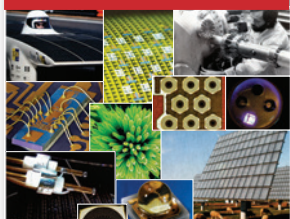


化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2025年 4/5月

标记里程碑



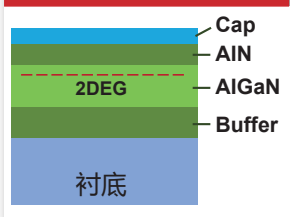
宽禁带功率器件的增长



回顾：过去30年的重大事件



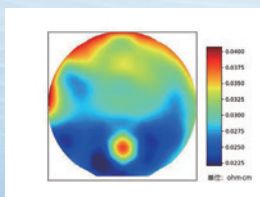
基于超宽禁带氮化物 AlN/AlGaN 异质结半导体器件的研究



碳化硅液相法电阻炉

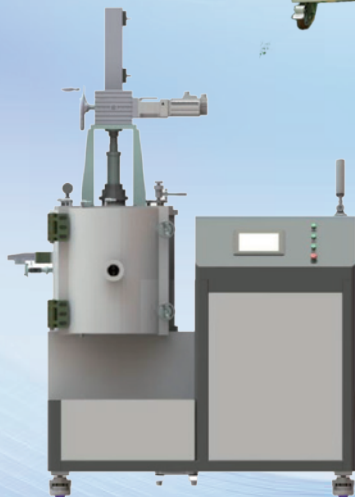


液相法晶体



籽晶粘接炉

柔性粘接——无损剥离



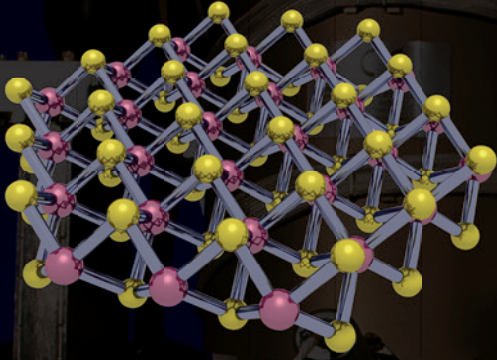
ACT INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

www.compoundsemiconductorchina.net

RIBER's COMPACT 21 SERIES



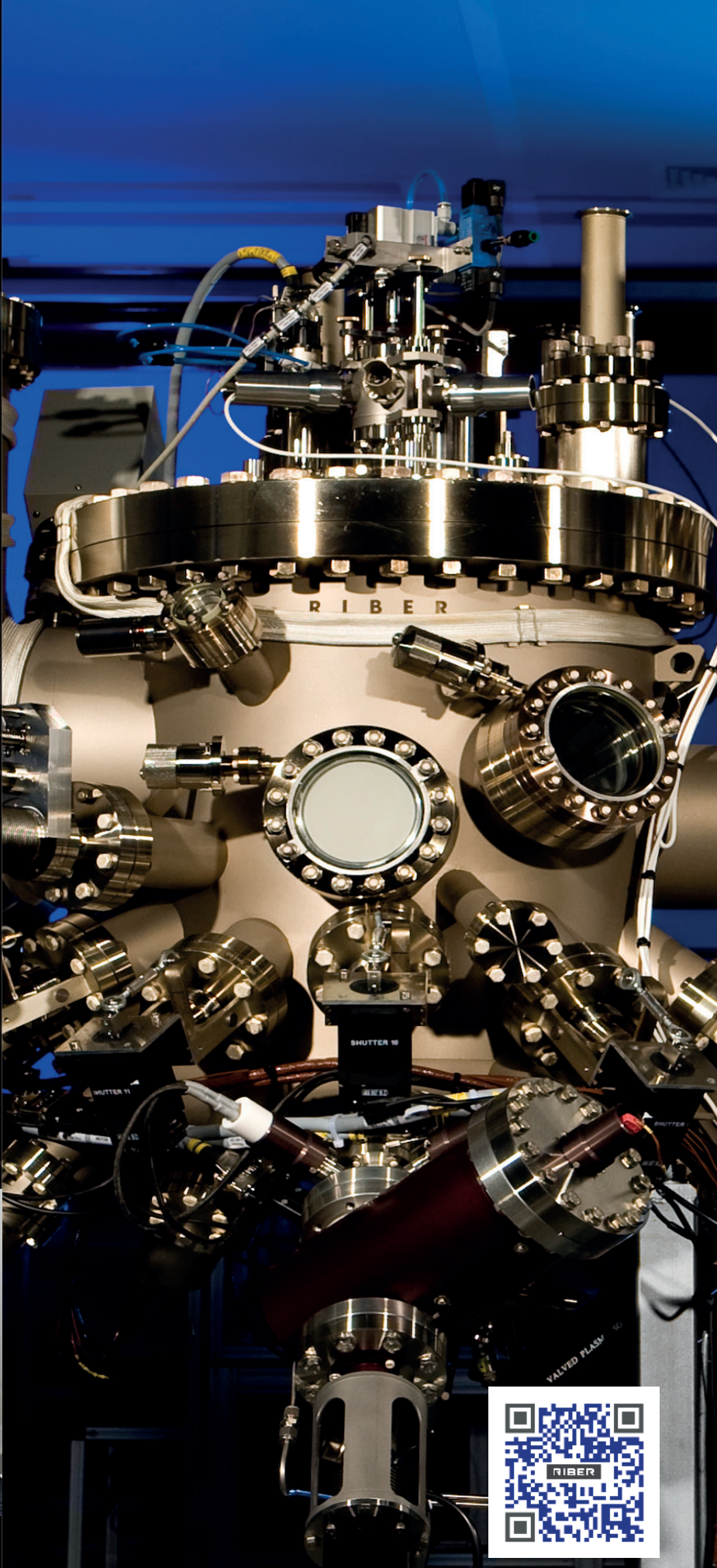
扩展您的研究 领域

小巧灵活

易于使用

高度集成

低使用成本



RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

业界引领的用于产线计量方案的 自动化原子力显微镜

展位号: E6馆 6455 



Park NX-Wafer

Park NX-Wafer是业界领先的半导体及相关制造业自动化AFM计量系统。
该系统能提供晶圆制造厂检查和分析、裸晶圆和衬底的自动缺陷检测以及CMP轮廓测量。

- 低噪声原子力轮廓仪,用于更精确的CMP轮廓测量
- 亚埃级表面粗糙度测量具有极高的精度和极长的探针使用寿命
- 用于缺陷成像和分析的全自动AFM解决方案
- 全自动系统,包括自动探针更换、机器人晶片搬运
- 4, 6, 8, 12寸全自动化测量



Watch the video

半导体薄膜物理沉积设备供应商

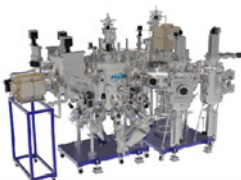
FERMI 费勉仪器

创立于2017年,提供设计开发、集成测试、售后服务等一站式供应服务平台。

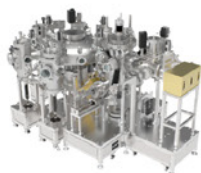
主营业务:半导体装备制造、精密零部件制造、不锈钢真空腔体焊接制造等。



MBE-800 cluster 分子束外延系统



MBE-1000 cluster 分子束外延系统



LFPC-600 真空解理和钝化系统



HLFP-800P 原子氢清洗钝化系统



PV-200C全自动磁控PZT薄膜生产线

费勉仪器科技(南京)有限公司
Fermion Instruments (Nanjing) Co., Ltd.

+86-25-5888 3672

南京市江北新区智达路6号智城园区3号楼 info@fermi.com



费勉仪器公众号



费勉仪器官网

封面故事 Cover Story

11 液相法电阻炉: 碳化硅晶体生长的革新力量, 驱动半导体产业新变革 Liquid Phase Resistance Furnace: A Revolutionary Force for SiC Crystal Growth, Driving a New Semiconductor Industry Transformation.

在半导体材料的广阔领域中, 碳化硅 (SiC) 作为第三代半导体材料的杰出代表, 正凭借其卓越的性能, 在众多关键领域掀起一场技术革新的浪潮。从新能源汽车的高效动力系统, 到数据中心的高速运算, 再到AR眼镜的沉浸式体验以及智能电网的稳定运行, 碳化硅的身影无处不在, 为这些战略性新兴产业的蓬勃发展提供了不可或缺的支持。然而, 长期以来, 高品质低成本碳化硅晶体的生长一直是横亘在行业发展道路上的一道难题, 限制着碳化硅材料优势的充分发挥。在这样的背景下, 常州臻晶半导体有限公司凭借其自主研发的液相法碳化硅电阻炉技术, 成为行业内的创新先锋, 为碳化硅晶体生长带来了全新的解决方案, 以技术专业性和市场适应性引领着行业发展的新潮流。今天, 就让我们深入探寻这款液相法电阻炉的独特魅力与强大实力。

- 常州臻晶半导体有限公司

编者话 Editor's Note

04 碳化硅衬底尺寸的选择: 理性布局而非尺寸竞赛 SiC Substrate Size Selection: Rational Planning Over Size Competition.

- 陆敏

业界动态 Industry

06 士兰微披露SiC项目最新进展, 士兰集宏8英寸线预计Q4通线 Shilan Microelectronics disclosed the latest progress of its SiC project. The 8-inch production line of Shilan Jihong is expected to be commissioned in the fourth quarter.

06 九峰山实验室GaN系列成果首次发布, 半导体领域迎来重大突破! Jiufengshan Laboratory unveils its GaN research findings for the first time, marking a significant breakthrough in the semiconductor industry!

07 SEMI报告: 2024年全球半导体设备出货金额飙升至1170亿美元 SEMI report: The global semiconductor equipment shipment value soared to 117 billion U.S. dollars in 2024.

07 意法半导体与英诺赛科签署氮化镓技术开发与制造协议 STMicroelectronics and Innoscience have signed an agreement for the development and manufacturing of GaN technology.

08 杭州镓仁8英寸氧化镓晶圆衬底震撼问世 8-inch gallium oxide wafer substrates from GAREN SEMI debut with a bang

关于雅时国际商讯 (ACT International)

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

关于《化合物半导体》

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



扫一扫
免费下载电子书

09 广纳四维、烁科晶体、国纳智造联手，加速碳化硅AR光波导量产
Guangna 4D, SEMISiC, and Guona Intelligent Manufacturing are joining forces to accelerate the mass production of silicon carbide AR optical waveguides.

10 化合物半导体市场以近13%的复合年均增长率增长，2030年市场规模将达250亿美元
Compound semiconductor market growing at nearly 13% CAGR to \$25bn by 2030

技术 Technology

15 标记里程碑
Marking milestones
- RICHARD STEVENSON, 《CS》杂志

19 宽禁带功率器件的增长
The growth of wide bandgap power devices
- POSHUN CHIU和EZGI DOGMUS, YOLE GROUP

24 回顾：过去30年的重大事件
Retrospective: Looking back at the biggest stories from the last 30 years
- RICHARD STEVENSON, 《CS》杂志

45 基于超宽禁带氮化物 AlN/AlGaN 异质结半导体器件的研究
Schottky Barrier Diodes Based on Ultrawide-Bandgap AlN/AlGaN Heterojunction
- 何溢勇、刘国梁、梁帅、肖科、樊永辉 (通信作者), 深圳市汇芯通信技术有限公司

科技前沿 Research Review

53 构建更好的多通道肖特基势垒二极管
Building better multi-channel Schottky barrier diodes

54 优化用于近眼应用的绿色LED
Optimising green LEDs for near-eye applications

55 提高双向HEMT的阻断电压
Boosting the blocking voltage of birectional HEMTs

56 广告索引 Advertisement Index

《化合物半导体》编委会 (排名不分先后)

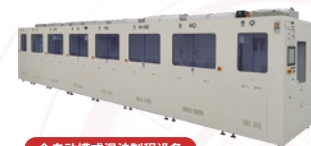
- 张国义教授 北京大学东莞光电研究院荣誉院长, 中国有色金属学会宽禁带半导体专委会顾问委员会委员
- 王新强教授 北京大学博雅特聘教授, 博导
- 孙 钱博士 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 研究院、博导、副主任
- 刘红超博士 安徽长飞先进半导体有限公司 首席科学家
- 李哲洋博士 怀柔实验室 资深技术专家 教授级高工, 博导
- 李顺峰博士 苏州半导体激光创新研究院 执行院长
- 佟存柱教授 中科院长春光学精密机械与物理研究所 常务副主任/研究
- 陈明祥教授 华中科技大学/武汉利之达科技 教授/首席专家
- 周贞宏博士 BelGaN CEO
- 张昭宇教授 香港中文大学 (深圳) 理工学院副教授 深圳半导体激光器重点实验室主任
- 孙海定博士 中国科学技术大学微电子学院 研究员、博导
- 钮应喜博士 中国科学院半导体研究所, 教授级高工
- 郑中屏博士 台湾工业研究院光电所资深研究员, 台湾鹏正光电创始人, 佛山照明LED事业部创始人

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 (CGB) 成立于2008年, 主要从事半导体、泛半导体、新材料等领域专业设备的研发、生产、销售及服务。公司研发总部位于北京亦庄经济技术开发区, 拥有河北廊坊北方生产基地和无锡华东区域服务中心。同时在日本设有研发中心, 专注于产品研发和海外市场服务。

产品应用领域包含: 集成电路 (IC)、微机电系统 (MEMS)、硅材料 (Si)、化合物半导体 (Compound Semiconductor)、光通信器件 (Optical Communication Devices)、功率器件 (Power Devices)、半导体照明 (LED)、先进封装 (Advanced Packaging)、光伏电池 (Photovoltaic)、平板显示 (FPD) 和科研 (R&D) 等。

作为国内深耕半导体湿法制程设备、全自动晶圆倒角机、全自动刷片机、干燥机、化学品供给系统等设备制造商, CGB 始终严格按照国际质量管理体系标准进行全方位和全过程的质量控制, 同时注重持续改进及创新。近年来, 荣获北京市创新型中小企业、北京市知识产权试点单位、国家高新技术企业、北京市“专精特新”中小企业等称号。未来, 我们将不断提升自主创新能力和核心竞争力, 为客户提供更加优化完善的技术服务和专业定制化解决方案。



全自动槽式湿法制程设备



单片湿法制程设备



CDS 化学品供给系统



全自动晶圆倒角机



钟罩清洗机



辅助设备



Marangoni 干燥机

北京华林嘉业科技有限公司
Beijing CGB Technology Co., Ltd

服务热线: 400-650-7658
官网网址: http://www.cgblek.com
总部地址: 北京市经济技术开发区科创十三街18号院30号楼
华东服务中心: 无锡市新吴区IC设计大厦 B1003-1004
北方制造基地: 河北·廊坊市·香河机器人产业园·3期A栋

(华东/海外区) 责任人: 139 1127 1076
(华南区) 责任人: 130 5158 6635
(西南/西北区) 责任人: 193 2206 6460
(华中区) 责任人: 180 1536 7016
(京津冀) 责任人: 130 5158 6631
(大项目部) 责任人: 139 1029 7918
(MEMS 事业部) 责任人: 180 1239 7806
(技术支持) 郭生刚: 139 1127 9276



网站

公众号

碳化硅衬底尺寸的选择： 理性布局而非尺寸竞赛

近期国内碳化硅 (SiC) 产业掀起 "12 英寸晶圆" 热潮, 部分企业将大尺寸化作为技术突破的核心指标。然而基于产业链成熟度、应用场景需求和成本效益分析, 这种 "唯尺寸论" 的思路可能陷入战略误区。

1. 功率器件市场：8 英寸晶圆的黄金平衡

Yole Développement 数据显示, 2023 年全球碳化硅功率器件市场规模约 23 亿美元, 预计 2028 年达 73 亿美元, 年均复合增长率 27%。即便在最乐观的增长预期下, 碳化硅市场规模仍不足硅半导体市场的 5% (2023 年硅基半导体市场规模约 5140 亿美元)。这种量级差异决定了碳化硅无法复制硅产业的 "尺寸进化论"。硅材料的市场体量这么大, 12 英寸晶圆都用了这么多年, 18 英寸还遥遥无期, 而碳化硅的市场规模小得多, 8 英寸晶圆已经完全能满足需求。

更重要的是, 8 英寸碳化硅晶圆的产业链还不够成熟。目前 8 英寸的材料和器件还在发展中, 而 12 英寸的设备和工艺更是几乎空白。即使未来碳化硅市场增长到几百亿美元, 8 英寸晶圆的经济性和实用性依然会是更好的选择。

2. 光学应用：6 英寸甚至更小才是最优解

再来看一个新兴的应用场景——光学应用 (比如 AR 眼镜的镜片)。这个市场的潜力确实很大, 如果未来 AR 眼镜取代手机成为主流消费电子设备, 碳化硅镜片的需求可能会超过功率器件的需求。摩根士丹利预测, 到 2030 年 AR/VR 设备市场规模将达 1.5 万亿美元, 碳化硅光学镜片需求可能突破 3000 万片/年。但与直觉相反, 大尺寸晶圆在此领域存在系统性劣势。

2.1 材料利用率低：AR 眼镜的镜片尺寸通常在 2 到 3 英寸之间, 而晶圆是圆形的。如果用 12 英寸的晶圆切割这些小尺寸镜片, 利用率反而会更低 (就像用一个大圆掏小圆, 浪费很多中间及边角料)。

2.2 工艺成本变化不大：光学应用的工艺步骤相对简单, 成本主要和面积相关 (尤其是切割成本)。大尺寸晶圆并不会显著降低成本。

2.3 光学均匀性差：光学应用对均匀性要求很高, 比如透过率、折射率和应力的均匀性。晶圆越大, 越难保证这些性能, 尤其是大尺寸晶圆中容易出现的微管和包裹物, 更会影响光学性能。

所以, 对于光学应用来说, 成熟的 6 英寸晶圆 (甚至更小尺寸) 才是最优选择。

3. 颠覆性技术路线：液相法的范式转移 - 小尺寸厚晶圆

还有一个更值得关注的方向是 "液相法" 技术。这种方法可以直接生长出符合镜片尺寸大小的厚晶圆, 比如 3 英寸、厚度超过 5 厘米甚至 10 厘米的晶圆。直接切片后几乎不需要复杂的切割等加工, 成本更低, 效率更高。这种技术可能是未来光学子应用的最佳解决方案。

4 战略启示：从尺寸崇拜到价值创造

碳化硅产业的健康发展需要摆脱 "尺寸焦虑", 建立基于场景价值的技术选择体系：

正如摩尔定律的本质不是晶体管尺寸缩小, 而是单位成本的指数级下降。碳化硅产业的突破点亦非盲目追求尺寸极限, 而在于构建与应用场景深度匹配的技术经济体系。在功率器件领域深耕 8 英寸的成熟生态, 在光学应用中拥抱小尺寸与新工艺的协同创新, 方能在全球半导体格局重塑中占据价值高地。这既需要技术理性, 更需要战略定力——毕竟, 真正决定产业未来的, 从来不是晶圆的直径, 而是技术与市场的精准咬合。

社长 Publisher
麦协林 Adonis Mak
adonism@actintl.com.hk

荣誉顾问 Honorary advisor
郝跃院士 Academician Hao Yue

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 82201291

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

ACT
INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

© 2025 版权所有 翻印必究

国际知名媒体授权 报道全球高新科技信息



免费索阅

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、电磁兼容等领域的专业读者及与会者

品牌会议



国际代理

CQ Publishing (Japan) Chomdan (Korea) Pan Global (Europe)

Endeavor Business Media (USA) Horizon House (USA) Angel Business Communications (UK)

士兰微披露 SiC 项目最新进展，士兰集宏 8 英寸线预计 Q4 通线

大半导体产业网消息，4月8日，士兰微发布公告，披露公司 SiC 项目的最新进展：

“士兰明镓 6 英寸 SiC 功率器件芯片生产线”项目

截至目前，士兰明镓已形成月产 9,000 片 6 吋 SiC MOS 芯片的生产能力。基于公司自主研发的 II 代 SiC-MOSFET 芯片生产的电动汽车主电机驱动模块在 4 家国内汽车厂家累计出货量 5 万只，客户端反映良好，随着 6 吋 SiC 芯片生产线产能释放，已实现大批量生产和交付。目前，公司已完成第四代平面栅 SiC-MOSFET 技术的开发，性能指标接近沟

槽栅 SiC 器件的水平。第四代 SiC 芯片与模块已送客户评测，基于第四代 SiC 芯片的功率模块预计将于 2025 年上量。

“士兰集宏 8 英寸 SiC 功率器件芯片生产线”项目

截至 2024 年底，士兰集宏 8 吋 SiC mini line 已实现通线，公司 II 代 SiC 芯片已在 8 吋 mini line 上试流片成功，其参数与公司 6 吋产品匹配，良品率明显高于 6 吋。士兰集宏主厂房及其他建筑物已全面封顶，正在进行净化装修，预计将在 2025 年 4 季度实现全面通线并试生产，以赶上 2026 年车用 SiC 市场的快速成长。OSc

九峰山实验室 GaN 系列成果首次发布，半导体领域迎来重大突破！

作为第三代化合物半导体材料的代表，氮化镓 (GaN) 凭借其优异的物理特性和广阔的应用前景，正在全球范围内掀起一场产业技术革命。

GaN 器件能在极端环境、在更高的频率范围下工作，同时提供更大的输出功率和更高的能量效率，已成为无线通信、卫星通信、雷达与导航、智慧医疗、物联网等高端应用发展的核心驱动力，正在达到规模化应用的临界点。

九峰山实验室成立之初就已超前布局以氮化镓材料为核心的研究，现已全方位从材料、器件到产业应用取得一系列突破性成果。它们分别是：

颠覆性材料

国际首创 8 英寸硅基氮极性氮化镓衬底 (N-polar GaNOI)

九峰山实验室科研团队在全球首次实现 8 英寸硅基氮极性氮化镓 (N-polar GaNOI) 高电子迁移率材料的制备。该成果将助力射频前端等系统级芯片在频率、效率、集成度等方面越级提升，为下一代通信、自动驾驶、雷达探测、微波能量传输等前沿技术发展提供有力支撑。

器件及设计创新

全国首个 100nm 高性能氮化镓流片 PDK 平台

九峰山实验室发布国内首个 100 nm 硅基氮化镓商用工艺设计套 (PDK)，性能指标达到国内领先、国际一流水平。作为全球第二个、国内首个商用方案，其技术指标可支撑高



九峰山实验室8英寸硅基氮极性氮化镓衬底

通量 Ku/Ka 频段低轨卫星通信，能够满足下一代移动通信、商用卫星通信与航天领域、车联网及工业物联网、手机终端等多领域对高频、高功率、高效率氮化镓器件的需求，推动我国相关领域器件从“进口替代”迈向“技术输出”。

系统级应用创新

动态远距离无人终端无线能量传输完成示范验证

九峰山实验室基于自主研发的氮化镓 (GaN) 器件，成功构建起动态远距微波无线传能系统，并在 20 米范围内实现对无人机的动态无线供能示范验证。该技术突破了传统无线充电的距离限制，解决了接收端功率波动与能量转换效率低的难题，为物流、农业、工业 4.0、智能家居等领域提供了创新性技术储备，标志着我国在高频高功率无线传能领域的探索迈入新阶段。OSc

SEMI 报告：2024 年全球半导体设备出货金额飙升至 1170 亿美元

美国加州时间 2025 年 4 月 9 日，SEMI 在其发布的《全球半导体设备市场报告》Worldwide Semiconductor Equipment Market Statistics (WWSEMS) 中指出，全球半导体制造设备出货金额 2024 年达到 1171 亿美元，相较 2023 年的 1063 亿美元增长 10%。

2024 年，全球前端半导体设备市场实现了显著增长，其中晶圆加工设备的销售额增长了 9%，其它前端细分领域的销售额增长了 5%。这一增长主要得益于在先进逻辑、成熟逻辑、先进封装和高带宽存储器（HBM）产能扩张方面的投资增加，以及中国投资的大幅增长。

在经历了连续两年的下降之后，后端设备细分领域在 2024 年强劲复苏，这主要得益于人工智能和高带宽存储器制造日益复杂的需求。封装和测试设备销售额分别增长了 25% 和 20%，这反映了行业在支持先进技术方面的努力。

SEMI 总裁兼首席执行官 Ajit Manocha 表示：“2024 年，全球半导体设备市场增长了 10%，从 2023 年的略微下降中反弹，达到了 1170 亿美元的年度销售额历史新高。2024 年芯片制造设备的行业支出反映了一个由区域投资趋势、逻辑

Semiconductor Equipment Market Revenue by Region
(U.S. Dollars in Billions)

Region	2024	2023	(YoY) %
Chinese Mainland	\$49.55	\$36.60	35%
Korea	\$20.47	\$19.94	3%
Chinese Taiwan	\$16.56	\$19.62	-16%
North America	\$13.69	\$12.05	14%
Japan	\$7.83	\$7.93	-1%
Europe	\$4.85	\$6.46	-25%
Rest of the World	\$4.19	\$3.65	15%
Total	\$117.14	\$106.25	10%

Sources: SEMI (www.semi.org) and SEAJ (www.seaj.or.jp), April 2025
Note: Summed subtotals may not equal the total due to rounding.

和存储器技术进步以及与人工智能驱动应用相关的芯片需求增加所塑造的动态格局。”

从区域来看，中国大陆、韩国和中国台湾仍然是半导体设备支出的前三大市场，合计占全球市场的 74%。中国大陆巩固了其作为最大半导体设备市场的地位，投资同比增长 35%，达到 496 亿美元，这主要得益于积极的产能扩张和政府支持

相关举措。韩国作为第二大市场，设备支出增长了 3%，达到 205 亿美元，这是因为存储器市场趋于稳定，以及对高带宽存储器的需求激增。相比之下，中国台湾的设备销售额下降了 16%，降至 166 亿美元，这反映了对新产能需求的放缓。

在其他地区，北美半导体设备投资增长了 14%，达到 137 亿美元，这主要得益于对国内制造和先进技术节点的重视。世界其他地区的销售额增长了 15%，达到 42 亿美元，这得益于新兴市场芯片生产的加速。然而，欧洲的设备支出大幅下降了 25%，降至 49 亿美元，这是由于在经济挑战下，汽车和工业领域的需求减弱。日本的销售额也略有 1% 的下降，为 78 亿美元，因为该地区在关键终端市场的增长放缓。📊

意法半导体与英诺赛科签署氮化镓技术开发与制造协议

签署氮化镓（GaN）技术联合开发协议（JDA），共同构筑面向 AI 数据中心、可再生能源发电与存储、汽车等领域的功率电子技术的未来。英诺赛科可利用意法半导体在欧洲的制造产能，意法半导体可利用英诺赛科在中国的制造产能。

日内瓦 / 苏州，2025 年 3 月 31 日 — 服务客户涵盖电子应用全领域的全球半导体领军企业意法半导体（纽交所股票代码：STM）与 8 英寸高性能低成本硅基氮化镓（GaN-on-Si）制造全球领军企业英诺赛科（香港联合交易所股票代码：02577.HK），共同宣布签署了一项氮化镓技术开发与制造协议，双方将基于该协议充分发挥各自优势，提升氮化镓功率解决方案性能和供应链韧性。

双方达成联合开发氮化镓功率技术的共识，并在未来几年内共同推动该技术在消费电子、数据中心、汽车、工业电源

系统等领域获得广泛应用的光明前景。此外，根据协议约定，英诺赛科可使用意法半导体在中国以外地区的前端制造产能生产其氮化镓晶圆，而意法半导体也可利用英诺赛科在中国的前端制造产能生产其自有的氮化镓晶圆。双方共同致力于拓展各自的氮化镓产品组合和市场供应能力，并通过增强供应链布局的灵活性和韧性，满足所有客户对多样化应用的需求。

意法半导体的模拟、功率与分立器件、MEMS 与传感器产品部总裁 Marco Cassis 表示：“意法半导体与英诺赛科均为垂直整合器件制造商（IDM），此次合作将最大化发挥这一模式的优势，惠及全球客户。一方面，意法半导体将加速氮化镓功率技术路线图，以补充现有的硅和碳化硅产品供应体系；另一方面，意法半导体还将通过灵活的制造模式服务全球客户。”

英诺赛科董事长兼创始人骆薇薇博士表示：“氮化镓技术对实现更小型化、高效率、低功耗、低成本且低二氧化碳排放的电子系统至关重要。英诺赛科率先实现8英寸硅基氮化镓晶圆量产，累计出货超10亿颗氮化镓器件，覆盖多领域市场，我们对于与意法半导体达成战略合作感到非常振奋。此次与意法半导体的战略合作将进一步扩大和加速氮化镓技术普及，双方团队将共同致力于开发下一代氮化镓技术。”

氮化镓功率器件凭借其基础材料特性，为电源转换、运动控制与驱动系统树立了性能新标杆，可显著降低损耗、提升效率、缩小体积并减轻重量，从而降低整体解决方案的成本与碳足迹。这些功率器件已快速应用于消费电子、数据中心、工业电源与光伏逆变器领域，并因其在减小体积与重量上的显著优势，正被积极引入到下一代电动汽车动力系统的设计中。OSc

杭州镓仁8英寸氧化镓晶圆衬底震撼问世

2025年3月25日，杭州镓仁半导体有限公司（以下简称“镓仁半导体”）继发布全球首颗8英寸氧化镓单晶之后，又一次取得突破性进展，基于自主创新的氧化镓单晶生长技术与大尺寸衬底加工技术，成功制备了全球首款8英寸（200mm）氧化镓晶圆衬底。我国第四代半导体氧化镓晶圆衬底率先迈入8英寸时代，不仅填补了全球氧化镓产业空白，更标志着我国在该领域实现从跟跑到领跑的跨越。

8英寸氧化镓晶圆衬底的重大产业价值

中国氧化镓率先进入8英寸时代，其产业价值可从三个维度进行体现：

其一，技术兼容性层面。8英寸氧化镓衬底与现有硅基半导体产业的8英寸制造体系形成良好适配，为产业化进程按下加速键。这种产线兼容性优势可有效缩短技术转化周期，降低企业技术升级成本。

其二，经济效能层面。衬底尺寸的升级带来显著的材料利用率提升，单片晶圆可制造芯片数量呈几何级增长，配合生产工艺优化，将推动氧化镓器件单位成本实现突破性下降，同步实现生产效率的显著提升。

其三，产业战略层面。中国在全球范围内率先攻克8英寸氧化镓制备技术壁垒，不仅标志着我国在超宽禁带半导体领域取得重大技术突破，更通过建立先发优势形成产业竞争

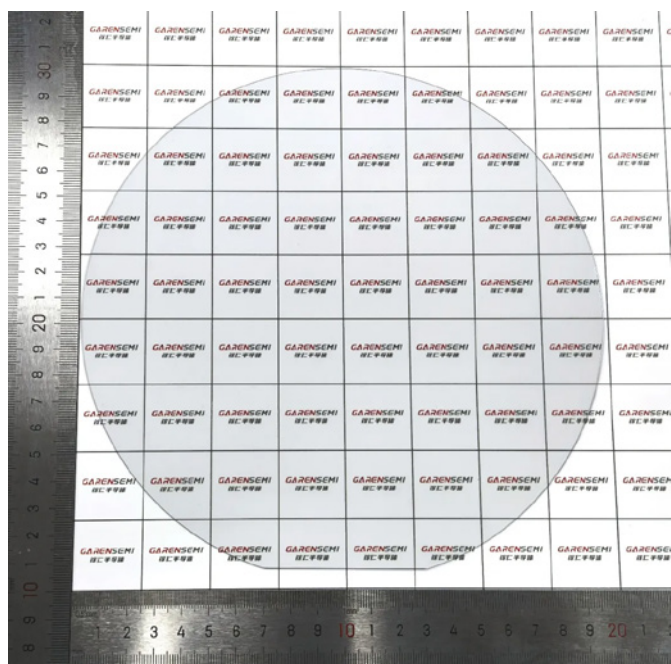


图1：镓仁半导体8英寸氧化镓晶圆衬底

护城河。这一技术跨越为我国半导体产业在全球价值链重构中掌握关键话语权，为构建自主可控的半导体产业生态奠定坚实基础。

未来，随着氧化镓应用的推广及成熟化，还有望应用于空间技术、商业航空及低空经济等前沿领域。未来，氧化镓的日盲特性、耐辐射、抗极端环境的特质将延伸至空间飞行器上的高可靠性电子器件等空间科技领域，有助于提升空间电子系统的稳定性和寿命。在商业航空方面，氧化镓的高击穿电场强度和低导通电阻特性，使其适用于制造航空电子设备中的功率器件，可赋能飞机电力系统的轻量化与高效化；基于其光电特性可制作成各种传感器，有助于提高飞机的安全性和维护效率。对于蓬勃发展的低空经济，其在无人机超快充模组、通信基础设施等方面中的应用潜力同样值得期待。当前我国已形成从晶体生长到器件设计的全链条研发体系，随着产学研协同创新和上下游联动深化，这种战略级新材料或将成为宽禁带半导体家族中闪耀的新星。OSc



图2：镓仁半导体氧化镓晶圆衬底尺寸快速演进

广纳四维、烁科晶体、国纳智造联手，加速碳化硅 AR 光波导量产

近期，广纳四维、烁科晶体、国纳智造达成战略合作，聚焦碳化硅刻蚀衍射光波导的研发与量产，旨在推动 AR 眼镜核心光学器件的国产化，加速消费级 AR 产品普及。

本次合作的核心目标是围绕碳化硅基底刻蚀制备衍射光波导镜片这一关键技术展开深度协同创新，并加速其量产落地。此举旨在提升 AR 眼镜产业链关键环节的国产化水平，为消费级 AR 产品的普及注入强劲动力。

在 AR 眼镜迈向大众消费市场的关键时期，光波导作为核心光学组件，其性能和量产能力直接影响着产品的轻薄度、显示效果以及成本竞争力。半绝缘型碳化硅 (SiC) 凭借其卓越的物理化学特性，正引领 AR 光波导技术革新，有望突破现有瓶颈。

本次战略合作充分整合了碳化硅产业链的优势环节。烁科晶体将提供高质量的碳化硅原材料，为碳化硅刻蚀光波导的量产奠定坚实的物质基础。广纳四维则凭借其成熟的衍射

光波导光学设计、先进的刻蚀工艺技术和丰富的量产经验，确保产品的性能和市场竞争能力。同时，依托国纳智造的国家级纳米技术多领域产业创新平台，将为碳化硅刻蚀光波导的规模化制造提供全面的纳米技术支持和产业协同服务。

碳化硅材料因其独特的优势，被认为是衍射光波导实现大规模量产的关键突破口。相较于传统的玻璃基底，碳化硅更高 (2.6 以上) 的折射率能够显著提升光波导的衍射效率和视场角，从而增强 AR 显示的亮度与对比度，并有望实现单片全彩显示，有效抑制彩虹纹效应，提升在户外强光环境下的显示可见性。

此外，碳化硅优异的超高热导率 ($490\text{W/m}\cdot\text{K}$) 是传统玻璃的三倍，能够快速散发高功率 Micro-LED 光引擎产生的热量，避免因热膨胀导致的光栅结构变形，保障设备的长期稳定运行。CSiC



Large stock of Molybdenum and Tantalum

All parts made according to drawings in these materials

MICRO-MECHANICS ON STRATEGIC MATERIALS

- In stock for all vacuum and ultra vacuum applications : **Molybdenum and Tantalum screw products** (screws, nuts, rings) « Usable in Clean Rooms »
- In stock for laboratory machines : **Standard substrate support** (Molybloc)
Dimensions :
 - 1 ½ inches
 - 2 inches
 - 3 inches
 Possibility of substrate support with cavity and washer, on request and according to drawings
- Stock of platens blanks for all types of MBE from various manufacturers.
- « Usable in clean rooms » **Platens and washers** produced according to drawings.







RABOUTET SA

Avenue Louis Armand • B.P. 31 • 74301 Cluses Cedex FRANCE

T. +33 (0)4 50 98 15 18 • info@raboutet.fr

www.raboutet.fr

化合物半导体市场以近 13% 的复合年均增长率增长，2030 年市场规模将达 250 亿美元

根据市场分析公司 Yole Group 的最新市场与技术报告“化合物半导体器件行业现状”，化合物半导体器件市场正以近 13% 的复合年均增长率（CAGR）快速增长，从 2024 年到 2030 年，市场规模将增至 250 亿美元左右，超过更广泛的半导体市场。

Yole 指出，在总值为 1 万亿美元的半导体器件市场中，化合物半导体器件市场仍然只占一小部分，但在强大市场动力的驱动下，化合物半导体会成为推动市场发展的因素。Yole Group 化合物半导体活动经理 Ezgi Dogmus 博士表示：“汽车和移动出行行业的蓬勃发展推动了这一加速，电信、基础设施和消费电子也呈现出强劲的发展势头。”

在这一动态背景下，主要半导体企业对化合物技术的兴趣与日俱增。过去十年中，随着功率碳化硅（SiC）应用的快速推进，Wolfspeed 剥离了射频和 LED 业务，专注于 SiC。与此同时，意法半导体、安森美和英飞凌也扩大了对 SiC 的投资，并采用垂直整合的业务模式，以减少地缘政治紧张局势下对晶圆供应的依赖。

SiC 得到应用之后，GaN 会是下一个重大突破吗？

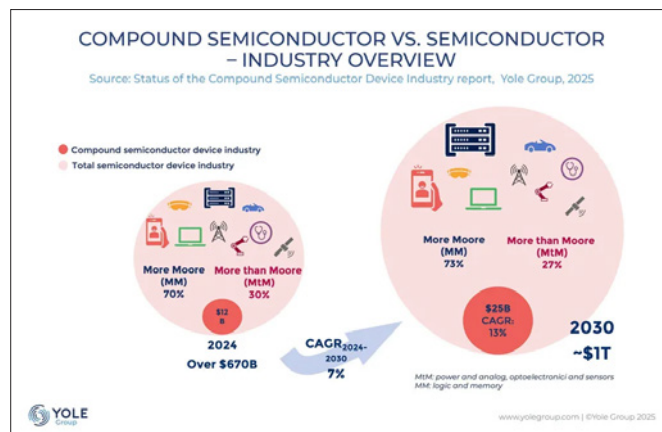
随着 SiC 的蓬勃发展（根据 Yole 的“功率 SiC——市场与应用报告，2024 版”，2029 年 SiC 市场规模预计达到 100 亿美元），原始设备制造商（OEM）对用于电力电子应用的 GaN 表现出了更浓厚的兴趣。这种兴趣导致了市场格局的变化。根据 Yole Group 的“2024 年功率 GaN 报告”，未来五年内，功率 GaN 市场将拥有强劲的复合年均增长率，2029 年市场规模有望超过 20 亿美元。

自 2025 年起，英诺赛科、Power Integrations 和纳微将在功率 GaN 市场中占据领先地位。与此同时，半导体公司英飞凌和瑞萨分别通过收购 GaN Systems 和 Transphorm 实现了非内生性增长。

Yole Group 化合物半导体高级技术与市场分析师 Poshun Chiu 指出：“它还与射频应用领域的 GaN 产生了协同效应。英飞凌、格芯等公司对硅基氮化镓进行了投资，目前正在探索利用现有设备（如外延）进行射频生产的协同效应。”

射频应用：独特的视角？

射频砷化镓（GaAs）是第一个在消费应用领域取得成功的化合物半导体，2025 年将形成一个完善的生态系统。Skyworks 在该市场处于领先地位，Qorvo 和 Murata 紧随其后，获得了消费终端系统的设计采纳。然而，地缘政治限制正促



使中国原始设备制造商发展本地生态系统。

Yole Group 化合物半导体技术与市场分析师 Aymen Ghorbel 指出：“射频 GaN 最初应用于雷达等国防领域，但在过去十年中，它已扩展到电信基础设施领域，满足了 5G 基站的要求。GaN 对卫星通信和其他用例的吸引力也在增长。”

人工智能热潮推动数据通信增长，为化合物半导体提供动力

半导体激光器推动了光子学化合物半导体行业的发展，2029 年其市场规模有望达到 50 亿美元。这些技术广泛应用于通信、传感和其他各种应用领域。随着人工智能（AI）的兴起，数据通信行业出现了显著增长，推动了市场对硅光子学的强劲需求。

Yole 分析师们发现磷化铟（InP）光子学和硅产业之间的合作越来越多。台积电等半导体巨头纷纷进入光子学领域。未来，格芯、三星等更多企业可能会逐步跟进。

micro-LED 显示器，格局分散

micro-LED 显示器行业高度分散，没有一个实体能够自始至终地监督制造。与传统的垂直整合显示器生产不同，micro-LED 制造需要独特的专业技术。

京东方、友达光电等主要显示器制造商正努力确保对 LED 供应商的控制，而初创企业和设备制造商为主要技术做出了贡献。地域联盟，尤其是中国大陆和台湾地区的联盟，正在塑造行业动态。Yole 总结道，苹果的退出减缓了融资速度，使大多数初创企业陷入困境，削弱了人们对 micro-LED 前景的信心。OSc

液相法电阻炉： 碳化硅晶体生长的革新力量， 驱动半导体产业新变革

作者：常州臻晶半导体有限公司

在半导体材料的广阔领域中，碳化硅 (SiC) 作为第三代半导体材料的杰出代表，正凭借其卓越的性能，在众多关键领域掀起一场技术革新的浪潮。从新能源汽车的高效动力系统，到数据中心的高速运算，再到 AR 眼镜的沉浸式体验以及智能电网的稳定运行，碳化硅的身影无处不在，为这些战略性新兴产业的蓬勃发展提供了不可或缺的支撑。然而，长期以来，高品质低成本碳化硅晶体的生长一直是横亘在行业发展道路上的一道难题，限制着碳化硅材料优势的充分发挥。

在这样的背景下，常州臻晶半导体有限公司凭借其自主研发的液相法碳化硅电阻炉技术，成为行业内的创新先锋，为碳化硅晶体生长带来了全新的解决方案，以技术专业性和市场适应性引领着行业发展的新潮流。今天，就让我们深入探寻这款液相法电阻炉的独特魅力与强大实力。

一、技术演进：从传统困境到创新突破

单晶炉作为碳化硅晶体生长的核心设备，其发展历程见证了无数科研人员的智慧与探索。回顾历史，早期的艾奇逊法虽然开启了碳化硅晶体生长的大门，但存在着诸多难以忽视的局限性。随后，1955 年雷利 (Lely) 法的出现，为该领域带来了新的希望，不过升华法等技术对生长效率和晶体质量方面仍有较大的提升空间。到了 20 世纪 60 年代，助熔剂法逐渐兴起，科研人员们对不同助熔剂体系展开了深入研究，试图攻克碳化硅晶体生长的难题，然而助熔剂法同样面临着溶解度、高温设备和坩埚等一系列复杂问题。

2000 年前后，偏 4 度外延技术、LPE 技术等新设备和新技术的涌现，为碳化硅晶体生长注入了新的活力。PVT 法生长技术也在这一时期逐渐

成熟，相关设备和晶片开始走向商品化。我国在这一阶段也积极投身于碳化硅晶体生长的探索，主要采用 PVT 法。但随着产业的发展，传统技术的瓶颈日益凸显，市场迫切需要一种更加高效、优质的碳化硅晶体生长技术。

常州臻晶半导体有限公司正是在这样的行业背景下应运而生。自 2020 年成立以来，公司便专注于液相法碳化硅晶体相关技术的研发，致力于打破传统技术的束缚，推动单晶炉技术的创新与发展。2021 年，公司启动碳化硅晶体的液相法生长项目，最初采用感应炉作为主要设备。但感应炉存在熔体作为发热体导致温度梯度难以调节、控温精度不高的问题，极大地限制了晶体生长的质量和效率。面对这一挑战，公司研发团队凭借深厚的技术积累和勇于创新的精神，经过无数次的实验与优化，成功研发出电阻炉。这一突破犹如一把钥匙，开启了液相法碳化硅晶体生长的新篇章，为高品质碳化硅晶体的生长奠定了坚实基础。

二、核心技术：创新驱动，突破行业瓶颈

(一) 液相法单晶炉制造技术

常州臻晶半导体自主研发的液相法单晶炉，融合了先进的设计理念与精湛的制造工艺，具有诸多创新性的设计特点。其 6-8 英寸大直径设计，能够满足不同尺寸晶体生长的多样化需求，为企业提供了更广阔的生产选择空间。更为关键的是，该单晶炉配备了多点温度实时精确监控功能，能够实现温度场的实时稳定调控。

精确的温度控制对于碳化硅晶体的生长至关重要。在晶体生长过程中，温度的微小波动都可能导致晶体缺陷的产生，影响晶体质量。而臻晶半导体的液相法单晶炉通过精准的温度控制，使



6-8英寸液相法碳化硅电阻炉

得固液界面状态能够得到实时调控，为碳化硅晶体的稳定生长提供了有力保障。与传统气相 PVT 长晶技术相比，这一技术成功解决了温度高、不可实时监控、长晶厚度薄、扩径难等一系列难题，实现了碳化硅晶体生长技术的重大突破。

（二）多元活性助溶技术

在碳化硅晶体生长过程中，碳源的供应是影响晶体生长质量和效率的关键因素之一。常州臻晶半导体的多元活性助溶技术，通过精心设计和优化助熔剂配方，有效增加了高温区碳源的供应，从而显著提高了溶碳量。

这一技术的优势不仅体现在提升晶体生长的速率上，更在于其能够有效提高晶体的良率。与传统的碳源供应方式相比，多元活性助溶技术能够实现碳源的快速持续可控供应，为碳化硅晶体的高质量生长提供了充足且稳定的碳源保障。这种精准的碳源调控，使得晶体生长过程更加稳定，减少了因碳源供应不均导致的晶体缺陷，进一步提升了晶体的品质。

（三）液相法 SiC 长时间稳定长晶工艺

液相法 SiC 长时间稳定长晶工艺是常州臻晶

半导体产品差异化的核心竞争力之一。该工艺通过精确控制生长参数，实现了碳化硅晶体的全方位可控生长。这种可控性不仅体现在晶体生长的速度和质量上，还延伸到晶体的尺寸和形状方面。

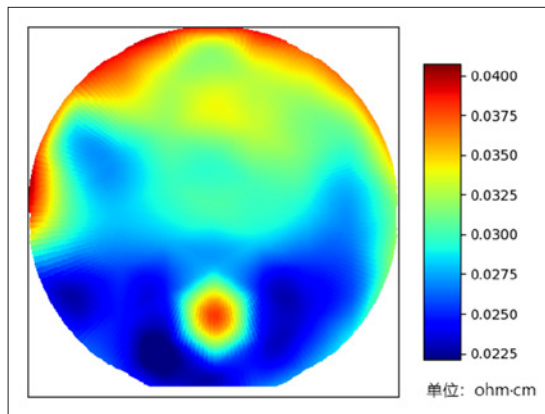
借助这一工艺，常州臻晶半导体能够生产出高品质、大尺寸、形状规则的碳化硅晶体，充分满足了市场对于高性能碳化硅材料的严格需求。此外，该工艺还具有生长效率高、能耗低等显著优点，符合当下全球倡导的低能耗发展理念，为客户降低了生产成本，提高了经济效益，在市场竞争中具备强大的优势。

三、卓越性能：满足高端需求，引领产业升级

（一）高品质晶体

常州臻晶半导体的液相法碳化硅电阻炉所生长的晶体，具备“0”微管、“极低”位错的优异品质，达到了行业顶尖水平。拉曼光谱分析结果显示，单晶 100% 为 4H 晶型，这一晶型在半导体应用中具有独特的优势，能够有效提升器件的性能。单晶 X 射线衍射摇摆曲线测试显示 FWHM 为 20 弧秒，表明晶体结构完整，缺陷极少。

这种高品质的碳化硅晶体，能够满足高端半导体器件制造对于材料的苛刻要求。在新能源汽车领域，高品质的碳化硅晶体可用于制造高效的功率器件，提升汽车的续航里程和动力性能；在数据中心，有助于提高芯片的运算速度和稳定性，满足大数据时代对数据处理的高要求；在 AR 眼镜等可穿戴设备中，能够实现更清晰、更流畅的显示效果，提升用户体验；在智能电网中，则可以增强电网的稳定性和输电效率。可以说，这些高品质晶体为战略性新兴产业的发展提供了坚实的材料基础。



6英寸液相法p型碳化硅电阻率mapping

（二）易扩径与易长厚

液相法碳化硅晶体生长技术在扩径和长厚方面具有天然的优势，这得益于其独特的生长原理、物质传输特性及热力学稳定性。常州臻晶半导体的液相法电阻炉能够轻松将晶体扩径至 8 英寸及以上尺寸，同时还能实现较厚晶体的生长，极限长晶厚度可达 6cm 以上。

大尺寸、厚晶体的碳化硅材料对于高端半导体器件及光学应用的研发和生产具有重要意义。在半导体器件制造中，大尺寸的晶体可以有效的降低材料成本，为功率器件应用打开更多的应用场景。在光学应用领域，大尺寸、厚晶体的碳化硅材料可以用于制造高性能的光学元件，满足光学领域对材料的特殊需求，为相关产业的发展开辟了更广阔的空间。

四、产品与服务：全方位支持，助力客户成功

（一）热场工艺包及服务

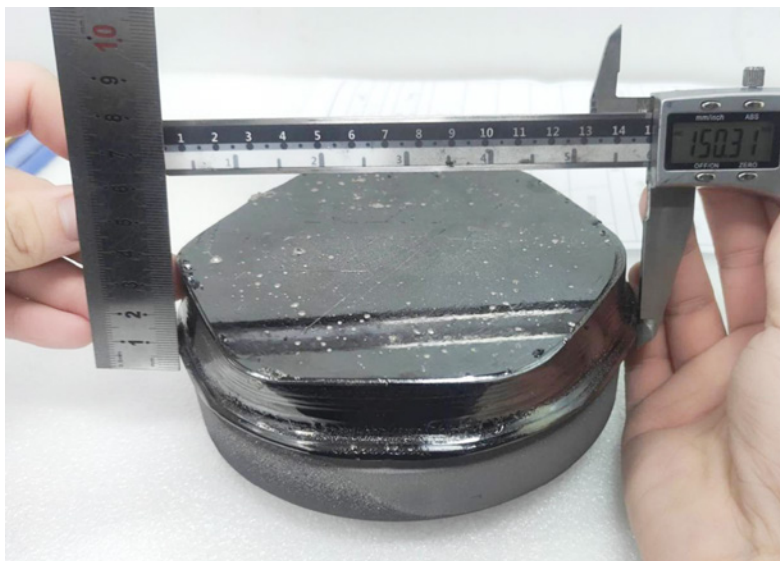
常州臻晶半导体不仅为客户提供先进的液相法碳化硅电阻炉设备，还可为客户提供专业的热场工艺包。在设备交付的同时，公司提供长晶所需的全套热场及原材料，确保客户在使用设备时无需为配套材料的选择和采购而烦恼。

公司还会安排专人到客户处，使用交付设备进行长晶演示，全程示范操作工艺。在演示过程中，同步对客户指定人员进行工艺培训，帮助客户掌握先进的碳化硅晶体生长工艺。这种手把手的教学方式，能够让客户快速熟悉设备的操作流程和工艺要点，提高生产效率。对于客户在自主长晶过程中遇到的问题，公司会及时进行评估并提供专业的解答，为客户提供全方位的技术支持，助力客户成功生产出高品质的碳化硅晶体。

（二）配套液相法籽晶粘接炉（带柔性粘接工艺包）

在液相法碳化硅晶体生长领域，常州臻晶半导体的柔性粘接工艺是一项具有创新性的技术突破。该工艺采用先进的粘接技术，确保在晶体生长完成后，能够实现零损伤地取出单晶，最大程度地保留了晶体的完整性，为后续的加工和应用提供了极大的便利。

与传统的粘接方法相比，柔性粘接工艺在晶体生长过程中能够更好地适应晶体的热膨胀和收缩，有效避免了因应力集中而导致的晶体裂纹和损伤。这种对晶体生长应力的优化改善，使得晶



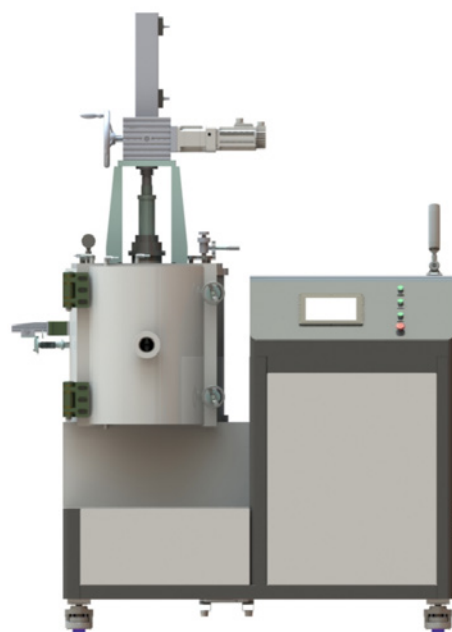
6英寸液相法碳化硅晶锭（厚度大于2cm）

体的质量和性能得到了显著提升，满足了高端半导体器件制造对于材料的严格要求。公司配套的液相法籽晶粘接炉，为柔性粘接工艺的实施提供了可靠的设备保障，进一步提升了长晶工艺的整体水平。

（三）设备售后

优质的售后服务是常州臻晶半导体的一大特色。公司拥有一支专业高效的售后服务团队，始终以服务客户为第一原则。在设备安装调试方面，公司承诺设备到达现场后 1 个工作日内安排人员进行安装调试，确保设备能够快速投入使用，减少客户的等待时间和设备闲置成本。

设备安装调试完成后 1 个工作日内，公司会提供详细的设备操作指导和操作手册，帮助客户快速掌握设备的使用方法。此外，公司还会提供设备保养指南，并对客户进行日常维护指导，延长设备的使用寿命，降低客户的设备维护成本。在故障诊断及维修方面，常州臻晶半导体提供快速响应服务，自设备验收合格之日起 1 年内，2 小时响应，8 小时反馈，第一时间为客户解决设备使用过程中遇到的问题，让客户在使用设备过程中无后顾之忧。



6-8英寸液相法碳化硅籽晶粘接炉

五、合作优势：携手共进，共创美好未来

(一) 技术领先

常州臻晶半导体在液相法碳化硅晶体生长技术方面处于行业领先地位。公司拥有一支由陆敏博士等多位资深专家组成的研发团队，他们在化合物半导体领域拥有几十年的研发及产业化经验，是行业内的顶尖人才。团队成员承担或参与了多项国家发改委、工信部、科技部重点研究计划、863、973 和国家自然科学基金等科技及产业化项目，积累了丰富的科研成果和实践经验。

公司在技术创新方面成果丰硕，申请国内发明专利 40 件，授权 30 件，起草并发布国际标准 1 项，国家标准 4 项。这些技术成果不仅体现了公司的技术实力，也为公司在市场竞争中赢得了优势。与常州臻晶半导体合作，客户将能够享受到行业内最前沿的技术成果，为企业的发展注入强大的动力。

(二) 产品可靠

产品质量是企业的生命线，常州臻晶半导体深知这一点。公司建立了完善的质量管理体系，从原材料采购到产品生产，再到最终的出厂检测，每一个环节都严格把控，确保产品的质量和性能。公司已通过 IATF16949 认证，这是对公司质量管理体系的高度认可。

常州臻晶半导体的液相法碳化硅电阻炉经过严格的质量检测和工艺验证，具有稳定可靠的性能。客户选择公司的产品，将获得高品质、高性能的设备，为生产运营提供可靠的保障，降低生产风险，提高生产效率和产品质量。

(三) 服务专业

常州臻晶半导体始终坚持以客户为中心，为客户提供专业、高效、贴心的服务。无论是设备的安装调试、操作培训，还是后期的维护保养、故障维修，公司都能够提供全方位、一站式的解决方案。

公司的服务团队具备丰富的专业知识和实践经验，能够及时响应客户的需求，为客户提供专业的建议和技术支持。此外，公司还为客户提供工艺服务支持，帮助客户优化生产工艺，提升生产效率，降低生产成本，提高产品质量。与常州臻晶半导体合作，客户将享受到专业、高效的服务体验，让企业的发展更加顺畅。

(四) 共同发展

常州臻晶半导体致力于与客户建立长期稳定

的合作关系，共同推动碳化硅半导体产业的发展。公司深知，只有与客户携手共进，才能实现互利共赢。公司愿意与客户分享技术经验，共同探索新的应用场景和市场机会。

通过与常州臻晶半导体的合作，客户将能够借助公司的技术优势和市场资源，实现企业的快速发展。同时，公司也将在与合作中不断提升自身的技术水平和产品质量，共同开创碳化硅半导体产业的美好未来。

随着半导体产业的蓬勃发展，对碳化硅材料的需求正呈现出爆发式增长的态势。在新能源汽车领域，碳化硅功率器件凭借其高效、节能的特性，成为提升汽车续航里程和动力性能的关键技术，市场对高品质碳化硅晶体的需求与日俱增。数据中心为满足海量数据处理的需求，对芯片运算速度和稳定性要求不断提高，碳化硅材料在这一领域的应用前景广阔。AR 应用和光储充等新兴产业的崛起，也为碳化硅材料开辟了新的市场空间。

常州臻晶半导体有限公司的液相法碳化硅电阻炉，凭借其创新的技术、卓越的性能和完善的服务，在市场竞争中脱颖而出，成为满足市场需求的理想选择。未来，公司将继续加大研发投入，不断优化单晶炉的性能，提高晶体生长的效率和质量，降低成本，以满足市场对高品质碳化硅衬底的不增长的需求。

同时，公司还将加强与国内外科研机构和企业合作，共同开展液相法碳化硅晶体生长技术的研究和应用。通过合作，实现资源共享、优势互补，加速液相法碳化硅晶体生长技术的产业化进程，为半导体产业的发展做出更大的贡献。

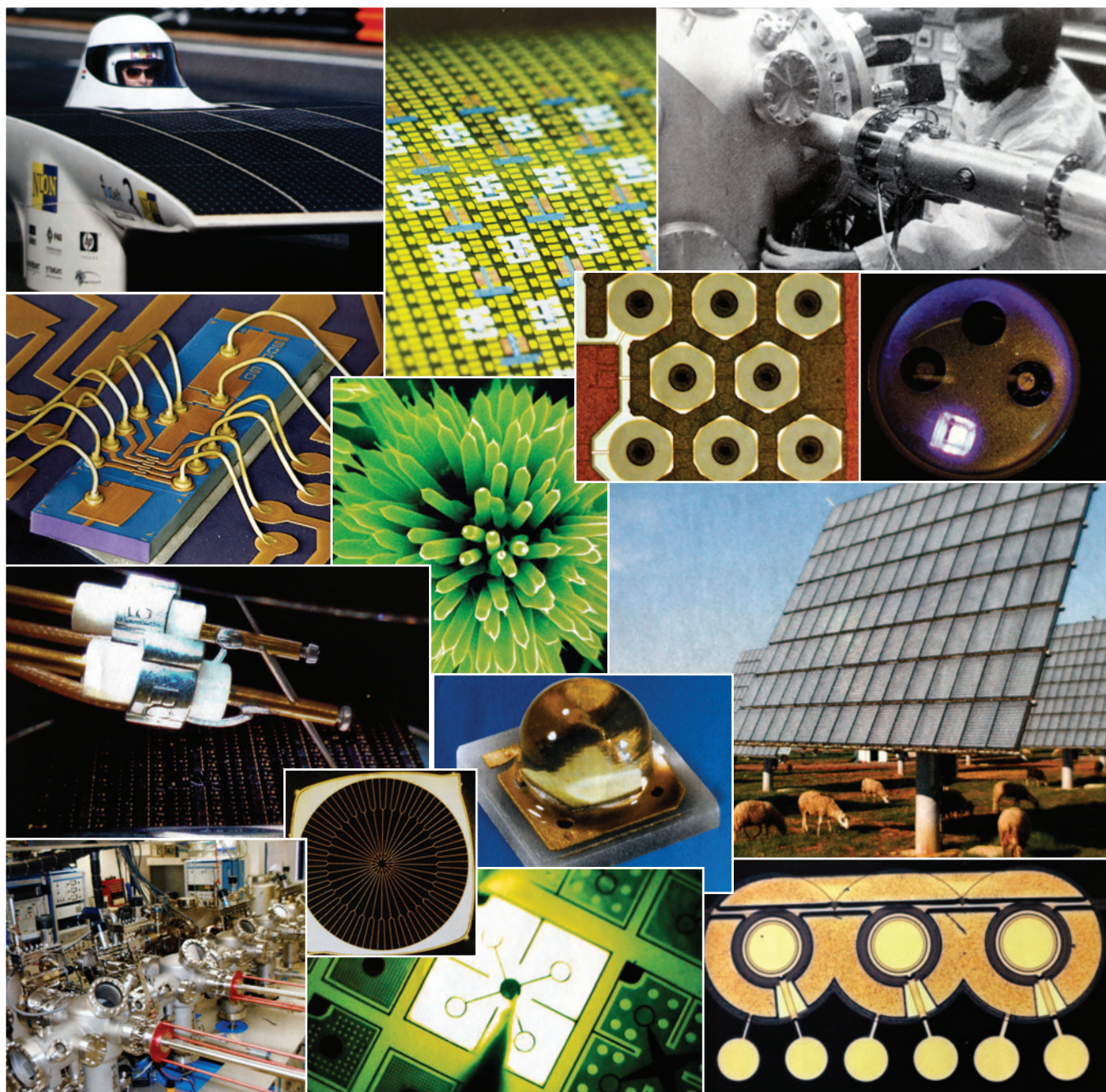
在碳化硅单晶生长的征程中，常州臻晶半导体有限公司的液相法碳化硅电阻炉已经成为行业内的标志性产品，以其独特的技术优势和创新理念，为碳化硅产业的发展注入了强大的动力。我们相信，在未来的科技舞台上，常州臻晶半导体将继续以技术创新为引领，以客户需求为导向，不断推出更加优质的产品和服务，与广大客户携手共进，共同开创半导体产业的新辉煌！

如果您对我们的液相法碳化硅电阻炉感兴趣，欢迎随时与我们联系。

地址：江苏省常州市武进区
武宜南路 377 号 19 号厂房东

联系人：蒋志强 19952805727





标记里程碑

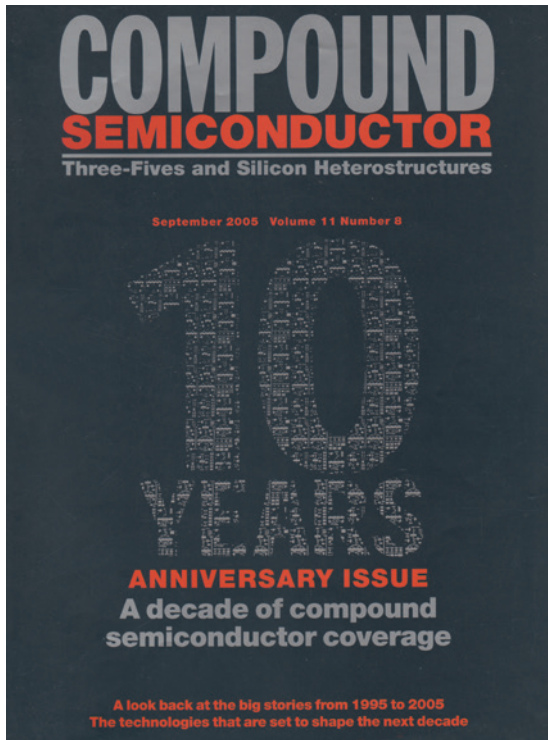
在庆祝《化合物半导体》英文版杂志创刊三十周年之际，我们回顾了两期纪念刊，这两期分别发布于创刊十周年和二十周年，以纪念这一出版物的重要时刻。

作者：RICHARD STEVENSON, 《CS》杂志

如何在一个出版物的历史上涵盖一个里程碑？尽管有许多可以采取的路径，但纪念版无疑提供了一个绝佳的机会来回顾多年来所取得的成就，同时也可以一窥未来。这一次，‘当下’可以退居二线——尽管仍然不能忽视报道一些最大的突发新闻。

《化合物半导体》英文版在其十周年纪念版发布时，我刚刚离开 IQE，开始担任特写编辑一年多。十年后，我晋升为编辑，在新出版商 Angel Business Communications 旗下，我必须决定采取何种方式，并确定该版的内容。而如今，作为三十周年纪念版的编辑——我注定要长期从事这项工作——我有幸决定包含哪些内容以及舍弃哪些内容。

由IOP 出版公司出版的十周年纪念版的核心内容是一篇详尽的特写，罗列了迄今为止每期最重要的新闻报道。



十周年纪念版

当前出版商 Angel Business Communications 与之前的所有者 Institute of Physics Publishing 的一个主要区别在于他们对页数的看法。当前出版商要求版面的页数应与广告所占空间相匹配，采用一比一的经验法则。这一规定将十周年纪念版的页数限制在不超过 40 页，限制了编辑的雄心壮志。

在这些相当繁琐的限制下，前编辑 Micheal Hatcher 回顾了《化合物半导体》英文版杂志的前十年，在几个版面中挑选出每期最重要的新闻。与这些细节并列的是一些有趣的附注：外延生长的亮点、GaAs 微电子和高亮度 LED 市场增长的概述，以及一篇简短的文章讨论 GaAs 和 CMOS 在未来手机前端中共存的潜力。

对于外延生长的亮点，《化合物半导体》英文版杂志借鉴了犹他大学 Gerald Stringfellow 的专业知识。Stringfellow 挑选了 1995 年至 2005 年间最优秀的三篇研究论文，分别涉及低缺陷密度 GaN 层的横向外延生长、稀磁氮化物的生长以及各种纳米结构材料的生长。二十年过去了，这些选择经受住了时间的考验，突出了对当今仍然重要的发展。

在创刊的前十年，GaAs 微电子和高亮度 LED 市场经历了惊人的增长。从 1995 年到 2000 年，全球 GaAs 收入从 5 亿美元飙升至 32 亿美元，

这得益于手机销量的激增以及对数字 GaAs 组件在光纤通信中的增长需求，这些组件包括激光驱动器、跨阻放大器、复用器和解复用器。但数字 GaAs 的市场并未持久——随着新千年伊始的‘互联网泡沫’破裂，光通信基础设施组件的销售受挫，而当商业机会再次出现时，基于硅和 SiGe 的产品占据了主导地位。此后，手机成为了 GaAs 微电子销售的主要部分。这一市场从 2000 年代初手机普及率的提高中受益，但又因 GaAs 器件平均售价的下降而受到打击。这两种截然相反的趋势导致从 2002 年到 2005 年全球 GaAs 微电子收入适度增长，到 2005 年底达到 25 亿美元。

与 GaAs 行业的过山车式收入相比，高亮度 LED 的销售额在 1995 年至 2005 年间稳步增长，除了 2001 年出现了一段平稳期。当时，相机闪光灯为收入增长提供了下一个机会。尽管背光屏幕和通用照明的机会也已被识别，但在 LED 能够渗透这些应用之前，性能需要显著提升。

在十周年纪念版中，Peregrine Semiconductor（现称为 pSemi）的 Rodd Novak 主张 GaAs 和 CMOS 在未来手机前端中共存，支持切换功能由 UltraCMOS 而非 GaAs pHEMT 提供。历史证明了这一基于硅绝缘体技术的开关愿景。十多年以来，提供放大功能的 GaAs HBT 主导了 GaAs 微电子行业的收入。

二十周年纪念版

其规模是十周年纪念版的两倍，二十周年纪念版为 GaAs 微电子和高亮度 LED 市场的演变留出了更多空间，同时详细回顾了创刊号的内容，并展望了未来。此外，这一纪念版还包括了对 2035 年化合物半导体器件可能部署方式的观点。

深入研究 GaAs 微电子的增长来自当时 Strategy Analytics 的董事 Eric Higham（他现在是《微波杂志》的技术编辑）。除了详细介绍了 GaAs 行业增长的基础——美国 MMIC 和微波模拟前端技术项目的结合，Higham 还解释了 2005 年至 2015 年销售额增长的原因，这主要得益于提供更高数据速率的移动网络的推出。2005 年是一个转折点，当时运营商引入了高速下行分组接入网络，点燃了数据军备竞赛。忽略 2009 年全球经济几乎崩溃导致的几乎平稳的一年，GaAs 收入在十多年中保持了上升轨迹。

市场分析师 Bob Steele，也是 Strategies in



Compound Semiconductor 的当前所有者 Angel Business Communications 出版了二十周年纪念版。这期纪念刊包括了当时顶尖分析师对砷化镓 (GaAs) 微电子和高亮度发光二极管 (LED) 市场的详细回顾。

Light 会议的创始人，为 LED 行业的演变提供了深刻的见解。他以 LED 在《化合物半导体》英文版创刊前 20 年所取得的惊人进步为开端，从在低亮度指示灯和字母数字显示器中的部署到在白光光源中的整合，而到 2015 年，白光光源已占据了 800 亿美元全球照明市场的三分之一。

像 Higham 一样，Steele 回顾了 LED 的起源可以追溯到 1907 年，当时英国无线电工程师 Henry Joseph Round 在研究金属-半导体 SiC 整流器的电气特性时偶然发现了这一装置。自那时以来的许多关键里程碑中，肯定有两个最大的是 1962 年 Nick Holonyak 及其在 GE Labs 的团队发明了第一个可见 LED，以及 1993 年 Nichia 由 Shuji Nakamura 主导的基于 GaN 的蓝色 LED 的商业化引入。

1996 年，Nichia 通过使用蓝色发光芯片泵浦黄色发光荧光粉生产出白色发射器，这一关键突破支撑了固态照明的革命。最初，只有高色温的白色 LED 可用。但到 2002 年，当 Lumileds 推出同时包含红色和黄色荧光粉的器件时，客户还可以获得更吸引人、更温暖的白色光。

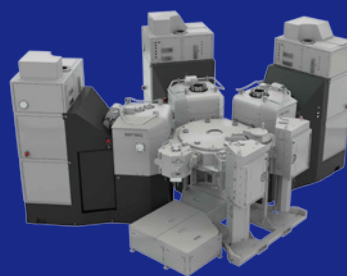


提供业界尖端的原子层沉积技术和离子注入技术
建设全球一流的高端半导体制造装备

SR11 离子注入机系列



SR11 Transform ALD 系列

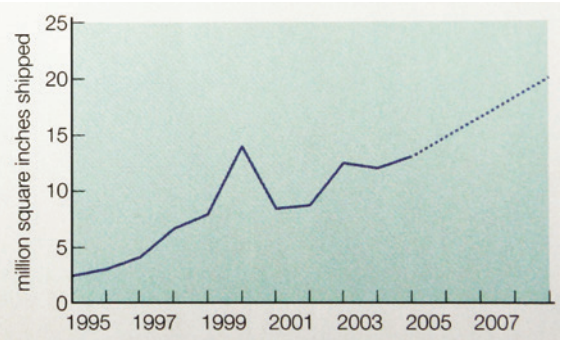
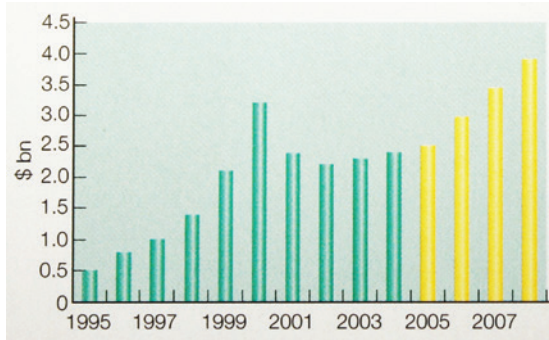


青岛思锐智能科技股份有限公司



地址：青岛市黄岛区牧马山路11号
电话/Tel: 0532-58793555
网址/Web: www.sri-i.com
邮箱/E-mail: sriimarketing@sri-i.com

摘自2005年的纪念版，Strategy Analytics提供的数据揭示了1995年至2005年GaAs市场的过山车式收入变化。



在本世纪的第一个十年中，基于 GaN 的 LED 效率随着器件设计的改进而急剧上升，例如引入多量子阱、芯片形状的改进以增加光提取，以及更好的封装以辅助热管理。

Steele 还考虑了在《化合物半导体》英文版杂志的生命周期内 LED 的巨大变化。从 1995 年到 2015 年，高亮度 LED 市场的规模扩大了 150 倍，LED 封装的输入功率能力提高了 1000 倍，而每流明的成本暴跌了 100 倍。到 2015 年，从市场角度来看，黄金时代已经结束。收入增长放缓，复合年增长率下降到大约 9%。更多的公司争夺销售，压低了利润率。

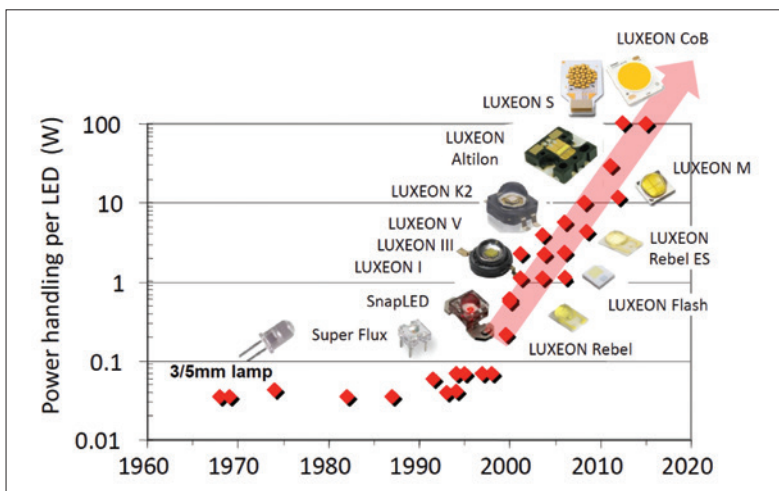
2015 年的纪念版还回顾了《化合物半导体》英文版创刊号的内容，当时该杂志仅以印刷形式提供。当时，其中一篇文章讨论了在交通灯中使用红色 LED 的优点。对于红色光源，可以使用 500-750 个器件，总成本为 200 美元，总功耗为 20 瓦。从现有的 150 瓦光源切换到这种光源有望显著节省能源，从而降低电费。然而，现在看来有些奇怪的是，当时有这样一种评论：‘然而，白炽灯可能会保持黄色市场的地位——因为它们点

亮的时间如此之短，以至于节省的能源无法抵消 LED 阵列的成本。’如今，在世界许多地方，很难找到一个完全不基于 LED 的交通灯。

2015 年纪念版中的未来展望也包括了对 2035 年我们行业可能面貌的思考。在那期杂志中，伦斯勒理工学院的 Fred Schubert 预测，在接下来的二十年中，绿色和紫外 LED 的效率将得到提高，这一进展已经发生，并预计会继续。2015 年，Qorvo 高级总监 Douglas Reep（现为顾问）预测，GaAs 放大器将在手机中保持关键组件的地位许多年——但最终可能会有 GaN 的潜力，它可以在更高的功率密度下工作。Reep 认为，为了 GaN 产生影响，它需要在 3-5 伏的范围内工作。如今，我们可能更接近于从 GaAs 到 GaN 的转变，这一转变现在由 Finwave 引领。

已故的 Cree 联合创始人 John Palmour 预测，SiC 功率器件的销售额将增加，取代硅器件。他预计在 2020 年之后电动汽车将取得成功，而这一成功实际上在那之前就已到来。

Palmour 还评论了超宽带隙材料的潜力和缺点。他指出了 p 型掺杂和热管理的问题。正在取得进展，特别是对于 Ga₂O₃，衬底和器件的开发投资正在迅速增加。



在《化合物半导体》英文版杂志庆祝其二十周年纪念版中，市场分析师 Bob Steele 的贡献包括这张图表，说明了 LED 封装技术的演变。其来源是 2015 年 Lumileds 固态照明研究员 George Craford 在美国能源部固态照明研讨会上的演讲。

三十周年纪念版（本期）

与这两个前辈相比，本期纪念版更多地回顾了这些年来发展，而没有对未来进行预测。其核心内容是对化合物半导体行业每年最重要的事件的逐年评估。在这方面，时间的流逝是一种优势，有助于识别真正重要的进步——并将那些最初似乎具有持久遗产但实际上只产生了短期影响的内容放在一边。

希望您喜欢阅读过去 30 年最大的新闻报道，以及市场分析师 Yole 对宽带隙市场的观点。希望这些内容能为您带来价值。📄



宽禁带功率器件的增长

SiC 和 GaN 器件销售额的激增，特别是在汽车行业，将在本十年末创造一个 100 亿美元的市场

作者：POSHUN CHIU 和 EZGI DOGMUS, YOLE GROUP

在补贴的支持下，并受到减少碳足迹的驱动，越来越多的司机转向电动汽车。这一举措包括了帮助推动宽禁带技术收入的影响，今天这些技术是 SiC 和 GaN 的结合。根据我们在 Yole Group 的研究，这些器件预计将使其在功率半导体市场的份额在未来五年内翻倍。

我们现在看到宽禁带器件的销售额以惊人的速度增长，比 20 多年前首批商用 SiC 功率器件的商业化还要快。这一市场的快速扩张没有放缓的迹象，GaN 技术即将起飞，并协助推动这一领域的创新。

今天，宽禁带技术占全球功率器件市场的 16% 以上，我们预计到 2029 年这一比例将跃升至 32% 以上。

到那时，我们预计 SiC 器件的收入将占半导体功率市场的 26% 以上，销售额将攀升至近 100 亿美元。为了实现这一目标，收入将以 24% 的复合年增长率从 2023 年的 27 亿美元增长到 2029 年。

在那段时间内，GaN 收入将从 2.6 亿美元增长到 20 亿美元，复合年增长率为 41%。除此之外，我们预计在高功率和工业应用的推动下，将进一步增长。

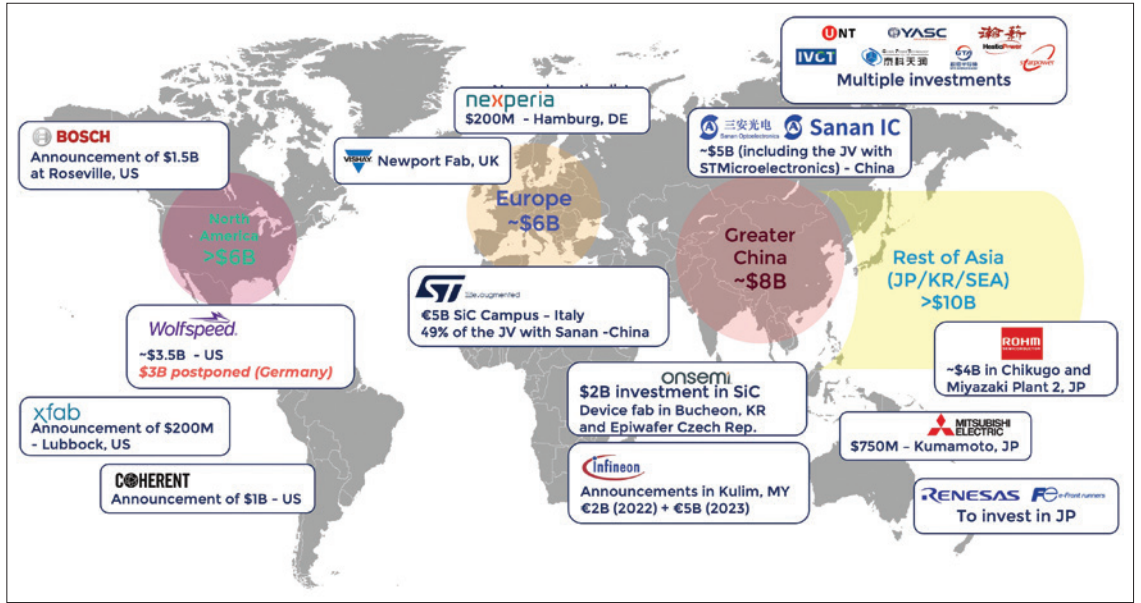
二十多年来宽禁带技术的发展的一个影响是，几乎每个主要的功率半导体市场参与者都在 SiC 领域有业务，并为未来几年的 GaN 业务做准备。对于后者，收入主要来自分立器件，以及系统级封装和系统级芯片产品。

在功率电子市场的主要参与者中，拥有可观 SiC 业务的包括英飞凌、onsemi 和意法半导体。自 2017 年以来，后者通过进入特斯拉的供应链——在汽车行业是 SiC 的先驱——在 SiC 领域一直处于领先地位。其他重要的 SiC 器件制造商包括罗姆、博世、Wolfspeed 和三菱电机。

SiC 在汽车领域的应用

2001 年，SiC 行业的一个重要里程碑是英飞

全球已宣布超过300亿美元的投资于SiC，重点在于器件制造。来源：《2024年功率SiC - 市场和应用》报告，Yole Intelligence。



凌推出了首个 SiC 肖特基势垒二极管。这一器件在商业规模上花了许多年才确立自己，当它在十年前首次出现时，是一个等待市场的创新。这些二极管，从 2010 年起被 MOSFET 加入，开始在工业应用中得到部署，如电源和太阳能光伏逆变器。然而，收入只有在汽车原始设备制造商开始采用 SiC 功率器件用于 400V 电池电动汽车时才开始火箭式增长。

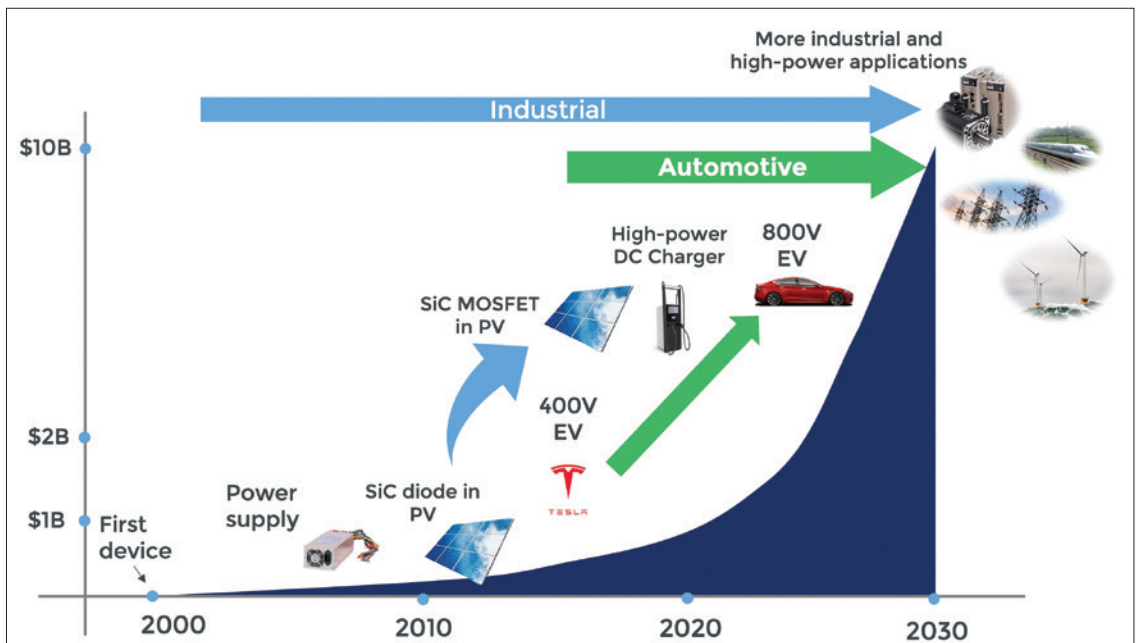
我们已经跟踪 SiC 市场数十年，并预测其价值从 2013 年的约 1 亿美元增长到接近 2020 年的 8 亿美元。

意法半导体与特斯拉之间的关键合作伙伴关系导致 SiC 首次被部署在 2017 年的特斯拉 Model

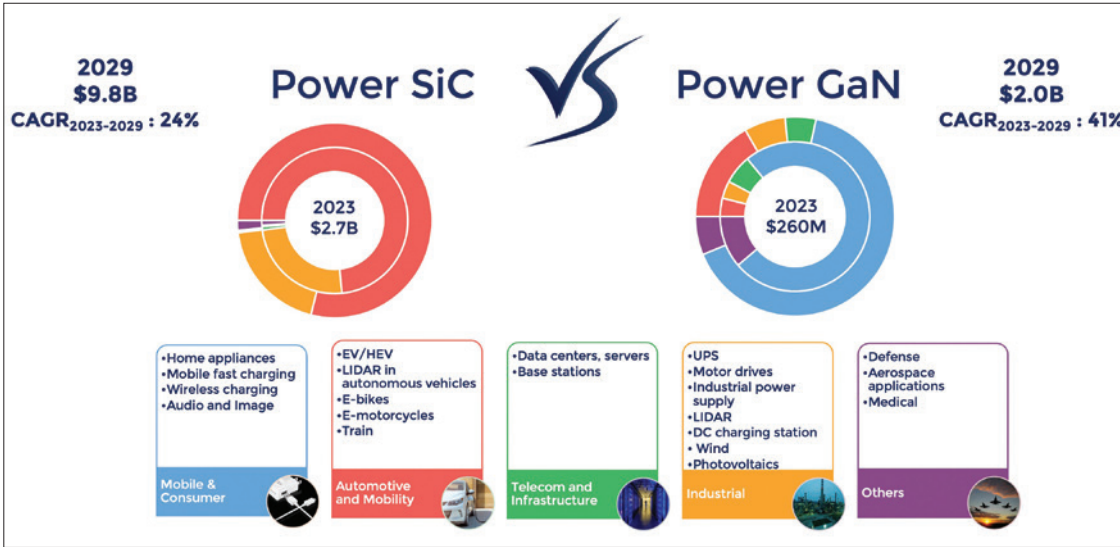
3 中。然后，这家电动汽车制造商在 Model Y 中采用了 SiC，随着这些电动汽车的销量激增，SiC 功率器件市场开始快速增长。特斯拉大量出货 SiC，但到目前为止，它们只被纳入相对较少的车型中。

在特斯拉的带领下，其他原始设备制造商也纷纷将 SiC 纳入其 400V 电池电动汽车架构中。下一代电动汽车将基于 800V 电池系统，这一转变将导致更多车型采用 SiC 技术并增加其需求。与此同时，我们已经看到不同厂商推出新一代 SiC MOSFET，以在各种应用中提供功率转换效率或高功率密度的优势。

这一预期趋势正在为 SiC 带来全球超过 300



SiC 的长期演变方向是用于 800V 电动汽车动力总成和多种工业应用。来源：《2024 年功率 SiC - 市场和应用》报告，Yole Intelligence。



2023年和2029年的功率碳化硅 (Power SiC) 和功率氮化镓 (Power GaN) 市场预测。资料来源:《功率碳化硅-市场与应用2024年报告》、《功率氮化镓2024年报告》, 由Yole Intelligence提供。

亿美元的投资。在北美, 博世正在加州罗斯维尔投资 15 亿美元建设一个设施, 以扩大其产能; Wolfspeed 正在投资 35 亿美元; Coherent 正在投资 10 亿美元; 而德克萨斯州卢博克的 X-FAB 正在投资 2 亿美元。与此同时, 在欧洲, 意法半导体正在意大利卡塔尼亚建设一个新的 50 亿欧元设施, 紧邻其现有的设施; onsemi 正在捷克共和国投资外延片产能; Nexperia 正在德国投资 2 亿美元; 而 Vishay 在英国收购了产能。

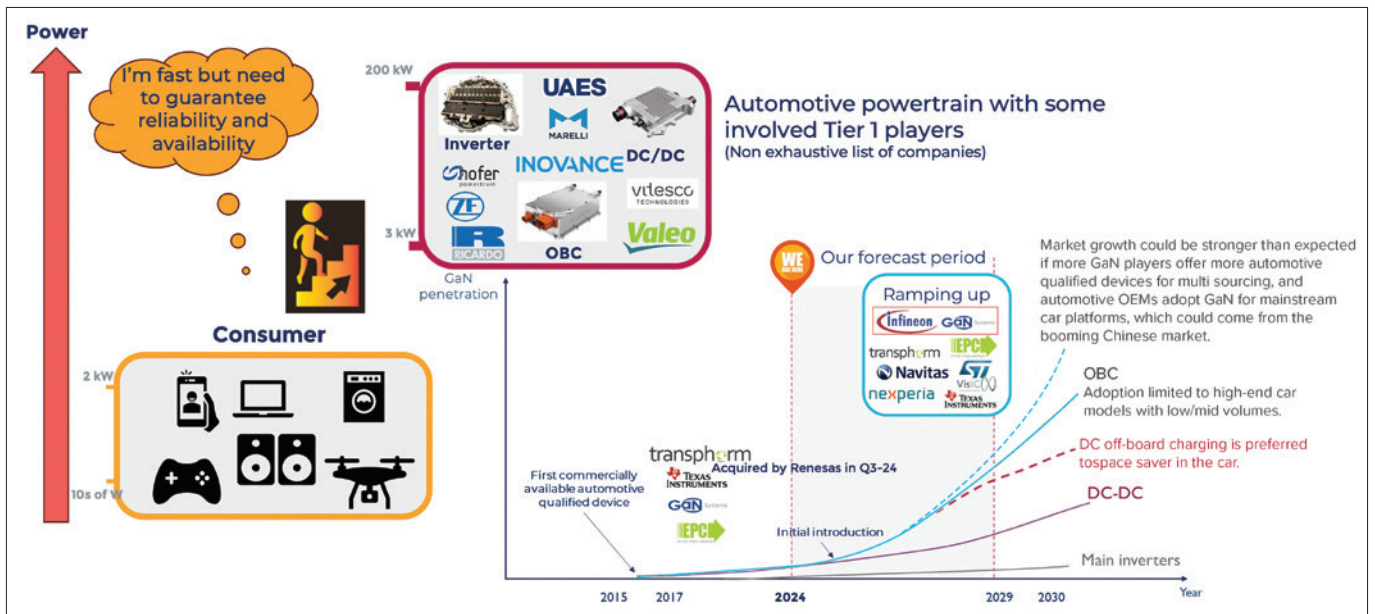
北美和欧洲的投资各约为 60 亿美元。这是一笔相当可观的金额, 但仍被亚洲的投资所掩盖。在制造业正在向亚洲转移的地区, 仅中国的支出预计将达到 80 亿美元, 而整个亚洲 (包括日本、韩国和东南亚) 的支出预计将超过 100 亿美元。在中国, 市场领导者如 UNT、Sanan IC、YASC

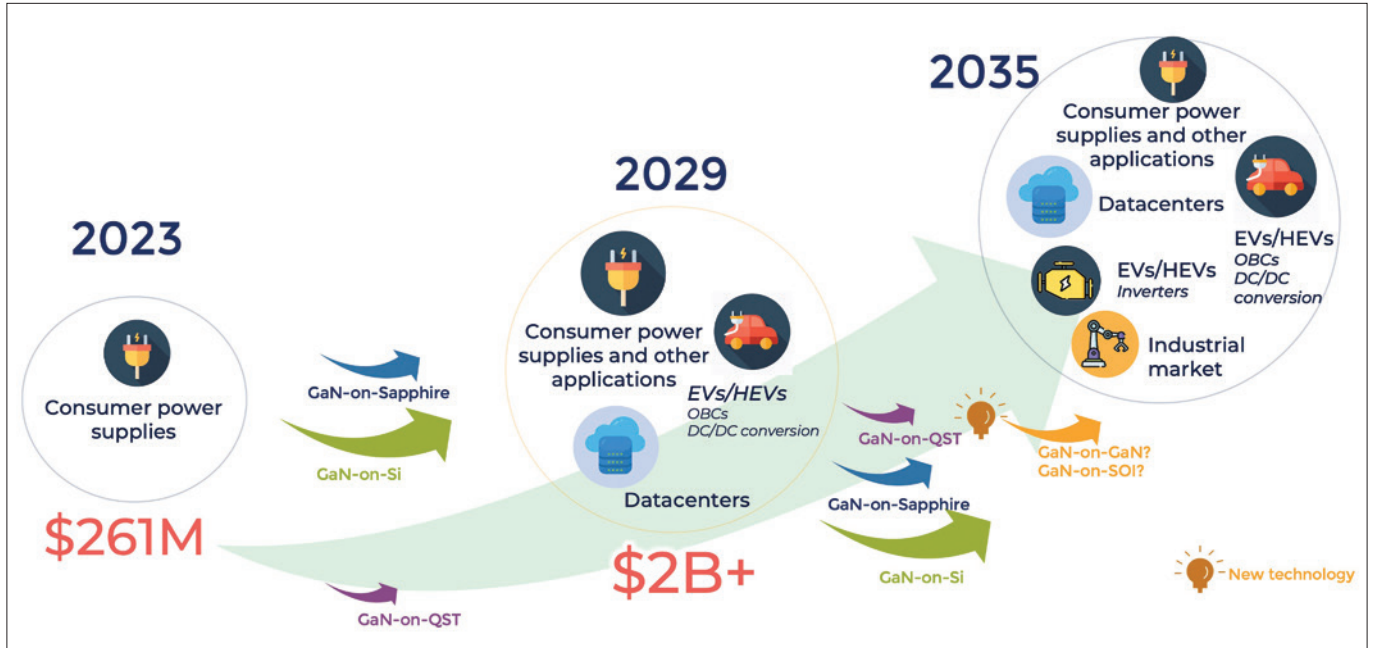
和 HestiaPower 已经宣布了多项投资。

这些投资对市场意味着什么? 我们预计, 尽管 SiC 收入将在未来几年增长, 但直到 2026 年, 这些销售额将小于公司对这一技术的计划总投资。因此, SiC 芯片制造商将不得不谨慎控制其资本支出注入, 以便在建设新设施的基础上增加收入。将面临一些挑战, 例如管理现金流。这种活动的一个逆风是电动汽车市场的放缓, 推动了更可持续的投资以继续资本支出注入。

在这些投资年中, SiC 行业正在从 6 英寸晶圆转向 8 英寸晶圆。尽管芯片制造商从这种基础设施升级中受益, 但进行这种升级需要大量的财务资源。如果他们能度过这一时期, 前景将更加光明, 因为支出减少和收入增加将创造一个更可持续的业务。

考虑到氮化镓 (GaN) 的应用, 重点在于汽车动力系统领域。资料来源:《Power GaN 2024 报告》, Yole Intelligence





在未来几年，氮化镓 (GaN) 器件将在越来越多的应用中得到部署。资料来源：《Power GaN 2024报告》，Yole Intelligence

SiC 的长期机会不仅限于由于 800V 电动汽车的推出而增加的需求。新产能的增加也将使这种技术在其他应用中得到更多使用，例如：高功率电动汽车充电器；太阳能光伏；以及包括电机驱动、铁路和风力涡轮机在内的工业应用。全球对 SiC 的数十亿美元投资的另一个后果是，2019 年至 2022 年发生的材料供应短缺和器件产能短缺——当时大多数需求由汽车客户锁定，限制了在工业应用中的渗透——在未来几年将不会重演。

GaN : 明日科技

与 SiC 不同，GaN 最初是作为消费器件而非汽车应用的技术出现的。首批器件于 2010 年推出，为快速智能手机充电器创造了一个小型市场。面向消费应用的市场在 2018-2019 年开始起飞，到 2023 年攀升至 2.6 亿美元。

为了确保 GaN 成为另一个数十亿美元的市场，供应商现在正寻求进入超越 2kW 消费应用的更高价值市场。这些新机会包括高功率汽车和工业应用。

正在加速 GaN 开发和生产的制造商包括：英飞凌，通过收购 GaN Systems；瑞萨，收购 Transphorm；Innoscence；意法半导体；德州仪器；Navitas；和 Nexperia。

有几家汽车原始设备制造商和一级制造商对下一代 GaN 技术感兴趣。他们包括 Hofer ZF 和 Ricardo，他们正在研究用于逆变器的 GaN；

UAES、Marelli 和 Inovance，他们是车载充电器的开发商；以及 Vitesco 和 Valeo，他们在追求 DC-DC 转换器时考虑 GaN。

我们预计汽车行业采用 GaN 将需要时间。目前用于消费产品的 GaN 通常被视为汽车领域的明日科技。

GaN 的主要应用预计将用于电池电动汽车和插电式混合动力汽车的车载充电器，功率水平低于 11kW。从硅转换到 GaN 的 DC-DC 转换器所增加的价值不足以证明显著采用，特别是在低于 3kW 的功率水平。

对于 400V 系统的主逆变器，GaN 将难以实现商业成功。SiC 和硅已经确立了地位，而允许在超过 50kW 功率水平下运行的 GaN 功率模块尚未上市。对于 800V 系统，1200V GaN 器件尚未上市，而 650V GaN 有可能通过多级功率拓扑进入逆变器市场。基于所有这些，我们预计在 2029 年之前不会开始采用 GaN 用于主逆变器。

GaN 技术仍然相对年轻是这一观点背后的另一个原因。它需要时间来验证可靠性和优化设计。目前，主要的汽车或工业原始设备制造商仍在开发 GaN 以在他们的车辆中实施。这种动机来自于 GaN 提供的独特附加价值，包括其比硅和 SiC 更高的效率。目前，GaN 倾向于在较低功率范围内部署，而更高功率应用的采用正在开发中。

在过去的一年左右，关于消费市场之后下一个大应用的观点发生了变化。由于人工智能 (AI) 作为‘下一个大事件’的出现，对使用 GaN 提

高 AI 数据中心效率的兴趣大增。每个 GPU 消耗 1kW，与 GaN 可以提供的功率水平相匹配。

在服务器的电源供应中，有多个阶段。在 400V AC-DC 阶段有电源供应单元 (PSUs)，DC-DC 阶段，以及在下一阶段，以较低电压和 48V 额定值。

GaN 适用于所有这些要求。除了两个主要的电压等级，650V 和 400V，可以支持 PSU 外，它还有一个较低的 200V 等级，可以匹配 AI 数据中心目前所需的 48V 直流总线要求。

GaN 的一个最大好处是其提供高效率的能力，这将通过降低运行成本来增加数据中心的盈利能力，帮助遵守新法规并减少碳足迹。由于技术已经准备就绪，关键问题是：何时一些大型系统玩家决定大量采用 GaN？

器件供应商正在努力说服他们，GaN 与硅器件在成本上具有可比性，同时在享受更高效率的同时提供性能优势。

我们预计数据中心将成为 GaN 进入的最重要市场之一。一旦被采用，增长将因 AI 的巨大需求而强劲。这可能最初将市场推向近 20 亿美元，

这是我们对 2029 年的预测。从长远来看，我们将看到 GaN 进入工业应用以及汽车领域的潜力。然而，消费应用仍将发挥重要作用。

今天制造的 GaN 器件通常涉及硅或蓝宝石基板。然而，也在提出并部分推出替代衬底，例如 Qromis Substrate Technology——一种复合材料基板，由美国 Qromis 开发。这种工程平台抑制了 GaN 外延层的开裂，从而实现大直径外延生长。未来，GaN 芯片制造商可能还可以转向在绝缘体上硅基板上生长。

从技术角度来看，我们看到了许多 GaN 采用的选项，以及 GaN 进入不同市场的巨大潜力。

宽禁带材料扮演关键角色

很清楚，宽禁带材料在半导体功率电子行业中扮演着越来越重要的角色。这个市场已经价值数十亿美元，并且在本十年及以后的剩余时间里具有强劲增长的潜力。

经过 10 到 20 年的发展，SiC 技术现在正在走向高产量生产和扩张。GaN 技术将紧随其后，但它仍在发展，并发现未来市场的不同可能性。☞





与 Evatec 一起探索薄膜技术

从 Si、SiC 和 GaN 的正反面金属化，到 5G 的 RF 滤波器，以及降低生产成本并实现 Micro LED 中更小器件架构的混合 DBR，Evatec 在功率器件、无线和光电子领域的专业知识为您带来创新的薄膜生产设备和工艺，让您在正确的道路上一往无前。



在最新版的 **LAYERS** 中阅读这些主题的更多信息。
 立即索取免费刊物
 意发薄膜科技(上海)有限公司, Tel: +86 21 6019 1660, Email: infochina@evatecnet.com



半导体与先进封装 | 化合物与光子学 | 半导体镀膜专家 | evatecnet.com/cn





过去 30 年，我们取得的成就令人惊叹。我们的发明包括蓝色和绿色 GaN 激光器、从芯片表面发射的变体，以及一系列氧化镓功率器件。其他成就包括：改进 LED，使其能够为屏幕背光并照亮家庭和办公室；通过将 SiC 和 GaN 二极管及晶体管商业化，提高电路效率；建造 GaAs 晶圆厂，生产了数十亿个放大器，这是移动电话的关键组件。接下来，我们将回顾从 1995 年（本刊创刊之年）开始每年的重大事件，了解所有这些成功及更多成就。

1995年：辉煌的激光器

高效蓝色 LED 的开拓者中村修二 (Shuji Nakamura) 在 1995 年夏季已成为行业名人。1993 年发明该器件后，他通过为这种发光芯片设定一系列更高的性能基准，持续成为焦点。这些成功提升了他在科技界的地位，并为他带来诸多荣誉，包括 2014 年的诺贝尔物理学奖。但看到自己的工作为照明革命奠定基础，他感到更大的快乐。

尽管中村修二无疑因对 GaN LED 发展的贡献而闻名，但这绝非他发明的唯一普及器件。他还是 GaN LED 的“表亲”——GaN 激光二极管的发明者。后者是一项惊人的成就。尽管许多制造商每月生产数百万个 GaN LED，但在推出 30 年后，仍只有两家高产量的 GaN 激光二极管制造商：中村修二在 20 世纪 90 年代工作的日亚化学 (Nichia)，以及德国雷根斯堡的欧司朗光电半导体 (Osram Opto Semiconductors)。

中村修二的激光突破发生在 1995 年底，相关消息于 12 月 12 日公布。当月晚些时候，这位日亚化学最伟大的工程师出现在全国晚间新闻节目中，展示他的新器件。

到 1996 年初，激光二极管的细节开始出现在科学期刊上。《日本应用物理杂志》的一篇文章描述了一种在蓝宝石衬底上生长的 30 微米宽、1500 微米长的条形激光器。该激光器在 417 纳米处发射，其有源区包含 26 个量子阱，每个量子阱由 2.5 纳米厚的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 层制成。为使该器件产生激光，电压必须升至 34 伏。在更高电压的脉冲模式下驱动时，该芯片的输出功率超过 200 毫瓦。令人鼓舞的是，该激光器在运行两小时后没有出现退化迹象。

在首次亮相之前，整个光电子行业就对这种短波长激光二极管的关键应用充满信心。当时，大多数音乐爱好者购买 CD，VHS 录像机即将被 DVD 播放器取代，而蓝紫色激光

器使存储密度提高五倍，带来了更高画质的前景。

那些渴望购买新一代光盘播放器、在家观看高清电影的人经历了一段艰难时期。早期采用者首先陷入了 HD DVD 技术支持者与蓝光支持者之间的格式战争。解决这一问题后，消费者得以在 2003 年日本首批蓝光播放器上架时高价购买，但随后又面临挫折——早期采用者不得不等待数年才能看到首批片源发布。

幸运的是，随后几年带来了增长的盈利市场，为蓝色激光二极管提供了机会。尽管流媒体服务的普及导致蓝光播放器销量大幅下降，但一扇门关闭的同时，多扇门打开了。蓝色激光器现在与红色和绿色激光器一起应用于彩色投影仪，并用于铜焊接系统，在该系统中，它们在吸收最佳点工作，实现出色焊接。未来，激光器甚至有可能取代 LED 用于通用照明——因此，或许有一天，社会会像感谢中村修二的 LED 一样，感谢他的激光器。



中村修二，蓝光发光二极管 (LED) 和氮化镓激光器的发明者，与株式会社 Nichia 的创始人小川登雄并肩而坐。摄影：Bob Johnstone。

1996年：光伏腾飞

1985 年，拥有移动电话的人寥寥无几。摩托罗拉高管的妻子凯伦·伯廷格 (Karen Bertinger) 是其中之一，她在加勒比度假时试图联系丈夫，但电话未能接通，这让预期接收者巴里·伯廷格 (Barry Bertinger) 认识到需要真正的全球无

线通信网络。为实现这一目标，摩托罗拉成立并资助了铱星 (Iridium) 公司，该公司通过发射 66 颗低地球轨道卫星来推进电话通信。

到 1996 年，III-V 族光伏器件制造商正忙于生产为这些

卫星供电的器件。尽管硅电池在太空领域仍占据销售优势，但单结GaAs器件正在崛起。尽管其成本是硅电池的5到8倍，但由于效率更高，它们更受青睐。在使用寿命开始时，其效率高出25%；关键的是，在使用寿命结束时，经过辐射冲击后，其效率仍高出40%至60%。鉴于每颗铱星卫星需要24平方米的GaAs电池，使用这些器件而非硅器件显著减少了太阳能电池的占地面积。

两家加州光伏制造商帮助满足了GaAs太阳能电池的订单：当时属于休斯公司（现为波音公司一部分）的Spectro-lab，以及Tecstar。对于后者，由于参与铱星项目，1996年的产量达到20万片3英寸晶圆，相当于140千瓦的功率。

工程师们在锗衬底上生产这些电池。锗衬底的价格是GaAs衬底的一半，且更坚固。锗衬底的使用为原材料制造商带来了大量业务——高纯度多晶锗矿石的价格在短短18个月内飙升了七倍，并推动了两家领先衬底制造商的销售：美国公司Eagle Pitcher和比利时公司Union Minière（现为Umicore）。1996年，锗衬底的消耗量在30万到50万片之间，尺寸从1.5英寸到4英寸不等。

1998年11月1日，铱星网络隆重推出，美国副总统阿尔·戈尔（Al Gore）与亚历山大·格雷厄姆·贝尔（Alexander Graham Bell）的曾孙吉尔伯特·格罗夫纳（Gilbert Grosvenor）进行了首次通话。然而，尽管宣传力度很大，该服务并未流行起来。潜在客户需支付2500美元购买手机而却步。

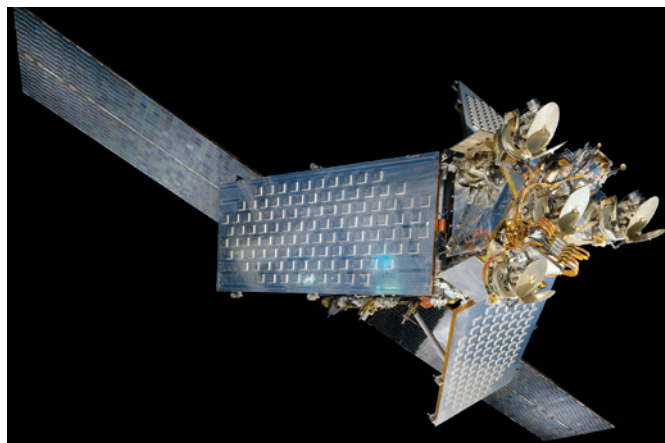
1997年：砷化镓的增长

20世纪90年代初，拥有移动电话并不常见，但到千禧年前后，这变得越来越普遍。这些手机的普及推动了GaAs微电子制造商的销售，并促使其中几家公司达到里程碑，包括1997年的三个里程碑：RFMD上市、罗克韦尔（Rockwell）发货第200万个HBT，以及Anadigics销售第100万个GaAs集成电路。

RFMD（现为Qorvo的一部分）最初是GaAs MESFET、硅双极器件和HBT的无晶圆厂供应商，其中HBT占销售额的85%。随着对后者需求的增加，RFMD无法跟上步伐，失去了与高通（Qualcomm）的关键合同。

为避免再次发生这种情况，RFMD于20世纪90年代末在北卡罗来纳州格林斯博罗建造了4英寸GaAs晶圆厂。该设施分两期建设，最初年产量为1万片晶圆，最终增至2.5万片。该设施的资金来自首次公开募股（IPO），由RFMD的HBT晶圆供应商TRW支持，TRW成为其最大股东，持有该公司31.1%的股份。

对于罗克韦尔半导体系统公司来说，20世纪90年代后半期因其在4英寸晶圆厂生产的HBT产量激增而被铭记。在1996年初至1997年中期的18个月期间，该公司的产量



铱星计划旨在提供全球范围的蜂窝覆盖，该计划共部署了66颗卫星，每颗卫星需要24平方米的砷化镓（GaAs）太阳能电池，这为III-V族光伏产业带来了可观的收入。摄影：Eric Long，美国国家航空航天博物馆，史密森学会。

将价格降至1495美元并大幅降低服务成本仍未能带来足够业务，到1999年底，铱星仅拥有1.5万用户，远低于预期的50万用户。随后，公司不可避免地申请破产。

该项目的失败对光伏制造商Tecstar造成了影响。2001年，它尝试涉足LED外延片领域。多元化发展并不顺利，2002年，Tecstar管理层决定停止运营，以2100万美元将其太阳能部门出售给Emcore。如今，该技术归Rocket Lab所有。2022年，Rocket Lab收购了SolAero，后者于2014年底通过出售Emcore的太阳能业务成立。

从每月仅1万台激增至70倍。这些HBT的买家包括高通和三星。两者都看重这种晶体管的优异线性度和高效率，这些特性非常适合制造具有长通话时间的CDMA技术手机。

罗克韦尔在这一业务上面临来自Anadigics的竞争，后者在1997年夏季之前已发货超过100万个支持CDMA标准的GaAs集成电路。当罗克韦尔的大多数HBT被集成到工作在800MHz至900MHz频段的手机中时，Anadigics的部件正在1900MHz频段的手机发射器中提供放大功能。

这些基于Anadigics核心技术MESFET的高频产品，最初为公司的未来成功奠定了基础，但后来却导致了其衰落。

到20世纪90年代末，手机制造商已从使用6V电池转向4.5V，然后是3V电池。这有利于价格竞争日益激烈的HBT。到21世纪初，Anadigics停止生产其MESFET，转而开发新一代HBT。

该公司没有使用AlGaAs发射极，而是使用InGaP。这一改进提高了HBT的可靠性，增强了其高温工作性能，并改善了线性度。Anadigics的产品最终受到手机制造商的欢迎，使该公司在3G市场占据了健康的份额。

1998年：fab的辉煌

当想到 GaAs 微电子器件的大规模生产时，你可能会想到用于智能手机的 HBT。但这并非唯一的市场。在电信领域，大量 GaAs 被用于激光和调制器驱动器、多路复用器、解复用器、跨阻放大器、时钟和数据恢复电路。在所有这些组件中，GaAs 比硅 CMOS 更快的速度实现了更高的比特率。

1998 年，当用于电信领域的 GaAs 器件畅销时，Vitesse 通过建造世界上第一个 6 英寸 GaAs 晶圆厂扩大了生产能力。

与大多数建筑项目不同，Vitesse 位于科罗拉多斯普林斯的工厂比原计划提前三个多月完工。首批采用 GaAs MES-FET 技术的产品于 1998 年初下线，同年第三季度，该公司发货了价值 1500 万美元的芯片，基于 16 种不同产品。

Vitesse 也是世界上率先从 3 英寸转向 4 英寸 GaAs 生产的公司，建造 6 英寸晶圆厂是为了降低每颗芯片的成本。尽管单位面积衬底成本增加了 25%，但转向更大的晶圆使芯片级成本降低了 40%。

在 Vitesse 服务的市场中，其技术必须不断进步，以保

持对基于硅 CMOS 产品的明显领先优势。

互联网泡沫的破裂带来了残酷的打击，导致 Vitesse 的 40 Gbit/s 器件销售崩溃，且在 90 纳米硅工艺赶上之前未能恢复。这最终导致 Vitesse 的 GaAs 晶圆厂于 2003 年关闭。

此后，该公司转移重点，专注于用于城域网、企业和存储市场的硅基产品，并利用其 4 英寸 InP 晶圆厂生产高速电子器件。该公司历史的最后一章是在 2015 年，被 Microsemi 收购。

即使在今天，6 英寸晶圆厂仍是生产 GaAs 晶体管的最先进设施。这可能表明，在过去二十年中，芯片制造的进展停滞不前。但请考虑：在硅 CMOS 晶圆厂中，20 世纪最后三十年晶圆尺寸的快速进步并未延续到本世纪，而且可能永远不会有 450 毫米的硅晶圆厂。

对于硅来说，300 毫米晶圆厂似乎是生产的最佳选择，任何更大尺寸所需的投资都无法提供合适的回报；对于 GaAs，6 英寸生产线是否也适用同样的道理？

1999年：完美联姻

什么是理想的合并？简而言之，当合并的结果大于各部分之和时，就实现了理想合并。

1999 年，英国的 Epitaxial Products International (EPI) 与美国的 Quantum Epitaxial Design (QED) 合并，成立了世界上最大的外延片供应商 IQE，就是这样的案例。位于宾夕法尼亚州伯利恒的 QED 通过向主要是国内市场供应 MBE 生长的晶圆建立了业务；而英国的 EPI 则专注于光电子外延片，其三分之二的销售额来自欧洲和亚洲。

合并后的实体为某些产品提供了双供应源，有望在全球取得巨大成功，利用两家公司不断增长的業務。QED 的销售额以 40% 的年复合增长率增长，而 EPI 的销售额以 30% 的年复合增长率增长。为满足更大的需求，两家工厂都制定了产能扩张计划。QED 订购了一台 MBE 反应器，能够单次运行生产多个 6 英寸晶圆；EPI 最近扩大了设施规模，订购了多晶圆 MOCVD 设备。为资助这些扩张计划，IQE 在 1999 年夏季通过在欧洲版纳斯达克 EASDAQ 上市，筹集了 7000 万美元。

从那以后，IQE 巩固了其在外延片市场的领先地位。2006 年，它收购了 Emcore 的外延业务；次年，收购了新加坡的 MBE Technologies；2012 年，收购了 RFMD 的外延业务。它还扩大了产品组合。2010 年收购美国斯波坎的 Galaxy Semiconductor，使该公司具备了铟衬底和红外技术的能力；2012 年对 Solar Junction 的投资增强了多结太阳能电池的专业知识；2018 年收购 Translucent 的技术，使其具备了晶体稀土氧化物的能力，能够在硅晶圆上生长化合物半导体薄膜。

然而，最近几年对这家外延片制造巨头来说并不辉煌。销售额远低于 2020 年 1.78 亿英镑的峰值，在魅力非凡的创始人德鲁·纳尔逊 (Drew Nelson) 领导数十年后，他的继任者阿梅里科·莱莫斯 (Americo Lemos) 在任职不到三年后被解雇。扭转这一局面并非易事，但由于在多元化市场运营，重返美好时光并非不可能。



1999年，英国的Epitaxial Products International公司与美国的Quantum Epitaxial Design公司合并，催生了IQE，并在欧洲相当于纳斯达克的市场上市。

2000年：狂热的高潮

千禧年之前，互联网流量激增，给光通信基础设施带来了巨大压力。运营商通过增强网络容量来应对这一问题。这创造了一个价值近 100 亿美元的光组件市场，预计年复合增长率为 40%。III-V 族光电子制造商处于有利地位，因为他们的器件占该市场的一半。

可以理解的是，急切的运营商不想与众多组件供应商打交道。他们渴望一站式服务，最好能提供可直接接入其网络的模块。

为满足这一需求，组件领域的收购盛行。1999 年 6 月，加拿大的 JDS Optics 与美国的 Uniphase 合并成立 JDS Uniphase (JDSU)，引领了这一收购狂潮。1999 年底，JDSU 以 4 亿美元收购光电探测器制造商 Epitaxx；2000 年，它进行了三次重大收购：以 62 亿美元收购 Optical Coating Laboratory，以 150 亿美元收购 E-Tek Dynamics，以 410 亿美元收购 SDL Lasers。

2000 年初，互联网泡沫开始破裂后，所有人都知道以高于年收入数倍的价格收购公司是愚蠢的。这使得 JDSU 以相当于 SDL 年收入 142 倍的价格收购该公司成为一个离谱的错误。事后诸葛亮揭示了狂热高潮中任何新世界秩序的概念都是错误的，传统经济学卷土重来。

2000 年期间，供应链内开始进行库存调整，导致利润率下降。同年 6 月 30 日，JDSU 创下了有史以来最大的年度企业亏损——令人瞠目结舌的 561 亿美元（考虑通货膨胀后，目前排名第三，仅次于美国在线时代华纳和美国国际集团）。然而，对 JDSU 来说，这一亏损主要是账面亏损。561 亿美元的绝大部分来自与各种收购相关的商誉减记，这些收购主要是全股票交易。

对投资者来说，公司 fortunes 的下滑并非如此容易忽视。2000 年 3 月，在分析师声称具有开拓性视野的人正在正确



凯文·卡尔霍文 (Kevin Kalkhoven)，前 JDSU 公司首席执行官，与他人共同创立了 PKV 赛车队，该车队后来更名为 KV 赛车技术公司。这支车队曾参加过 Champ Car 世界系列赛和印地赛车系列赛，共获得五场胜利，包括 2013 年的印第安纳波利斯 500 大赛。

的时间领导一家伟大公司的推动下，这家华尔街“宠儿”的股价飙升至 1200 美元的峰值。几年后，股价下跌了 99% 以上。

该公司的领导人在股价峰值附近出售了部分股份，导致欺诈和内幕交易的指控。有人开玩笑说 JDSU 现在代表“Just Don't Sue Us”——但康涅狄格州的代表确实提起了诉讼，希望从养老基金中追回损失。该案件于 2002 年提起，五年后开庭，管理层被清除欺诈罪名。

到那时，辉煌时期的公司首席执行官凯文·卡尔霍文 (Kevin Kalkhoven) 已经退休，用部分财富从事慈善事业。他还资助了一支赛车队，该队取得了五场胜利，包括 2013 年的印第安纳波利斯 500 赛。

至于 JDSU，它已不复存在。光组件业务的长期低迷造成了沉重损失，该公司裁员 80%，关闭了 29 个站点。2015 年 8 月，该公司分拆，成立了网络测试和测量专家 Viavi Solutions 和激光制造商 Lumentum。

2001年：强大的开端

什么标志着宽禁带功率电子行业的开始？无疑是英飞凌 (Infineon) 推出的 SiC 肖特基势垒二极管，这是首款推向市场的宽禁带功率电子产品。

当该器件于 2001 年首次亮相时，它填补了一个空白。硅和 GaAs 肖特基势垒二极管限于阻断低于 250V 的电压，以避免高温下加剧的高漏电流。英飞凌的两种变体可处理 300V 和 600V 电压，电流高达 1A，并且更擅长处理热量，使其在电源中部署具有优势。

英飞凌在奥地利维拉赫的晶圆厂使用 2 英寸 SiC 晶圆生产这些器件，目标是 200W 至 1000W 的电源。以这种方式使用时，该公司的二极管应用于服务器和无线基站。从硅二



宽禁带行业的诞生可以追溯到 2001 年，当时英飞凌推出了碳化硅肖特基势垒二极管。

极管转向 SiC 二极管的设计师获得了丰厚回报。他们的电源更可靠、效率更高，并且可以更小更轻，因为 SiC 二极管允许工作频率提高，从而减少无源组件的尺寸和重量。

英飞凌的第一代 SiC 二极管采用简单架构，旨在尽量降低成本，而成本主要由昂贵的 2 英寸 SiC 衬底主导。从那时起，

衬底的尺寸和质量有所提高，价格下降，二极管经历了多次迭代，复杂性增加。到 2018 年，英飞凌已推出第六代 650V SiC 肖特基势垒二极管，该系列器件能够处理 4A 至 20A 的电流。这些器件仍在供应，同时还有阻断电压为 1.2kV 和 2kV、额定电流分别高达 80A 和 40A 的第五代变体。

2002年：手机的欢呼

化合物半导体行业从未被指责将所有鸡蛋放在一个篮子里。但在本世纪初，它确实将两个最大的“鸡蛋”放在了那里。当时，手机为两种最大的畅销产品提供了关键应用：用于屏幕背光、键盘照明和相机闪光灯的 LED，以及用于放大和切换 RF 信号的 GaAs 晶体管。

在移动电话行业的初期，重点是吸引新客户。但很快，努力就扩展到吸引用户升级设备。2002 年，酷炫的新功能包括彩色屏幕、内置摄像头以及图片和照片消息服务。在日本，移动网络运营商 J-phone 为购买新手机的用户提供发送 5 秒视频片段的机会。

在过去二十年中，领先品牌发生了显著变化，改变了



在本世纪初，手机中彩色屏幕的引入推动了 LED 销售的增长。

GaAs 微电子制造商的命运。2002 年初，当支持 2.5G 的手机领先时，诺基亚 (Nokia) 以超过 35% 的市场份额占据主导地位，其手机生产为 GaAs HBT 制造商 RFMD 提供了约一半的出货量。摩托罗拉 (Motorola) 以 16% 的市场份额位居第二，紧随其后的是三星 (Samsung)、西门子 (Siemens) 和索尼爱立信 (Sony Ericsson)。

快进到 2024 年，苹果 (Apple) 以 19% 的市场份额升至首位，紧随其后的是三星。手机年销量也大幅增长。2002 年，手机销量略超过 4 亿部，自 2014 年以来，这一数字每年保持在 10 亿部以上，2018 年达到峰值，略超过 15 亿部。

2003年：电信业的动荡时期

在经历疫情或俄罗斯入侵乌克兰等经济冲击后，金融复苏可能采取多种形式。我们渴望“V”型复苏——即急剧下跌后出现同样急剧的上升，迅速恢复到稳定持续增长的时期。但通常我们现实中最好的希望是“U”型复苏，在回到美好日子之前有几个艰难的季节。我们拼命避免的是“L”型复苏，即衰退给经济留下永久伤痕。

有时，即使整体经济好转，某些行业也会经历“L”型复苏。21 世纪初，电信市场的组件制造商就是如此，导致 2003 年活动频繁。互联网泡沫破裂时，在该行业运营的 III-V 族芯片制造商最初将问题归咎于库存调整。

然而，到 2003 年，订单仍未回升，人们更清楚地认识到真正的问题是长期产能过剩。当设施易主时，这个问题无法解决——所能做的只是潜在提高生产效率。残酷的现实是，当晶圆厂数量超过供应需求时，一些必须关闭，工人必须裁员。

这一系列事件可以从 Bookham 的活动中看出。泡沫破裂后不久，它收购了北电网络 (Nortel Networks) 的光组件部门和马可尼 (Marconi) 的光组件业务。2003 年，为精简运营，它开始将北电网络在加拿大渥太华的 InP 芯片制造设

施迁至英国卡斯韦尔的前马可尼设施。此外，它还将激光组装和测试的半自动生产线从瑞士苏黎世的工厂迁至英国佩恩顿的工厂。在该工厂，用于将光芯片组装成封装产品的员工人数已从鼎盛时期的 7000 人骤降至 800 人。

当一个行业陷入困境且没有复苏迹象时，多元化进入新市场是个好主意。2003 年底，Bookham 正是这样做的，收购了数据通信网络收发器制造商 Ignis Optics 和为半导体、生物技术、国防和研究行业提供光子学和微波产品的 New Focus。

2003 年，光组件领域的另一重大转变来自 Avanex 对阿尔卡特 (Alcatel) 和康宁 (Corning) 部门的收购。前者剥离了阿尔卡特光电 (Alcatel Optonics)，后者则剥离了其在意大利米兰的光组件工厂及其在纽约埃尔温的光放大器设施。康宁的重组还包括关闭其 Lasertron 泵激光器设施，该设施是在 1999 年 11 月以 18 亿美元的股票交易收购的。

2003 年组件领域的其他变化包括：InP 光电子组件制造商 ASIP 收购陷入困境的竞争对手 ThreeFive Photonics；整合 NTT Electronics 和 Oki Electric 用于激光器、光电二

极管和调制器的光芯片处理线；爱立信（Ericsson）通过将爱立信光电（Ericsson Optoelectronics）出售给瑞典初创公司 Northlight Optronics 退出光组件业务；Agere 决定通过以 2500 万美元现金将其西海岸光电子业务出售给 Emcore 来告别该行业。

2003 年的繁忙活动之后，该行业的重组速度放缓，但并未停止。2009 年，Avanex 和 Bookham 合并成立 Oclaro，后者于 2013 年将其苏黎世 GaAs 激光二极管业务以 1.15 亿

美元现金出售给 II-VI Incorporated（现为 Coherent）。然后，在 2018 年，Lumentum 收购 Oclaro，以扩展其激光产品组合。

尽管 2003 年很容易被视为充满 gloom and doom 的一年，但仔细观察也能发现一线希望。当时，一些精明的投资者愿意向该行业注入资金，使 Infinera 在下半年筹集了高达 5300 万美元的 D 轮融资。这家总部位于加州的公司蓬勃发展，赚取了数十亿美元，并为电信行业垂直整合的优势提供了有力论据。

2004年：寻找新的关键应用

手机为 GaN LED 提供了第一个关键应用。随着手机成为必备配件，用于键盘照明和屏幕背光的该器件制造量激增。这导致领先的 LED 制造商面临更多竞争。他们知道该市场的利润率将慢慢收缩，因此寻求新的、要求更高的应用以获取更多利润。

更大屏幕的背光提供了一个非常有前景的机会，2004 年，日亚化学、丰田合成（Toyoda Gosei）和欧司朗光电半导体都在各种展会上推广 LED 背光屏幕。但竞争对手 Lumileds 率先行动，赢得了向索尼（Sony）供应其 Luxeon 系列 LED 的合同，用于索尼 2004 年的两款旗舰电视：40 英寸和 46 英寸的 Qualia 型号，零售价分别约为 7500 美元和 1 万美元。

这些电视拥有比采用冷阴极荧光灯的屏幕更宽的色域，给人留下深刻印象。毫无疑问，一些早期采用者愿意支付高额溢价来获得这项新技术。但他们的支出帮助索尼收回了部分研发投资，并未在接下来的几年导致价格暴跌、出货量增长和重大市场成功。尽管 LED 背光电视最终实现了这一点，但这花了相对较长的时间。索尼推出五年后，其高端型号仍售价数千美元。到那时，同样在 2004 年推出 LED 背光电视



三星和索尼率先推出了 LED 背光电视。这些电视于 2004 年上市，价格高达数千美元，初期销售表现不佳。但由于这些屏幕成本的大幅降低，如今它们已成为主流技术。

的三星，其 46 英寸和 40 英寸电视的售价分别略低于 2000 美元和 1500 美元。直到前十年，LED 背光才成为更实惠、占主导地位的技术。

2004 年也将作为中国开始争取重要市场份额的一年载入史册。中国国家固态照明计划于当年 6 月启动，为本土芯片制造商提供了巨大支持。这一努力最终导致 LED 行业利润率极低，并使该器件商品化。

2005年：追求超高效激光器

使用高功率激光以强大的辐射脉冲摧毁坦克和导弹是一种优雅的想法。但即使在今天，尽管基于激光的武器研发已超过 60 年，这一想法仍远未成为主流军事技术。存在各种问题，包括称为热晕的现象——高光照强度下产生的等离子体导致光束散焦。不幸的是，雾、烟、尘和雨会加剧热晕，而这些在战场上并不少见。

尽管存在这些担忧，2003 年美国国防部高级研究计划局（DARPA）开展了一项为期三年的计划，称为 SHEDS（超高效二极管源），旨在为基于激光的武器铺平道路。该计划专注于将商用红外激光棒的壁插效率从远低于 50% 提高到 80%。据赞助商称，达到这一目标可能会带来高效的 100 千



将基于激光的武器愿景变为现实的努力得到了美国国防高级研究计划局（DARPA）资助的一项计划的支持，该计划旨在将红外激光二极管的效率从低于 50% 提高到 80% 或更高。

瓦激光防御武器。

三家美国芯片制造商接受了激光二极管效率挑战：Al-falight、nLight 和 JDSU。通过改进器件，包括量子阱界面的成分分级、引入增强光学和电限制的材料，以及改变掺杂以降低接触电阻，它们都超越了 65% 的中间目标。但没有一家能达到最终目标——80% 的效率。

尽管失败，该计划留下了巨大遗产。与许多 DARPA 计划一样，受益者不在军事领域。甚至在 2005 年该计划完成之前，激光效率的提高就已对使用固态二极管泵浦激光器进

行各种材料加工任务的行业产生了影响，从医疗设备成型到汽车车身部件焊接。更高的效率降低了每瓦成本，进而减少了占系统成本三分之一的二极管支出。此外，器件可靠性提高，因为更高的效率意味着更少的热量，芯片在更低温度下运行。

二极管性价比的提高也是光纤激光器成功的关键。二极管泵浦光纤激光器为将光聚焦到目标的棘手问题提供了简单解决方案，现在广泛用于切割、焊接和折叠金属和聚合物，2024 年的销售额达到 77 亿美元。

2006年：点亮硅光子学

硅光子学听起来很棒。在硅芯片上的微型赛道上传输光子，在最先进的晶圆厂生产，预示着一个拥有负担得起的惊人计算能力和超高速通信的未来。

但你可能会有疑问，因为硅不能发光。这使得光子芯片的制造颇具挑战性，因为如果你想在芯片上集成光源，就需要找到一种方法将 III-V 族激光器与硅波导结合，同时解决这些材料之间巨大的晶格失配问题。

这一努力的首个重大成功出现在 2006 年，由英特尔(Intel)的工程师与加州大学圣巴巴拉分校约翰·鲍尔 (John Bower) 的团队合作实现。研究人员使用低温氧等离子体在两种材料的表面形成薄氧化层。该层使包含 AlGaInAs 量子阱的 InP 基芯片能够与硅波导条融合，形成电泵浦激光器。由于这些实体之间的出色耦合，硅波导在激光作用中发挥了基本作用。

基于这一成功，英特尔开发并商业化了一系列收发器产品。到 2020 年，该公司已发货超过 300 万个基于其硅光子学平台的 100G 可插拔收发器，并展示了工作在 400 Gbit/s 的四通道器件。



英特尔率先实现了磷化铟 (InP) 激光器与硅光子学的集成。在这个 50 Gbit/s 链路中，发射模块 (左侧) 将激光从绿色电路板中央的硅芯片发出，激光通过光纤传输到接收模块 (右侧)，在那里，第二个硅芯片检测激光上的数据，并将其转换为电信号。

然而，2023 年夏季，作为成本削减措施和专注于人工智能基础设施努力的一部分，英特尔将其硅光子学可插拔收发器模块业务出售给 Jabil。目前，它提供包括 800 Gbit/s 产品在内的产品组合。

2007年：下垂现象的争论

一些科学问题引起兴趣，但实际上并不重要，因为它们仅具有学术意义。但在 2007 年，下垂现象 (droop) 绝非如此。当时，这种神秘的问题限制了 LED 在大电流密度下的效率，而大电流密度是在最大的市场——通用照明中赢得业务所需的。

当时，研究人员已排除加热作为原因，并驳斥了钢团簇是测量伪像的说法。搜索继续，成功与否至关重要。揭示下垂现象的原因将为制造高效器件照亮家庭和办公室提供见解。

2007 年 2 月，飞利浦 Lumileds 大胆宣称，它已“从根本上解决”了下垂问题。这家加州芯片制造商表示，无下垂的 LED 将在几个月内推出。

颇具诱惑的是，该公司未透露这一缺陷的原因。但在 9 月，在当年最大的氮化物会议上，他们透露了细节。在拉斯

维加斯举行的国际氮化物半导体会议上，当时该公司先进实验室的负责人迈克·克拉姆斯 (Mike Krames) 宣布，俄歇-迈特纳复合 (Auger-Meitner recombination) 是原因。

这一说法引发了不同反响。部分原因是没有人希望如此，因为它没有提供制造无下垂器件的途径。

俄歇-迈特纳复合是一种本征过程，取决于载流子密度，减少它的唯一方法是原子尺度的“作用距离”，例如加宽量子阱。但实际上，由于应变，生产厚的高质量量子阱非常困难。

此外，并非所有研究人员都同意克拉姆斯及其同事的观点。一些人质疑将俄歇-迈特纳系数作为主要损耗机制所需的幅度，另一些人认为，仅仅因为可以将曲线拟合到经典上与俄歇-迈特纳复合相关的三次方依赖关系图，并不证明俄

歇 - 迈特纳导致下垂。

另一种理论来自纽约特洛伊伦斯勒理工学院 (Rensselaer Polytechnic Institute) 的弗雷德·舒伯特 (Fred Schubert) 团队，与三星的研究人员和器件模拟咨询公司 NUSOD 的理论家约阿希姆·皮普雷克 (Joachim Piprek) 合作。该团队从 2007

年底开始发表论文，将下垂归因于载流子泄漏。他们继续构建偏振匹配器件，在更高驱动电流下提供更高效率。

关于下垂原因的争论持续了多年。2013 年，如我们即将看到的，独立研究声称找到了确凿证据，明确证明俄歇 - 迈特纳复合是下垂的原因。但即使如此，也未能说服所有人。

2008年：集中式光伏的阳光时刻

经过多年等待，2008 年，集中式光伏 (CPV) 行业似乎即将取得重大突破。风险投资家已厌倦投资电信市场，开始将资金投入清洁技术，包括 CPV 开发商。这帮助少数 CPV 系统先驱赢得了多兆瓦部署合同，并导致两家多结电池制造商 Spectrolab 和 Emcore 订单满仓。当他们回头看时，看到 Spire Semiconductors、MicroLink 和 Kopin 等公司准备推出竞争产品。

这个新兴的 CPV 行业花了很长时间才走到这一步。将阳光聚焦在高效 III-V 族电池上的想法可以追溯到 20 世纪 70 年代末。几年后，俄罗斯圣彼得堡约飞物理技术研究所的研究人员组装了一个原型。他们的系统在 1981 年的一篇文章中报道，该论文由诺贝尔奖得主物理学家若列斯·阿尔费罗夫 (Zhores Alferov) 共同撰写，使用像垃圾桶盖一样大的反射器将阳光引导到 1.7 厘米直径的 AlGaAs/GaAs 太阳能电池上，紧贴铝管以防止过热。在接下来的几十年中，更多的演示器被组装出来，III-V 族电池效率不断提高，到 2008

年前后部署了数十兆瓦。

那年，市场分析师 Lux Research 称，长期迹象良好，使用 III-V 族太阳能电池的安装支出到 2012 年将达到 12 亿美元。分析师警告称，一些 CPV 初创公司将无法生存，因为它们未能解决与维护、冷却和风阻相关的重要工程问题。但在新兴市场，一些公司必然会倒闭。

不幸的现实是，到 2012 年，CPV 行业已支离破碎。许多公司破产，剩下的公司也濒临破产。全球经济危机引发的信贷紧缩剥夺了这些先驱扩大规模和实现规模经济所需的投资。另一打击来自本十年初硅太阳能电池价格的下跌。尽管投资了 5 亿美元，CPV 的部署量仅约 100 兆瓦，该行业许多知名公司的倒闭背后都缺乏业务，包括 Ammonix、SolFocus、Isofoton、GreenVolts 和 Semprius。

如今，CPV 仍处于低谷，但尚未消亡。去年年底，Fraunhofer ISE 的 CPV 专家弗兰克·迪姆罗斯 (Frank Dimroth) 告诉《化合物半导体》杂志，由于需要从给定面积最大化能源产量并最小化材料使用，长期前景是积极的。太阳能部署预计到 2037 年左右达到每年约 3.4 太瓦的峰值，如果所有产能都由今天的硅面板提供，将消耗目前生产的所有玻璃。

美国国家可再生能源实验室 (NREL) 的工作可能为 CPV 的前景带来另一长期推动，该工作有望大幅降低电池成本。该实验室的研究人员正在开发一种动态 HVPE 生长工具，该工具具有多个腔室，每个腔室用于以每小时数十微米的生长速率添加单层。使用 HVPE 生产单结电池获得的一些初步结果表明，这种生长技术可实现的光伏效率仅比 MOCVD 低几个百分点，其中部分优势来自增强光子回收的光学结构。因此，有充分理由相信，转向 III-V 族太阳能电池的 HVPE 生长可以提高产量，同时降低成本，并最终增加这种比现有技术所需材料少得多的技术的吸引力。



对集中光伏技术的兴趣在2008年达到了历史最高点。该领域的领导者Concentrix公司使用菲涅尔透镜，将阳光以通常500倍的倍率集中到三结电池上。然而，信贷紧缩和硅光伏价格的急剧下降对该新兴的集中光伏 (CPV) 行业造成了严重冲击。2009年，Soitec收购了Concentrix，随后在2015年将这项技术出售给了加拿大的STACE公司。

2009年：绿色激光的竞赛

你认为哪种更容易——以高效蓝色 LED 为起点制造波长大致相同的激光器，还是以蓝紫色激光器为起点制造绿色变体？我想你的直觉是后者。毕竟，从 LED 到激光器，需

要引入光学限制、添加反射镜、提高局部载流子浓度并降低有源区的缺陷密度。相比之下，将蓝紫色激光器转变为绿色激光器，只需在量子阱中添加更多铜。

但如果查阅历史记录，你会发现这种推理存在缺陷。得益于中村修二的开创性工作，日亚化学于1993年报告了首个高效蓝色LED，并仅用两年时间就推出了激光器。但又过了近15年，我们的社区才制造出首个绿色GaN激光器。

实现这一光源的第一个重要步骤出现在2003年，日亚化学报告了480纳米的激光器——仍为蓝色，但偏向绿色。五年后，其波长仅再延长了8纳米。该器件是否遇到了无形的障碍，蓝绿色是极限？

实现真正绿色（通常认为是520纳米及以上）的任何机会似乎都依赖于彻底的重新设计。日亚化学的工程师及其竞争对手面临的部分问题涉及提高镓含量以达到更长波长。增加阱中的镓需要降低MOCVD腔中的生长温度。然而，这会使器件充满缺陷，降低发光效率。此外，这些异质结构中的内建电场将阱中的电子和空穴分离，随着镓含量增加，电场变得更强。尽管这些电场在一方面有益，推动发射到更长波长，但它们导致有源区内界面处的电荷积累，使载流子注入器件更加困难。提高电压迫使载流子通过，但抵消了内建电场的优势，因此更长波长的发射就无法实现。

克服这一问题的新颖方法是切换生长平面。在非极性平面上生长器件可消除电场。2007年初，加州大学圣巴巴拉分校的一个团队（包括1999年底从日亚化学加入的中村修二）正是这样做的，并宣布了世界上首个非极性激光器，以脉冲模式在404纳米处发射。仅仅三天后，罗姆（Rohm）就推出了连续波变体，超越了该器件。罗姆宣布这一里程碑时，也阐述了其真正目标：制造用于彩色显示器的532纳米

激光器。年底前，其器件的发射波长已延长至459纳米。竞争对手夏普（Sharp）于2008年加入竞争，推出463纳米的非极性激光器。罗姆以481纳米的器件进行反击。

2009年证明是关键的一年。2009年2月，罗姆透露了更多进展，达到499.8纳米，超越了传统氮化物激光器的最佳记录。此时，非极性激光器在首个GaN绿色激光器的竞赛中成为热门。但任何这样想的人在九天后都受到了巨大冲击，当时传统激光器领先。这并非来自日亚化学的实验室，而是来自一匹黑马——德国雷根斯堡的欧司朗光电半导体。这家德国公司通过多方面的进展达到了500纳米。随后，在春季，日亚化学凭借传统激光器夺回纪录，首先报告成功达到510纳米，然后透露已制造出515纳米的激光器。它是如何做到的？很难说——该公司只表示改进了有源区的质量。

首个真正的绿色激光器于2009年夏初问世。夺冠的是GaN衬底专家住友（Sumitomo），7月16日宣布了一款在531纳米处发射的器件。成功来自一个中间方案——半极性平面。这种取向消除了内建电场，同时为生长富镓的InGaN层提供了良好基础。

在非极性、半极性和传统平面上的进一步研究仍在继续。2019年，索尼报告了一款525纳米的半极性激光器，峰值壁插效率超过19%，输出功率高达1.75瓦。在2020年的光子学西部展（Photonics West）上，日亚化学透露，它可以做得更好，已制造出传统的525纳米激光器，输出功率接近2瓦。此后，关于绿色二极管激光器的功率和效率没有重大公告，但显然其性能水平足以推动这类器件在许多应用中的销售。

2010年：期待已久的晶体管

英飞凌2001年推出世界上首个SiC肖特基势垒二极管，为功率电子设计师提供了一种效率更高的电流控制器件。

然而，尽管这种宽禁带二极管有助于减少损耗，电路设计师知道，如果能将这些器件与SiC晶体管配对，效率会更高，因为这将改善电流开关效率。

初创公司和成熟的SiC器件制造商接受了这一挑战。美国公司SemiSouth率先在2008年将JFET推向市场。几个月内，另一种选择出现：由瑞典皇家理工学院（KTH Royal Institute of Technology）衍生公司TranSiC推出的BJT。

但这两类SiC晶体管都未受到设计师的青睐。两者都提供快速开关和低导通电阻，这是SiC的标志，但都是“常开”型。从安全角度来看，这是一个重大问题。尽管可以通过将该晶体管与另一个器件配对来创建“常关”混合型，但这是一个不太理想的解决方案。

设计师渴望一种更高效、可直接替代硅IGBT的器件。

SiC MOSFET符合这些要求，但生产起来非常具有挑战

性。一个多年来才解决的困难是如何制造高质量的本征氧化物，这是器件核心的关键层，位于SiC和金属接触之间。工程师在硅行业使用的任何技巧都无济于事，因此他们不得不寻找替代方法，例如热生长工艺。低沟道迁移率也阻碍了商业化，通过氮气退火解决了这一问题，该步骤减少了界面态。

到2010年，SiC行业的两大巨头Cree（现为Wolf-speed）和罗姆开始大规模生产SiC MOSFET。哪家公司赢得了这场竞赛至今仍有争议——双方都声称胜利。推出并未打开销售闸门，销售受到高价的限制。

例如，推出后不久，Cree的MOSFET通过Digikey零售，价格超过80美元。

从那以后，价格下跌，生产商数量大幅增加。由于产品组合扩展和性能改善，在阻断电压和电流处理方面也有更多选择。所有这些活动都推动了销售，许多分析师称，SiC MOSFET的全球年销售额现在超过10亿美元，并继续以非常健康的速度增长。

2011年：获奖灯泡

在不久的过去，许多人在灯泡烧坏需要更换时会纠结该怎么办。如果减少碳足迹是我们的首要任务，我们会选择紧凑型荧光灯。但它们从未受欢迎。

安装后打开开关，这种灯泡需要一分钟左右才能达到全亮度，此时房间被一种相当刺眼的光照亮。调光开关无法调节亮度，处理时需要小心，因为其中含有汞。

如果所有这些妥协对我们来说太多，我们会购买成熟的白炽灯。它产生的热量远多于光，寿命也不长——通常为 1000 小时——但它有许多粉丝，因为它能立即用柔和的白光照亮房间，并且可以调暗。



认识到这些问题并试图解决它们，美国能源部于 2008 年发起了一项名为“光明未来照明奖”（Bright Tomorrow Lighting Prize）的

竞赛，更广为人知的是 L-Prize。1000 万美元的奖金将授予首家生产出兼具白炽灯优点、运行成本低于紧凑型荧光灯且寿命极长的灯泡的公司。

2011 年 8 月，飞利浦（Philips）声称获胜，其调光灯泡仅消耗 9.7 瓦功率，峰值输出为 910 流明——比典型的 60 瓦白炽灯多 110 流明。飞利浦的灯泡经过了一系列鲁棒性测试，包括振动、极端温度和高湿度环境下的运行，以及在不完善的电压供应下驱动。它轻松通过所有评估，寿命为 25,000 小时，是紧凑型荧光灯的两倍多。

当飞利浦推出这款令人印象深刻的光源时，其价格之高会让许多早期采用者望而却步。真的有人愿意花 50 美元买一个灯泡吗？

幸运的是，过去几年价格大幅下跌。如今，如果你花 50 美元购买固态照明产品，可能会从五金店带回数十个飞利浦的 60 瓦等效 LED 灯泡。得益于这些具有竞争力的价格，许多家庭现在都使用发光芯片照明。

2012年：氮化镓获得认证

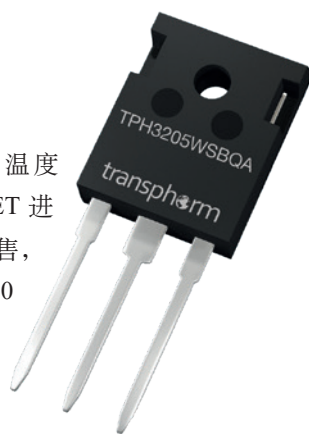
出色的结果引起兴趣，但不能保证销售。设计师需要兼具高性能和长寿命的产品。

Transphorm 的开发人员完全理解这一点。他们知道自己的 GaN FET 吸引了很多关注，因为这是一款出色的产品，效率超过硅，并且在高温下表现更好。但为了赢得销售，向潜在客户保证可靠性无忧，他们将 600V FET 送去进行独立器件测试。2012 年，它通过测试，使 Transphorm 成为行业内首个符合 JEDEC 标准的 GaN FET。

这家西海岸公司的初始产品在 SiC 衬底上生产，但生产很快转向硅。这一举措的优点不仅包括更便宜、更大的基础，还包括在成熟的 200 毫米生产线上处理器件的机会，可能在

未充分利用的晶圆厂中进行。

最近，Transphorm 在标准温度和 175°C 下对其硅基 GaN FET 进行了认证。这有助于推动销售，2019 年销量超过 50 万台。2020 年推出的第四代产品将硅基 GaN FET 的性能提升到新高度。



去年 1 月，瑞萨（Renesas）宣布将以 3.39 亿美元收购 Transphorm。该交易于 6 月完成，将这家日本芯片制造商的功率产品组合扩展到硅和 SiC 器件之外。

2013年：下垂现象的铁证？

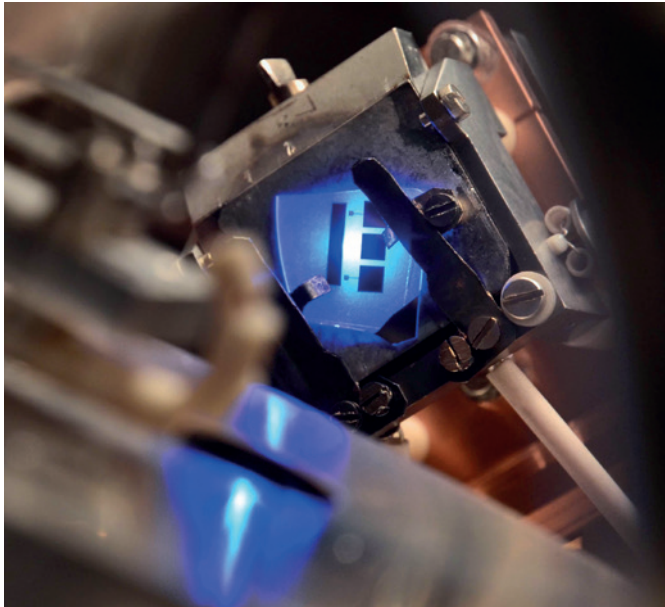
是否有可能结束关于下垂现象的争论？鉴于相互竞争、激烈捍卫的理论，需要无可辩驳的证据。获得这一点并不容易，但 2013 年春季，加州大学圣巴巴拉分校（UCSB）和法国巴黎综合理工学院（École Polytechnique）的研究人员合作声称找到了确凿证据。

该团队的证据来自一项极其巧妙的实验，该实验与 20 世纪初罗伯特·密立根（Robert Millikan）的实验相似。密

立根通过测量被光子束轰击的金属中出射电子的动能来研究光电效应。

在最近的这次实验中，研究人员将载流子注入量子阱，并记录了两种现象：LED 发出的光和从器件 p 侧出射的电子能量。为确保所有热平衡电子离开 LED，p 侧表面经过铯处理。

当该合作团队的科学家提高通过器件的电流时，他们检测到与真空发射电子相关的更高能量峰。据他们称，这一观



通过追踪穿过发光二极管 (LED) 的非辐射电子的能量，同时记录该器件的光输出，来自加州大学圣塔芭芭拉分校和法国巴黎综合理工学院的科研人员声称，他们有确凿证据表明，Auger-Meitner效应是导致LED效率降低 (droop) 的原因。

实验结果为俄歇-迈特纳效应是下垂的原因提供了确凿证据。在他们看来，没有其他机制能导致这些“热”电子峰。进一步支持这一说法的是，他们发现当下垂发生时，高能量峰开始出现。

2014年：全面布局

新兴器件的前景可以通过生产现有技术产品的最大厂商的行动来判断。如果替代品有成功的可能，一些领先公司可能会涉足；如果它们肯定会发挥重要作用，跨国公司将通过收购或内部开发进行投资。

历史现在证明，领先的功率器件生产商大力投资宽禁带技术是正确的决定。它们都从仅考虑硅器件扩展到在 SiC 或



2014年，英飞凌 (Infineon) 同意以30亿美元的价格收购国际整流器公司 (International Rectifier)。这笔交易的主导者是英飞凌科技公司 (Infineon Technologies) 的首席执行官莱因哈德·普洛斯 (Reinhard Ploss, 左) 和国际整流器公司的总裁兼首席执行官奥列格·卡伊金 (Oleg Khaykin, 右)。

那么，该领域的其他研究人员是否举杯庆祝该团队的成功并同意这项工作结束了关于下垂的争论？绝对没有。一般来说，试图探究下垂原因的研究人员立场坚定，相信在审查所有证据后，他们提出的理论仍然最具说服力。

批评者认为，实验结果可能被错误解读。波士顿大学的恩里科·贝洛蒂 (Enrico Bellotti) 声称，实验表明电子泄漏是下垂的原因，俄歇-迈特纳效应起了一定作用。

纽约特洛伊伦斯勒理工学院的弗雷德·舒伯特倾向于同意，认为实验中检测到的一些电子可能与俄歇-迈特纳效应无关，只是从LED的量子阱中泄漏出来。舒伯特难以将俄歇-迈特纳复合视为下垂的主要原因的另一个原因是，他认为下垂在低温下更强，而俄歇效应在低温下更弱。

UCSB 和巴黎综合理工学院的团队在 2013 年 11 月和 12 月的《化合物半导体》杂志上回应了批评者。在其专题文章中，他们认为在他们的 LED 中，电场不足以导致电子泄漏。他们还反驳了关于不可能观察到俄歇-迈特纳产生的电子逃逸到真空的说法，并表达了对自由载流子吸收可能是下垂原因的担忧。

讨论竞争理论有助于推动就下垂原因达成共识的努力。但即使现在，争论也未完全消失。

GaN 或两者上取得进展。

大规模多元化的先驱是英飞凌。它没有押注这两个竞争对手中哪一个会发挥更大作用，而是十多年来一直在追求两者，认为 GaN 是低于 600V 的有力候选，SiC 是更高电压的最佳选择。作为 SiC 二极管和 MOSFET 商业化的先驱，英飞凌并未启动 GaN 的内部开发计划，而是决定收购该技术。2014 年，它同意以 30 亿美元现金收购硅基 GaN 先驱国际整流器 (International Rectifier, IR)。然而，请注意，除了获得 IR 的 GaN 基技术外，它还获得了其低压硅 MOSFET 系列，该系列占销售额的最大份额。当英飞凌将 IR 纳入旗下时，它将硅基 GaN 视为长期投资，预计至少五年后才能产生销售额。

2015 年 3 月，英飞凌加深了对 GaN 的参与，与松下 (Panasonic) 合作。双方签署协议，承诺共同开发将松下的常关型硅基 GaN 晶体管与英飞凌的表面安装封装相结合的器件，这些封装将容纳这些芯片。

最近，英飞凌扩大了其 CoolGaN 产品组合，使用自己的器件生产。因此，GaN 正在推进，SiC 和硅已成熟，为这家德国巨头提供了极其广泛的产品组合。

2015年：两大巨头合并

在过去30年中，我们行业的两大领域——LED和GaAs微电子——走向了截然不同的方向。在LED行业，五大LED芯片制造商在20世纪90年代末崛起——日亚化学、Cree、Lumileds、丰田合成和欧司朗——并多年占据领先地位之一。但现在，LED行业更加分散。相比之下，尽管过去30年营收从低于5亿美元增长到超过十倍，GaAs微电子行业的竞争对手数量却急剧减少。

离开GaAs行业的大公司包括Anadigics，2016年被II-VI（现为Coherent）收购，该公司花了几年时间将其RF生产线转换为VCSEL生产。其他知名公司进行了合并。

2002年，Skyworks通过Alpha Industries和Conexant的合并成立，最近Qorvo由两大巨头RFMD和TriQuint合并而成。新实体于2015年1月1日开始交易。

此次合并有很多优势。许多人认为两家公司互补，RFMD在手机RF技术方面实力更强，TriQuint在国防产品方面拥有更好的产品组合。

投资者显然认可此次合并，两家公司的股价在披露计划后均出现两位数的涨幅。新实体最初的年营收有望略超过20亿美元；由于协同效应每年节省1.5亿美元，毛利率和营业利润率预计分别为45%和25%。

十年后，合并是否实现了所有承诺？嗯，最近四个财季的销售总额累计达到32.4亿美元，毛利率接近目标值。

然而，该公司目前略有亏损。这似乎对股价造成了压力，股价从2021年夏季的近200美元峰值跌至约70美元，即其上市首日的股价。

2016年：真正的重量级选手发力

如果你是本刊的定期读者，到上一个十年中期，你应该已经意识到氧化镓（gallium oxide）的巨大潜力。其约5 eV的宽禁带（精确值取决于特定多型）有可能对SiC和GaN这两个备受追捧的中量级选手造成致命打击。由于氧化镓的禁带更宽，它应该能够在最重要的特性——作为击穿电压函数的导通电阻——方面占据至高无上的地位。但这并非其唯一诱人的属性：它具有多功能性，因为氧化镓薄膜可以通过多种技术沉积，包括MBE和MOCVD；并且衬底有多种选择。器件可以在蓝宝石或氧化镓上生长，而氧化镓衬底的价格可能会下跌，因为这种材料的晶锭可以通过熔体基技术生长。

氧化镓的巨大潜力使研究人员和开发人员很容易吸引兴趣和初始投资。然而，与任何材料一样，其未来取决于器件能力的演示。对于氧化镓，2016年出现了大量演示。

那年，美国空军研究实验室（ARFL）的一个团队取得了两项关键突破。使用在本征衬底上生长的b-多型结构，那里的工程师生产出临界场强达到3.8 MV/cm的MOSFET，打破纪录——这是GaN临界场强的约四倍。同年晚些时候，他们实现了另一项突破，报告了首个具有高击穿电压的增强

型场效应晶体管（FET）。这第二次成功表明，氧化镓中缺乏p型载流子并非制造常关型FET的障碍。ARFL的氧化镓研究计划受到日本信息通信研究机构（NICT）工作的启发。NICT的研究人员与国内合作伙伴合作，推动了材料和器件的早期进展，并于2012年生产出世界上首个MESFET和MOSFET。

日本在氧化镓方面也取得了另一里程碑。2016年，Flosfia的研究人员使用称为雾状外延（mist epitaxy）的新型生长技术，报告了蓝宝石基 β -Ga₂O₃肖特基势垒二极管，其导通电阻优于最先进的SiC变体。几年前，这家京都大学衍生公司表示将在几个月内将其 β -Ga₂O₃功率器件商业化。该公司未能遵守时间表，市场发布因可靠性问题而推迟。然而，Flosfia似乎现在回到了正轨，取得了进展，最近宣布已开发出600V、10A的结势垒二极管原型，今年将向客户提供样品。该器件的开启电压为0.9V，包含p型(IrGa)₂O₃。除了这一进展，该公司最近还演示了沟槽栅MOSFET的运行，并扩展了生产工艺，建立了4英寸晶圆的 β -Ga₂O₃生长技术。由于计划今年验证4英寸晶圆制造，Ga₂O₃的商业前景正在上升。

2017年：创建世界首个化合物半导体集群

世界上最著名的山谷是什么？好吧，它可能不是你脑海中第一个想到的答案，但硅谷（Silicon Valley）很有说服力。

尽管该地区现在可能没有那么多晶圆厂，但在这里工作的工程师——其中许多是斯坦福大学的毕业生——不仅要感

谢他们在技术上的进步，还要感谢他们提升了我们所有在半导体行业工作的人在社会中的地位。如今，技术受到推崇，使许多人受益，尽管普通人可能从未听说过空穴、带隙或光刻。

加州并非世界上唯一拥有半导体公司集群的地区。它们



由于新冠疫情导致的延误，化合物半导体研究所（隶属于转化研究中心）于2023年5月正式开放。诺贝尔和平奖获得者兼气候科学家唐纳德·韦布勒（Donald Wuebbles）主持了开幕仪式。

也存在于比利时鲁汶、德国德累斯顿、荷兰埃因霍温以及法国格勒诺布尔。

所有这些集群的优势之一是，许多公司毗邻而居，通常在供应链中处于不同位置，它们能够相互支持，同时吸引更多工程人才到该地区。这有助于提升集群的声誉，带来更多业务和创新，同时培养创业精神，使本地初创公司有最好的发展机会。

创建世界首个化合物半导体集群的努力可以追溯到2011年，当时IQE的创始人德鲁·纳尔逊会见了威尔士经济部长。纳尔逊主张在英国建立更强大的基础设施，以支持化合物半导体行业。当时，IQE几乎没有国内客户。但这并不是说，南威尔士没有其他从事我们行业的公司：英国的这一地区过去和现在都是蚀刻和沉积设备制造商SPTS（现为KLA的一部分）的所在地，以及拥有封装专业知识的Microsemi工厂（现为Microchip Technology Caldicot）。

纳尔逊的下一步包括在欧洲数字经济技术专员成立的小组中工作。在一个考虑关键使能技术的团队中，他倡导在南威尔士建设化合物半导体的主权能力，以重建欧洲大陆的该技术制造能力。

基于这些努力，纳尔逊游说威尔士政府和卡迪夫大学（Cardiff University）成立化合物半导体研究所（Institute for Compound Semiconductors）。他设想建立一个本地设施，使用与大规模制造兼容的工具和工艺开发前沿技术。2015年3月，英国政府为该计划提供资金，一年后，规划者批准为化合物半导体研究所建造新大楼。作为创新园区的一部分，该研究所于2023年开放，在疫情导致的延误后，在转型研究中心（Translational Research Hub）中发挥主导作用。

为了将化合物半导体研究所开发的技术商业化，2015年，IQE和卡迪夫大学成立了合资企业：化合物半导体中心（Compound Semiconductor Centre）。利用卡迪夫大学的资金和CSC的一些设备，它运行合作研究项目。

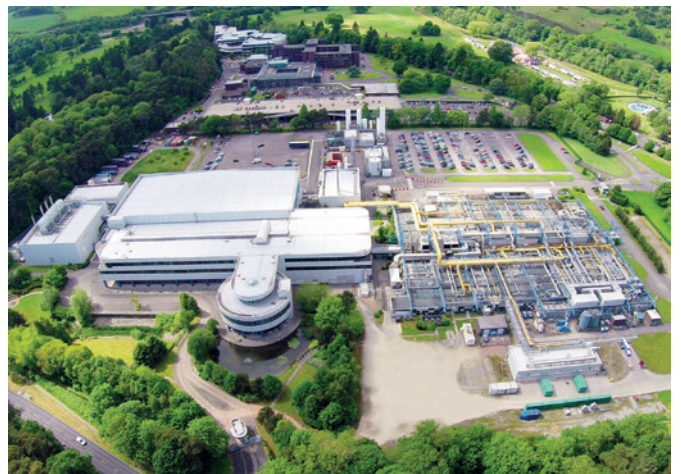
2016年，供应链中增加了更多环节。1月，英国政府投入5000万英镑，资助成立化合物半导体弹射器（Compound

Semiconductor Catapult），这是一个开放获取的研发设施，专注于帮助英国企业利用化合物半导体技术的进步。同年晚些时候，英国工程和物理科学研究委员会（EPSRC）向化合物半导体制造中心（Manufacturing Hub for Compound Semiconductors）注入1000万英镑，目标是将研究转化为大规模芯片制造。

随着许多拼图块到位，2017年夏季，该集群正式开业，命名为CS Connected，并举办活动，邀请所有关键利益相关者发言。该集群还迈出了巨大一步，抓住机会获得一条生产线。南威尔士纽波特的200毫米晶圆厂通过英飞凌收购国际整流器归其所有。在这家德国巨头评估其全球芯片制造能力后，认为纽波特晶圆厂（Newport Wafer Fab）多余。该设施被挂牌出售，纳尔逊领导了一次私募股权收购。交易完成后，纽波特晶圆厂获得了英飞凌两年的保证订单。展望未来，集群内的企业希望这些生产线也能用于生产硅基化合物半导体芯片，借助IQE收购的Translucent（一家稀土氧化物开发商，可在晶圆和化合物半导体外延层之间架起桥梁）的技术。

该集群的进一步进展包括将CS Catapult迁至为LG Semicon建造的大型建筑的一部分，IQE使用剩余部分创建一个外延代工厂，可容纳多达100台MOCVD设备。该集群还扩展到包括斯旺西大学（Swansea University），该大学正在建设集成半导体材料中心（Centre for Integrative Semiconductor Materials）。

纽波特设施的所有权威胁到部分进展，该设施于2021年被Nexperia收购。由于Nexperia是一家中国公司，此次收购引起了英国政府的担忧，政府花了数月时间deliberating over what to do。2022年11月，英国政府最终决定，该晶圆厂必须出售。12个月后，Vishay收购了该设施，去年底宣布将在该晶圆厂投资5100万美元，该晶圆厂将多元化生产SiC功率器件，并支持集群的发展。



CS Connected，世界上第一个化合物半导体产业集群，于2017年正式投入运营。到年底，这个位于南威尔士的集群通过启动Newport Wafer fab增强了其能力，而这设施是英飞凌认为多余的。

2018年：蓝色VCSEL的突破

VCSEL 具有一系列出色的属性。它效率高，允许使用电池运行；可以非常高速地开关，使其成为传输大量数据的理想光源；通过调整孔径大小，可以产生具有圆形轮廓的单模发射，简化光学设计；并且非常适合大规模制造，部分原因是其设计允许晶圆级测试。

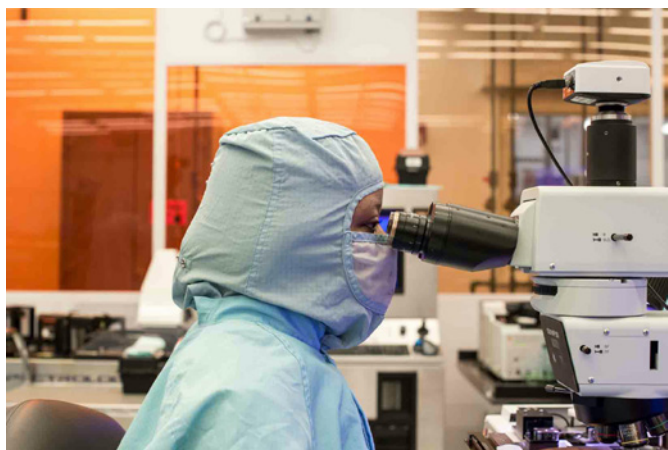
然而，仍有改进空间。尽管经过数十年的发展，VCSEL 的波长范围远窄于边缘发射激光器和 LED。

考虑到该器件的悠久历史，其光谱范围的扩展非常缓慢。其根源可追溯到 1965 年，当时麻省理工学院林肯实验室的 Ivars Melngailis 宣布了一种在 5.2 微米处发射的“纵向注入激光器”，由具有抛光顶面和底面的 InSb 二极管形成，以确保光学反馈。这种器件在当时是一项令人印象深刻的成就，但远不实用，激光发射需要 20 安的驱动电流并冷却至 10 开尔文。

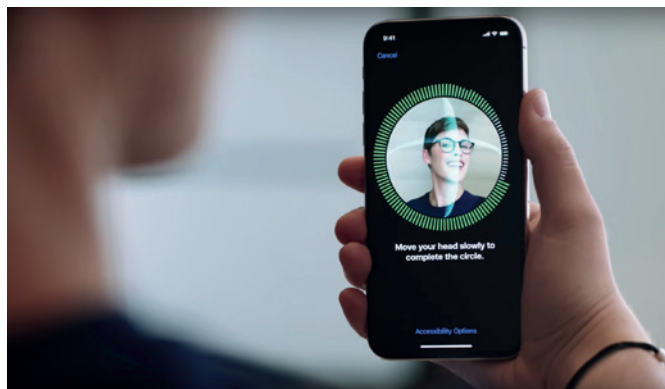
首个真正的 VCSEL 来自东京工业大学的池田健一 (Kenicha Iga) 实验室。1977 年，池田提出了一种与当今 VCSEL 具有许多相同特征的设计，在接下来的 11 年中，他几乎独自开创了这类器件，直到其他团队注意到他的突破并将努力转向该技术。随后取得了成功，20 世纪后期的研究最初集中在近红外，之后尝试在两个方向上拓宽 VCSEL 的光谱范围。

最初，基于 GaAs 的材料系统的突破实现了 980 纳米和 850 纳米的 VCSEL，之后发射波长扩展到约 650 纳米。晶圆键合带来了更多成功，允许将 GaAs 基反射镜与 InP 基有源区结合，实现 1.5 微米的发射。

到千禧年之交，研究人员开始考虑下一个目标：将发射扩展到蓝色和绿色。成功将开辟新市场，使器件能够用于高分辨率打印、高密度光数据存储、化学和生物传感、全彩显示和照明。



为确保 VCSELs 的第二个供应商，苹果同意向 Finisar 购买价值 3.9 亿美元的这些器件。



面部识别为红外 VCSEL 提供了有吸引力的市场。

生产在该光谱域工作的 VCSEL 绝非易事。为了达到这些更短的波长，必须将基于 GaAs 的材料系统替换为基于 GaN 及其相关合金的材料系统。这种转换听起来简单，但实际并非如此。

最大的问题是生产位于有源区两侧的反射镜。在基于 GaAs 的 VCSEL 中，这相对容易，因为该材料系统具有 GaAs 和 AlGaAs 的配对。这些 III-V 族材料具有非常相似的晶格常数，因此应变不是问题，并且它们的折射率差异很大，有助于反射。当使用 20 对交替的 GaAs 和 AlGaAs 层制作反射镜时，其反射率为 99%，足以制造高性能 VCSEL。

对于蓝色和绿色 VCSEL，为了防止应变使反射镜退化，GaN 必须与 $Al_{0.83}In_{0.17}N$ 配对，这是一种更难生长的合金，折射率对比度相对较低。生长两套基于 GaN 的反射镜将耗时过长，因此最好将氮化物基底部反射镜与顶部电介质反射镜结合，这是 EPFL 的尼古拉斯·格兰让 (Nicholas Grandjean) 团队开创的方法。他们的高光时刻出现在 2007 年，当时他们报告了首个光泵浦 GaN VCSEL。

令人沮丧的是，格兰让的资金枯竭，因为那些掌管资金的人认为首个电泵浦 VCSEL 将来自日本。他们大致正确，现在我们永远无法知道欧洲是否能成为该器件的先驱。

首个电泵浦 GaN VCSEL 实际上来自台湾交通大学，于 2008 年 4 月宣布。这需要低温冷却，同年晚些时候被日亚化学克服，使用了一对电介质反射镜。日亚化学坚持这一设计，2009 年将输出功率提高到 0.62 毫瓦。在接下来的几年中，它继续开发该器件，但仅实现了微小的额外增益。

重大进展出现在 2018 年，两家公司独立突破了 10 毫瓦大关——这大致是增强现实设备、投影系统和显示器所需的功率。斯坦利电气 (Stanley Electric) 与明治大学的竹内哲也 (Tetsuya Takeuchi) 团队合作，在 EPFL 工作的基础上改进了生长条件。那年秋天，他们报告了一款输出超过

15 毫瓦的蓝色 VCSEL。2018 年 11 月，索尼推出了一款 12 毫瓦的 VCSEL，采用新颖设计，具有更大的腔，包含薄化的 GaN 衬底和在晶圆背面生长的弯曲反射镜。

从那以后，进展不大，目前最强大的 GaN VCSEL 发射功率略超过 20 毫瓦。

除了蓝色 VCSEL 性能的突破，2018 年还将因红外 VCSEL 的市场成功而被铭记。在此之前，数据通信是该器件的主要收入来源。然而，2018 年，由于苹果推出 iPhone X，手机市场迎头赶上。这款智能手机包含两个 VCSEL：一个用于点投影仪，另一个用于泛光照明器。

智能手机领域的许多竞争对手也推出了采用 VCSEL 的新型号，将其用作飞行时间技术的光源，以避免任何潜在的知识产权问题。随着安卓手机制造商在最新型号中倾向于放弃 VCSEL 以腾出空间引入 5G 网络组件，这些销售在过去几年有所减少。然而，尽管失去了这一业务，消费电子市场的 VCSEL 收入仍在增长。

当苹果开始在其智能手机中部署 VCSEL 时，Lumentum 提供了该器件。但为了通过增加第二供应商来降低供应链风险，2017 年底，苹果鼓励 Finisar 成为 VCSEL 供应商，承诺订单总额达 3.9 亿美元，这家美国制造商抓住了机会。在

此期间，Finisar 的 VCSEL 生产业务被 II-VI 收购，随后并入 Coherent，该公司现在占据了重要的市场份额。

面部识别为红外 VCSEL 提供了一个利润丰厚的市场。过去几年，Coherent 和 Lumentum 一直在与 Trumpf Photonic Components 竞争苹果的业务。最近，这家已向苹果发货超过 10 亿个 VCSEL 的芯片制造商，一直在其德国乌尔姆的工厂扩大该器件的制造设施，该工厂是 2019 年从飞利浦光子学 (Philips Photonics) 收购的。

现在，数据通信市场的 VCSEL 销售额正在超过消费电子市场。因此，2022 年 Yole 预测数据通信市场将超过消费电子市场。但最新趋势表明，消费电子仍将是最大的市场，预计 2028 年将达到 9.74 亿美元，而电信和基础设施市场为 2.32 亿美元。

几年前，用于自动驾驶汽车的激光雷达 (lidar) 似乎将成为 VCSEL 的下一个关键应用。然而，自动驾驶汽车的引入受到安全问题的阻碍，并且 VCSEL 在这里面临来自光纤激光器和边缘发射激光器的激烈竞争，后者在该市场占据主导地位。这导致 Yole 预测，到 2028 年，汽车和移动市场的 VCSEL 销售额将仅为 1.08 亿美元，在当年预计的 14 亿美元中占相对较小的份额。

2019年：碳化硅的巨额注资

2019 年春季，Cree (现为 Wolfspeed) 果断调整业务。其新任首席执行官格雷格·洛 (Greg Lowe) 毫不犹豫地将其公司的照明产品部门剥离给 Ideal Industries；将带来多年成功的 LED 业务置于次要地位；并专注于宽禁带材料以及 RF 和功率器件。一系列有利可图的 SiC 晶圆供应合同帮助他做出了这一重大决定：与英飞凌、意法半导体 (ST Microelectronics) 等公司的合同总额达 5 亿美元。

到 2019 年夏季，该公司的 LED 业务已经疲软，并且从出售给 Ideal 的 3.1 亿美元交易中获得了大部分资金。这

些情况将帮助洛推进他的愿景，投资 10 亿美元大规模扩大 SiC 产能。到 2024 年，将建成一个最先进的 200 毫米设施，与 2017 财年第一季度相比，产能扩大 30 倍。

那年晚些时候，该公司收到了一个无法拒绝的报价——纽约州提供的 5 亿美元赠款。现在，它无需花费 4.5 亿美元改造其北卡罗来纳州达勒姆总部的现有基础设施，而是可以投资 1.7 亿美元在纽约马尔西建造一个新的汽车级 200 毫米功率和 RF 晶圆制造工厂。并且，产能扩大倍数从 30 倍提升至 40 倍。

2022 年 4 月，Wolfspeed 高调开业，将该设施描述为“世界上第一个、最大的且唯一的 200 毫米 SiC 晶圆厂”。

当时，该公司风顺水，拥有许多大胆计划、大量支持者，股价超过 100 美元。但此后，股价暴跌，目前交易价格远低于 10 美元，因为该公司难以应对电动汽车市场的缓慢增长，同时面临来自中国 SiC 衬底竞争对手的加剧竞争。去年 10 月，Wolfspeed 搁置了在德国萨尔兰建造世界上最先进的 SiC 制造设施的计划，现在正在裁员五分之一以降低成本。这些裁员包括格雷格·洛，他于 11 月被解雇。该公司现在正在寻找新的领导者来扭转局面。



2022年4月25日，Wolfspeed在其位于纽约州上州莫霍克谷的200毫米汽车级碳化硅 (SiC) 制造工厂开业当天，还宣布与Lucid Motors签署了一项多年协议，向其供应碳化硅功率半导体。这些器件已被应用于豪华纯电动车型Lucid Air。

2020年：新冠疫情下的曙光

谁能忘记2020年？这场疫情席卷全球，新冠病毒的迅速传播带来了灾难性后果。世界卫生组织数据显示，全球死亡人数超过300万。除了高死亡率，各国经济也面临巨大压力——许多国家的公民被迫隔离，引发心理健康问题，其影响延续至今。

当政府政策促使许多人居家办公时，半导体行业中从事实际生产的从业者却被赋予了不同的意义。化合物半导体工厂昼夜不停地生产芯片，甚至从这场全球危机中获得了发展机遇。

为降低生命损失，科学家全力加速疫苗的研发与推广。除了这一“变革性技术”，人们还在寻找杀灭病毒的解决方案。

一种有效的病毒灭活方法是使用深紫外光源照射。传统的汞灯体积庞大、易碎、需要高压驱动，且存在环境问题。而解决这些缺陷的方法之一是转向深紫外发光二极管(LED)。尽管其性能目前落后于蓝光LED，但在利润丰厚的应用推动下，加大投资有望实现跨越式发展。

疫情期间，深紫外LED的关注度飙升，企业纷纷推出新型器件、专用生长设备及各种消毒系统。

由于光提取效率和掺杂水平等问题，高性能深紫外LED的制造远比可见光LED困难。基于这些挑战，成熟的器件制造商更有能力扩大产能，例如Sensor Electronic Technology与首尔半导体子公司Seoul Viosys的合作。在疫情最严峻时期，双方开始大规模生产能在3秒内杀灭99.9%新冠病毒的紫外LED模块。此外，他们还启动了“光子淋浴”技术的研发，这是一种全身消毒解决方案，可在数秒内杀灭衣物上的病菌。

2021年：垂直整合的价值

你认为我们行业何时开始大规模制造器件？虽然没有明确答案，但20世纪90年代末是一个有力候选——当时晶圆厂开始大量生产GaAs晶体管和GaN LED，这两种器件是不断增长的手机市场的核心。

生产LED时，晶圆厂通常购买蓝宝石衬底，在内部进行外延生长和加工，然后将芯片送往封装合作伙伴。而对于GaAs HBT，常见两种路线：外延生长外包或由芯片制造商自行完成。

对于LED和GaAs HBT制造商，衬底生产无疑是关键环节。这一任务由专门生长晶体、切割和抛光衬底的公司承担，为外延生长提供高质量基础。

碳化硅(SiC)的供应链更为多样化。由于SiC无法从熔体中生长，高质量衬底的生产绝非易事，这也是器件从实

2020年夏季，疫情高峰期，新加坡机器人制造商Ostaw Digital宣称推出了全球首款使用深紫外LED的消毒机器人。

为支持深紫外LED生产企业，中国设备制造商中微半导体(AMEC)推出了新型MOCVD设备Prismo HiT3，该设备被认为是生产高质量AlN层(深紫外光源的关键材料)的理想工具。

封锁高峰期，新型深紫外LED消毒系统也推向市场。2020年夏季，水处理专家AquiSense推出表面消毒系统，Ostaw Digital的消毒机器人充满电后可自主部署5小时，在2.5米范围内消毒率达99.999%。

市场分析机构Yole数据显示，2020年适用于新冠病毒消毒的深紫外LED销售额飙升，收入同比几乎翻倍，达3.08亿美元。但这仍远低于可见光LED市场规模。尽管疫情为深紫外光源的长期健康发展提供了催化剂，但其价值更多体现在重要性而非销售额上。



在2020年夏季，新冠疫情最严重的时候，Ostaw Digital声称推出了世界上首款使用深紫外LED的消毒机器人。

验室到晶圆厂进展相对缓慢的原因。对芯片制造商而言，获得充足的高质量衬底是生产高性能器件的关键，因此过去几年许多企业在扩大产能时，不得不协商晶圆供应协议。

SiC器件先驱Cree(现Wolfspeed)满足了部分需求。该公司将SiC衬底作为LED生产的基础，这种模式积累了丰富的SiC衬底专业知识，并通过大规模生产提升了衬底质量，为内部SiC功率器件的研发和商业化提供了良好平台。

中国三安集成位于长沙高新区的制造工厂是国内首条垂直整合的SiC生产线。

在羡慕Wolfspeed的成就后，许多领先的SiC二极管和MOSFET制造商正通过开发从SiC衬底生产(甚至从粉末提纯开始)的垂直整合能力，将主动权掌握在自己手中。

2021年，许多SiC功率电子领域的巨头在垂直整合上

迈出重要步伐。其中包括 Wolfspeed 的长期竞争对手罗姆 (Rohm)，该公司在日本筑后完成了 1.9 亿美元的 SiC 晶圆和器件生产工厂建设，预计芯片产量将提高五倍。此前，罗姆于 2019 年收购了德国 SiC 晶圆制造商 SiCrystal。

另一个值得关注的动向来自中国，三安集成投资 23 亿美元的制造工厂投产，该工厂整合了晶体生长、功率器件生产及封装测试。分阶段建设中，芯片生产初期为每月 1.5 万片 6 英寸晶圆，长期计划转向 4 万片 8 英寸晶圆。

安森美 (Onsemi) 也在 2021 年以 4.15 亿美元收购了美国 6 英寸和 8 英寸 SiC 材料生产商 GT Advanced Technologies，旨在确保和扩大 SiC 供应，满足电动汽车和能源基础设施对 SiC 功率电子器件的增长需求。

SiC 功率器件巨头的垂直整合趋势延续至今。2022 年底，意法半导体 (STMicroelectronics) 宣布将在西西里岛卡塔尼亚工厂生产 SiC 衬底，计划 5 年内投资 7.3 亿欧元，2023 年



三安集成位于长沙高新技术产业园的制造工厂，是中国首个垂直整合的碳化硅 (SiC) 生产线。

开始衬底生产。去年，该公司宣布进一步投资 50 亿欧元，并在 2024 年 5 月获得意大利政府 20 亿欧元支持 (基于欧盟芯片法案)，用于建设垂直整合的 200 毫米 SiC 园区，涵盖衬底开发、外延生长、晶圆制造、模块封装及多项研发计划。该园区 SiC 产品生产将于 2026 年启动，2033 年达满产，每周处理 1.5 万片晶圆。

2022年：功率氮化镓的转折点？

对于许多新兴器件，商业成功绝非线性。初期突破困难重重，需耗费大量精力说服潜在客户采用新芯片。但一旦成功，其他企业将跟进，推动器件销售并展现其优势，进而为进一步拓展新应用奠定基础。

功率氮化镓 (GaN) 器件的转折点出现在 2022 年，许多生产商通过扩展产品组合或扩大产能瞄准新市场。GaN HEMT 在手机充电器中的应用 (实现更短充电时间) 为其进入新市场奠定了基础。2022 年夏季，Yole 预测 2021-2027 年消费电源市场复合年增长率为 52%，规模达 9.15 亿美元，同期全球 GaN 收入将达 20 亿美元。该法国分析机构指出，电信和数据中心电源将带来快速增长的销售额，2027 年有望达 6.2 亿美元。Transphorm、EPC、德州仪器、英飞凌和 GaN Systems 等公司的设计中标助力了这一领域的收入增长。

截至 2022 年，已被英飞凌收购的 GaN Systems 在汽车市场取得重大进展，获得宝马、丰田、加拿大 GaN 动力系统开发商 FTEX 及电动汽车动力系统供应商 Vitesco Technologies 的合同，并从宝马 i Ventures、Vitesco 等获得 1.5 亿美元投资。

2022 年初，时任 GaN Systems 首席执行官 (现英飞凌高级副总裁) Jim Witham 在接受《化合物半导体》采访时表示，GaN 功率器件的高频性能可推动其在电动汽车车载充电器和 DC-DC 转换器中的成功，甚至可能与 SiC 在牵引逆变器领域竞争。

从安森美收购的 BelGaN 曾雄心勃勃，计划将比利时奥德纳尔德晶圆厂转型为欧洲领先的 6 英寸和 8 英寸车用 GaN 代工厂，但梦想未实现，2024 年 7 月该公司申请破产。

中国 GaN 芯片制造商 Innoscience 也在 2022 年瞄准新



从Onsemi手中收购的BelGaN对位于奥德纳尔德的工厂抱有雄心壮志，计划将其转型为生产面向汽车行业的氮化镓 (GaN) 功率器件。然而，这些梦想未能实现，BelGaN于2024年7月申请破产。

机遇，在美国和欧洲开设销售办公室，计划将珠海和苏州 8 英寸晶圆厂的产能从每月 1 万片提升至 1.4 万片。该公司以快充充电器销售为主，目标拓展数据中心 DC-DC 转换器、LED 驱动器、激光雷达驱动器及电动汽车 DC-DC 转换领域的收入，远期看好 650V 车载充电器。

2022 年追求新市场的其他 GaN HEMT 生产商包括：罗姆推出用于基站和数据中心电源的 150V HEMT；EPC 推出用于太空应用的抗辐射 GaN 功率器件演示板；Navitas 推出 GaNSense 半桥功率 IC，通过栅极驱动器、功率器件及传感保护功能的单片集成突破技术，巩固其作为领先 GaN 功率器件供应商的地位。当时，Navitas 的器件已应用于 150 多种不同公司的充电产品，并在太阳能、数据中心和电动汽车领域发现机遇。

2022 年，欧洲一家硅晶圆厂开始转型生产 GaN 器件。2 月，BelGaN 集团从安森美收购比利时奥德纳尔德晶圆厂，目标成为欧洲领先的 6 英寸和 8 英寸车用 GaN 代工厂。但该项目失败，去年夏季 BelGaN 申请破产，440 个工作岗位面临风险。

2023年：新的氮化镓专利战

在 GaN 领域，HEMT 似乎正沿着与 LED 相似的轨迹发展。早期高亮度 GaN 基 LED 时代，许多公司专注于扩展产品组合以赢得利润丰厚的合同。但随着销售额增长，这些芯片制造商开始超越器件优化，发起专利诉讼，声称关键专利被侵权。2023 年，随着 GaN 功率器件销售额飙升，历史开始重演。

GaN HEMT 专利战的第一枪于 2023 年 5 月打响，加州无晶圆厂公司 EPC 发布新闻稿，称起诉中国芯片制造商 Innoscience 侵犯其四项美国专利，指控后者在生产 100V 和 650V 产品时使用了这些知识产权。EPC 不仅向联邦法院和美国国际贸易委员会（ITC）提起诉讼，还公开指责 Innoscience 挖走两名员工（后成为该公司 CTO 和销售营销主管），称这些招聘是推出类似产品的背后原因。两天后，Innoscience 发布新闻稿称经内部调查和详细分析，未发现侵权行为，否认指控。

然而，这场专利战的关键不在于新闻稿交锋，而在于基于专利细节在法庭上提出胜诉论点。

EPC 与 Innoscience 的纠纷涉及双方生产的一种特定形式 HEMT——栅极下方具有 P 掺杂 (Al) GaN 层的常关型 (E 模式) 器件。

最初，EPC 对 Innoscience 的诉讼涉及四项专利（两项 2013 年，两项 2017 年），但在 ITC 案件中放弃了后两项。

两项争议专利之一 US 8,350,294 涉及补偿栅 MISFET 的设计与制造，核心问题是“Innoscience 器件中的栅极层是否属于‘补偿 GaN 层’（推测通过镁掺杂形成）”。实现有效

的 p 型掺杂并非易事，这曾是 LED 发展的关键里程碑。

另一项专利 US 8,404,508 涉及自对准栅 E 模式 HEMT，描述了使用三种不同光刻胶图案进行多步工艺以生产自对准栅。

2024 年夏季，ITC 行政法官 (ALJ) 的初步裁决认定 EPC 的两项专利均有效，且 ‘294 专利被侵权。对 Innoscience 的另一打击是，裁决认定 EPC 在中国的对应专利也有效。

去年 11 月，ITC 确认初步裁定，Innoscience 侵犯 ‘294 专利，决定禁止其在未获 EPC 许可的情况下向美国进口 GaN 相关产品。经过 60 天的总统审查期（今年 1 月完成），ITC 最终裁定 Innoscience 未经许可不得在美国进口和销售其产品。

英飞凌对 Innoscience 采取了额外行动，2024 年 3 月在旧金山提起诉讼，涉及一项具有“源极感应”的高压封装专利。Innoscience 于 6 月向美国专利局提交请愿书，主张所有权利要求无效。夏季，英飞凌在德国提起多起诉讼，获得初步禁令，禁止 Innoscience 的部分高压 GaN 晶体管在 PCIM 展上推广。这家德国巨头还在旧金山案件中增加三项专利，并向 ITC 提出投诉。

新增的三项专利之一涉及电极堆叠中氮化钛覆盖层的厚度，另外两项与“合并共源共栅晶体管”相关。

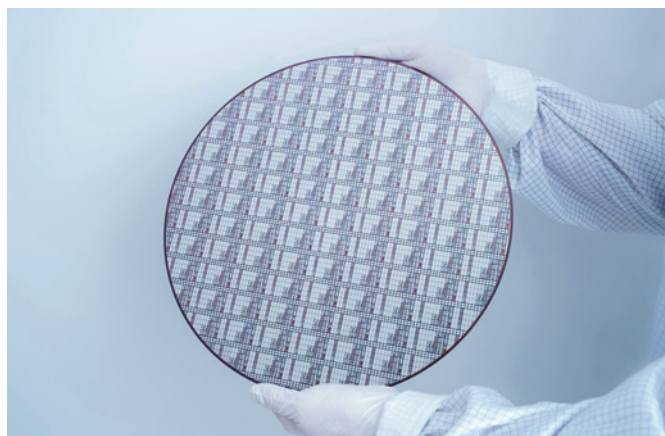
专利战今年注定成为新闻焦点。1 月 Innoscience 对英飞凌提起诉讼，涉及 GaN 功率器件及其制造方法，秋季 AJC 将对英飞凌的指控作出初步裁决。鉴于收入快速增长和更多参与者进入，GaN 功率器件制造商之间的诉讼不太可能是最后一次。LED 的历史表明，专利战将持续，结局难以预见。

2024年：追赶硅晶圆

在半导体行业，实现规模经济的一条成熟路径是增大晶圆尺寸。硅晶圆引领潮流，从 20 世纪 60 年代的 1 英寸到 90 年代的 6 英寸，千禧年初转向 200 毫米，2010 年代后 300 毫米日益普及，此后停滞不前。

我们的行业（常处于硅的阴影下）正在追赶，功率电子领域 2024 年取得重大进展。下半年，英飞凌宣称开发出首款 300 毫米功率 GaN 技术，中国 SiC 衬底供应商 SICC 展示了首款 300 毫米 SiC 衬底。

由于当前硅基 GaN HEMT 生产使用直径 200 毫米或更小的衬底，英飞凌的突破使每晶圆器件数量翻倍以上。但这并非唯一优势，更大晶圆还能改善制造工艺，如提高良率和采用更先进的计量技术。英飞凌工程师在从 150 毫米升级到 200 毫米晶圆时已受益，转向 300 毫米平台时再次体验到这些优势。



2024年秋季，英飞凌声称开发出了首个300毫米功率氮化镓技术，有望实现与硅器件的成本相当。

基于 200 毫米硅基 GaN 技术，英飞凌的 300 毫米工艺研发耗时 18 个月，有望实现与硅器件的成本 parity。实现这一目标的助力包括：规模经济、技术改进（尤其是外延堆叠）、GaN 的低导通电阻（允许更小芯片实现与硅器件相当的性能）。

300 毫米外延片的生长具有挑战性，晶格常数和热失配差异可能导致弯曲甚至开裂，高压所需的较厚 GaN 层加剧了这些问题。英飞凌已确定从 100V 到 650V 的发展路径，但超越这一范围更具挑战，可能需要转向更厚的衬底。

11 月中旬在慕尼黑举行的 Electronica 展上，英飞凌发布下一代 G5 HV 技术，计划将该工艺应用于 300 毫米晶圆，工程样品将于今年底交付客户，2026 年量产。

2024 年秋季，英飞凌宣称开发出首款 300 毫米功率 GaN 技术，旨在实现与硅器件的成本 parity。

全球第二大 SiC 生产商 SICC 也选择 Electronica 展示其

成就——世界首块 300 毫米 SiC 衬底，由 20 毫米厚的 n 型晶锭切割而成，采用与制造 200 毫米材料相同的轴向生长速率。

历史上，SiC 衬底受多种缺陷困扰，这些缺陷会降低甚至破坏器件性能。但许多公司已解决这些问题，且 SICC 制造 300 毫米衬底的工艺与较小晶圆相同，因此实现大尺寸衬底的先进质量没有重大障碍。

对 SICC 突破性 300 毫米衬底的表征显示，关键缺陷微管道并非重大问题，表面粗糙度与该公司 200 毫米晶圆相当。更值得关注的是基面位错，需要进一步降低。

但该公司有信心复制 200 毫米 n 型衬底的密度。

SICC 的 300 毫米 n 型 SiC 衬底商业化时间将取决于这种新规格的技术进展速度和市场需求，预计 2027 年开始小批量生产。

2025年：microLED的时刻到了吗？

在寒冬深处，很难确定今年化合物半导体行业最重要的里程碑是什么。但基于最近消费电子展（CES）的一些头条新闻，或许今年将是 microLED 开始实现商业潜力并产生可观销售额的一年。

过去几年，这种微型发光器件遭遇了挫折。除了未达到市场分析师的部分乐观预测，去年 2 月苹果决定终止与 ams Osram 的供应协议，这可能是一个毁灭性打击。

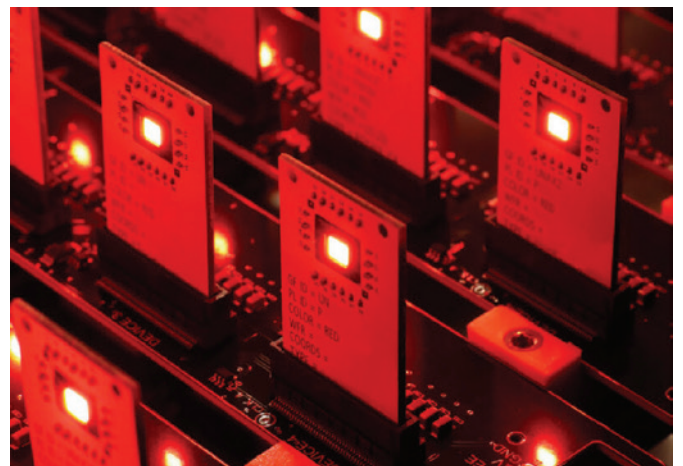
苹果的举动促使这家欧洲芯片制造商考虑出售其在马来西亚的第二座晶圆厂，产生了广泛影响——苹果多年来在这一领域扮演了重要角色。可以说，这家科技巨头通过 2014 年收购初创公司 Luxvue 创造了 microLED 行业，这一举措促使数十家初创公司及大多数 OEM 和显示器制造商投资该技术。

尽管苹果的决定震动了 microLED 行业，但密切关注发展的人可能预见到了这一结果。Osram 的 microLED 晶圆厂投产时间表多次推迟，表明苹果和其他合作伙伴在下游遇到问题和延误，尤其是在 microLED 向背板的大规模转移、组装及整体工艺集成方面。此外，良率低下阻碍了成本目标的实现。

今年 1 月，与 Meta 合作的英国 microLED 制造商 Plessey 宣称生产出适用于 AR 眼镜的最亮红色 microLED 显示屏，这一成就被认为是迈向下一代计算平台的关键一步。

苹果退出 microLED 行业后，其中心已转移到台湾地区，得益于友达光电（AUO）和 PlayNitride，当地拥有强大的生态系统。

这两家公司的近期亮点包括：友达光电 2024 年 5 月在



今年1月，英国的微型LED制造商Plessey（与Meta合作）声称已生产出适合增强现实（AR）眼镜的最亮红色微型LED显示屏。

Display Week 上展示 17.3 英寸折叠屏，并建设新的车用显示器产线，预计 2026 或 2027 年投产；PlayNitride 完成 Veeco Lumina MOCVD 系统的 microLED 生产认证，并订购两台设备，今年交付。

在 CES 上，与会者注意到尽管台湾地区在 microLED 商业化方面领先，但这是一个全球行业。法国 microLED 制造商 Aledia 宣布利用纳米线技术开发出单片集成红、绿、蓝 microLED 的微显示器，在同一衬底上实现突破性效率；加拿大公司 VueReal 推广其 microLED 设计参考套件，声称可加速技术采用。

这些突破对 microLED 的未来令人鼓舞，但无法保证成功。由于 incumbent OLED 技术不断进步，2025 年可能是 microLED 的“生死之年”，决定这一微型奇迹的未来。📺

基于超宽禁带氮化物 AlN/AlGaN 异质结半导体器件的研究

作者：何溢勇、刘国梁、梁帅、肖科、樊永辉（通信作者）
深圳市汇芯通信技术有限公司

摘要

本文报道了基于 AlN/AlGaN 异质结的肖特基势垒二极管（SBD）的制备与表征结果。通过系统性实验研究了异质结关键参数对界面二维电子气（2DEG）特性的影响规律，分析参数包括沟道层 Al 组分、沟道层与势垒层厚度，以及帽层材料类型与厚度。实验发现，当 Al 组分为 50% 时，2DEG 获得了 $142 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 的电子迁移率和 $1989 \text{ } \Omega/\square$ 的方块电阻。基于优化后的异质结结构，成功制备并测试了 SBD 器件。结果表明，该器件展现出的整流特性，正向导通机制明确，反向击穿电压超过 1500 V，同时在 300–550 K 宽温域内保持 $\sim 1 \mu\text{A}/\text{mm}$ 的超低反向漏电流。本研究验证了 AlN/AlGaN 异质结器件在高温、高压及高功率电子系统中的卓越应用潜力。

前言

在后摩尔时代，半导体技术正面临诸多挑战与战略机遇，这些挑战与机遇正深刻驱动半导体技术的创新演进。新型半导体材料作为后摩尔时代技术突破的核心方向之一，其研发进展对产业升级具有决定性意义。宽禁带半导体材料凭借其高临界击穿电场强度（ $> 3 \text{ MV}/\text{cm}$ ）、高饱和电子漂移速率（ $> 2 \times 10^7 \text{ cm}/\text{s}$ ）等本征优势，在高温功率模块、高频通信器件、极端环境传感器等领域展现出不可替代的应用价值。以碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）为代表的宽禁带半导体材料，已在新能源汽车电驱系统、智能电网换流装置、5G 基站射频功放等场景实现规模化应用。

为满足更高频率、更大功率、更高温度、更高效率及更小尺寸的应用需求，超宽禁带半导体材料研发近年成为国际研究热点。典型材料体系包括： β -氧化镓（ $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ ），其禁带宽度达 4.8 eV，临界击穿电场强度高达 $8 \text{ MV}/\text{cm}$ ，在高压功率器件和深紫外探测领域具有颠覆性潜力；金刚石材料，兼具 5.5 eV 超宽禁带、 $2200 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 极限热导率以及 $4000 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 以上的高载流子迁移率，被视为下一代电力电子器件的终极材料解决方案。

氮化铝（AlN）作为超宽禁带半导体材料，

具有 6.2 eV 的本征带隙和 $12\text{--}15 \text{ MV}/\text{cm}$ 的临界击穿电场强度，其 Baliga 品质因数（BFOM）较 SiC 和 GaN 高出两个数量级以上。这种材料兼具高热导率（ $\sim 320 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ）、高电子饱和漂移速度（ $\sim 1.7 \times 10^7 \text{ cm}/\text{s}$ ）和优异的化学稳定性，在极端环境电子器件、高功率电力电子模块、高温传感器等领域展现出不可替代的应用价值。

近年来，AlN 材料生长技术及器件制备成为国际研究热点。Woo 等^[1]系统综述了该领域的研究进展。Fu 等^[2]首次通过金属有机化学气相沉积（MOCVD）技术在蓝宝石衬底上制备了硅掺杂 n 型 AlN 肖特基势垒二极管（SBD），器件实现 1 kV 反向击穿电压，并在 500 K 以上高温环境中保持稳定工作，验证了 AlN 基电力电子器件的可行性。Okumura 等^[3]开发的 AlN 基肖特基二极管和硅注入 MESFET 器件分别实现 1100 K 和 1000 K 的极限工作温度，其中 SBD 器件击穿电压达 610 V，势垒高度为 3.5 eV，为高温电子器件设计提供了重要参考。Irokawa 等^[4]在单晶 AlN 衬底上制备的横向 SBD 器件，在室温和 -40 V 偏压下反向漏电流仅 0.1 nA，且在 573 K 高温下仍保持稳定运行，证实了 AlN 材料在高压器件中的应用潜力。Mudiyanselage 等^[5]通过优化衬底制备工艺，在

单晶 AlN 衬底上实现了 3 kV 击穿电压的垂直结构 SBD，器件整流比达 10^6 - 10^8 ，且在 298-623 K 宽温域内保持优异的热稳定性，标志着 AlN 材料在超高压器件领域的重大突破。Kumabe 等^[6]采用分布极化掺杂 (DPD) 技术成功制备出近理想的垂直结构 $Al_xGa_{1-x}N$ ($0.7 \leq x < 1.0$) p-n 结二极管，通过优化 p 型层和 n 型层掺杂分布，器件实现 6.5 V 低开启电压、7.3 MV/cm 击穿场强，并在室温至 573 K 范围内保持理想因子 2 的稳定特性，为解决 AlN 基材料导电类型控制难题提供了创新方案。Cao 等^[7]通过富氧快速热退火工艺优化 AlN SBD 界面特性，使器件整流比提升至 10^7 ，击穿电压突破 1150 V，为 AlN 基器件性能优化提供了新途径。Hussain 等^[8]采用 MOCVD 技术在 AlN 衬底上制备了 $Al_{0.87}Ga_{0.13}N/Al_{0.64}Ga_{0.36}N$ 异质结结构，实现了 $\sim 1.8 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 的 2DEG 密度和 2400 Ω/\square 的低沟道电阻，并测得超过 11 MV/cm 的击穿场强，为高频高功率器件设计奠定了材料基础。这些研究表明，作为一种兼具优异热学、电学、力学和化学性能的半导体材料，AlN 将在电子电力、机车、航空、航天、国防和通讯等领域具有广泛的应用前景和巨大的发展潜力。

然而，当前 AlN 基半导体器件仍处于研发阶段，面临材料与器件层面的多重技术瓶颈。材料方面，单晶 AlN 衬底存在生长工艺复杂、制备成本高昂等问题；器件层面则面临缺陷工程、掺杂调控及欧姆接触优化等关键挑战。以 n 型掺杂为例，传统硅掺杂技术存在电离能较高 ($> 200 \text{meV}$) 导致的载流子激活效率低问题，且低掺杂浓度下易受碳杂质补偿和位错缺陷的协同影响。具体表现为：当碳杂质占据氮原子晶格位点时，会形成受主型缺陷态，捕获硅施主提供的自由电子；而位错缺陷不仅通过悬挂键形成电子陷阱，还会促进碳杂质的偏聚，进一步降低载流子浓度。值得注意的是，高硅掺杂浓度下会形成硅 - 本征缺陷复合体 (如硅 - 铝空位复合体)，这些缺陷能级位

于禁带中，通过增强电子散射和陷阱效应，显著削弱掺杂效率。

与体材料掺杂技术不同，AlN/AlGa_N 异质结通过界面自发形成高迁移率二维电子气 (2DEG) 实现导电特性。本文系统研究了 AlN/AlGa_N 异质结结构参数对 2DEG 输运性能的影响规律，并基于优化结构制备了高性能肖特基势垒二极管 (SBD)。实验结果表明，该异质结器件展现出 1500 V 以上反向击穿电压、 $\sim 1 \text{uA/mm}$ 超低反向漏电流及 300-550 K 宽温域稳定性，为下一代高功率开关器件和高频射频系统提供了兼具高性能与低成本优势的技术解决方案。

AlN/AlGa_N 异质结

图 1 所示为本文研究的 AlN/AlGa_N 异质结结构示意图。该多层结构自下而上依次为衬底、缓冲层 (Buffer)、沟道层 (Channel)、势垒层 (Barrier) 及帽层 (Cap)。其中势垒层采用本征带隙 6.2 eV 的 AlN 材料，而沟道层选用 AlGa_N 三元合金材料，其带隙可通过 Al 组分 (x) 在 3.4 eV (Ga_N) 至 6.2 eV (AlN) 范围内连续调节。例如，当 Al 组分为 0.2、0.5 和 0.8 时，AlGa_N 的本征带隙分别为 3.96 eV、4.8 eV 和 5.64 eV。

沟道层 AlGa_N 外延生长于缓冲层之上，该缓冲层通常采用 AlN 材料。其核心作用包括：1) 补偿衬底与外延层之间的晶格失配 (蓝宝石衬底与 AlN 晶格失配度达 16%) 和热膨胀系数差异 (蓝宝石与 AlN 的热膨胀系数分别为 $7.5 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ 和 $4.2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$)，从而显著提升外延层晶体质量；2) 缓解材料生长过程中因温度梯度产生的热应力，有效抑制外延层开裂和翘曲等问题；3) 通过优化缓冲层厚度，可实现对器件击穿电压和漏电流的协同调控。

帽层沉积于 AlN 势垒层表面，其主要功能包括：1) 物理保护作用，防止势垒层表面氧化及杂质吸附，维持异质结界面二维电子气 (2DEG) 的高迁移率特性；2) 电学调控作用，通过优化帽层材料 (如 SiN_x) 及厚度 (5-10 nm)，可精确调控 2DEG 的浓度和分布，从而提升器件跨导和截止频率等关键性能参数。

图 2 所示为 AlN/AlGa_N 异质结能带结构示意图。由于两种材料的本征带隙存在显著差异 (AlN:6.2 eV vs AlGa_N:3.4-6.2 eV)，在异质结界面的导带底存在 ΔE_c 的能量偏移。这种导带阶

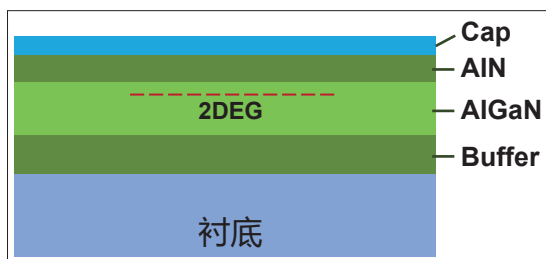


图1: AlN/AlGa_N 异质结结构

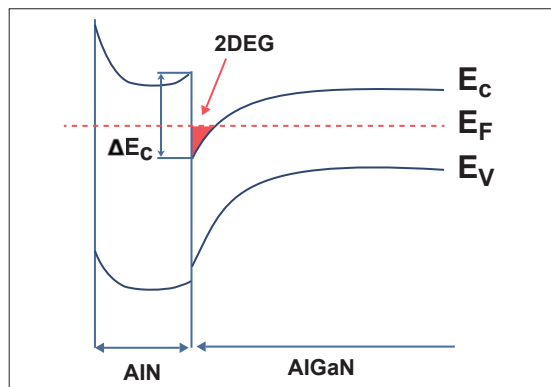


图2: AlN/AlGaN异质结能带示意图

差与量子限制效应共同作用，导致界面处能带发生弯曲，形成深度约为 $\Delta E_c/2$ 的二维电子势阱。被限制在该势阱中的电子仅能沿界面平面作二维运动，从而形成具有高迁移率特性的二维电子气 (2DEG) 系统。

值得注意的是，AlN 材料的强极化效应（自发极化强度约为 -80 至 $-90 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ ）与异质结界面压电极化的协同作用，可在势垒层中诱导高密度极化正电荷。即使不引入任何掺杂，这些极化电荷也能在界面处感应出 $\sim 1.5 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ 的 2DEG，其面密度较传统掺杂结构提高 1-2 个数量级。这种高密度 2DEG 不仅显著提升器件的电流导通能力，其高迁移率特性还赋予器件优异的高频响应性能。

基于上述能带结构与 2DEG 特性，AlN/AlGaN 异质结为多种新型器件提供了材料基础。例如：肖特基势垒二极管 (SBD) 利用 2DEG 的高导电性实现低导通电阻，同时借助 AlN 的超宽禁带特性获得 $> 1500 \text{V}$ 的击穿电压；高电子迁移率晶体管 (HEMT) 则通过调控 2DEG 浓度与分布，实现高跨导和截止频率，在 5G 和未来通信与电力电子领域展现出显著优势。

与传统体材料通过掺杂形成的自由电子相比，AlN/AlGaN 异质结界面二维电子气 (2DEG) 具有更高的电子迁移率和更高的电子密度。基于该异质结结构的半导体器件突破了 AlN 材料掺杂效率低的关键技术瓶颈，展现出以下优异特性：更高的电流密度、更高的开关速度、更低的导通电阻、

更低的反向漏电流、更高的击穿电压以及温度稳定性。该材料体系的技术突破为高功率密度、高阻断电压和大电流的新一代电力电子器件提供了创新解决方案，特别适用于新能源汽车电驱系统、智能电网换流装置及航空航天电源等领域。

AlN/AlGaN 异质结外延材料的生长

上述异质结结构的性质和半导体器件的性能会受到诸多关键因素的影响。1) 沟道层 AlGaN 的 Al 组分：恰当选取 Al 组分比例，是调控器件性能的重要环节；2) AlGaN 材料生长质量：材料内部的杂质与缺陷浓度，以及表面粗糙度等质量指标，会直接影响器件的最终性能；3) 沟道层厚度：其厚度会影响材料生长质量，从而影响器件性能；4) AlN 势垒厚度：其厚度的确定，对器件性能的优化不可或缺；5) AlN 材料生长质量：高质量的 AlN 材料，是保障器件性能稳定的基础；6) Cap 层材料与厚度：Cap 层材料类型和厚度的选择，同样对器件性能有不可忽视的影响。

为实现二维电子气性能的最优化，作者开展了系统性的研究工作。研究采用 MOCVD 工艺，生长异质结外延层材料。在这一过程中，硅、碳化硅、蓝宝石等材料，均可作为衬底使用。本文重点报道以蓝宝石为衬底的实验成果。

表 1 所示为不同沟道层厚度对异质结二维电子气性能的影响。在沟道层材料 AlGaN 的铝组分为 52%，且势垒层与盖帽层厚度保持一致的情况下，当沟道层厚度分别为 100nm、150nm、300nm 时，方阻、电子迁移率和二维电子气密度，呈现出不同的变化趋势。当沟道层厚度达到 300nm 时，电子迁移率达到最高值，为 $662 \text{cm}^2/\text{Vs}$ ，但此时方阻最大，达到 $15412 \Omega/\square$ ，二维电子气密度最低，为 $6.1 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$ 。而当沟道层厚度为 100nm 时，电子迁移率和方阻降低，二维电子气密度升高。这一现象可归因于，随着沟道层厚度的增加，晶体质量逐步改善。然而，当厚度超过临界值时，应力释放会致使表面形貌恶化，进而导致方阻急剧上升，电学特性变差。

表1: 不同沟道层厚度时二维电子气性能影响

Wafer #	沟道层 (AlGaN) 厚度 (nm)	AlGaN 材料 Al 组分 (%)	二维电子气方阻 (Ω/\square)	二维电子气迁移率 (cm^2/Vs)	二维电子气浓度 (cm^{-2})
01	300	51.9%	15412	662	$6.1\text{E}+11$
02	150	51.7%	3394	150	$1.2\text{E}+13$
03	100	52.0%	4190	131	$1.3\text{E}+13$

通过对二维电子气的方阻、迁移率以及浓度进行细致比较后发现，#02 结构能够实现最小的方阻，同时还具备适宜的迁移率与浓度水平。综合考量这些关键性能指标后，最终确定选择 150nm 作为沟道层的厚度，以获取更为理想的器件性能表现。

表 2 对 AlGaIn 沟道层中不同 Al 组分含量，在异质结材料结构性能方面的影响，展开了系统性对比。数据表明，随着沟道层中 Al 组分的降低，二维电子气的方阻也随之减小。但与此同时，AlGaIn 材料的禁带宽度会因 Al 组分降低而变窄，这会导致材料的击穿电压下降。

基于本次实验结果和初步分析，综合权衡方阻、禁带宽度和击穿电压等多项性能，将 51.7% 确定为沟道层 AlGaIn 的 Al 组分含量，以便在不同性能间寻求最佳平衡，满足后续器件的应用需求。

表 3 围绕不同势垒层厚度，对二维电子气性能的影响展开了对比。研究结果表明，随着势垒层 AlN 厚度的增加，晶体生长质量出现劣化，材料表面粗糙度也随之上升。在此过程中，二维电子气浓度呈上升趋势，然而电子迁移率却逐渐降低。

经对比发现，#07 结构展现出最高的电子迁移率，同时其方阻值和电子浓度均处于合理区间。基于这一综合比较，最终选定 20nm 作为势垒层的厚度，以确保材料在多个性能维度间达成平衡，

满足实际应用需求。

表 4 呈现了不同 Cap 层材料以及厚度，对异质结材料结构性能所产生的影响。实验结果清晰表明，与采用 GaN 作为 Cap 层的情况相比，当选用 SiN 作为 Cap 层材料时，能够实现更小的方阻。进一步对 SiN 不同厚度进行比较后发现，相较于厚度为 3nm 的 SiN，当 SiN 厚度增加至 5nm 时，方阻、迁移率以及电子浓度等关键性能指标均得到了显著改善。综合考虑这些性能提升因素，最终决定选择厚度为 5nm 的 SiN 材料作为 Cap 层，以此来优化异质结材料的整体结构性能，使其更契合实际应用的需求。

在开展外延层材料生长工艺研发期间，团队组织实施了大量实验，并借助系统分析，全面剖析了不同工艺参数对异质结材料结构性能的影响。各工艺参数的变化，会对材料的各项性能指标产生差异化的影响。经过审慎权衡、综合考量，最终选定样品 #11，将其作为后续深入研究的外延层结构。该结构的主要参数，汇总于表 5 之中。

本文以肖特基二极管为典型示例，利用确定的外延层结构成功制作出半导体器件。在此基础上，对该器件的导通特性、耐压能力、反向漏电情况以及温度稳定性等关键性能指标展开了深入研究，旨在全面评估基于此特定外延结构的半导体器件的实际性能表现和应用潜力。

表2: AlGaIn材料的不同Al组分对二维电子气性能影响

Wafer #	沟道层 (AlGaIn) 厚度 (nm)	AlGaIn 材料 Al 组分 (%)	二维电子气方阻 (Ω/\square)	二维电子气迁移率 (cm^2/Vs)	二维电子气浓度 (cm^{-2})
02	150	51.7%	3394	150	1.2E+13
04	150	43.2%	2963	132	1.6E+13
05	150	28.9%	2124	149	2.0E+13

表3: 不同势垒层厚度对二维电子气性能的影响

Wafer #	势垒层 (AlN) 厚度 (nm)	AlGaIn 材料 Al 组分 (%)	二维电子气方阻 (Ω/\square)	二维电子气迁移率 (cm^2/Vs)	二维电子气浓度 (cm^{-2})
02	10	51.7%	3394	150	1.2E+13
06	15	50.9%	2768	123	2.0E+13
07	20	51.5%	2194	176	1.9E+13
08	25	50.6%	2048	125	2.6E+13
09	30	51.2%	2239	144	2.4E+13

表4: Cap层材料和厚度对二维电子气性能影响

Wafer #	势垒层 (AlN) 厚度 (nm)	Cap 材料与厚度 (nm)	二维电子气方阻 (Ω/\square)	二维电子气迁移率 (cm^2/Vs)	二维电子气浓度 (cm^{-2})
07	20	2 (GaN)	2194	176	1.9E+13
10	20	3 (SiN)	2052	140	2.6E+13
11	20	5 (SiN)	1989	142	2.6E+13

表5: 外延层结构参数

外延层	材料	厚度 (nm)	其它
Buffer	AlN	1500	
Channel	AlGaIn	150	Al 组分 ~50%
Barrier	AlN	20	
Cap	SiN	5	

肖特基二极管制作工艺

基于 AlN/AlGaIn 材料构建的异质结构的肖特基二极管，其制作工艺呈现于图 3 之中。该工艺主要由以下一系列关键的步骤构成：

(1) 外延层材料生长：借助 MOCVD 设备和工艺，生长外延层材料，如图 3 (a) 所示。这一环节是构建肖特基二极管的基础，直接影响器件性能。(2) 隔离 (ISO) 凹槽刻蚀：运用干法刻蚀工艺，对外延层进行精准加工，以形成所需的隔离 (ISO) 凹槽，为后续的结构构建做好准备，如图 3 (b) 所示。(3) 阴极金属 (即欧姆接触)

凹槽刻蚀：采用低损伤干法刻蚀工艺，对相应区域进行刻蚀处理，旨在为阴极金属的制作打造合适的凹槽结构，如图 3 (c) 所示。(4) 阴极金属 (欧姆接触) 制造：选用 Ti/Al/Ni/Au 金属组合，通过特定的工艺手段，成功实现阴极金属 (欧姆接触) 的制造，从而建立良好的欧姆接触特性，如图 3 (d) 所示。(5) 阳极金属 (肖特基接触)

凹槽刻蚀：再次运用低损伤干法刻蚀工艺，对阳极金属 (肖特基接触) 部位进行凹槽刻蚀操作，为阳极金属的铺设创造条件，如图 3 (e) 所示。(6) 阳极金属制造：采用 Ni/Au 金属组合，通过特定的工艺过程，完成阳极金属的制造工作，以实现良好的肖特基接触，最终形成完整的肖特基二极管结构，如图 3 (f) 所示。

在二极管器件制造中，工艺水平的优劣直接决定了器件性能的高低。为打造高性能二极管，各环节需遵循以下严苛的工艺标准：(1) 光刻工

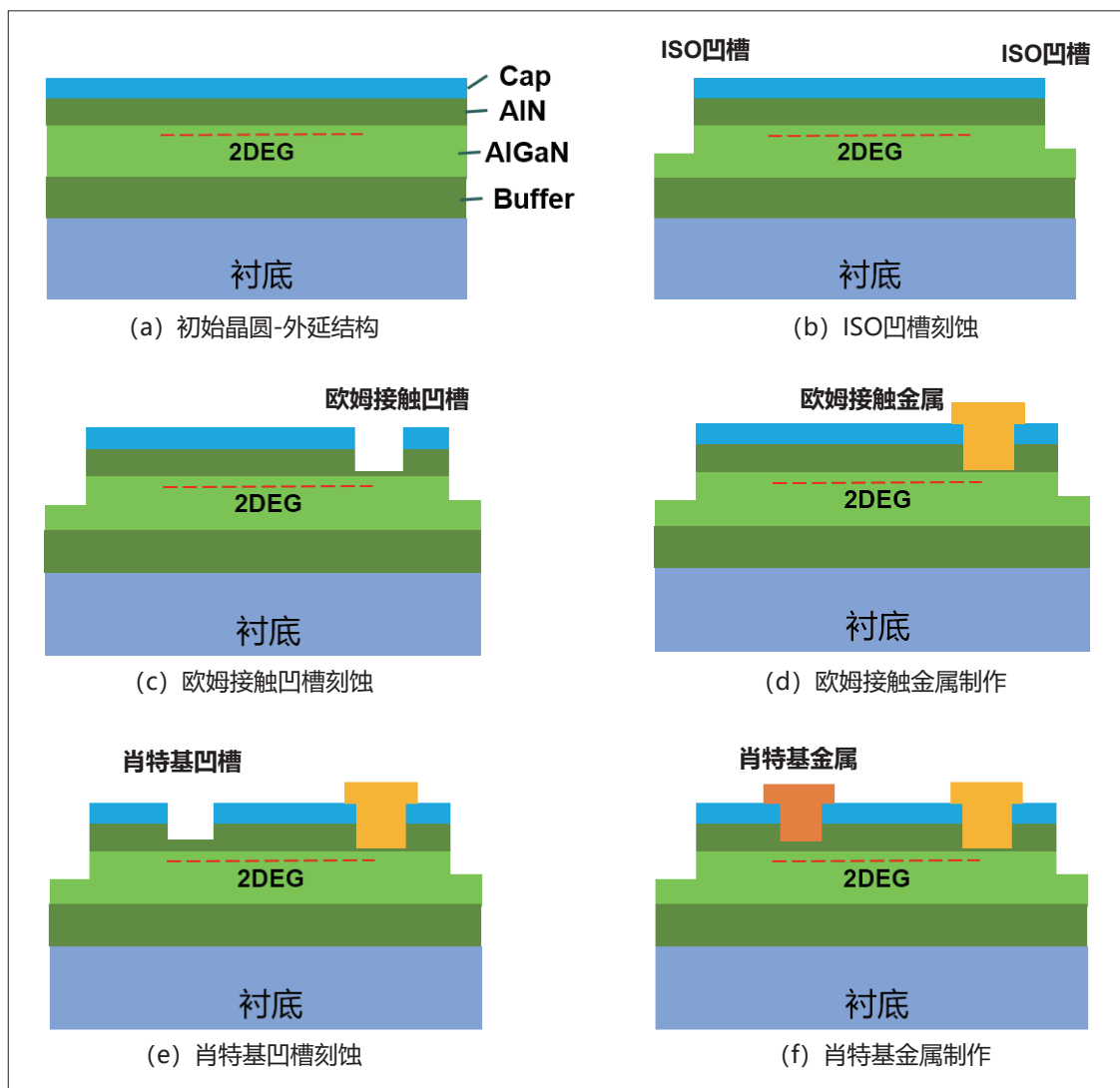


图3: 肖特基二极管的制作工艺

艺：光刻胶的涂覆必须确保高度均匀，在曝光与显影工序完成后，不仅图像轮廓要清晰，光刻图案的侧壁形貌也要符合后续刻蚀与金属剥离（Lift off）工艺的要求，避免因光刻瑕疵导致后续工艺的偏差。（2）刻蚀工艺：在对帽层（SiN）和势垒层（AlN）进行刻蚀时，刻蚀速率需始终维持稳定，且全程采用低损伤刻蚀工艺。通过这种方式，将刻蚀过程对势垒层、沟道层的损伤，以及对 AlN/AlGaN 异质结界面二维电子气的影响降至最低，最大程度保障材料特性与器件性能。（3）阳极和阴极金属生长工艺：在生长阳极与阴极金属前，样品表面必须经过严格清洗，确保表面无杂质残留。在金属生长阶段，工艺温度、电子束功率、真空度和沉积速率等参数都要精确控制，维持稳定，为金属与材料形成良好的接触奠定基础。（4）金属剥离（Lift off）工艺：阳极和阴极金属生长完成后，将样品放入丙酮溶液中，借助超声波并采用水浴加热辅助剥离。但要严格控制加热温度和超声功率，防止因参数过高破坏金属图案。理想的剥离效果是，金属图案清晰，边缘无明显毛刺。（5）金属退火工艺：在阳极和阴极金属剥离后，需对其进行退火处理。退火过程中，氮气环境、升温速率、退火温度与时间、降温速度等参数都要稳定可控。这些参数的精确调控，对欧姆接触和肖特基接触的性能起着决定性作用。（6）湿法清洗工艺：每一步工艺前的清洗效果，都会对最终的工艺成果和器件性能产生影响。尤其是刻蚀过程中产生的聚合物，这类物质难以用常规的干法去胶或丙酮清洗彻底去除。有效的解决办法是，先用等离子清洗机去除 100-200nm 的光刻胶，再使用丙酮，在水浴加热环境下进行超声清洗，以彻底清除剩余的光刻胶与聚合物。

图 4 展示了制作完成的二极管器件实例。从图中可以看出，肖特基和欧姆接触形貌正常，器件表面清洁。肖特基接触区域的直径在 $R=80-150\mu\text{m}$ 范围内，肖特基与欧姆接触之间的距离在 $D=100-400\mu\text{m}$ 范围内。

器件性能测试与分析

器件测试采用 Keysight B1506A 设备，针对器件的多项关键性能展开系统性测试。测试项目涵盖正向导通曲线、耐压曲线、漏电流曲线，以及温度稳定性曲线。这些测试结果，直观反映了器件在不同工作条件下的性能表现，各项目测试结

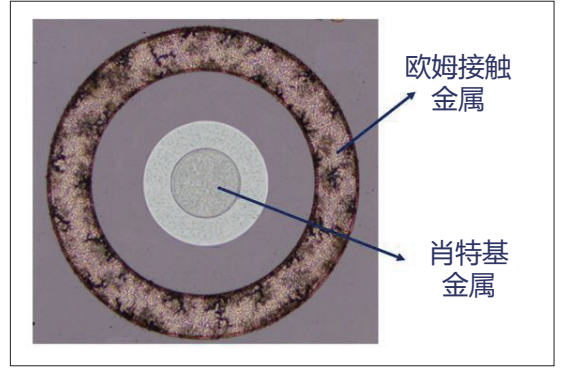


图4：肖特基二极管实例

果分别呈现在图 5 至图 8 中，可供进一步分析与研究。通过图中的数据与曲线，可以清晰洞察器件的各项性能指标，为后续优化与改进提供依据。

正向导通性能（图 5）的测试参数设定为：温度设定：300K；最大电流设定：100mA；电压设定范围：0V~40V；器件尺寸： $R=90\mu\text{m}$ ， $D=300\mu\text{m}$ 。肖特基二极管正向导通无异常。

耐压曲线（图 6）测试参数设定为：温度设定：300K；最大电流设定：8mA；反向电压设定范围：0~1500V。根据图 6 所示的肖特基二极管耐压曲线，在反向耐压 1500V 处二极管没有被击穿。结合图 5 和图 6，证明本本文报道的肖特基二极管半导体器件具有正向导通、反向耐压的特性。

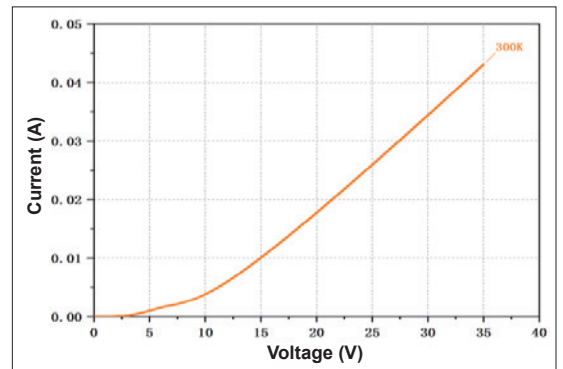


图5：肖特基正向导通曲线

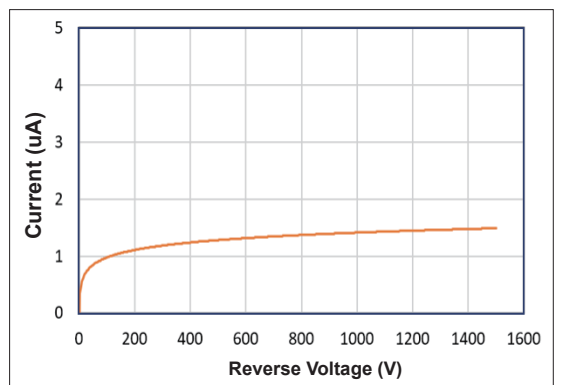


图6：肖特基二极管耐压曲线

反向漏电流曲线如图7所示。测试参数设定为，测试参数设定：温度设定：300K；最大电流设定：8mA；电压设定范围：-50V~0V；器件尺寸：R1=90~150um，D1=100~400um。根据图7所示，在所设定的电压范围内，反向漏电在1uA/mm左右。

肖特基二极管温度稳定性曲线如图8所示。测试参数设定：温度范围：300K~550K；最大电流设定：100mA；电压设定范围：-40V~0V；器件尺寸：R1=90um，D1=300um。根据相关文献^[4]定义：若10V处电流与-40V处电流比值大于1000时，则满足温度稳定性。根据图8肖特基温度稳定性曲线所示，在300K~550K温度下，10V与-40V处电流比值最小比值为3885，均大于1000，表面器件可以在550K的温度下稳定工作。

结论

本文围绕基于AlN/AlGaN异质结的肖特基二极管，系统性地报道了其结构设计、制作工艺及器件性能。在材料生长环节，通过优化外延材料生长工艺，成功获取具有优异性能的二维电子气(2DEG)，其迁移率达到 $142\text{cm}^2/\text{Vs}$ ，方块电阻为 $1989\Omega/\square$ ，密度为 $2.6 \times 10^{13}\text{cm}^{-2}$ 。在此基础上制作的肖特基二极管，展现出良好的二极管特性，不仅能实现正向导通，反向耐压性能也十分突出，耐压值超过1500V，反向漏电仅在1uA/mm左右。值得一提的是，该二极管能在300-550K的宽温度范围内稳定工作，充分证明了基于AlN/AlGaN异质结的器件，在高温、高压、高功率应用场景中的巨大潜力。此外，基于该结构的半导体器件

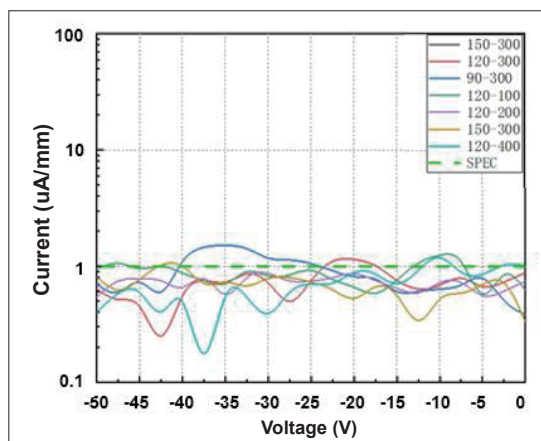


图7: 肖特基反向漏电流曲线

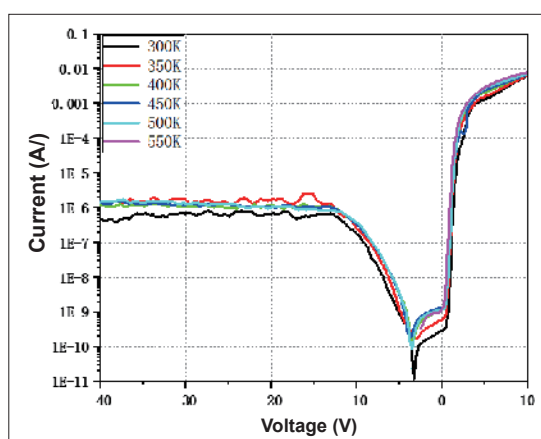


图8: 肖特基温度稳定性曲线

无需进行掺杂，且制作工艺成熟，具备成本优势，有利于大规模推广应用。后续研究将致力于进一步改善材料生长工艺，优化欧姆接触工艺，并开展可靠性研究，以全方位提升器件性能，推动基于AlN/AlGaN结构的半导体器件迈向产业化进程，助力相关行业的技术革新与快速发展。CS

扩展阅读

- 1. Woo, K., et al., From wide to ultrawide-bandgap semiconductors for high power and high frequency electronic devices, Journal of Physics: Materials, Volume 7, Number 2, 2024.
- 2. Fu, H. et al., Demonstration of AlN Schottky Barrier Diodes with Blocking Voltage Over 1 kV, IEEE Electron Device Letters, Vol. 38, No. 9, 2017.
- 3. Okumura, H., et al., Temperature dependence of electrical characteristics of Si-implanted AlN layers on sapphire substrates, Applied Physics Express 16, 064005 (2023).
- 4. Irokawa, Y. et al., Schottky Barrier Diodes on AlN Free-Standing Substrates, Japanese Journal of Applied Physics 51 (2012) 040206.
- 5. Mudiyansele, D. et al., High-voltage AlN Schottky Barrier Diodes on bulk AlN substrate by MOCVD, Applied Physics Express 17, 014005 (2024).
- 6. Kumabe, T. et al., Demonstration of AlN-based Vertical p-n Diodes with Dopant-free Distributed Polarization Doping, IEEE Trans. on Electron Devices, Feb. 2024.
- 7. Cao, H., et al., Performance Enhancement of n-Type AlN Schottky Barrier Diodes Using Oxygen-Rich Rapid Thermal Annealing Treatment, IEEE Transactions on Electron Devices, volume 72, issue 3, p 1533-1536.
- 8. Hussain, K. et al., High figure of merit extreme bandgap Al_{0.87}Ga_{0.13}N-Al_{0.64}Ga_{0.36}N heterostructures over bulk AlN substrates, Applied Physics Express, January 2023.



SEMICON[®] CHINA

FPDCHINA 跨界全球·心芯相联

2026年3月25-27日 | 上海新国际博览中心



全球半导体行业盛会



免费自助发产品
 7000+公司 | 26万+专业观众
货比三家选精品



构建更好的多通道肖特基势垒二极管

稳定的欧姆接触使多通道 AlN/GaN 肖特基势垒二极管开始发挥潜力

新加坡南洋理工大学及其科学技术研究局的研究人员声称，他们首次成功演示了使用多通道 AlN/GaN 异质结构的功能性器件。团队发言人、南洋理工大学的李瀚超解释说：“尽管其他团队在外延片方面报告了令人印象深刻的结果，但关键挑战在于从材料到实际工作器件的转化。”

据李瀚超介绍，该团队的一项重大突破是形成了稳定的欧姆接触，避免了对肖特基势垒二极管中通道电流的损害。他补充道：“这一成就意义重大，因为氮化铝的高铝成分和宽带隙使得在这些异质结构中形成欧姆接触极具挑战性。”

过去几年，多通道 GaN 器件引发了广泛关注。它们的吸引力在于克服了单通道器件的有限电流传导，并最终规避了面电荷密度和迁移率之间的权衡。许多研究团队通过将 GaN 与 AlGaIn 或 InAlN 结合制备了多通道器件，但新加坡团队更青睐 AlN 与 GaN 的组合。这种组合可提供更高的极化感应电荷密度，当采用薄 AlN 势垒时能够对垂直方向的通道实现优异的静电控制，并使载流子在通道内实现出色的限制。

该团队的二极管制造过程中，外延片生长外包给了商业 MOCVD（金属有机化学气相沉积）工厂，此举旨在确保外延生长的稳定性和可重复

性。李瀚超指出：“鉴于器件性能对材料质量高度敏感，一致且可靠的外延层对我们的器件开发和优化过程至关重要。”

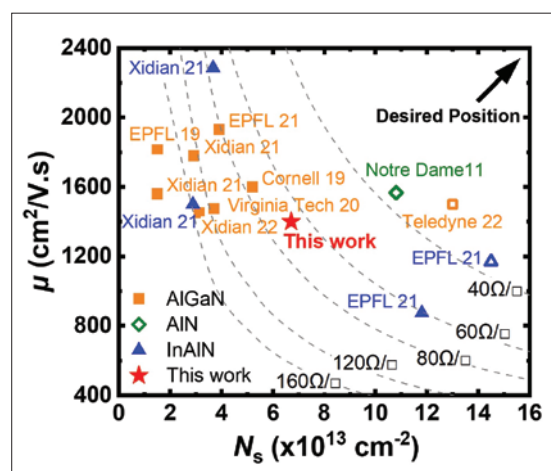
对该团队外延片（包含 5 对 4.9 纳米厚的 AlN 势垒和 46.7 纳米厚的 GaN 通道）的表征显示，材料生长质量优异。扫描透射电子显微镜揭示了层间的清晰界面，倒易空间映射产生了明确且独特的峰，表明晶体生长质量高。

为形成二极管，李瀚超及其同事首先制备阴极：通过欧姆刻蚀工艺在暴露区域施加 Ti/Al/Ni/Au 金属层。下一步是制备阳极，通过等离子体刻蚀形成肖特基接触，使二维电子气与阳极实现直接侧壁接触。阳极制备后在氮气中退火，以修复刻蚀过程中产生的氮空位。

利用传输线法，团队确定了 180 纳米的最佳欧姆刻蚀深度（对应第四通道的中点）。刻蚀过深（穿透所有 5 个通道）会导致电阻从最佳值 $0.38\ \Omega\text{mm}$ 上升至 $0.64\ \Omega\text{mm}$ ，团队认为这是由于侧壁接触的有效性受限所致。

电学测量显示，二极管的开启电压仅为 0.5 V。对于阳极 - 阴极间距 3 微米的二极管，1.1 V 电压可产生 $100\ \text{mAmm}^{-1}$ 的正向电流，最大电流可达 $1050\ \text{mAmm}^{-1}$ 。反向偏压下，击穿电压（定义为电流超过 $1\ \text{mAmm}^{-1}$ 阈值时的电压）在阳极 - 阴极间距 3 微米、5 微米和 20 微米时分别为 104 V、268 V 和 422 V。这些相对较低的值归因于两方面因素：缺乏场板和保护环等电场管理结构，导致电场分布不均匀并提前击穿；以及 AlN/GaN 的多次生长循环可能引入材料质量问题，导致位错密度和界面态增加。

该团队目前正在开发基于 GaN 溅射的欧姆接触形成方法，并开始研究基于该外延工艺的鳍式场效应晶体管（finFET）。李瀚超表示：“我们相信这将提升器件性能。”



尽管新加坡团队生产的外延片在迁移率和面电荷密度的综合性能上并非最佳，但其器件性能却最为优异。需注意，实心符号对应于这些异质结构上制造器件的报告，而空心符号则表示未制造器件。

参考文献

H. Li et al. Appl. Phys. Express 18 016502 (2025)

优化用于近眼应用的绿色 LED

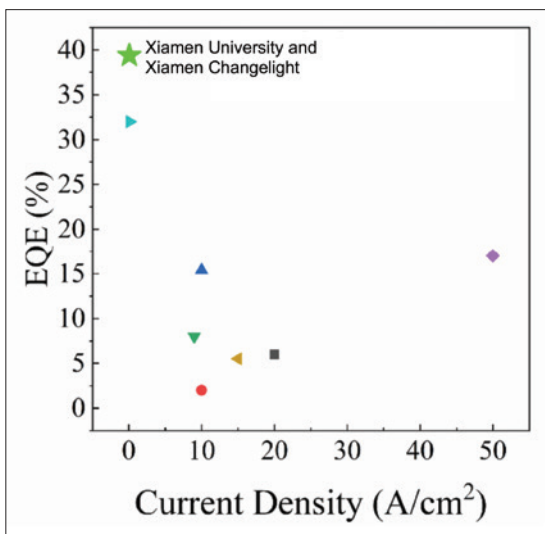
在有源区前去除超晶格结构，使外量子效率提升至创纪录值

商用大电流 LED 的常用制备方法是在有源区前引入预阱层（低铟含量的超晶格结构），以辅助应变工程。然而，中国研究团队的工作表明，去除这些预层可显著提升近眼应用绿色微 LED 的性能，因为其缺失减少了量子阱中的压电极化场，并抑制了俄歇 - 迈特纳非辐射复合。

厦门大学的康俊勇指出，去除预阱层的优势源于量子阱界面缺陷的减少。缺陷的最小化显著提高了低电流密度下的辐射复合效率。他强调：“这一进展对 AR/VR/MR 等近眼显示应用至关重要，但该结构不适用于功率更高的 LED。”

厦门大学与厦门长之光团队通过制备包含 6 个预阱、3 个预阱和无预阱的绿色微 LED，并比较其发光特性，验证了该方法的有效性。

该团队的绿色微 LED 制备始于图案化蓝宝石衬底，首先沉积 45 纳米厚的 AlON（氮氧化铝）层。康俊勇解释道：“氮氧化铝缓冲层通过 PVD 溅射与 MOCVD 外延相结合的工艺制备，相较于解决后续 GaN 基外延层的晶格和热失配问题，沉积该层的难度较低。生长过程中需精确控制温度梯度和 V/III 比，并结合原位应力监测以实现动态补偿。”



厦门大学与厦门乾照光电制备的绿色微LED在0.07 A/cm²电流密度下实现了39%的外量子效率，打破了纪录。

将蓝宝石衬底上的 AlON 层载入 MOCVD 反应室后，团队依次生长 4 微米厚的非掺杂 GaN 层、2 微米厚的 n 型层、包含三个 In_{0.2}Ga_{0.8}N 量子阱的有源区、20 纳米厚的 AlGaIn 阻挡层以及一对 p 掺杂层。含预阱的变体采用 In_{0.05}Ga_{0.95}N 超晶格结构。

外延片通过一系列工艺加工成 17 微米 × 20 微米的微 LED，包括制备 ITO 透明导电层、快速退火以形成 p 型 GaN 欧姆接触，以及光刻和等离子体刻蚀以暴露 n 型 GaN 区域。

在多量子阱生长过程中，量子阱与相邻势垒层界面不可避免地产生缺陷，进而促进 V 型坑的形成。扫描电子显微镜图像显示，减少预阱数量可减少界面总数，从而降低 V 型坑密度。

外量子效率测量显示，含 6 个预阱的微 LED 在 0.3 A/cm² 下的最大值为 31%，含 3 个预阱的微 LED 在 0.12 A/cm² 下为 36%，无预阱的微 LED 在 0.07 A/cm² 下为 39%。团队称，39% 的外量子效率是迄今报道的最高值。

为理解不同设计微 LED 的外量子效率差异，团队采用经典的 ABC 模型分析数据，确定了肖克利 - 里德 - 霍尔复合、辐射复合和俄歇 - 迈特纳复合的系数。与无预阱微 LED 相比，含 3 个和 6 个预阱的变体肖克利 - 里德 - 霍尔复合值分别高 4 倍和 6 倍。这表明减少预阱数量可提高多量子阱质量、改善均匀性，并抑制缺陷引起的非辐射肖克利 - 里德 - 霍尔复合。

康俊勇及其团队计划进一步利用高铟含量材料的缺陷工程、应变补偿和载流子输运优化技术，未来将聚焦于克服 InGaIn 基红黄光 LED 的关键外延生长挑战。

参考文献

A. Wang et al. Appl. Phys. Express 18 011001 (2025)

提高双向 HEMT 的阻断电压

3 kV 单片双向 GaN HEMT 成为 1200 V 级和 1700 V 级功率转换器的候选器件

美国威斯康星大学麦迪逊分校的工程师声称，他们将单片双向 GaN HEMT（高电子迁移率晶体管）的击穿电压提升至 3 kV。这类器件具备双向电流和双向阻断能力，有望应用于多种新型功率转换器（包括矩阵转换器、多电平 T 型逆变器、电流源逆变器和固态断路器），从而提高可再生能源基础设施的效率。

该团队发言人 Md Tahmidul Alam 向《化合物半导体》杂志表示，传统实现双向功能的方法是使用两个晶体管和两个二极管，其缺点之一是多组件总电阻导致的高阻抗。

器件数量多还会导致复杂度增加和可靠性下降。Alam 指出：“若四个组件中任何一个失效，整个系统就会瘫痪。而用单个器件实现双向功能可减少这些问题。”

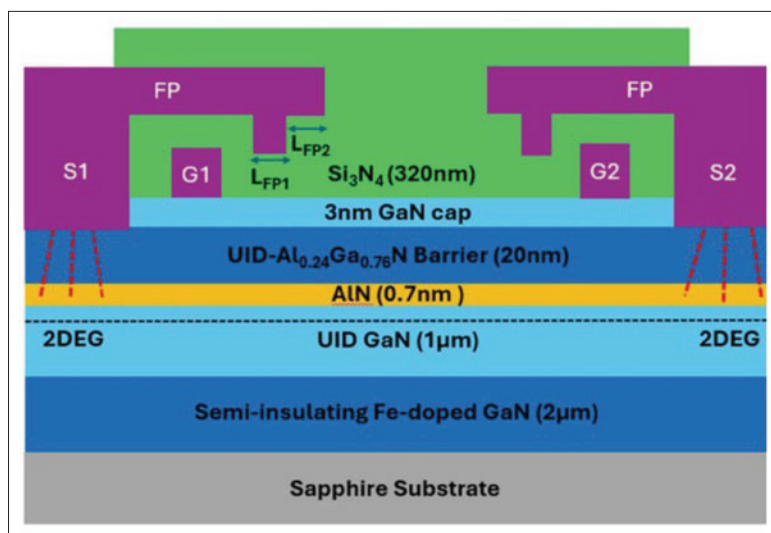
器件数量多还会导致复杂度增加和可靠性下降。Alam 指出：“若四个组件中任何一个失效，整个系统就会瘫痪。而用单个器件实现双向功能可减少这些问题。”

威斯康星大学麦迪逊分校团队声称，他们是首个突破 2 kV 壁垒的研究组，其 3 kV 器件的导通电阻约为 $20 \Omega \text{mm}$ 。突破 2 kV 壁垒后，该器件适用于构建 1200 V 级和 1700 V 级功率转换器。

对于功率转换器，常关型晶体管更受青睐，因为它们能承受栅极驱动电路的意外损坏。尽管该团队在最新工作中使用了常开型晶体管，但他们认为在制造高压器件时，类似概念或设计可应用于常关型晶体管。

单片双向 GaN HEMT 的制备始于将蓝宝石衬底载入 MOCVD 反应室，依次沉积 2 微米厚的半绝缘 GaN 层、1 微米厚的非故意掺杂 GaN 层、0.7 纳米厚的 AlN 层、20 纳米厚的 $\text{Al}_{0.24}\text{Ga}_{0.76}\text{N}$ 势垒层和 3 纳米厚的 GaN 帽层。团队选择蓝宝石而非硅作为衬底，以实现超过 2 kV 的阻断电压。

将外延片加工成器件的步骤包括：通过光刻和金属沉积形成欧姆接触；进行 750 纳米深的的



威斯康星大学麦迪逊分校的工程师开发的单片双向氮化镓高电子迁移率晶体管（GaN HEMTs）能够承受3千伏的电压。

面刻蚀以隔离器件；制备 200 纳米厚的镍栅极；通过等离子体增强化学气相沉积（CVD）生长 320 纳米厚的 Si_3N_4 层实现表面钝化。

团队制备了一系列器件，其第一和第二场板长度不同（1 微米至 3 微米）。电学测量显示，器件的阈值电压稳定在 -3.25 V ，亚阈值摆幅为 92 mV/dec^{-1} ，开关比超过 10^5 。团队称，稳定的阈值电压、低亚阈值摆幅和高开关比使其适用于高频操作，且传导和开关损耗低。

对于第一场板长度不超过 2 微米的大多数器件，击穿电压达到工具极限 3 kV；但更长的场板会导致击穿电压降低，可能是由于场板下方电场强度增加导致碰撞电离率升高所致。

使用 100 微秒脉冲宽度、在 40 V 关态开关电压下的脉冲电流 - 电压测量表明，电流崩塌小于 10%。

该团队的下一步目标包括提高击穿电压和或降低导通电阻，以及测量晶体管在 600 V 等高压下的开关性能。

参考文献

M. T. Alam et al. Appl. Phys. Express 18 016501 (2025)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AIXTRON SE		www.aixtron.com	BC
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
Evatec AG		vatecnet.com/cn	23
FERMI	费勉仪器	www.fermi.com	2
RABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	9
Riber		www.riber.com	IFC
Park Systems		parksystems.cn/nx-wafer	1
SEMICON China 2026		www.semiconchina.org	52
SRII	思锐智能	www.sri-i.com	17

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: minL@actintl.com.hk, lynnw@actintl.com.hk。

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

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

Lynn Wang (王清玲), lynnw@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)
Mini Xu (徐若男), minix@actintl.com.hk
Tel: 86 187 7196 7314

Phoebe Yin (尹菲菲), phoebey@actintl.com.hk
Tel: 86 155 2754 0817

Ron Wang (汪毓舛), ronw@actintl.com.hk
Tel: 86 186 9404 8156

Mandy Wu (吴漫), mandyw@actintl.com.hk
Tel: 86 156 2304 9536

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



CHIP China
晶芯研讨会

CS 2025
化合物半导体
CON 先进技术及应用大会

2025年5月 中国·苏州
May 2025 Suzhou, China

半导体先进技术创新发展和机遇大会

Semiconductor Advanced Technology Innovation Development And Opportunities Conference

化合物半导体先进技术及应用大会

氮化镓 (GaN) 技术的突破
GaN Technology Breakthrough

碳化硅 (SiC) 的优化与机遇
Optimization & Opportunities of SiC

Micro-LED技术的持续发展
The Sustainable Development of Micro-LED Technology

超宽禁带半导体材料
Ultra-wide Bandgap Semiconductor Materials

光电半导体与发射技术
Optoelectronic Semiconductors And Emission Technology

市场趋势与应用
Market Trends & Applications

主办单位：雅时国际商讯
官方媒体：《化合物半导体》《半导体芯科技》

CHIP China晶芯研讨会

2.5D/3D/3.5D封装在AI趋势下大有可为
2.5D/3D/3.5D Packaging Has Great Potential Under the AI Trend

玻璃通孔 (TGV) 技术创新发展和应用推动
TGV Technology Innovation, Development and Application Promotion

面板级封装技术的崛起
The Rise of Panel-Level Packaging Technology

先进封装对新型装备技术
Advanced Packaging for New Equipment Technology

光电合封 (CPO) 及光电互连技术发展
CPO & Optoelectronic Interconnection Technology Development

2.5D/3D封装设计仿真与可靠性
2.5D/3D Packaging Design Simulation & Reliability

2.5D/3D封装新材料进展
Progress in New Materials for 2.5D/3D Packaging

以技术为媒, 以产业为基, 诚邀全球创新力量共绘泛半导体蓝图!

赞助及媒体合作：徐若男 Mini Xu

157 8288 4236

参会报名：吴漫 Mandy Wu

156 2304 9536

AIXTRON

THE NEW G10 SERIES

Your Productivity Solution for All Advanced Epitaxy Materials



G10-SiC

- ▶ 9x150 mm (6") or 6x200 mm (8")
- ▶ New hardware & process surpassing Single Wafer Reactor uniformities
- ▶ +50% productivity per fab area with large batch technology & small footprint

End Markets/Products:

EV inverters & charging infrastructure

G10-GaN

- ▶ 8x150mm (6") or 5x200 mm (8")
- ▶ 1st fully automated compact GaN MOCVD cluster designed 100% for Si Power fabs
- ▶ Novel hardware solution for unmatched barrier uniformities and device yields

End Markets/Products:

Power Electronics & Wireless communication



G10-AsP

- ▶ 8x150 mm (6") or 5x200mm (8")
- ▶ 1st fully automated AsP MOCVD system enabling 10x lower defect density
- ▶ Unmatched wavelength uniformity on all wafer sizes

End Markets/Products:

Micro LED, Optical Data communication, 3D-sensing & LiDAR

