨大的技术发展空间和提升潜力。对于波长 >365 nm 的 UVA 波段紫外 LED，与目前已经很成熟的蓝光 LED 技术有很大的相似性，电光转换效率可以达到 40% 以上，技术成熟度已经较好。但是对

于消杀需求最迫切的 UVC 波段 LED，虽然已经达到了可实用的程度，但是离满意还相去甚远。目前市场上在销售的 UVC LED，大部分电光转换效率只有 2-3% 水平。以中科瀚安目前研发生产的 UVC LED 为例，目前其电光转换效率超过 5.5%，相比于一年前提升近一倍，已经处于国内领先、国际一流水准，但是离挑战传统紫外汞灯的效率还有不小的差距。这也就带来了深紫外 LED 目前在市场应用推广上的难处，当然，也是对于从业者加速研发和技术进步的动力和机遇。

深紫外 LED 的性能很大程度上取决于外延材料。深紫外 LED 采用第三代半导体材料氮化铝 / 氮化铝镓 (AlN/AlGaIn)，由于高质量同质衬底价格极其昂贵，外延材料在以蓝宝石为主的异质衬底上生长完成，位错密度多，高铝组分下 p 型掺杂困难，导致了低的电光转换效率。因此，提升核心发光材料质量，设计高效的量子结构，是当前 UVC LED 研究的重点。同时深紫外 LED 的平面薄膜结构和 TM 模式发光，是限制其光提取效率的关键因素。针对这方面的出光结构设计，以及合适的封装材料，是提升深紫外 LED 发光效率的关键。我们已经看到，在过去的两三年时间里，UVC LED 产品的性能提升很快。基于当前的态势，未来三年到五年，UVC LED 产品的效率完全有望超过 10%——这将会是支撑深紫外 LED 广泛应用的技术里程碑。性能的提升有力支撑深紫外 LED 在各种领域的应用，而产业的发展又将反馈促进技术的更快进步，从而深紫外 LED 产业呈现出加速发展的良好态势。

**8. 砷化镓和磷化铟作为第二代半导体的“老兵”，在可见光及红外光电及微波射频领域一直默默贡献重要力量，随着高速光通讯、智能感知等新兴应用的推广及普及，“老材料”又被再次引发诸多关注，请谈谈砷化镓和磷化铟相关技术和未来产业化发展？**



迈锐斯自动化（深圳）有限公司总经理  
周利民博士

MRSI 是以高精度，高可靠的灵活贴片解决方案广泛服务于第二代化合物半导体的领先企业，在二代化合物半导体领域有着庞大的客户群。砷化镓 (GaAs) 是二代半导体的代表材料之一。随着 5G 通信和人工智能等新兴应用的发展，砷化镓已成为手机射频 PA 和 Switch 的主流材料，在 5G 时代占有重要地位。以 VCSEL 为代表的光电器件可用于 3D 感知、LiDAR 等新的应用场景，其将成为 GaAs 增长新的驱动力。此外 MicroLED 和 miniLED 显示的应用也将是一个海量的应用市场。砷化镓在大功率半导体光纤激光器和 LED 光源应用率的不断提高，预计其将在未来几年也会创造更多的需求

机会。磷化铟 (InP) 是二代半导体的另外一个重要的代表材料。随着 5G 通信和数据中心的快速发展和建设，高速光收发器件需求越来越大，磷化铟是 5G 传输与数据中心收发核心器件的关键材料。随着高速光通信和人工智能的发展，行业普遍认为高速光收发器件的需求将会维持一个至少十年的高速增长趋势。此外磷化铟在医疗、高端激光雷达 (LiDAR)、传感等领域也有广泛的应用，其应用市场的前景非常广阔。

硅基光子学的一大制约因素是硅材料本身不支持发光，为了实现集成的硅基激光器，目前有效的解决方案是使用三五族材料磷化铟与硅基材料贴合生成异质外延，也就是异质集成芯片。另外一种方案就是通过芯片封装工艺，将三五族材料芯片与硅基芯片贴合来实现集成。英特尔 (Intel) 公司经过了十多年的发展，目前基于英特尔异质集成硅光子技术的光电收发器已经批量出货，产品也从 100G 快速迭代到 400G 甚至更高速率。异质集成硅光技术的优势是封装工艺流程可以不依赖光纤连接以及昂贵的光学对准封装，这一技术应该具有较好的应用前景。但是这种异质集成芯片工艺非常复杂和昂贵，而且由于异质集成不得不做一些性能方面的折中与取舍，目前学术的研究比较多，但是真正可以做到工业应用的也只有 Intel。MRSI 一直关注光子集成的进展，并提供封装技术解决方案，我们也积极参与国际光子集成封装路线图的制定工作。我们认为利用相应的硅基材料实现不同的光和电的功能，与三五族材料工艺制成的激光分别制造，有利于低芯片工艺成本，且有利于实现最优的芯片性能，然后采用先进封装工艺实现的硅光子功能器件，应该是硅光集成发展的主流方向，而且目前多数的硅光企业采用此方案，典型的代表是 Cisco。当然，异质集成的硅光芯片在尺寸和体积要求苛刻的应用中，会有一些优势。我认为在一个相当长的时期内两种方案将会并存发展，两种方案均具有非常大的应用前景。

**9. 对于中国化合物半导体行业应该如何学习国际经验，加速产业发展，请谈谈你的看法。在这个过程中，不可避免地会遇到了知识产权的矛盾、纠纷和保护的问题，包括今后国内的企业之间日益增多的知识产权的问题。也请展开谈谈。**



迈锐斯自动化（深圳）有限公司总经理  
周利民博士

化合物半导体行业在中国近几年已有突飞猛进的发展。就目前来看，在化合物半导体领域，中国厂商和国际厂商相比仍有技术差距，随着国家大基金的大力支持以及相关厂商的不断布局，相信差距将会不断缩小。但是目前头部企业都是国外大厂，而且这些

企业也在积极布局扩产和并购，市场非常活跃。我觉得国内应该在以下几个方面学习国外经验：首先，企业要定位好产品或技术的方向，根据自身优势专注做好某个新兴应用市场，提升产品技术的核心竞争力。而不能什么都做，做大做强是目标，但是首先要做强才能活下去，先进的企业都是有技术和应用特色的企业。在化合物半导体行业整个供应链中任何一个环节的创新与优势都是一个企业的核心竞争力。其次，企业要定位好企业的发展模式，每个企业都去做芯片的发展模式是不现实的，化合物半导体器件的封装和复杂设计也是影响产品性能的关键因素。企业要根据自身技术和管理的状况和能力选择适合自身的发展模式，量力而行来选择企业的发展。一个企业是做全产业链，还是产业链中的某个环节，或者为产业做代工生产都是需要有非常强的专业知识与运营能力的。只有结合自身优势选对经营模式，企业才能在激烈的市场竞争中立于不败之地。再次，要避免盲目重复建设，化合物半导体所有工艺都是新的、复杂的，需要昂贵的最先进的设备，并采用先进技术和和管理，项目建设成本高昂。同质化建设必将浪费大量社会资源，而且不利于行业长期稳定的发展。国家和投资人已开始认识到盲目投资的风险，用大规模圈钱圈地搞建设和快速上市发财的思维来发展化合物半导体，后果将会抑制化合物半导体市场和削弱市场的增长动力。

一个热门行业的快速爆发式发展总会遇到一些问题。当前国内化合物半导体行业很多初创企业是留学归国人员创立的，他们带回来了先进的技术和先进的管理理念，对行业的发展起到了积极的推动与促进作用。但有时也会引起一些与原工作单位的知识产权方面的矛盾和纠纷，加之国内一些人对知识产权保护意识的淡薄，个别企业公开照抄别人的设计或知识产权。知识产权维权事件在新兴的热门行业有日益增多的趋势。MRSI 做为化合物半导体封装设备的领导者，我们专利的设计也有遭遇到国内个别企业的抄袭。我们的做法是将自己的知识产权采用专利的形式进行保护并加以宣传，提醒竞争对手不要违法违规。随着中国对知识产权保护决心的加强和处罚力度的加大，知识产权侵权的问题会随着知识产权保护宣传力度的加大而逐步减少的，这必须在全社会和行业从业者中营造一种侵权可耻的意识才行。



Soitec 公司中国区战略负责人 张万鹏

在化合物半导体材料的制备、合成和提纯技术以及器件设计制造等细分领域要加强研发合作，注重基础以及核心技术和工艺积累，保持足够耐心，产业发展需要借力资本，但不能完全被资本左右，欲速则不达。



广东省科学院半导体研究所，教授，首席科学家 龚政

在半导体行业发展上台湾是一个很好的借鉴，产业链相互配合，产学研深度融合。以 Micro-LED 新型显示发展为例，台湾工研院技术孵化，转移至初创公司，有雄厚实力的设备厂商与面板厂商高度配合，形成完整产业链，共同发展。而国内厂商内卷内耗严重，资本市场浮躁，希望通过并购形成垄断，达到短期收益，其实是欲速则不达。

在知识产权保护方面，虽然国家政策方面已经有长足进步，但是如上所说，厂商和资本浮躁，均希望通过知识产权保护形成垄断。但半导体行业是一个庞大的产业链，很难形成技术垄断，因为常有知识产权矛盾，现今半导体行业面临国外严峻形势，国家应引导整个行业协调发展，通过相互授权合作，形成合作共赢态势，先把国家半导体行业这个大蛋糕做大，整个行业才能健康发展。



芯塔电子 倪炜江博士

我国碳化硅起步较国外略晚，技术研发与人才储备相对较弱，相关核心专利以及国际期刊论文较少，缺乏系统性的自主创新。国内产业链对海外依赖性较高，产业协同度低。这导致我国碳化硅产业长期竞争力不足。

芯塔电子积极推动国内上下游企业深度合作，推动产业链各个环节的国产化和自主可控，加强关键技术本土创新，提升中国全产业链的全球竞争力。芯塔电子厚积薄发，行稳且致远！



芜湖启迪 钮应喜博士

经历多年的发展，国内已经形成了从材料、器件、封测到应用的全产业链，但整体和国外企业相比还存在差距，自主可控的国产器件市场占比还很小。国外的优势是开展较早，技术得到较好的积累和迭代更新，并且延伸到了应用端，有很好的闭环生态，有助于产业上下游技术提升和快速发展。未来五年是第三代半导体的发展的关键期，国内化合物行业，要充分利用国内广阔应用市场的优势，通过示范应用工程，加强上下游协同攻关和深度交流，提升行业整体水平，提前做好与国际企业竞争的准备。



# 最佳鸡尾酒



一个新时代正在召唤，可以利用整个化合物半导体的优势制备更好器件

RICHARD STEVENSON

**材**料往往因特定优势而闻名。GaN 因能处理非常高功率密度而广受赞誉，InSb 因其高速载流子迁移性能而闻名，而 HgCdTe 因其检测远红外能力而闻名。然而，对于所有这些材料，除了它们的优点外，至少还有一个弱点。

因此，选择任何材料都需要折衷，要权衡什么才能实现最佳的整体器件性能。

通过选择最佳组合而不是选择最佳材料来避免这种限制显然具有很大的吸引力。但这说起来容易做起来却很难，因为在整合不同系列的化合物半导体材料时需要克服几个艰巨的挑战。

虽然这些挑战最初似乎无法克服，但由于许多研究人员的辛勤努力，正在取得进展。由于这些突破涉及许多不同的材料和技术，因此很难跟踪正在取得的所有进展。然而，由于去年举行的 CS Mantech 对这一主题的广泛报道，参加此次在线会议的所有代表都可以很好地了解不同半导体材料组合所取得的许多进展，以及如何将这一成功进展开发下一代器件。

美国国防部高级研究计划局（DARPA）微系统技术办公室主任 Mark Rosker 在会议开幕式上概述了化合物半导体器件的三个不同时代，为我们已经走了多远以及未来的发展奠定了基础。他认为第一波浪潮涉及在同质衬底上生产器件，如砷化镓基 MMIC；第二种是在异质衬底上生长的器件——例如 SiC 上的 GaN HEMT，以及生长在 GaAs 和 InP 衬底上的锑化物器件（用于低功率、高频电子电路）。Rosker 认为，第三次浪潮现在开始出现，器件采用突变结和具有不同晶格常数的高性能材料。正在开发的基础技术可能被认为是结工程。”Rosker 解释说：“为了提高器件的整体性能，在结层面进行优化。”

为了说明第三波器件可能是什么样子，Rosker 强调了一种由威斯康星大学麦迪逊分校和密歇根州立大学合作创新的新型 HBT 器件。使用在同质衬底上生长的 AlGaAs/GaAs 膜转移，该团队构建了带有金刚石衬底、p 型金刚石集电极、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 中间层和提供发射极和基极结的 AlGaAs 层

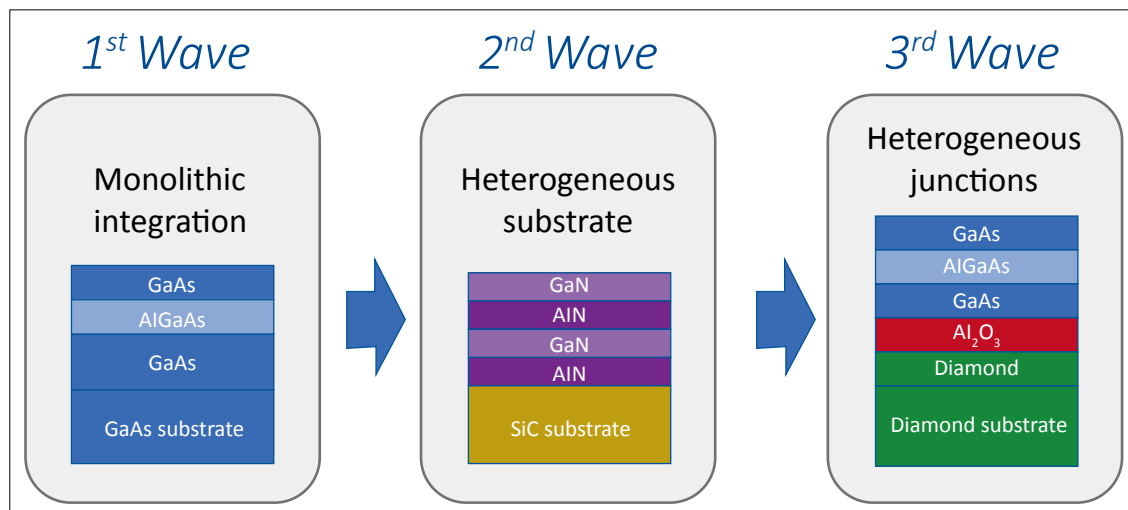


图1.美国国防部高级研究计划局（DARPA）微系统技术办公室主任 Mark Rosker表示，化合物半导体行业将很快进入第三波材料技术浪潮。这个时代将看到由不同材料组合制造的器件。

的 HBT（见图 1）。通过采用嫁接技术，工程师克服了 GaAs 基层和金刚石之间 37% 的晶格失配。这是一项突破，为将 HBT 的一些传统优点与金刚石出色的散热能力以及可提高晶体管击穿电压的更高带隙相结合打开了大门。

DARPA 项目已经为第三波化合物半导体器件奠定了基础。为了解决 GaN HEMT 中限制速度的高接触电阻问题，下一个计划中的工作重点是在源极和漏极触点下方引入重 n 掺杂、晶格匹配 GaN 区域的再生长。”重要的不是你在使用不同的材料，而是你开始在结工程层面上制备整个器件” Rosker 评论道。

他还讨论了超宽带隙材料，他希望这将对下一代器件产生重大影响。这些材料的优点突出，如 AlN、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、金刚石和 BN，大约两倍于 GaN 的带隙和大约四倍于 GaN 的击穿场。然而，这些材料也有缺点，一些难以 p- 掺杂，而另一些缺乏衬底。

“第一个问题，就像上一代一样，是更好地了解材料特性，并认识到其中一些材料挑战是什么。” Rosker 说。据他介绍，材料及其相关器件

的精确模型是帮助理解和开发这种新型化合物半导体的重要工具。

为了帮助推动第三波前进，DARPA 刚刚启动了一个异构异质结构计划。在第一阶段，目标是开发形成低缺陷密度异质结的新工艺。

该计划的第二部分侧重于设计新型的异质结构，以基于物理的精确建模和模拟为基础。

### 可剥离外延层

产生第三波化合物半导体器件的关键工艺是外延层的生长，然后再转移到另一种材料上。由 Jeehwan Kim 领导的麻省理工学院的一个小组正在开发一种非常有前途的技术来实现这一目标，他向参加 CS Mantech 的人员提供了有关该主题的非广泛的工作。

众所周知，晶格匹配是第二波材料的关键要求，限制了材料组合的选择，也可能导致高晶圆成本。但是，根据 Kim 的说法，还必须考虑另外两个重要的弱点：由于底层衬底的原子间距，器件的各层可能会被“夹住”，这可能会影响器件性能；如果无法释放衬底，则会增加重量，同时妨

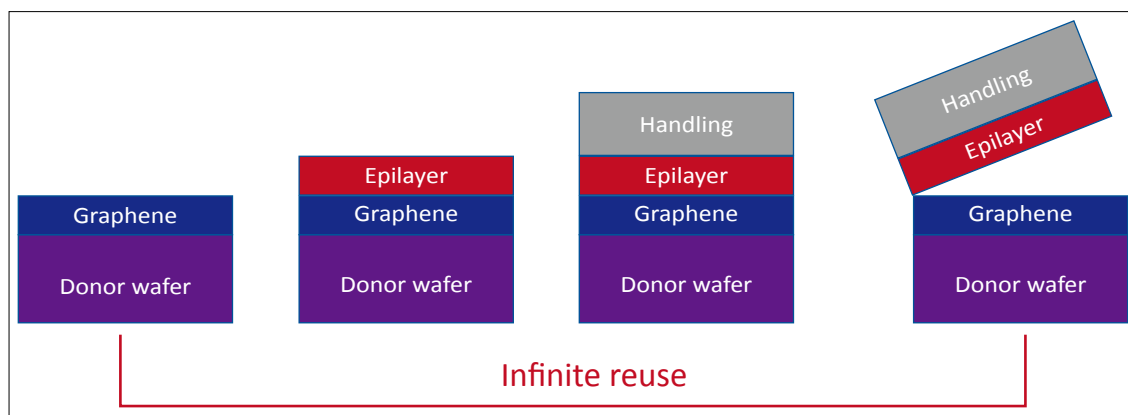


图2.麻省理工学院 Jeehwan Kim 团队采用在衬底和外延层之间插入一层石墨烯来实现衬底的再利用。

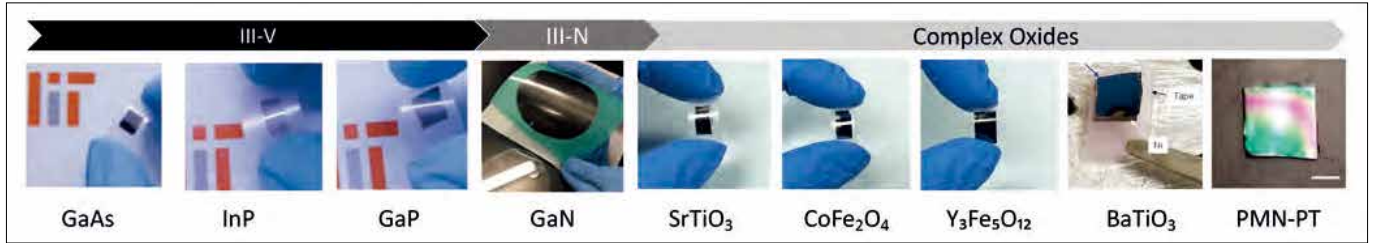


图 3. 麻省理工学院 Jeehwan Kim 的团队使用一种称为远程外延的技术来生长各种与衬底分离的薄膜。这项研究的成果已发表在以下期刊上：Nature 544 340 (2017)、Nature Materials 17 999 (2018)、Nature Materials 18 550 (2019)、Nature Electronics 2 439 (2019)、Nature Nanotechnology 15 272 (2020)、Nature 578 75 (2020)

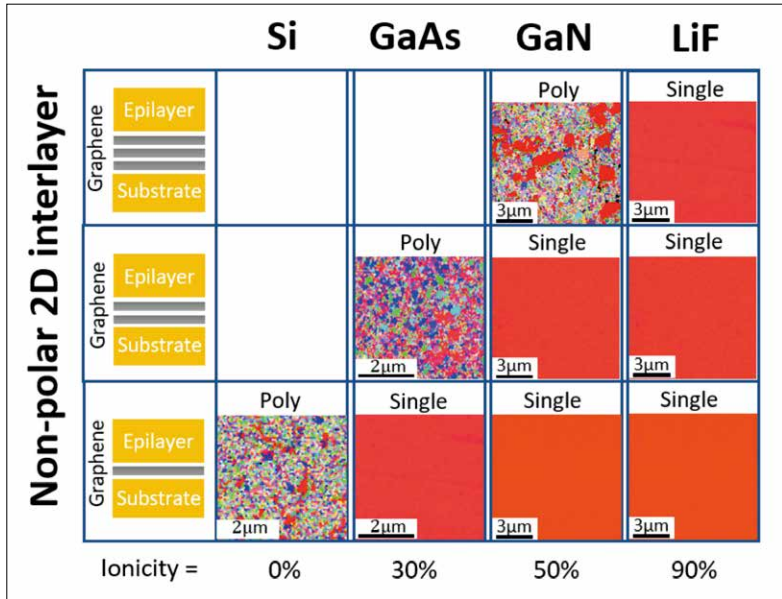


图4.对于远程外延，离子场穿透石墨烯是关键。对于硅来说，它非常弱，以至于随后的外延会产生多晶材料。对于砷化镓，电场更强，允许晶体通过单层石墨烯生长；对于GaN，离子场强度非常高，以至于可以用双层石墨烯形成的晶体材料。有关这项工作的更多详情，请参见Nature Materials 17 999 (2018)。

碍柔韧性。

释放外延层最常见的两种选择是化学剥离和光学剥离。前者并不理想，因为化学处理可能会降低衬底的质量，阻碍其再利用。“你必须在释放完成后抛光你的晶圆，” Kim 解释说，指出蚀刻需要时间，并且通常仅限于 III-V 材料。常见的替代方法是光学剥离，包括引导激光穿过透明衬底的背面在界面熔化材料，这需要相当长的时间并造成损伤，但它比化学剥离更快。

Kim 和他的同事所追求的新方法是，将石墨烯转移到同质衬底上，然后生长外延层、剥离处理，然后分离该结构（见图 2）。由于与石墨烯界面处的弱结合力，外延层可以从这种碳结构中精确剥离。这种技术的优点包括：由于相互作用弱、释放速度快、适用于任何材料、无需任何释放后处理和衬底可再利用。

使用石墨烯薄层而不是其他二维材料（如 BN）的优点之一是它具有“透明度”——即离子场穿透碳层。因此，当外延时，沉积的薄膜

晶格排布仍然服从下面的衬底。通过这种方法，Kim 和他的同事已经形成了单晶、独立、柔性的 GaAs、InP、GaP 和 GaN 膜，以及许多复杂的氧化物，包括 SrTiO<sub>3</sub>、CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、Y<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> 和 BaTiO<sub>3</sub>（见图 3）

离子场通过石墨烯的穿透力因材料而异。对于硅来说，它很弱，导致多晶材料的生长。对于 GaAs 来说，石墨烯的强度稍强一些，所以要通过远程外延来制备晶体薄膜，石墨烯必须只有单层厚度；但对于 GaN 来说，由于相对较强的离子场，即使使用两层石墨烯，远程外延也可以产生晶体薄膜（见图 4）。

Kim 及其同事还研究了异质外延，即生长与 GaAs 晶格失配的 InGaP。由于 Kim 所描述的石墨烯上的自发弛豫，与传统外延相比，三元材料中的位错密度显著降低。

的优点不仅限于生产灵活、可堆叠的晶圆，还可以降低材料成本。此外，还有望实现简单的异质集成，允许堆叠不同的器件，如 III-V 太阳能电池、无线器件、处理器和传感器，以及基于氧化物的电池。

在支持所有这些机会的同时，Kim 对挑战持开放态度，其中包括与石墨烯中的针孔相关的外延层质量的下降，这可能是由剥离过程引起的。他指出，使用正确的工艺添加石墨烯层很重要。对于生产化合物半导体薄膜，湿法工艺是不合适的——石墨烯在其主体衬底上的形态存在缺陷，例如缺乏完美的平整度，这会损害外延层。干燥工艺更好，首先在碳化硅上形成一层石墨烯。

Kim 团队的最新工作之一是利用其技术形成一种包含蓝色、红色和绿色 LED 的人工异质结构。这种横向尺寸为几微米的 LED 堆栈是制造基于 microLED 的显示器的有希望的候选者。

### 键合晶圆

将不同的化合物半导体材料组合在一起的更

成熟的方法是直接晶圆键合。这种方法的一种变体，称为表面活化键合，具有很大的吸引力，因为它不需要任何湿法处理，晶片在室温下键合在一起。

Akash 是金刚石基 GaN 的先驱，目前正在批量生产 100 毫米晶圆。

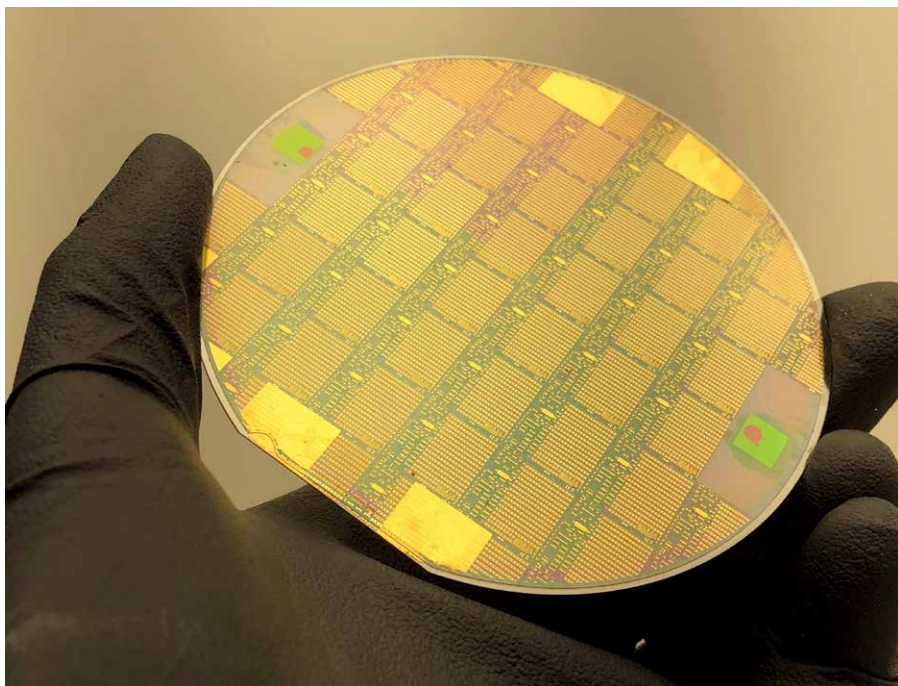
为了用这种技术将材料结合在一起，晶片被装入一个真空室，真空室被抽至  $10^{-6}$  帕左右，然后用中性原子束（通常是氩）轰击晶片表面，原子束被加速 1-2 千伏。这些碰撞消除了天然氧化物并产生了活化表面。然后将成对的晶片压在一起，通常键合压力约为 10 MPa（见图 5）。

在 CS Mantech 大会上，大阪城市大学（Osaka City University）的小组负责人、这种晶圆键合方面的专家 Naoteru Shigekawa 概述了优化这种工艺的标准，然后用新型器件的例子说明了其能力。虽然他的器件仅限于连接直径不超过 2 英寸的晶圆，但他很快指出，有可用的商用工具，适用于 300 毫米晶圆的高通量键合。

Shigekawa 告诉与会者，晶圆的表面粗糙度会影响键合良率。他的团队的实验表明，要成功键合，表面粗糙度值 Ra 必须低于 1 nm，理想情况下小于该值的一半。外延片往往远高于此值，但抛光会使它们的表面变平，从而实现成功的键合（见图 6）。

应用这种形式的键合时需要小心，因为表面活化会导致干蚀刻，这会增加表面粗糙度并降低产量。蚀刻的另一个缺点是它引入了中间间隙状态。“我们假设这种中间间隙状态对键合界面的电气特性有负面影响，” Shigekawa 说，他补充说，一种解决方案是键合后退火，这可以导致界面特性的恢复。

为了说明这一点，Shigekawa 展示了键合硅和 GaAs 晶片的透射电子显微镜。在退火之前，



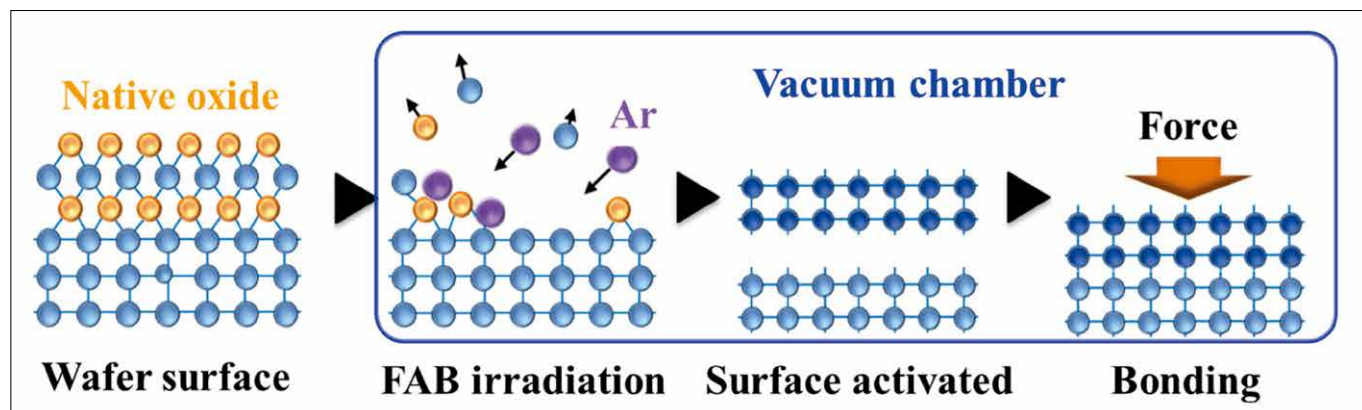
Akash 是金刚石基 GaN 的先驱，目前正在批量生产 100 毫米晶圆。

界面处有一个类似非晶的过渡层。在 300℃ 下退火会导致该层收缩，而在 400℃ 下它会由于再结晶而消失。

Shigekawa 及其同事还使用电学测量来评估退火如何调整界面特性。对通过将两个 n 型硅晶片键合在一起以及通过将两个 p 型硅晶片键合在一起形成的结进行的研究表明，在 1000℃ 下退火 10 分钟会将界面态密度从  $10^{13} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  左右降低到此值的五分之一。

大阪城市大学的团队已经生产了一系列具有晶圆键合的新型器件，包括多结太阳能电池、具有宽带隙和窄带隙材料之间结的功率器件，以及具有金刚石层以增加电流扩散的场效应晶体管。对于后者，器件是通过将金刚石直接键合到半导体材料上形成的，一种是硅，另一种是 GaAs，并将金刚石键合到散热器上。新架构有望大幅降低热阻。

图 5. 在真空条件下工作，用快速原子束 (FAB) 轰击晶圆去除了原生氧化物，形成了一个用于键合的表面。



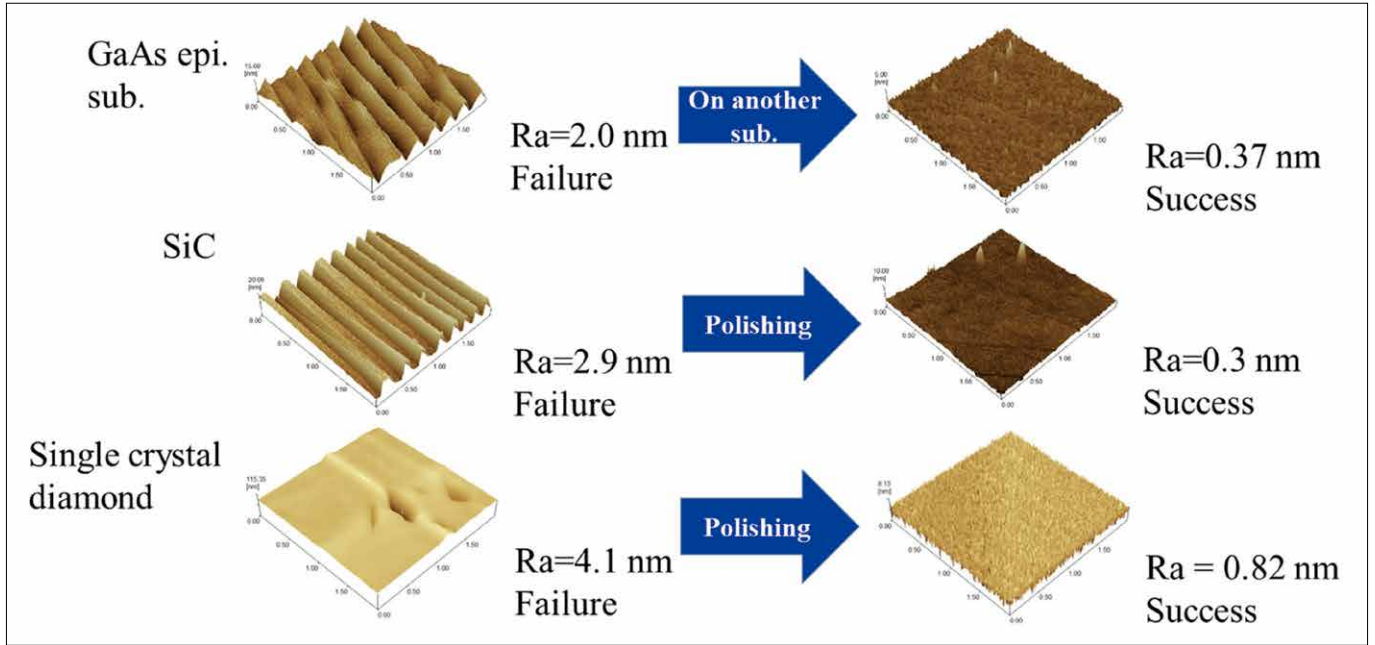


图 6. 晶片的平整度决定了键合良率。抛光可降低粗糙度，并增加高质量键合的机会。

使用热成像仪，Shigekawa 和同事测量了他们节点的热阻。为了提供基准，他们使用了热阻为 35 K/W 的键合 GaAs- 蓝宝石结（见图 7）。相比之下，GaAs- 金刚石结的电阻仅为 6 K/W，这就允许器件在不过热的情况下更稳定可靠工作，或者采用更简单的热管理方法。

研究人员还考虑了将 GaN 与金刚石键合。布里斯托大学的 Martin Kuball 团队对这些结构进行了微拉曼测量，结果表明这些结构内的应力与硅基 GaN 的应力相似。

### 金刚石散热

加利福尼亚州旧金山的 Akash Systems 致力于开发用于卫星通信的金刚石 GaN 晶体管、功率放大器和无线电。在这种环境下，散热的唯一机制是辐射。使用金刚石基氮化镓，热量从 HEMT 的通道中排出的速度比使用 SiC 上 GaN 快得多，

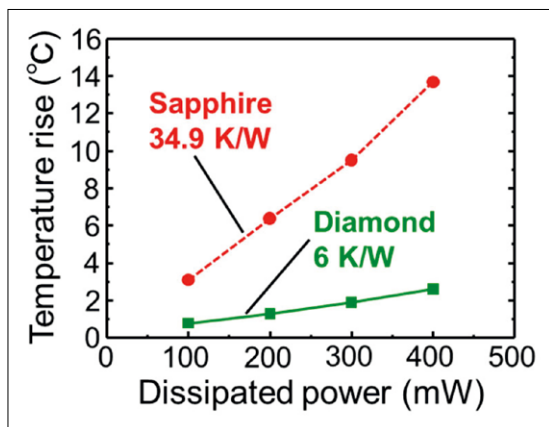


图 7. 与蓝宝石相比，金刚石具有极高的导热性，可降低该结处的热阻。

从而允许更高的衬底温度 - 最终通过辐射更好地散热。

请注意，通过降低器件的强度来避免高温并不是一个很好的折衷方案，因为这会降低数据传输速率。说明这一点的是 Akash 的产品之一，金刚石 GaN 无线电，它采用 10 厘米 × 10 厘米 × 3 厘米的封装，当放置在 550 公里的高度时，可以提供超过 600 Mbit/s 的数据速率 - 这是 100 MHz 信道中 8 GHz 左右的传统 SiC 上 GaN 技术速率的五倍多。

参加 CS Mantech 的人员在公司材料副总裁 Daniel Francis 的演讲中深入了解了 Akash 的金刚石 GaN 技术的发展。他解释说，许多技术团队都是 Group4 Labs 的前创始人和员工，他们是该技术的先驱。在 Element Six 收购之后，以及在 Akash 推出之后，金刚石 GaN 的进展仍在继续，后者收购了 IP 并在 100 毫米晶圆上引入了生产工艺。

在 Akash，工程师们将未加工的硅基 GaN 外延片的外延面连接到一个临时载体，移除硅衬底，在该处生长一层金刚石，然后移除临时载体来形成新器件。由于沉积的金刚石形成了一个相当粗糙的层，因此必须对其进行抛光。

将临时载体连接到外延片的选项包括扩散键合和等离子体激活键合。但在 Akash，出于多种原因，他们更喜欢玻璃熔块键合（也称为玻璃焊接）（见表 1）。熔块键合的主要属性是它可以应用于完整的晶片，它在随后用于金刚石生长的高温下



Criteria	Diffusion bond	Plasma-activated bond	Glass frit
Solid bond at 800 °C	Yes	Yes	Yes
Bow/warp	?	?	Yes
Surface roughness	?	?	Yes
Bond full wafers	?	?	Yes
Defects	No	No	Yes

保持其强度，并且它可以适应 GaN 中的弯曲、翘曲和缺陷。

Francis 解释说，通过熔化玻璃，它们可以满足表面粗糙度和弯曲度。“因为你把玻璃做得足够厚，你可以为 5 微米的缺陷提供一定程度的粗糙度，而不会有太多麻烦。”

Akash 的团队与布里斯托尔大学的 Kuball 团队合作，量化了去除过渡层所带来的散热改进。这些过渡层受到其三元性质以及众多缺陷的阻碍（见图 8）。热导率通常为  $15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，比 GaN 的值低约 10 倍。为了避免这个问题，Akash 在添加导热系数为  $1600 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  的金刚石之前去除了这些过渡层。

在 GaN 上沉积高质量的金金刚石层并不容易。金刚石层有侵扰 GaN 的趋势，在界面形成爆米花状的纳米级结构。解决方案是添加一层 SiN。由于其导热系数非常低，因此需要尽可能薄，同时仍能确保优质的金刚石薄膜。Francis 表示，在考虑器件性能和一致性时，25 nm 左右的厚度会产生最佳结果。

由于沉积的金刚石形成数十微米大小的颗粒，因此需要抛光工艺以确保表面光滑。第一步

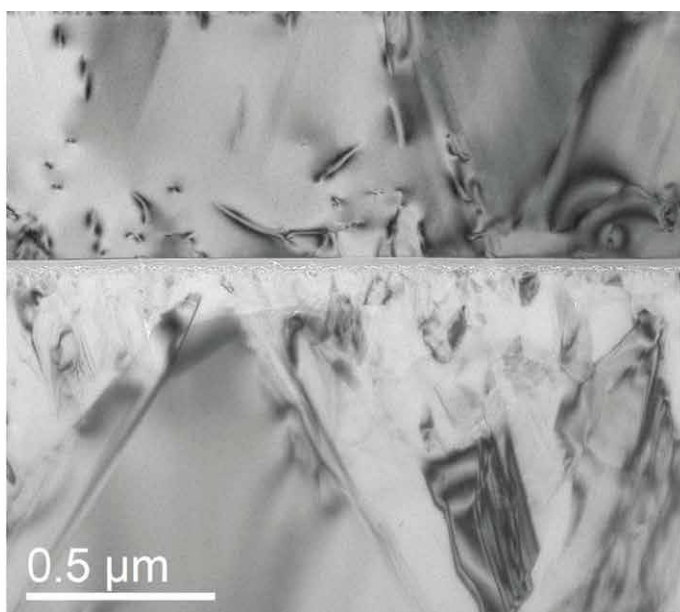
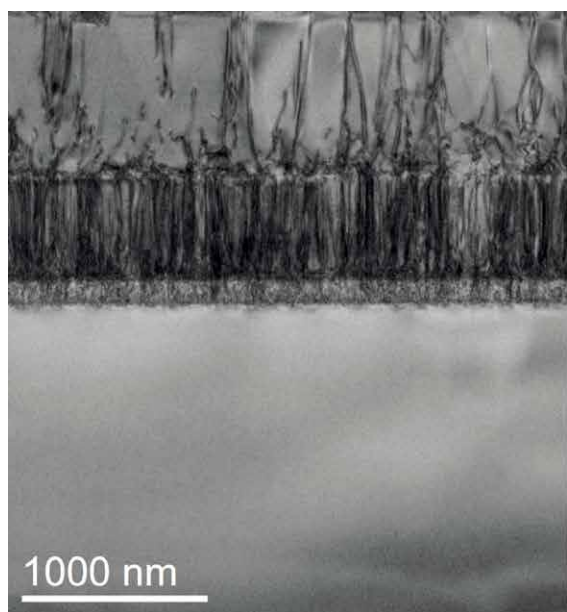
将峰谷粗糙度变化从  $30\mu\text{m}$  减少到  $5\mu\text{m}$ ，然后第二步将表面粗糙度降低到  $0.5\mu\text{m}$ 。应用这两个步骤会修整钻石的总厚度，从大约 200 微米降至 105 微米。

Francis 及其同事将 GaN-on-SiC HEMT 的性能与基于金刚石的金金刚石 HEMT 的性能进行了比较。前者的测量结果是，栅极长度为 150 nm、工作频率为 20 GHz、效率为 25% 的器件，当通道温度为  $200^\circ\text{C}$  时，衬底温度为  $25^\circ\text{C}$ 。对于金刚石基 GaN 变体，由于该团队尚未完善 150 nm 工艺，因此采用了 250 nm 的栅极长度。较大的栅极将效率降低到 20%。然而，令人鼓舞的是，对于  $200^\circ\text{C}$  的通道温度，基板温度可以高达  $100^\circ\text{C}$ ，从而允许器件在不需要主动冷却的情况下在太空中运行。

这一有希望的结果，就像 Rosker 描述的那些器件——以及麻省理工学院和大阪城市大学制造的那些器件——让我们看到了未来可能发生的事情。当器件使用不同的材料时，许多门都可以打开，这有助于将我们行业的重要性提升到一个全新的水平。☞

表 1. Akash 的工程师在生产金金刚石 GaN 器件时采用玻璃熔块工艺的原因有很多。

图 8. Akash 使用硅基 GaN HEMT 作为生产其金金刚石 GaN 器件的起点。硅基 GaN 的透射电子显微镜图像，显示过渡层（左）和金金刚石 GaN（右）中的缺陷密度非常高。



# 在硅上构建 III-V 族化合物半导体纳米脊型光电探测器

—单片集成的 III-V 族化合物半导体器件可以提供高质量的红外检测性能。

作者：来自 IMEC 和根特大学的 CENK IBRAHIM OZDEMIR 和 DRIES VAN THOURHOUT，以及来自 IMEC 的 YANNICK DE KONINCK, DIDIT YUDISTIRA, MARINA BARYSHNIKOVA, NADEZDA KUZNETSOVA BERNARDETTE KUNERT, MARIANNA PANTOUVAKI 和 JORIS VAN CAMPENHOUT

**在**今天这个超级互联的世界里，硅光子学已经成为实现大规模数据传输的关键技术。几家代工厂现在正在提供硅光子学平台，用于制造每秒万亿比特容量的电光收发器。这些收发器可以满足超大规模数据中心以及新兴高性能计算和人工智能计算集群日益增长的数据通信需求。

硅光子学非常适合这些任务，这要归功于它在电信波长下的高折射率和透明度，以及它在亚微米波导中有效传输光的能力。这些属性使高集成密度光子集成电路（PICs）能够为数据通信应用提供多 Tbit/s 光学模块的扩展路径，并为未来的激光雷达系统提供密集光学相控阵的路径。

然而，尽管有这些不错的希望，应该注意的是，硅并不是制作 PIC 的完美材料。由于其间接带隙，其光调制、检测和放大能力有限。

今天硅基 PICs 的所有功能部分是由其他材料

的单片集成提供的。其中之一是锗，它能使波导光电探测器具有高达 1550 纳米的出色响应度和高速数据接收器应用中可接受的暗电流。然而，有了锗，光放大仍然没有出现在 PIC 工程师的工具箱中，以及更长波长的光电探测——这些都是各种新兴光学传感应用的宝贵属性。

克服这一限制的一个普遍途径是将 III-V 族化合物半导体族集成到硅光子学平台上。目前，混合 III-V 族化合物半导体族集成的两种最流行方法是倒装芯片组装和芯片对晶圆键合。两者都适用于中低晶圆容量。然而，从长远来看，直接在硅上进行 III-V 族化合物半导体族单片异质外延生长可以说是实现最低成本、可扩展性和最高吞吐量的更有希望的途径。

虽然这种方法有很大的潜力，但要实现它并不容易。几十年来，研究人员一直在努力解决在硅上直接生长高质量 III-V 族化合物半导体层的困难。存在与晶格常数、热膨胀系数和晶体极性不匹配相关的挑战。尽管取得了重大进展，但即使在今天，直接在硅上生长的最先进的 III-V 族化合物半导体族层的缺陷率水平也比同质衬底上的缺陷率高几个数量级。还值得注意的是，当通过最常见的方法（缓冲层生长）添加这些层时，缓冲层必须有几微米厚以适应晶体缺陷。这并不理想，阻碍了大晶圆尺寸的可扩展性。

## 转向纳米脊

在总部设在比利时的全球知名微电子研究中心 IMEC，我们的团队正在开创一种独特的方法来解决这个问题。随着我们的前进方向，我们称

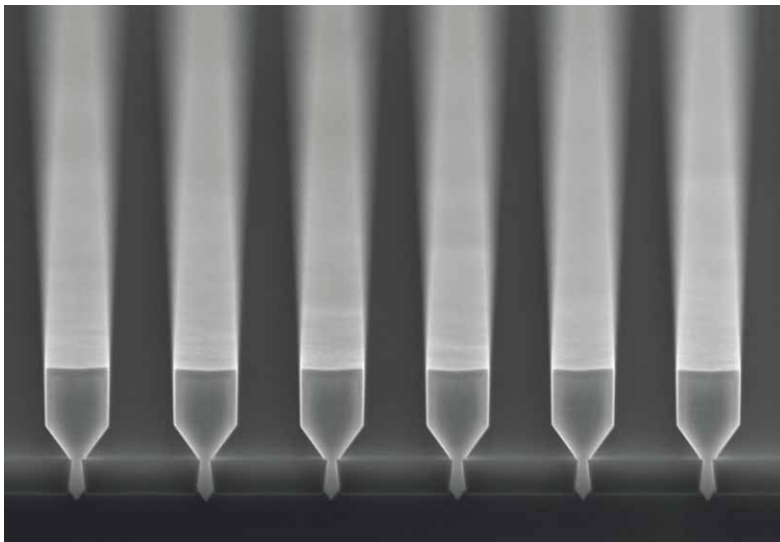


图1.在硅上生长的III-V族化合物半导体纳米脊的倾斜扫描电子显微镜（SEM）图像。

之为纳米脊工程，我们的器件形成过程开始于在 300 mm 硅衬底上形成具有狭窄沟槽图案的选定区域中生长 III-V 族化合物半导体族化合物。这些具有高的深空比的狭窄沟槽可以捕获位错缺陷。在填充沟槽之后，III-V 族的生长继续，形成具有体积增加、工程化的纳米脊形状和非常低的缺陷密度的纳米脊。通过避免对厚的 III-V 族化合物半导体缓冲层的需要，这种方法产生了接近底层硅的 III-V 族化合物半导体纳米脊。

当我们使用纳米脊工程将 III-V 族化合物半导体与硅集成时，我们通过施加各向异性腐蚀在沟槽底部形成硅的 {111} 面。这就形成了一个 V 形底部，小平面的方向阻止了反相域的形成(见图 1)。

我们通过调整 MOCVD 的生长参数来控制我们的纳米脊的轮廓。我们已经学会了如何设计一种具有平坦 (001) 表面的矩形纳米脊，这种结构为光子学提供了一个很好的平台，因为每个脊都为光提供了波导，并为制造 III-V 族化合物半导体器件奠定了基础。

除了控制纳米脊的形状，我们的工程技术使我们能够引入不同的掺杂剂和 III-V 族化合物半导体。我们可以形成二极管结，引入量子阱，在不同的 III-V 族化合物半导体组合之间交替，以及钝化我们的波导。

我们工作的一个起点是纳米脊形波导的光泵浦激光，这是我们的团队几年前展示的一项壮举。当时，我们利用纳米脊工程，在纳米脊波导的(001)面水平生长了  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}/\text{GaAs}$  多量子阱。为了保证载流子限制和表面钝化，我们用晶格匹配的  $\text{InGaP}$  层覆盖了纳米脊形波导。我们通过在纳米脊形波导中加入反射面光栅来产生腔体，而外耦合光栅的加入使我们能够读出激光响应。当时的亮点包括 1028 nm 的激光，激光发射的峰值比背景高 28dB。最初，我们在这一成功的基础上进行了模拟，考虑耦合到规则的硅波导中。这些计算强调了将我们的纳米脊形器件与已建立的硅光子学平台相集成的前景。

我们使用纳米脊线工程来生产各种各样的器件。在我们最新研究光电探测器之前，我们开发了 HBTs。这类晶体管利用了 III-V 族化合物半导体高频 RF 应用中的出色迁移率，如 5G 及其潜在的后续产品。利用纳米脊线工程在硅上生产 HBTs 的吸引力包括更大的设计灵活性、更低的成本和更小的面积。

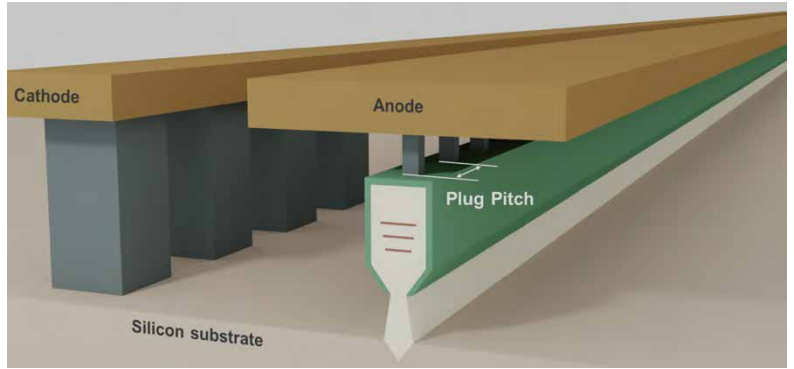


图2: IMEC生产的纳米脊波导光探测器器件的3D图。

### 纳米脊型光电探测器

最近，我们扩大了可以在我们的纳米脊上生产的器件的范围，包括高质量的光电探测器。设计这些器件时的一个关键要求是确保吸收材料的带隙足够低，以捕获所需波长的光。如果该器件要具有较小的面积，那么材料的吸收系数足够高也是至关重要的。还有其他潜在的要求：如果需要低噪声、高灵敏度的探测器，则吸收材料必须具有低缺陷密度；如果必须进行高速操作，则吸收材料需要具有高的电子和空穴迁移率，因为这使载流子能够被快速收集。在过去的几十年里，满足所有这些要求的常规  $\text{InGaAs}$  光电探测器已经被大量生产出来。

光电探测器最常见的结构是 p-i-n 二极管，光主要在本征层的体积中被吸收。通过这种设计，在反向偏压下工作的二极管可以在本征区域获得非常高的电场，从而有助于有效地收集生成的载流子。二极管 p 侧和 n 侧的金属触点提供与外部

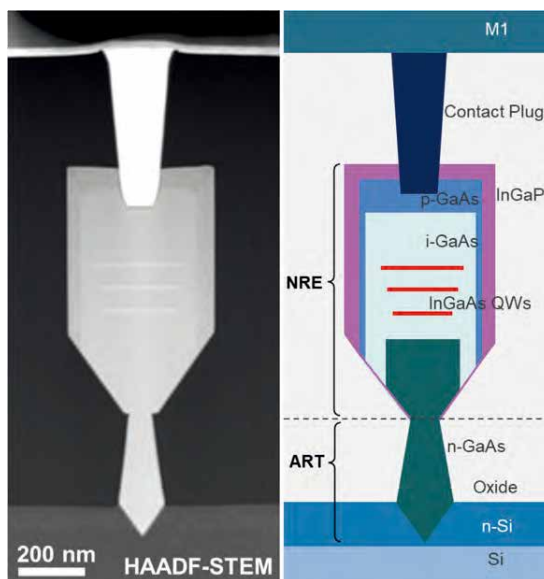


图3: (左) 具有三个  $\text{InGaAs}$  量子阱的  $\text{GaAs}$  纳米脊的高角度环形暗场扫描透射电子显微镜 (HAADF-STEM) 横截面图像; (右) 纳米脊横截面的示意。有关更多详细信息请参见: C. I. Ozdemir et al. Dec. 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECOC48923.2020.9333310

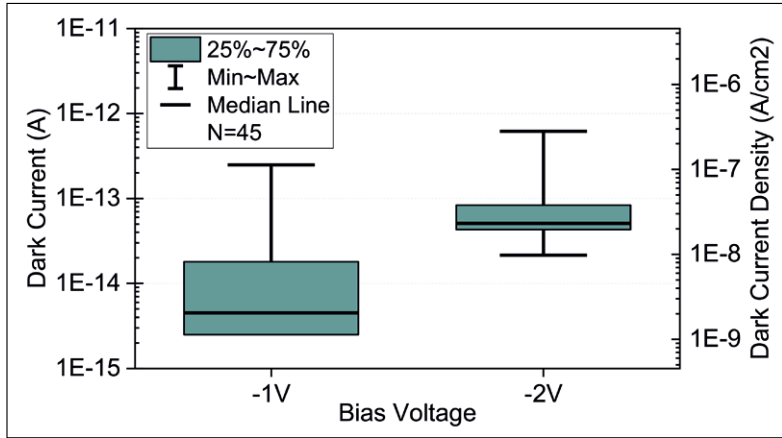


图4：不同偏置电压下的暗电流分布。更多细节见：C. I. Ozdemir et al. Dec. 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/ECOC48923.2020.9333310

的电气连接（参见图 2）。

在我们最新的研究中，我们评估了使用纳米脊在硅平台上单片集成高质量 III-V 族化合物半导体光电探测器的潜力。使用用于演示光泵浦激光器的结构作为我们最近工作的基础，我们开发了引入 p-i-n 掺杂和创建二极管结的专业知识，并在我们的器件中增加了金属触点。

## 最近，我们已经扩展到三元InGaAs纳米脊，为集成在更长波长下工作的器件开辟了一条道路。

我们在 IMEC 的 300 mm CMOS 生产线上生长 InGaAs/GaAs 光电探测器，使用 MOCVD 在 n 掺杂硅片上添加 III-V 族化合物半导体。通过在 300 nm 深、80 nm 到 100 nm 宽的沟槽中生长这些 III-V 族化合物半导体，我们获得了大于 3.5 的深宽比，这足以确保有效的缺陷捕获。在 GaAs 和 Si 的界面上开始的所有螺位错和失配位错缺陷

都会被有效地限制在沟槽内。

在 GaAs 生长期间，引入掺杂剂以定义 p-i-n 二极管，对于 n 型和 p 型 GaAs 使用约  $1.0 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  的掺杂浓度。入射光的吸收发生在嵌入 i-GaAs 层的三个 10nm 厚的  $\text{In}_{0.20}\text{Ga}_{0.80}\text{As}$  量子阱中，如图 3 所示。为了钝化表面，我们用 InGaP 盖住矩形纳米脊波导层。在氧化物填充之后，InGaP 层的局部蚀刻和钨触点的添加产生与顶部 p-GaAs 层的电接触。而且，形成向下到 n 掺杂硅衬底的钨触点以接触器件的 n-GaAs 端。标准 CMOS 铜金属化处理完整的器件制造。

在我们的设计中，由于砷化镓的折射率比起周围的氧化层的高，光被强烈限制在砷化镓纳米脊波导中。由于我们的纳米脊波导的横截面很小，因此很难为我们的器件提供良好的电气连接。部分困难在于，任何直接接触纳米脊的金属都会引入光吸收损耗，进而降低光电探测器的响应度。我们通过改变落在 GaAs 纳米脊顶部的 p 接触头的密度和间距，并检查其与测量的光电探测器响应度的相关性，研究了这一问题的严重程度。

在我们最新的迭代中，我们劈开了纳米脊波导的一端，以提供从芯片边缘到劈开的光学小面的光学通道。劈开 InGaAs/GaAs 纳米脊的一侧，可得到 500 μm 长的器件。

在将光引导到我们的光电探测器之前，我们测量了它们在反向偏压下的暗电流性能。这些测量，顾名思义，是在黑暗条件下进行的，提供了对器件和材料质量的洞察。使用 -1 V 和 -2 V 的典型反向偏置，我们观察到非常低的中值暗电流（见图 4）。例如，在 -2 V 时，我们记录到的值仅为 0.05 pA，相当于  $1.98 \times 10^{-8} \text{ A cm}^{-2}$  的暗电流密度（通过考虑器件的宽度和长度计算得出）。这一

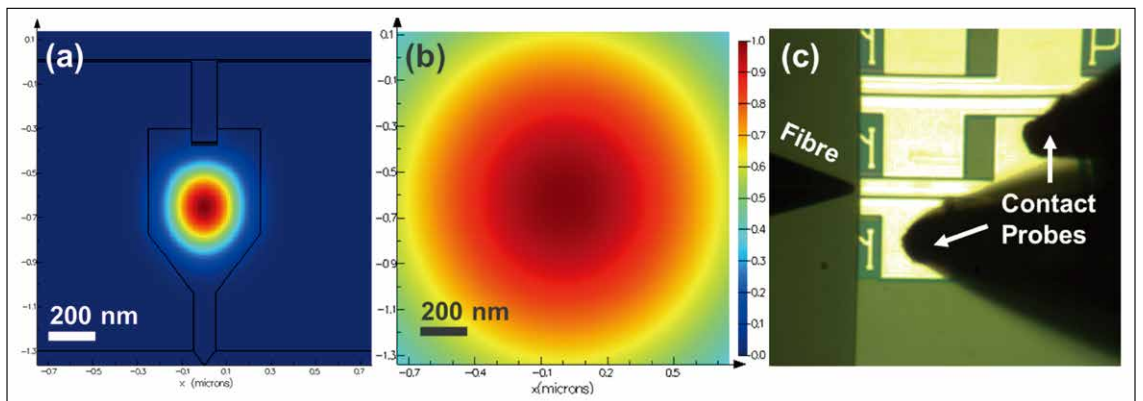


图5：(a-b)使用线性色标的纳米脊形波导和2.0μm聚焦光束的模截面。(C)带有劈裂面和透镜式纤维的测量装置的俯视图。更多细节见：C. I. Ozdemir et al. Dec. 2020, pp. 1–4, doi: 10.1109/ECOC48923.2020.9333310

数字为单片集成在硅上的光电探测器的暗电流开辟了新的天地。然而，请注意，我们正在比较的器件工作在更高的波长，容易产生更高的暗电流。这并不是说我们的低暗电流不令人鼓舞 - 它提供了良好的材料质量的强烈迹象，这是成功实现单片集成的关键因素。

在我们的电光测量中，我们使用透镜光纤将光通过解理面耦合到波导中，以提供  $2.0\mu\text{m}$  的光束大小（见图 5）。采用一个  $1020\text{ nm}$  的光源抑制了 GaAs 的吸收，同时保证了 InGaAs 量子阱的吸收。

由于我们的纳米脊形器件尺寸很小，它们的导模几乎比入射光束小五倍。因此，耦合损耗是不可避免的。我们用光学仿真软件对它们的大小进行了评估，结果显示耦合效率为 21%。确定这个数字对于评估我们器件的内部响应度和量子效率至关重要。

响应度定义为每瓦输入光功率产生的光电流，光电流的单位为安培。最大的理论响应率取决于入射光源的波长，对于  $1020\text{ nm}$  的光，它的响应度是  $0.82\text{ A/W}$ 。我们的纳米脊波导光探测器离这个上限不远，在  $-1\text{V}$  时实现了  $0.65\text{ A/W}$  的中值内部响应度，对于接触头间距为  $4.8\mu\text{m}$  InGaAs 的器件而言这是最高的记录。这相当于 79% 的内量子效率，这个高值表明，即使相对较小的体积，InGaAs 量子阱成功地吸收了光，而 p-i-n 二极管则有效地收集了产生的载流子并产生了很强的光电流。

对我们的光电探测器在不同的顶触头间距下的性能进行了检查，结果表明，该距离与测量的响应度有很强的相关性（见图 6）。降低接触头的密度（即增加间距距离）会减少金属对光的吸收。这意味着当光通过波导传播时，更多的光被 InGaAs 量子阱吸收。我们已经用三维光学模拟证实了这一行为（见图 7）。

我们将继续提升我们的技术能力。最近，我们已经扩展到三元 InGaAs 纳米脊，为集成在更长波长下工作的器件开辟了一条道路。这是朝着制造具有 III-V 族化合物半导体器件单片集成的光学集成电路又迈进了一步，III-V 族化合物半导体器件是通过硅光电子平台上的纳米脊工程形成的。

**致谢：**作者对 IMEC 的制造、计量和支持团队在这项工作中的贡献表示感谢。这项工作是由 IMEC 的行业关联光学 I/O 研发计划资助的。

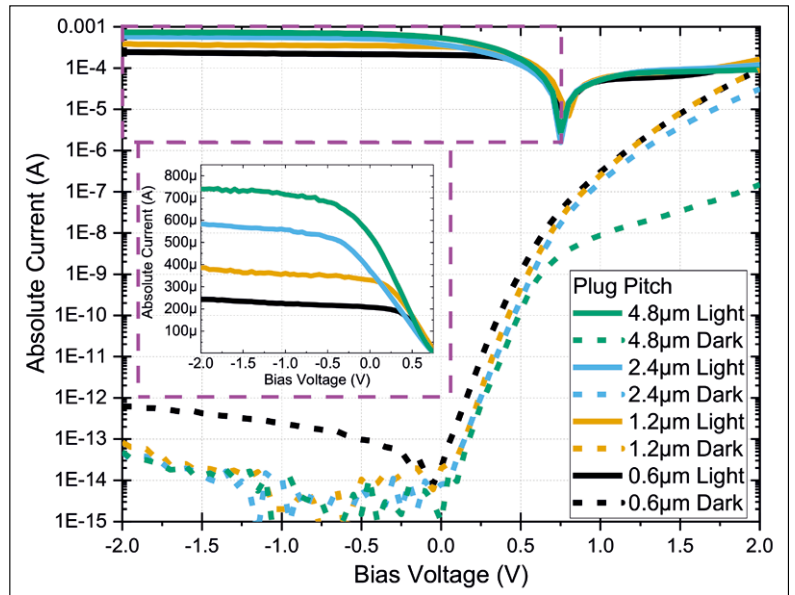


图6.具有不同p触点间距的器件的电流-电压(I-V)特性的暗和亮测量，(插图)光I-V以线性比例放大。更多细节见：C. I. Ozdemir et al. Dec. 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECOC48923.2020.9333310

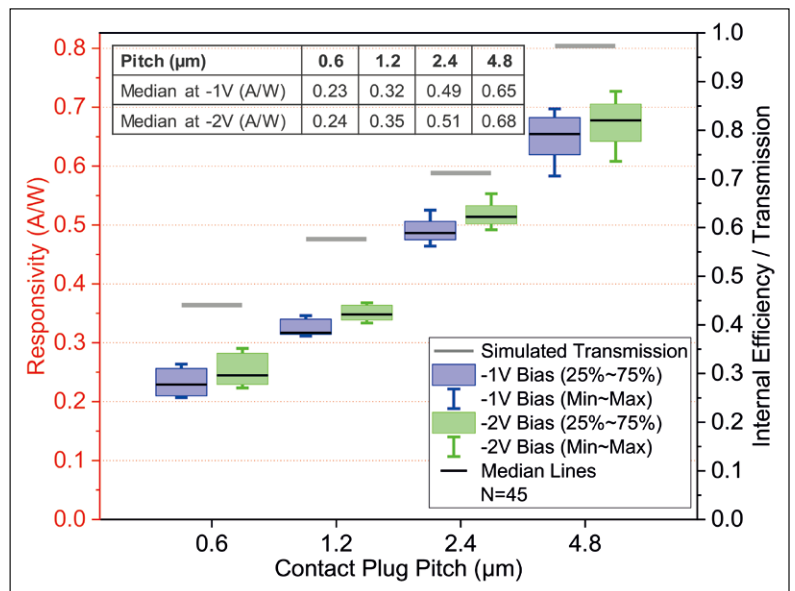


图7.不同偏置和p触点间距下的响应度分布。不同p触点间距的模拟传输值，缩放至右垂直轴。(插图)中位数响应度值表。更多细节见：C. I. Ozdemir et al. Dec. 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ECOC48923.2020.9333310

### 进一步阅读

- [1] B. K unert et al. "Gaining an edge with nano-ridges" Compound Semiconductor July 2018, <https://www.publishing.ninja/V4/ page/5900/304/6/1>
- [2] Y. Shi et al. Optica 4 1468 (2017)
- [3] Y. Shi et al. Opt. Express 27 37781 (2019)
- [4] A. Vais et al. Dec. IEDM 2019, pp. 9.1.1-9.1.4, doi: 10.1109/IEDM19573.2019.8993539
- [5] C. I. Ozdemir et al. ECOC Dec. 2020, pp. 1-4, (2020) doi: 10.1109/ECOC48923.2020.9333310
- [6] B. Kunert et al. Cryst. Growth Des. 21 1657 (2021)
- [7] C. I. Ozdemir et al. J. Lightwave Technol., 2021, (preprint) doi: 10.1109/JLT.2021.3084324

# UVC-LED 进入低成本 4 英寸时代的推手：应变调控

刘上锋<sup>1,2</sup>, 袁治<sup>2</sup>, 黄黎杰<sup>2</sup>, 张晋<sup>2</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 李泰<sup>1,2</sup>, 康俊杰<sup>2</sup>, 罗巍<sup>2</sup>, 陈兆营<sup>1</sup>, 孙萧萧<sup>1</sup>, 王新强<sup>1,2</sup>

1 北京大学物理学院, 人工微结构和介观物理国家重点实验室, 纳光电子前沿科学中心, 北京

2 松山湖材料实验室, 东莞, 广东省

**摘要：**深紫外波段的发光二极管 (UVC-LED) 在各类消毒杀菌场景下具有极为广泛的应用，特别其在当前新冠疫情全球流行的形势下显得尤其引人注目。然而，UVC-LED 外延片至今仍局限于 2 英寸工艺制程，极大地增加了 LED 芯片的规模化制备成本。本工作通过引入应变调控工艺，成功实现了 4 英寸无裂纹大功率 UVC-LED 外延片。通过在高温热退火 AIN(HTA-AIN) 模板上引入 AIN 同质三维-二维 (3D-2D) 过渡层，模板中原有的压应力成功地被调整为张应力状态，因此保证了后续高质量  $Al_{0.6}Ga_{0.4}N$  薄膜顺势外延生长过程中表面的光滑平整。该方案成功地解决了 HTA-AIN 衬底上制备大尺寸 UVC-LED 外延片长期存在的应力控制问题：虽然 HTA-AIN 存在的压应变极大地压制了裂纹的产生，但也会导致 AlGaIn 生长过程中形貌和晶体质量的急剧恶化。4 英寸 UVC-LED 外延片的实现使得 UVC-LED 的制造工艺与成熟的蓝光 LED 工艺兼容成为可能，将加速 UVC-LED 在日常生活中的普及。

## 背景简介

COVID-19 的爆发对全球产生了巨大的影响，极大地推动 C 波段紫外光 (UVC, 波长  $\leq 280\text{nm}$ ) 发光二极管 (UVC-LED) 的发展。特别是 UVC-LED 可在 1 秒时间尺度内便能够对新冠病毒实现超过 99.99% 超快速杀灭的优异性能体现出巨大的应用前景。为了制造高性能的 UVC-LED，研究人员首先从外延衬底模板入手，近年来相继提出多种技术路线以求在具有高深紫外透过率的蓝宝石衬底上制备高结晶质量的 AIN 模板。在众多方案中，尽管侧向外延生长 (ELOG) 与高温热退火 (HTA) 技术的问世在提高 AIN 结晶质量方面具有里程碑式的意义，但其同时也

有各自的缺点：(1) 基于纳米图形化蓝宝石衬底 (NPSS) 的侧向外延技术可将单晶 AIN 模板的位错密度降低至  $\sim 10^8 \text{ cm}^{-2}$  数量级，但在 AIN 横向聚合过程中会产生强烈的张应变，使表面发生严重的开裂；此外，就工业生产而言，NPSS 本身复杂的制备工艺与侧向外延过程中所需 3~4  $\mu\text{m}$  的 AIN 厚度提高了成本。(2) 由于在膜厚小于 1  $\mu\text{m}$  的情况下能够成功地将位错密度降低至  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  数量级，高温热退火技术在制备 AIN 模板 (HTA-AIN) 方面受到广泛关注，特别是已有研究人员基于 HTA-AIN 实现了在 268 nm 和 265 nm 波段发光的 UVC-LED；此外，HTA-AIN 模板中固有的压应变能够成功抑制外延过程中产生的裂

纹，为发展4英寸无裂纹的UVC-LED晶圆指明了方向。但令人遗憾的是，HTA-AIN所具有的强压应变会导致后续生长的 $Al_xGa_{1-x}N(x \leq 60\%)$ 膜层存在严重的表面粗化、晶格弛豫与晶体质量降低等一系列问题。这是由于强压应变在AlGaIn生长过程中增加了Ga和Al原子的表面扩散势垒能，且Ga原子的扩散能力高于Al原子，因此会使得AlGaIn沿着螺型和混合型位错呈现六边形螺旋岛优先生长，并在六边形螺旋岛的台阶处发生严重的组分偏析，导致器件性能恶化。综上所述，尽管HTA-AIN中存在的压应变会因为抑制裂纹而成为UVC-LED向大尺寸进化最有利的条件，但其同时会导致后续UVC-LED外延中出现一系列其他严重问题，从而成为UVC-LED规模化制备中的障碍。

因此，实现应变可控、晶体质量高、无裂纹、表面平整的AIN，对于推动高性能UVC-LED进入规模化4英寸晶圆时代，具有重要的意义。

该工作成功实现了高性能4英寸无裂纹UVC-LED外延片。通过调节薄膜应变，即在4英寸高结晶质量的HTA-AIN模板上引入一个三维-二维(3D-2D)的应变过渡层，可在外延过程中避免牺牲结晶质量的前提下，在以压应力为主的HTA-AIN单晶模板表面成功实现一层具有张应力的AIN过渡层，从而抑制了裂纹的出现和表面粗糙化。该工作通过利用低成本的4英寸HTA-AIN模板极大的促进了UVC-LED的普及，并为促进UVC-LED与GaN基蓝光LED工艺的兼容提供了基础。

### 实验与结果

通过利用物理气相沉积(PVD)结合原位高

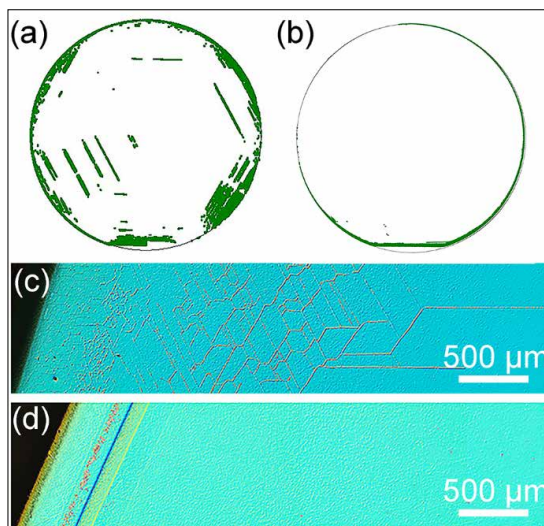


图1. (a) 4英寸AlN/NPSS和(b) 4英寸HTA-AIN模板的裂纹分布图，以及基于(c) 4英寸AlN/NPSS和(d) 4英寸HTA-AIN模板所制备的UVC-LED晶圆的光学显微镜图像。

温退火工艺，我们于4英寸蓝宝石衬底上制备了500 nm高质量单晶AIN模板。作为比较，同时使用金属有机化学气相沉积(MOCVD)设备通过侧向外延的方法制备了以纳米图形化蓝宝石为衬底的4英寸AIN模板(AIN/NPSS)。HTA-AIN模板中的(002)和(102)晶面的X射线衍射摇摆曲线半高宽分别为52弧秒与197弧秒。根据马赛克模型估计总位错密度约为 $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，结晶质量足以胜任后续高性能UVC-LED的外延需求。在生长UVC-LED结构之前，我们先利用MOCVD在两种AIN模板上同质外延了200 nm厚的AIN再生层，该AIN层能够确保表面平整以适合后续UVC-LED外延。为了对表面裂纹情况进行最直观的观察，我们利用了KLA公司生产的Candela对两种类型的AIN模板表面进行了晶圆级裂纹映射，其中绿色区域表示裂纹[图1(a)和1(b)]。相比HTA-AIN，我们可以清楚地观察到AIN/NPSS存在严重的裂纹。我们依托这两种AIN模板生长了UVC-LED结构，其中包括AlGaIn缓冲层、

图2. (a)纳米图形化蓝宝石衬底，(b)平片蓝宝石衬底上外延AIN模板，以及(c) HTA-AIN制备过程的示意图。(d) AlN/NPSS和(e) HTA-AIN的(105)晶面倒易空间XRD衍射图谱。无应变状态的AIN倒易格点位置已用星形标注。

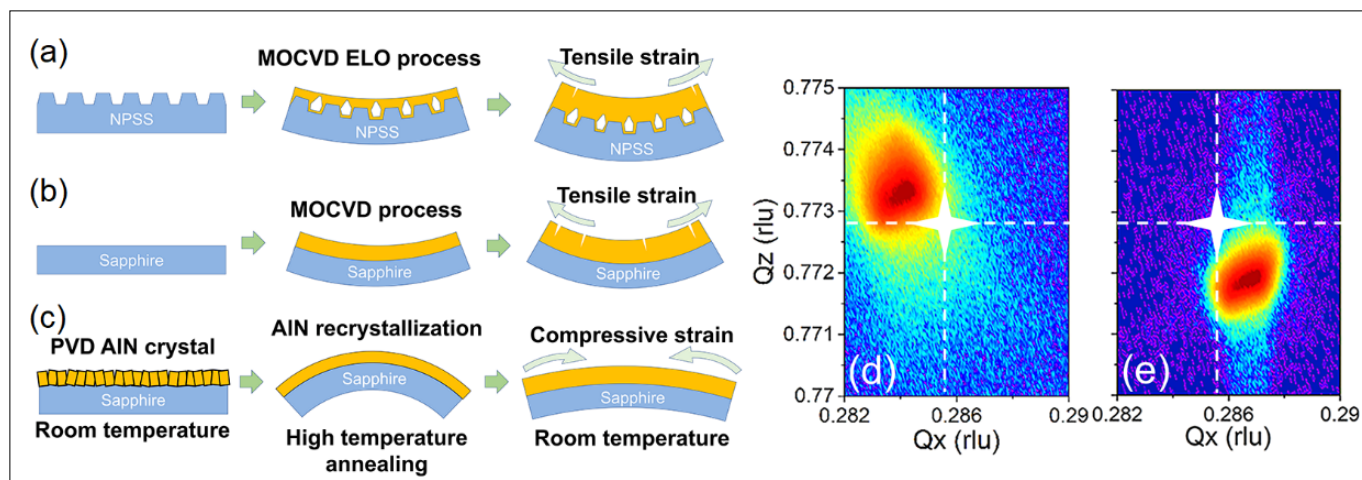
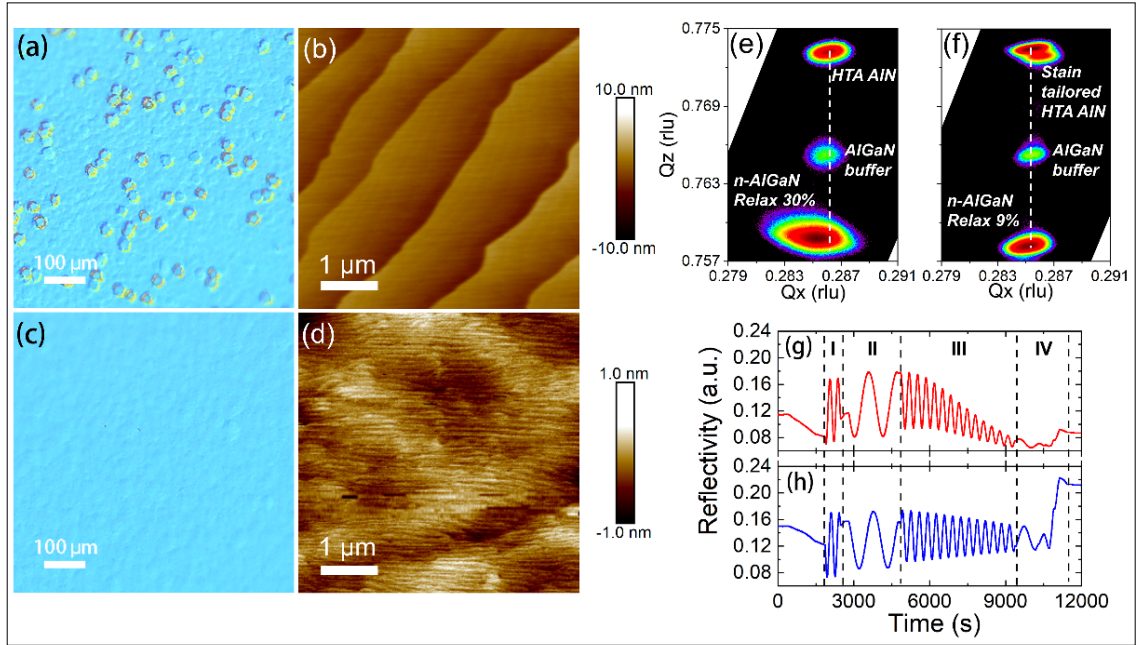


图3. (a)(b)(e)(g)未应变调制和(c)(d)(f)(h)经过应变调制的HTA-AIN上的UVC-LED晶圆的(a)(c)光学显微镜图像;(b)(d)原子力显微镜图像;(e)(f) X射线(105)晶面倒易空间图谱与(g)(h)生长过程反射率曲线。UVC-LED外延过程中相应的不同阶段用虚线分隔。I区(AIN再生层)、II区(AlGaIn缓冲层)、III区(n-AlGaIn层)和IV区(MQW和p型区)。



n-AlGaIn 层、多量子阱 (MQWs) 层、电子阻断层和 p-AlGaIn/p-GaN 层, 具体结构如图 5(a) 所示。图 1(c) 为 AIN/NPSS 模板上生长的 UVC-LED 光学显微镜图像, 可以清楚的看到, AIN/NPSS 中的裂纹出现在 UVC-LED 晶圆边缘, 甚至会出现中央区域。这种裂纹是由侧向外延过程中连续的 AIN 晶粒成核和合并引入的强张应力所致, 如图 2(a) 所示。与 AIN/NPSS 相比, 由于没有空隙结构来释放张应力, 在平片蓝宝石衬底上生长的 AIN 在相同的厚度下通常会出现更多的裂纹。而对于 4 英寸高质量 HTA-AIN 模板, 如图 2(c) 所示, 我们成功地在实现高结晶质量的同时压制了裂纹的产生。如图 1(b) 与 1(d) 所示, 在 HTA-AIN 模板和以其为基础的 UVC-LED 晶圆中, 只有在距离晶圆边界小于 0.5 毫米的边缘区域存在轻微裂纹。为了量化的研究外延层中的不同应力状态, 我们对 AIN(105) 晶面进行了 X 射线衍射倒易空间扫描测试 (RSM), 结果分别如图 2(d) 和 2(e) 所示。无应变状态 AIN 的  $Q_x$  和  $Q_z$  值分别应为 0.2858 和 0.7730, 相关位置已在图中标记。根据布拉格定律,  $Q_x$  值与面内晶格常数  $a$  成反比。可以看出, HTA-AIN 的衍射峰位置较无应变 AIN 具有更大的  $Q_x$  值与更小的  $Q_z$  值, 表明其存在强压应力。相反, AIN/NPSS 呈现较小的  $Q_x$  值和较大的  $Q_z$  值, 表明其承受较强的张应力。

我们利用 MOCVD 在 HTA-AIN 模板上同质外延了 AIN 薄膜, 并利用原子力显微镜 (AFM) 观察了其表面形貌。图 3(b) 中可以看到台阶聚并表

面形貌, 表面粗糙度约为 3 nm。尽管 HTA-AIN 的结晶质量和表面形貌都能够满足后续 AlGaIn 层的外延要求, 但其存在的压应力依然对后续的 AlGaIn 生长构成了严峻的挑战。由于螺旋型和混合型位错有助于在初期生长中形成螺旋形岛状台阶, 而 Ga 原子较 Al 原子有更大的扩散能力和结合效率, 因此 AlGaIn 层呈现出六角丘结构的表面形貌并出现严重的组分偏析, 而这种现象在压应力的驱使下进一步加剧, 导致随后的 UVC-LED 外延中发生严重的表面粗糙化, 结果如图 3(a) 所示。值得注意的是, n-AlGaIn 层的生长模式是影响后续量子阱外延的关键因素。一方面, 岛状生长模式在 n-AlGaIn 层生长过程中引入了大量的位错, 其结晶质量也会随着厚度的增加不断恶化。新产生的位错在多量子阱 (MQWs) 区会成为非辐射复合中心从而降低发光效率。另一方面, 随之发生的严重晶格弛豫进一步降低了多量子阱区 TE 偏振模式的出光 (垂直于 c 面), 进而降低光提取效率。在本实验中, 如图 3(e) 中 (105) 晶面的 XRD 倒易空间衍射图所示, n-AlGaIn 的弛豫度约为 30%。而如图 3(g) 所示, 根据外延过程中原位记录的反射率曲线所示, 反射率曲线振荡平均强度和振幅均迅速下降, 说明其表面形貌正在不断发生恶化。

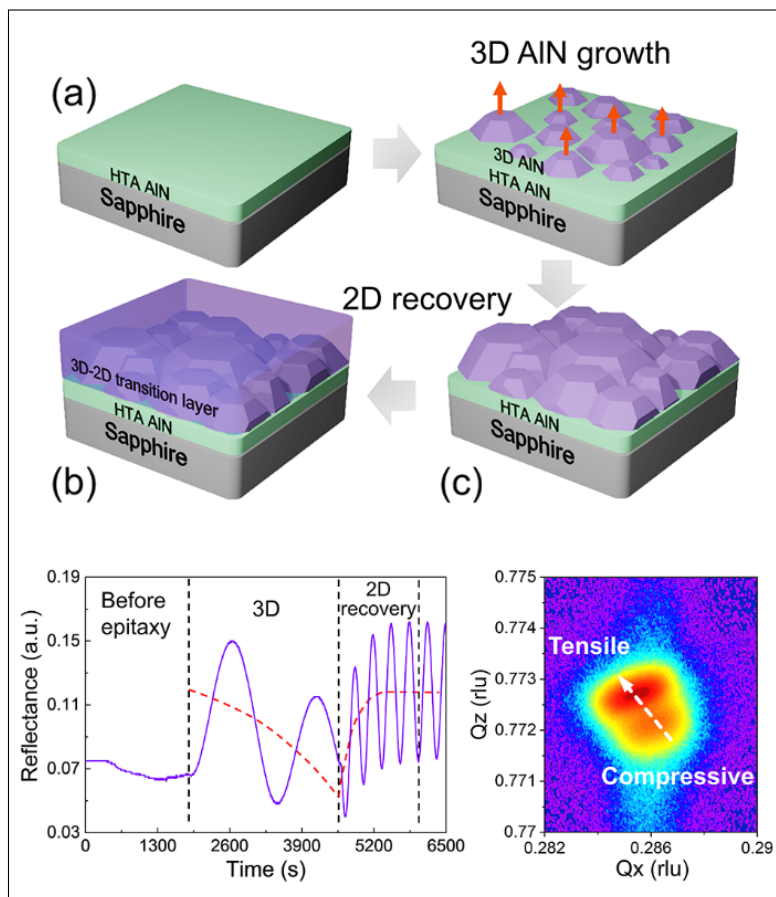
从上述讨论中, 我们可以得出结论, 如何精准控制应变是解决 n-AlGaIn 裂纹产生和表面形貌恶化的关键所在。在此, 我们提出在 HTA-AIN 模板上构建一个 3D-2D 应力过渡层, 以使得 n-AlGaIn



外延层以及 UVC-LED 的表面形貌更加平整。3D-2D 过渡层生长过程示意图见图 4(a)，相对应的原位反射率曲线见图 4(b)。在三维生长阶段，大量的 AlN 晶粒同质外延生长在 HTA-AlN 模板表面。由于这些引入的 AlN 晶粒在结晶取向上与 HTA-AlN 模板保持高度一致，因此即使当小的 AlN 晶粒通过长大合并成较大的晶粒时，AlN 依然可以保证很好的结晶质量。由于三维生长过程导致表面粗糙，因此在此阶段表面反射率不断下降，正如图 4(b) 所示。在随后的二维生长模式中，在此前三维生长过程中引入的 AlN 晶粒开始相互聚合，表面恢复平整，因此表面反射率强度逐渐上升。

为了证实此方案的效果，我们测试了应力调制后 HTA-AlN 的 (105) 晶面 X 射线倒易空间衍射图。如图 4(c) 所示，AlN 衍射峰向张应变的方向发生了移动，并且衍射峰宽并未出现明显的变化。经过过渡层应力调制后的 AlN 模板 (002) 与 (102) 晶面的 X 射线衍射摇摆曲线的半高宽分别为 58 弧秒与 237 弧秒。与直接在 HTA-AlN 模板上进行 AlN 再生长后所展现的台阶聚并形貌不同，引入 3D-2D 过渡层后，AlN 表面转变为台阶流形貌 (表面粗糙度 = 0.2 nm)，其结果如图 3(d) 所示。该结果证实了我们的方案能成功地在保证晶体质量的前提下调整应力状态。

通过调制应力，我们实现了具有平整表面的 UVC-LED 晶圆，结果如图 3(c) 所示。图 3(f) 所示的 (105) 晶面 X 射线衍射倒易空间衍射图则向我们展示了在应力调制后的 HTA-AlN 模板上生长 n-AlGaIn 的晶体状态。可以观察到，n-AlGaIn 衍射峰的展宽程度与 AlN 衬底衍射峰接近，同时比未进行应力调制的参考样品衍射峰展宽更小 [图 3(e)]。从衍射图中可以计算出 n-AlGaIn 弛豫度仅为 9%。因此 n-AlGaIn 具有优异的晶体质量。图 3(g) 和 3(h) 分别显示了在应力调制与未应力调制 HTA-AlN 模板上外延生长全结构 UVC-LED 的原位反射率曲线。在图 3(h) 所示的 III 区 (n-AlGaIn 生长部分)，引入应力调控样品的反射率曲线呈现出稳定的振荡和较大的平均强度，表明 n-AlGaIn 层生长时具有平整的表面结构。而未经应力调制的 HTA-AlN 的反射强度则持续下降，表明 n-AlGaIn 层的表面随着生长过程逐渐粗糙 [图 3(g)]。因此，在 3D-2D 过渡层的辅助下，我们实现了具有平整表面的 4 英寸 UVC-LED 晶圆。



为了证明 UVC-LED 的外延质量，我们利用高角环形暗场扫描透射电子显微镜 (HAADF-STEM) 对其进行了表征，结果如图 5(b) 所示。在多量子阱区域，浅色和深色区域分别代表量子阱和势垒，透射电镜图片清楚的展示了量子阱和势垒的厚度分别为 2 和 11 nm。在扫描观察区域内并未观察到位错。此外，量子阱和势垒区之间的原子尺度锐利的界面则证明了多量子阱区的优异外延质量。

尽管基于应变调制的 HTA-AlN 模板的 4 英寸 UVC-LED 具有广阔的前景，但其依然存在不足。AlGaIn/AlN 与蓝宝石衬底之间存在的晶格失配和热失配使得外延片存在严重的翘曲 (~200  $\mu\text{m}$ )。而如此大的晶圆翘曲在 MOCVD 的外延过程中将会导致晶圆区域温度与流场的不均匀，此现象在大晶圆尺寸条件下更为明显。此外，大翘曲直接增加了 UVC-LED 流片过程中的困难，如真空吸片和光刻中的对焦步骤。因此，如何减少晶圆翘曲被认为是 UVC-LED 能否与传统蓝光 LED 芯片工艺实现兼容的重要瓶颈之一。在此，我们提出了在蓝宝石衬底背面图案刻蚀的方案，并通过线性刻蚀成功地将晶圆翘曲降至 ~150  $\mu\text{m}$ 。

图 4. (a) HTA-AlN 上 3D-2D 过渡层生长过程的示意图和 (b) 相应的原位反射率曲线；(c) 应力调制的 AlN 模板的 (105) 晶面倒易空间图谱。白色虚线箭头标记了应变状态移动的过程。

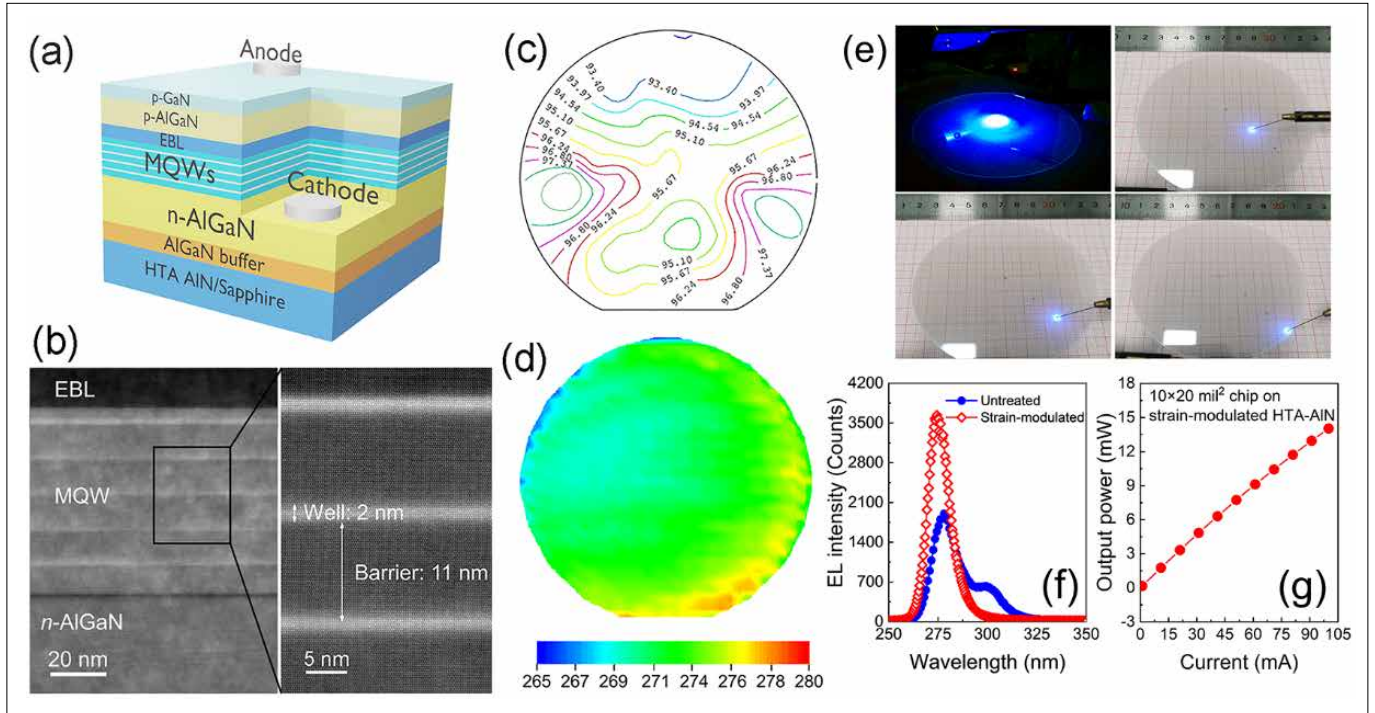


图5. (a)在4英寸HTA-AlN模板上通过MOCVD制备的UVC-LED结构示意图；(b) UVC-LED在MQWs区域的HAADF-STEM图像。5个周期的MQW区域由2 nm的Al<sub>0.45</sub>Ga<sub>0.55</sub>N阱和11 nm的Al<sub>0.52</sub>Ga<sub>0.48</sub>势垒构成；(c)方块电阻分布图(单位: Ω/sq)；(d) PL波长分布图(单位: nm)和(e)应变调制HTA-AlN模板上4英寸UVC-LED晶片的EL照片；(f) HTA-AlN模板上倒装UVC-LED芯片的EL发光光谱和(g)输出功率曲线。

众所周知，UVC-LED的伞状翘曲源自外延冷却过程中AlN/AlGaIn外延层和蓝宝石衬底之间的热应力。我们在蓝宝石衬底的背面沿着径向方向引入一条划痕，所产生的划痕间隙能够有效释放应力。尽管蓝宝石衬底并未被完全被切开，但晶圆翘曲仍然被部分缓解，同时优异的AlN晶体质量得到了有效保持。该方案对改善工艺和进一步推动用于大尺寸UVC-LED晶圆的HTA-AlN模板具有很大帮助。

为了证明所制备4英寸UVC-LED晶圆性能均匀性，我们测量了片内电阻和光致发光光谱。图5(c)所示的结果证实了4英寸UVC-LED晶圆具有优异的电学均匀性，其平均方阻值为95 Ω/sq，不均匀性约为1%。该结果保证了晶圆内LED芯片具有稳定的工作电压和电学均匀性。此外，如图5(d)所示，通过光致发光测试晶圆的发光波长，我们发现在中心位置的发光波长为275 nm，波长的片内标准差为2 nm，从而证明了4英寸UVC-LED外延片出色的发光均匀性。为了直观地测试4英寸UVC-LED的电致发光特性，我们测量了晶圆的电致发光光谱，如图5(e)所示，我们沿着径向方向随机选择晶圆上四个点进行测试。可以看出，所测试的位置均出现明显的紫外发光，该结果定性的证明了其发光均匀性。图5(f)显示了在经过应变调控和未经应变调控的HTA-AlN模板上制备UVC-LED的电致发光光谱，

未引入应变过渡层的样品显示出双发光峰的特性，这是由于多重量子阱区中的AlGaIn中存在组分偏析，而经过应变调控的样品则显示出单峰发射特性。此外，未经应力调控的样品的输出功率远低于应力调控的样品。图5(g)则展示基于应力调控样品UVC-LED所组装的10×20 mil<sup>2</sup>芯片的功率-电流输出曲线图，在100 mA的正向电流下，在275 nm的波长处可获得14 mW的输出功率，其发光波长半高宽低至11 nm。

结论

通过在HTA-AlN模板上引入3D-2D AlN应力过渡层，成功地实现了无裂纹的4英寸高功率UVC-LED的外延制备。这一方法解决了目前基于HTA-AlN模板UVC-LED最具挑战性的问题：由强压应力引起的表面粗糙化。此外，通过“背面刻蚀”的方法，我们成功地将由AlGaIn和蓝宝石衬底之间的热失配引发的晶圆翘曲降低了近25%。本工作所实现的4英寸UVC-LED将通过降低成本和提高良率的方式来促进UVC-LED的普及。

该工作受到了北京市卓越青年科学家计划、广东省基础与应用基础基金和国家自然科学基金的资助。

原文刊载于 *Advanced Functional Materials*, 链接: <https://doi.org/10.1002/adfm.202112111>

# HVPE 制备垂直 GaN *p-n* 二极管

## 一种利用 HVPE 连续生长垂直 GaN *p-n* 二极管的镁掺杂新方法

日本名古屋大学 (Nagoya University) 的工程师们声称, 他们已经利用 HVPE 技术制造出了第一批 GaN *p-n* 二极管。HVPE 是一种结合了高的生长率和无碳源的技术。

该团队发言人大西和树 (Kazuki Ohnishi) 表示, 由于从 MOCVD 转换到 HVPE, 这项工作可以降低垂直 GaN 功率器件的生产成本。“据我们估计, 用 MOCVD 制造 4 亿块 6 英寸的晶片将花费 5300 亿美元, 但用 HVPE 可以减少到 760 亿美元。”

目前, 订购 HVPE 反应器的公司可以获得定制工具, 主要用于研究。然而, 如果需求上升, 由于对这种生长技术的更大兴趣, 它可能会推动反应器的发展, 以实现大批量生产。

也可以通过 HVPE 生长 *n* 型区域, 然后通过 MOCVD 生长 *p* 型层来生产 GaN *p-n* 二极管。然而, 这种混合方法的缺点是, 它倾向于在界面产生硅杂质, 从而导致二极管的电气性能变差。通过使用 HVPE 连续生长, Ohnishi 和同事避免了在 *p+n* 界面产生硅积累层。

来自名古屋的团队在用 HVPE 生长的、螺位错密度为  $1.7 \times 10^6 \text{cm}^{-2}$ 、载流子浓度为  $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  的自支撑 GaN 衬底上制备了该器件。在此基础上, 他们首先用 HVPE 沉积了一对掺硅 *n* 型层——最初是 200 nm 厚的 *n+* 层, 然后是 15  $\mu\text{m}$  厚的 *n* 型层, 以 3  $\mu\text{m}/\text{h}$  的速度生长, 硅浓度为  $3 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 。对于 *p* 侧, 他们添加了一个镁掺杂浓度为  $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  的 300 nm 厚的 GaN 层, 和一个 20 nm 厚的氮化镓接触层, 高掺杂。

该团队开创了垂直 GaN *p-n* 二极管 HVPE 生长的先河, 关键是开发了一种新的镁掺杂方法。早在 20 世纪 70 年代, 研究人员就已经意识到了使用镁来实现在 HVPE 生长薄膜中的 *p* 型掺杂。然而, 金属源的高平衡蒸汽压阻碍了掺杂水平的控制。

Ohnishi 及其同事通过将镁源转换为 MgO 来解决这一弱点, MgO 的平衡蒸汽压非常低, 熔点为 2800  $^{\circ}\text{C}$ 。新工艺涉及向加热的 MgO 提供 HCl 气体。反应产生  $\text{MgCl}_2$ , 这是生长过程的前驱物质。这种方法的一个担忧是, MgO 可能会引入氧杂质。

然而, 根据 Ohnishi 的说法, 这似乎不是一个问题: “幸运的是, 即使使用了氧化镁, 氧浓度也被抑制了。这一机制正在研究中, 但我们认为 *c*-面生长对氧抑制是有效的。”

他和他的同事通过以下方法从外延片中形成二极管: 使用反应离子刻蚀技术来定义 340  $\mu\text{m}$  高的台面; 通过在氮气中将样品在 700  $^{\circ}\text{C}$  下退火 5 分钟来激活镁受主; 在 *p+* 接触层和衬底背面分别添加 Ni/Au 阳极和铝阴极。(见下图 1)

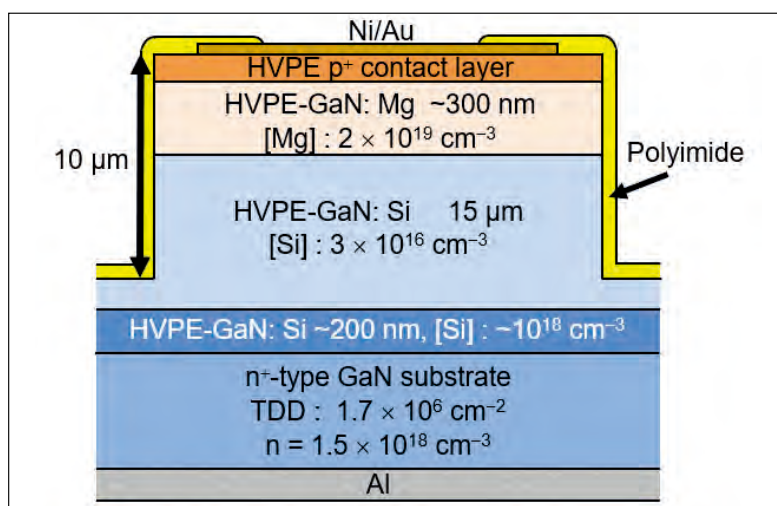


图1: HVPE的使用消除了混合生长方法在界面处形成的硅积累层, 从而改善了*p-n*垂直GaN二极管的性能。聚酰亚胺层提供钝化。

二次离子质谱仪显示镁的浓度从 *n* 型 GaN 漂移层的  $5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  急剧增加到 *p-n* 界面附近的 *p* 型漂移层的  $1.9 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 。这表明 HVPE 能够产生陡峭的 *p+n* 界面。

器件的电流 - 电压曲线显示, 由于界面硅的抑制, 器件的理想因子为 1.6, 低于 MOCVD 和 HVPE 组合形成的 *p-n* 二极管的理想因子。

Ohnishi 和他的同事现在正计划使用 HVPE 来制造其他垂直器件, 例如 MOSFET。“此外, 我们对 HEMT 也很感兴趣。”

### 参考文献

K. Ohnishi et al. Appl. Phys. Lett 119 152102 (2021)

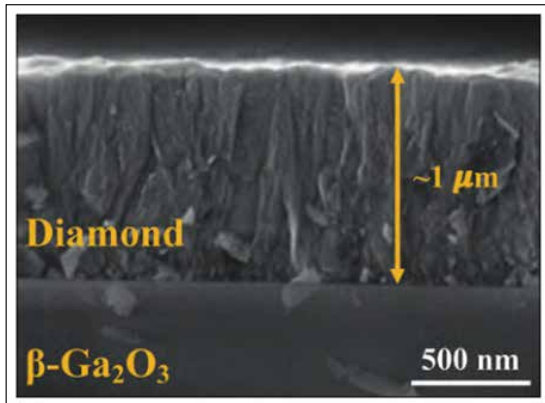
# 用金刚石层解决氧化镓导电性差的问题

—金刚石层的生长是通过高密度沉积金刚石纳米颗粒来实现的，它克服了氧化镓的低热导率。

对于  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  而言，强大的性能优势与重大缺陷相伴而生。由于超宽的带隙，这种氧化物可以承受非常高的电场，使其有可能超越由 SiC 和 GaN 制成的器件。与这两个竞争对手不同的是， $\text{Ga}_2\text{O}_3$  适合大块材料的熔体生长。然而，由于缺乏 p 型掺杂，及其导热系数通常只有  $11\text{--}27\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ ，因此对其应用带来了很大的阻碍。

美国最近的一项合作有望解决热导率低问题，该合作通过在  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  层上直接沉积一层高导热系数层（本例中为金刚石）而开辟了新的领域。

TAM 发言人、斯坦福大学的 Srabanti Chowdhury 强调了这一突破的重要性，他告诉《化合物半导体》，改进热提取对于  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  电力电子和射频器件性能的提升至关重要。但是，这种散热管理必须在这两种应用中都具有成本效益，尤其是对电力电子产品而言。



通过添加一层薄薄的  $\text{SiO}_2$  和金刚石纳米颗粒的聚合辅助形核下，实现了在  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  上生长金刚石层。

成本限制阻碍了大面积单晶金刚石晶片的使用，这些晶片价格昂贵，尺寸和可获得性有限。同样值得注意的是，这种形式的金刚石并不能带来最好的效果。通过在  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  上放置小块单晶金刚石（通常尺寸仅为  $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ）构建的结构边界热阻约为  $60\text{ m}^2\text{ K GW}^{-1}$ 。当将剥离的  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  转移到单晶金刚石上时，也获得了类似的数值，但对于美国团队生产的以多晶金刚石为特征的结构，边界热阻仅为  $30\text{ m}^2\text{ K GW}^{-1}$  左右。

“我们测得的金刚石 -  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  边界热阻与 GaN

上 CVD 生长金刚石的边界热阻相当，具有大致相同的氮化硅介电层，这是一个非常有希望的结果，” Chowdhury 兴奋地说道。

来自斯坦福大学，宾夕法尼亚州立大学，乔治亚理工学院和加州大学戴维斯分校的团队必须开发一种生长金刚石层的新工艺。这是因为通过微波等离子体 CVD 直接生长金刚石层会导致衬底分解。

为了解决这个问题，研究人员调研了实现高密度形核的三种不同方法：纳米颗粒在溶液中的超声波处理、滴种和聚合物辅助形核。

超声波形核未能实现连续的金刚石层。金刚石纳米颗粒易于团聚，导致  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  表面不受等离子体保护。随后其基质分解。

滴种能够沉积金刚石层，但由于形核层非常厚，它受到了不均匀性的影响。并且由于热膨胀系数的不同，一旦厚度超过  $200\text{ nm}$ ，金刚石就会分层。

聚合物辅助形核的效果最好。研究人员开发了一种自组装方法，在加入具有正 Zeta 电位的纳米颗粒之前，使用这种聚合物制备具有负静电的表面。这就在表面填充了密度超过  $10^{12}\text{ cm}^{-2}$  的纳米颗粒。然而，由于  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  在氢等离子体中的高分解速率，氢离子有可能穿过纳米粒子，对氧化物表面造成破坏。为了防止这种情况，研究小组在  $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$  和金刚石纳米颗粒之间插入了一层薄薄的二氧化硅。这样实现了金刚石层的生长。

对具有  $19\text{ nm}$  厚的  $\text{SiO}_2$  层和  $267\text{ nm}$  厚的金刚石层的样品进行测量，发现其导热系数为  $110\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ 。

现在将致力于在不降低  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  的性能的同时，降低边界热阻和增加多晶金刚石层的厚度。CS。

## 参考文献

M. Malakoutian et al. Appl. Phys. Express 14 055502 (2021)

## GaN HEMT 与 SiC SBD 的集成原型单芯片

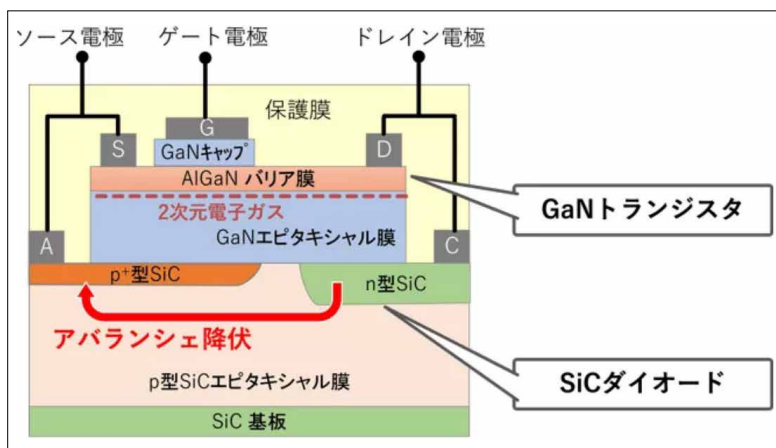
近日日本先进工业科学技术研究所 (AIST) 宣布, 他们成功开发了全球首款 GaN HEMT 与 SiC SBD 的集成原型单芯片。

据介绍, 该混合晶体管实现了正向低导通电阻 (GaNHEMT 的优势) 和高反向击穿能力 (SiC 二极管的优势), 因此有望应用于高可靠性的电动汽车和光伏发电等领域。

近年来, 全球变暖是人类的行为造成地球气候变化的后果。“碳”就是石油、煤炭、木材等由碳元素构成的自然资源。“碳”耗用得多了, 导致地球暖化的元凶“二氧化碳”也制造得多了。随着人类的活动, 全球变暖也在改变 (影响) 着人们的生活, 带来越来越多的问题。要实现碳中和, 电源转换器必须比现在的更高效、更小、更可靠。因此, 电源转换器的功率晶体管需要进一步的技术创新。功率晶体管用作开关时, 需要三个性能提升: (1) 低导通电阻; (2) 高速开/关性能; (3) 具备非破坏性击穿能力。对于主流的硅晶体管来说, (1) 到 (3) 的性能几乎达到了材料的极限, 因此, 需要使用 GaN、SiC 等宽禁带半导体来超越硅极限。

GaN HEMT 具有高电流密度、快开关速度和低导通电阻等优点, 但是, 由于源极和漏极之间没有 PN 结, GaN HEMT 没有体二极管, 因此其雪崩能力差。器件在阻断状态下, 当漏端电压超过器件的额定耐压时, 会引起器件本身以及系统的安全性和可靠性问题, 给实际应用造成了很大不便。为解决 GaN HEMT 的可靠性问题, AIST 进行了混合晶体管的研究和开发—在同一衬底上, 将 GaN 晶体管和 SiC 二极管集成在一起 (即单片化)。

AIST 已经成功地进行了原型设计, 并确认该小尺寸原型器件 (额定电流约 20 mA) 已经可以可靠运行。首先在 SiC 衬底上生长 p 型 SiC 外延膜。接着, 通过离子注入形成由 p+ 型 SiC 和 n 型 SiC 构成的二极管结构。然后, 通过在它们的顶部外延生长三层膜, 即 GaN 外延层、AlGaIn 势垒层和 GaN 帽层来制造 GaN 晶体管结构。



该原型器件的横截面示意图

通过这种方式, AIST 成功地将 SiC 二极管和 GaN 晶体管进行单片化集成。其中, p+ 型 SiC 上的阳极与 AlGaIn 势垒层上的源极相连, n 型 SiC 上的阴极与 AlGaIn 势垒层上的漏电极相连, 形成三端混合晶体管。这个原型具有 4 个好处:

首先, 击穿电压更高。通常, GaN 晶体管很容易被击穿破坏。但是, 在 AIST 制造的混合晶体管中, 通过将 SiC 侧的耐压设计为略低于 GaN, 从而获得了 SiC 二极管中的非破坏性雪崩击穿, 击穿电压约为 1.2 kV。

其次, 由于具备非破坏性击穿能力, 通过多次实验可以确认, 该原型具备稳定和可逆的击穿操作。

第三, 导通电阻更低。由于电流流过具有高迁移率的二维电子气, 因此该原型具备 300 mA/mm 的高漏电流和 47 Ωmm 的低导通电阻。

第四, 散热更好。由于碳化硅的热导率是硅的三倍, 因此优异的散热特性也是该混合晶体管的一个特点。

AIST 认为, 该器件技术有望提高电源转换器的效率和可靠性, 他们接下来计划开发可用于实际转换器的大尺寸器件 (额定值 10A 或更高)。

Advertiser	广告商名称	网址	页码
Evatec AG		www.evatecnet.com	11
列真株式会社		http://lazin.jp	2
Riber		www.riber.com	IFC

## 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  
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,  
CV56SP, UK  
Tel: +44 (0)1923 690200

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)**  
**Shenzhen (深圳)**  
Jenny Li (李文娟)  
jennyl@actintl.com.hk  
Gavin Hua (华北平)  
gavinh@actintl.com.hk  
Tel: 86-755-2598 8571  
**Shanghai (上海)**  
Hatter Yao (姚丽莹)  
hattery@actintl.com.hk  
Amber Li (李歆)  
amberl@actintl.com.hk

Linda Li (李承珍)  
lindal@actintl.com.hk  
Tel: 86-21-6251 1200

**Beijing (北京)**  
Cecily Bian (边团芳)  
cecilyb@actintl.com.hk  
Tel: 86-135 5262 1310

**Wuhan (武汉)**  
Sky Chen (陈燕)  
skyc@actintl.com.hk  
Tel: 86-137 2373 9991

Eva Liu (刘婷)  
eval@actintl.com.hk  
Tel: 86-138-8603 3073  
Grace Zhu (朱婉婷)  
gracez@actintl.com.hk  
Tel: 86 159 1532 6267

**Taiwan, Singapore, Malaysia (台湾, 新加坡, 马来西亚)**  
Floyd Chun (秦泽峰)  
floyd@actintl.com.hk  
Tel: 852 2838 6298

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

**US (美国)**  
Janice Jenkins  
jjenkins@brunmedia.com  
Tel: 724-929-3550

Tom Brun  
tbrun@brunmedia.com  
Tel: 724-539-2404

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



国际授权翻译  
国内发行高新科技杂志  
8本杂志免费送一年  
(6期/印刷版)  
包揽全年行业资讯



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



免费  
订阅

扫一扫添加  
ACT读者服务号免费订阅

雅时国际商讯 (ACT International) 成立于1998年, 为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品 - 包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动 - 为跨国公司及中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站, 以及各种技术会议, 服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体、半导体制造、洁净及污染控制等领域的约二十多万专业读者及与会者。

## ◆ 线上 ◆

### 先进封装

01月 第九届

- 三维异构集成
- WLP/ SiP/ FO/ Chiplet
- 封装结构的失效分析
- 封装新材料/工艺
- 后摩尔时代封装技术 (FOWLP, FOPLP, CHIPLET, HBM, TSV)

### MEMS

03月 第十届

- MEMS晶圆代工与封测
- MEMS新材料与工艺
- MEMS特色产品 (RF, Sensor)
- MEMS应用前景展望

### 汽车电子

05月 第十一届

- 车规级芯片测试与可靠性
- 智能网络汽车芯片
- 车联网
- 车规器件 (传感器, POWER, LED) 激光雷达, 传感器融合

### 测试&测量

07月 第十二届

- 光学检测
- 工艺缺陷分析
- 芯片故障分析
- 器件可靠性与良率

### 芯片设计

08月 第十三届

- EDA/IP/PDK生态构建
- 大规模逻辑芯片设计发展趋势
- 模拟与数模混合芯片设计趋势
- ASIC专用芯片与芯片定制兴起

### 半导体测试

09月 第十四届

- 车规级芯片检测
- SLT测试发展趋势
- 存储芯片测试发展趋势
- 半导体测试设备发展趋势

### 存储器

10月 第十五届

- 闪存市场
- 数据安全
- 量产测试
- 存储器封装
- 应用驱动存储技术发展

### 半导体供应链

11月 第十六届

- 厂务设施
- 供应链市场趋势
- 关键Parts (设备配套)
- 工艺材料 (化学品、气体)

## ◆ 线下 ◆

04月 深圳

“芯聚大湾区 一起向未来” 集成电路应用大会

05月 苏州

拓展摩尔定律-先进制造与封装技术协同发展大会

09月 厦门

先进封装与系统集成论坛

\*以上主题暂定,请以会议举办实际议题为准

