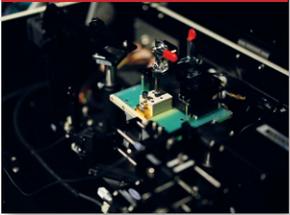


化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2024年 8/9月

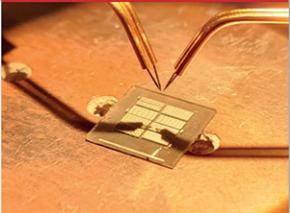
假晶氮化物的能力



AlN: 用低温外延
打开大门



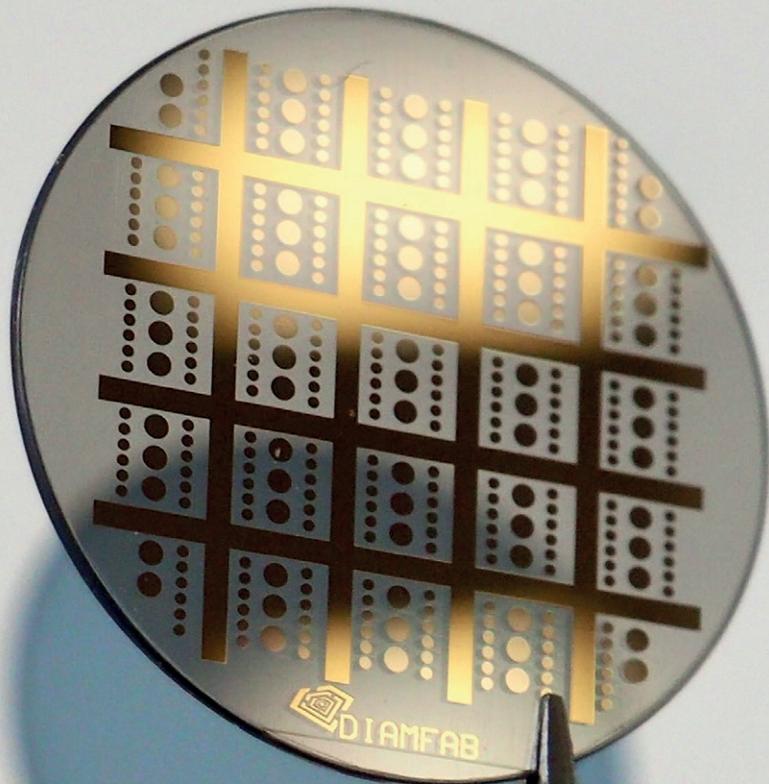
利用InP PIC实现相
干光通信



氮化镓: 在极端条件
下的卓越表现



未来晶体管



ACT
INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

www.compoundsemiconductorchina.net

传感
满足半导体技术大趋势

InP
GaAs-GaSb

RIBER's 生产型分子束外延系统

多片 3"

多片 4"

多片 6"

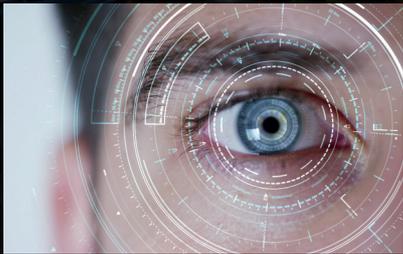
易于获得高性能
P/Sb/As 红外激光器和探测器：

防护

安保

环境监控

医疗传感



RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

最先进的200毫米样品 原子力显微镜



Park FX200

Park FX200, 是Park Systems近期推出的200毫米样品的原子力显微镜。FX200拥有专利设计的机械结构, 确保机器具备优秀的稳定性, FX200的低噪音、低热漂移等性能, 树立了大样品台原子力显微镜精度和可靠性的新标准。

其更快的Z伺服性能和增强的高功率样品视图提高了操作效率和成像能力, 同时探针自动更换和识别、激光对准以及宏观光学全样品视图等功能简化了用户操作并大大提高了工作效率。

FX200其强大的性能和便捷的易用性, 可有效改变纳米级成像和分析的现状, 使科学家和工程师能够在各自的领域实习真正的解放双手, 实习样品自由测量。



扫码关注公众号

欲了解更多信息, 请访问 parksystems.cn/fx200
inquiry@parksystems.com | ☎ 400-878-6829

Park
SYSTEMS

帕克
原子力显微镜

封面故事 Cover Story

25 未来晶体管 The transistor of the future

数十年来，金刚石晶体管一直充满希望。然而，它的性能尚未达到预期。那么，为什么我们有理由乐观呢？这是一个很好的问题。有人可能会轻率地回答：“为什么不呢？”但你可能有健康的怀疑态度，要求一个更细致的解释——我很高兴提供这个，通过分享我们在Diamfab对这项技术的愿景。衬底质量和尺寸的改进，加上市场对新型半导体的接受度，为金刚石晶体管带来了巨大的商业成功机会。

- Gauthier Chicot 和 Ivan Llaurodo, Diamfab

编者话 Editor's Note

04 碳化硅外延技术和产业化进展 The Progress of Silicon Carbide Epitaxial Technology and Industrialization

- 陆敏

业界动态 Industry

06 英飞凌居林三厂正式落成 2025年开始量产 Infineon's third factory in Jülich has been officially completed and will start mass production in 2025.

06 最新发布！Park Systems重磅推出最先进的200毫米样品原子力显微镜Park FX200 Just released! Park Systems launches the most advanced 200-millimeter sample atomic force microscope, the Park FX200.

07 比利时半导体制造商BelGaN申请破产保护 寻求新的投资人 Belgian semiconductor makers declared bankrupt, over 400 jobs at risk

07 长飞先进与怀柔实验室签署碳化硅功率器件成果转化意向协议 Yangtze Optical Advanced and Huairou Laboratory signed an intention agreement for the cooperation and transformation of silicon carbide power device results.

08 Crystal IS使100 mm块状AlN衬底的可用面积达到99% Crystal IS achieved 99% usable area on 100mm bulk AlN substrate

08 IQE计划让台湾子公司在台湾证券交易所进行首次公开募股 IQE plans IPO of Taiwan subsidiary on Taiwan Stock Exchange

08 最新公告：中国对这些物项实施出口管制 Latest Announcement: China imposes export controls on these items.

九峰山实验室专栏 JFS Laboratory Column

09 化合物半导体外延技术及应用 Compound semiconductor epitaxy technology and its applications

- 潘磊, 张伟, 董浩, 刘力, 徐爽, 刘洋博文, 应豪, 徐豪, 卢双赞, 孙义远, 何传奇, 柯鑫池, 樊庆男, 柳俊, 丁琪超, 九峰山实验室

关于雅时国际商讯 (ACT International)

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

关于《化合物半导体》

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



扫一扫
免费下载电子书

宽禁带半导体国家工程研究中心专栏 WBS Column

- 18 面向 5G 应用的高线性度氮化镓射频器件研究进展
Research Progress on High Linearity Gallium Nitride RF Devices for 5G Applications
- 芦浩, 杨凌, 张濛, 侯斌, 时春州, 于谦, 武攻, 马晓华, 郝跃, 宽禁带半导体国家工程研究中心

技术 Technology

- 28 假晶氮化物的能力
The power of pseudomorphic nitrides
- Leo Schowalter1,2, Maki Kushimoto1, Ziyi Zhang1, Akira Yoshikawa1和Hiroshi Amano1 (1名古屋大学, 2Lit Thinking)
33 氮化镓: 在极端条件下的卓越表现
GaN: Excelling in the extreme
- Savannah Eisner, Jessica Frick 和 Debbie Senesky, 斯坦福大学
39 AIN: 用低温外延打开大门
AIN: Opening doors with low-temperature epitaxy
- Christopher Matthews, Habib Ahmad, Keisuke Motoki, Sangho Lee, Aheli Ghosh, Emily Marshall, Amanda Tang和W. ALAN DOOLITTLE, 佐治亚理工学院
44 利用InP PIC实现相干光通信
Enabling coherent optical communication with InP PICs
- Paul Momtahan, 英飞朗

科技前沿 Research Review

- 49 提高β-Ga2O3二极管的标准
Raising the bar for the β-Ga2O3
50 辐射加固的GaN HEMTs
Irradiation-hardened GaN HEMTs
51 通过雾CVD提高迁移率
Enhancing mobility with mist CVD

52 广告索引 Advertisement Index

《化合物半导体》编委会 (排名不分先后)

- 张国义教授 北京大学东莞光电研究院常务副院长, 中国有色金属学会宽禁带半导体专业委员会常务副主任
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/研究员
陈明祥教授 华中科技大学/武汉利之达科技 教授/首席专家
周宏博士 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
郑小鹿博士 营口天维半导体制造有限公司创办人, 功率半导体材料和器件的行业独立顾问



专业半导体设备制造商

专注于化合物半导体、硅材料、集成电路(IC)、微机电系统(MEMS)等领域。



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

网 址: https://www.cgbtek.com
电 话: 0316-7678695 400-650 7658
华东服务中心: 无锡市新吴区IC设计大厦B座1003-1004
总部地址: 北京市经济开发区科创十三街18号院30号楼
制造基地: 河北省廊坊市香河机器人产业园3期A栋

- (大项目部) 耿 彪: 139 1029 7918
(华南区) 王九新: 130 5158 6635
(华东/海外区) 牛沈军: 139 1127 1076
(华中区) 周耀华: 180 1536 7016
(西南/西北区) 贾三斌: 193 2206 6460
(京津冀) 宋晚燕: 130 5158 6631
(MEMS专区/山东区) 杨经理: 180 1239 7806
(技术支持) 郭生钢: 139 1127 9276



公众号 官网

碳化硅外延技术和产业化进展

不同于 Si 器件工艺，碳化硅功率器件必须以外延层来制备，外延层的质量直接决定器件的良率。因此，外延生长是碳化硅产业中必不可少的中间环节。SiC 同质外延技术研究最早开始于 20 世纪 60 年代。第一个里程碑是 1987 年 Kuroda 和 Kong 等提出台阶流生长模型。早期采用 CVD 工艺生长 SiC 外延时，存在多型体混合的问题。“台阶控制外延”技术通过在 SiC 衬底引入低度偏角来控制外延生长，使用 CVD 工艺在较低的温度下实现完美多型体复制，解决了多型体混合的问题。台阶流成核通过调节台阶密度控制 SiC 同质外延生长，在偏轴 0001 衬底上，台阶密度较大，台面宽度较窄，由能量较低的台阶或扭折迫使衬底多型体在外延层中得到复制。第二个里程碑是热壁 CVD 反应室的提出，克服了传统冷壁 CVD 反应腔晶片表面法线方向的温度梯度大，导致 SiC 晶片翘曲严重和加热效率低的缺点。第三个里程碑是氯基快速外延生长技术，传统 SiC 的 CVD 生长技术气相中 Si 团簇容易形成 Si 滴，导致外延生长工艺窗口相对较窄，同时也限制了外延生长的速率。通过引入氯基化学成分可以极大地抑制 Si 团簇，目前已成功应用于 SiC 快速外延生长中。

相较于其他生长工艺，化学气相淀积有着良好的可重复性，成本可控，可以实现大尺寸、多片式的生长模式。但依赖衬底质量，需要高纯的生长源，外延层中的缺陷密度较难控制。化学气相沉积是用于生长 SiC 外延材料的最主要方法。4H-SiC 同质外延机理：生长源和掺杂源以合理流速随载气通入高温环境反应腔，生长源气体分解，反应腔内低压环境使得分解后的气相反应物更容易扩散到衬底表面，生长源相互作用发生化学反应。气相反应物在衬底表面迁移，部分气相反应物迁移到合适的位置被衬底吸附。其余气相反应物出现解吸附随载气通入尾气处理系统。为实现 4H-SiC 同质外延生长，必须抑制 2D 成核、岛状生长，促进台阶流生长。典型生长温度为 1400~1700℃，压强为 100~1000mbar，采用 SiH₄、TCS SiHCl₃、SiCl₄ 等作为 Si 源，CH₄、C₂H₆、C₃H₈、CCl₄ 等作为 C 源，H₂ 为载气。使用 N₂ 作为 N 型掺杂源，TMA (C₃H₉Al) 作为 P 型掺杂源。CVD 外延中有 2 个常规既定工艺：一是原位刻蚀衬底，RF 加热反应腔至 H₂ 原位刻蚀温度，去除 4H-SiC 衬底表面划痕、生长坑等机械损伤。二是缓冲层生长，对于 n 型碳化硅外延片，要求在碳化硅外延之前先做一层高浓度薄层的碳化硅缓冲层，以减小碳化硅外延片成品的缺陷。缓冲层厚度约为 1.2μm 以内，浓度 1E18 cm⁻³ 左右。

精确可控的厚度、掺杂浓度及片内均匀性是保障 SiC 功率器件性能及一致性的关键。同时外延层缺陷控制水平也是衡量外延片质量的核心参数。虽然 SBD 及 MOSFET 对缺陷的要求有所区别，但较为明显的表面形貌缺陷如掉落物缺陷、三角形缺陷、胡萝卜缺陷、彗星缺陷等都同时被定义为 SBD 及 MOSFET 器件的致命缺陷，因此控制致命缺陷的数量对提高芯片良率、降低成本极为重要。在 C/Si 比不存在明显失衡的条件下，胡萝卜缺陷及彗星缺陷基本可以消除，而掉落物缺陷、三角形缺陷与外延设备运行过程中洁净度控制、反应室石墨件杂质水平以及衬底质量有关。外延片表面粗糙度应控制在 0.2nm 以内，杜绝明显的台阶聚集现象。小坑缺陷是当前研究的热点：H.Fujiwara 等人报道了小坑缺陷可能导致器件漏电流增大，对器件性能的长期可靠性有影响。T.Katsuno 等人发现在衬底螺位错对应位置的小坑缺陷会引起器件漏电流增大。中电科技十三所房玉龙团队研究确定了衬底内部的 TSD 在外延生长过程中，延伸到外延层表面局部阻断了台阶流，形成了小坑缺陷，通过优化碳硅比和生长温度，有效降低了 4H-SiC 外延层小坑缺陷密度。

目前国内外 SiC 外延技术已经取得较大进展，产业界也已成功实现 6-8 英寸 SiC 外延批量生产，但 8 英寸的良率和品质还远不如 6 英寸的水平，需要从优选 8 英寸 SiC 衬底和优化外延工艺两方面来不断突破。碳化硅行业致力于不断降本增效，未来将开发单腔多片式 8 英寸碳化硅外延设备是重要发展趋势。高质量大尺寸厚膜外延也是提高器件耐压特性的关键，如何在提高外延生长速度的同时确保外延层的高质量是 SiC 同质外延面临的重要挑战。为了使器件的性能能够进一步提升，通过外延来实现部分器件结构，主要是开发 SiC 外延沟槽填充技术，进一步降低器件的导通电阻。近期液相法已生长出 3C-SiC 及 P 型 4H-SiC 衬底，在这两种新型衬底上的外延工艺及技术也有待研究及开发。

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

雅时国际资讯 ACT International
香港九龙 B,13/F, Por Yen Bldg,
长沙湾青山道478号 478 Castle Peak Road,
百欣大厦 Cheung Sha Wan,
13楼B室 Kowloon, Hong Kong
Tel: (852) 2838 6298
Fax: (852) 2838 2766

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200

Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 25988573

Fax: 86 755 25988567

武汉 Wuhan

Tel: 86 27 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

© 2024 版权所有 翻印必究



MESSE
MÜNCHEN

Connecting Global Competence

华南



扫码即刻预订展位



扫码注册免费参观

INTELLIGENT LIGHT
智能制造 洞悉新未来

LEAP EXPO | 成员展

华南国际智能制造、先进电子及激光技术博览会

慕尼黑华南激光展
LASER PHOTONICS SOUTH CHINA

electronica South China
慕尼黑华南电子展

productronica South China
慕尼黑华南电子生产设备展

同期举办
Vision China
中国(深圳)机器视觉展

2024年10月14-16日 OCTOBER 14-16, 2024

深圳国际会展中心(宝安新馆)

SHENZHEN WORLD EXHIBITION & CONVENTION CENTER

www.lasersouth.cn

慕尼黑华南激光展

LASER World of PHOTONICS SOUTH CHINA

英飞凌居林三厂正式落成 2025 年开始量产

8月8日消息，据台湾电子时报消息，英飞凌位于马来西亚居林高科技园区的厂区，以碳化硅（SiC）为主力的第三厂区已经正式落成并开始运作，预计2025年开始量产。

英飞凌指出，居林三厂一期从动工到完工仅花13个月的时间，已经是超前进度的表现。

目前初期碳化硅生产仍以成熟的6寸晶圆为主，2027全面转向8寸晶圆。

据悉，英飞凌于2022年2月宣布将斥资逾20亿欧元，在马来西亚居林工厂建造第三厂区，建成后将用于生产碳化硅和氮化镓功率半导体产品，每年可为英飞凌创造20亿欧元的收入。

2023年8月，英飞凌又宣布在原始投资之上，大幅扩建居林晶圆厂，投建全球最大的8英寸碳化硅功率晶圆厂，



且在未来五年内，将再投入高达50亿欧元用于马来西亚居林第三厂区的二期建设。至此，居林工厂计划投资总额从20亿欧元增至70亿欧元。

最新发布！ Park Systems 重磅推出最先进的 200 毫米样品原子力显微镜 Park FX200

（韩国首尔，2024年8月12日）作为市场领先的纳米计量系统制造商，Park Systems 隆重宣布推出最新的原子力显微镜（AFM）创新产品 Park FX200。该产品专为200毫米样品而设计，不仅满足了研究和工业应用的需求，还有力促进了大样品 AFM 技术的重要发展。



FX200 采用先进的机械结构，可显著降低本底噪声并最小化热漂移，从而提高测量的稳定性。这一改进提升了精度和可靠性，使其在长时间操作中表现稳定。

凭借更快的 Z 伺服性能，FX200 能够快速且精准地扫描大面积样品。其增强的高功率样品视图具有自动对焦功能，无论样品类型或条件如何，该功能都能使研究人员在 AFM 成像中获得出色的清晰度和细节。

FX200 包含多种自动化功能，以简化操作并保证研究效率最大化。探头无需手动调整，即可自动识别和更换。而减小的激光光斑尺寸和自动对准功能则显著提高了测量的精度

且保证了测量的一致性。

宏观光学系统提供了全面的200毫米样品视图，无需拼接多幅图像即可进行全面分析。该系统在预定义坐标处能进行自动顺序测量，进一步提高了大样品区域的数据收集效率。

Park FX200 配备了自动 AFM 扫描参数设置，旨在提高用户便利性。其直观的界面使研究人员能够更专注于科学目标，而非仪器配置，从而提高了生产力和工作流程效率。

此外，其卓越的性能使其在广泛的研究和工业应用（包括表面形貌研究、机械性能表征和纳米尺度现象探索）中表现出色，为当代科学研究提供了可靠的数据结果。作为 AFM 技术的重要进展，Park FX200 提供了无可比拟的精度、自动化效率和全面的样品可视化功能。

Park Systems 是全球领先的原子力显微镜（AFM）、椭圆偏测量仪及其他纳米计量系统制造商，提供全系列产品，服务于化学、材料、物理、生命科学、半导体和数据存储行业的研究人员和工程师。公司的使命是推动科学家和工程师在纳米尺度上的进步，解决全球最紧迫的问题，并拓展科学发现和工程创新的边界。Park Systems 的客户包括全球大多数领先的半导体公司以及亚洲、欧洲和美洲等国家研究型大学。Park Systems 在韩国证券交易所（KOSDAQ）上市，公司总部位于韩国水原，并在圣克拉拉、曼海姆、巴黎、诺丁汉、北京、东京、新加坡和班加罗尔设有地区总部。

更多详情，请访问：

<http://www.parksystems.cn/fx200>.

比利时半导体制造商 BelGaN 申请破产保护 寻求新的投资人

位于比利时佛兰德奥德纳尔德总部的半导体生产商 BelGaN 已申请破产保护，该公司总部的 440 名员工面临失业风险。

该公司成立已有 30 多年，但其尝试采用 GaN 芯片新技术研究未能迅速见效，面临现金流短缺的问题，无法再维持 400 多名员工的工厂运营。

“我们一直在执行公司的商业计划，并持续沿着这条道路推进，直到今天。”总经理 Rob Willems 说。“我们全心全意工作了 33 年，开创了新事业。”

该公司从生产传统硅芯片已转向生产氮化镓 (GaN) 芯片，这种芯片可用于电动充电器、电动汽车和数据中心等。此外，GaN 芯片还用于更高质量的音频、驱动 LED 照明和激光雷达传感器，甚至用于太空旅行。

然而，这项前景光明的技术无法迅速推向市场，无法收回必要的投资。管理层指出，这是劳动力和能源成本过高造成的。

“2023 年的能源成本变化非常大。我们很幸运能成为最高效的公司之一。也因此我们能够部分弥补成本问题。但这也是我们寻找新的高附加值技术的原因之一。氮化镓技术的出现就是天赐之物。”

在 BelGaN 最初的新闻稿中，管理层“对佛兰德的辉煌历程即将结束感到十分遗憾”，但这并不意味着正在考虑重新安置生产，Willems 澄清道。“这更像是向政府呼吁要求为



比利时的工业提供生存条件。”

会议举行

BelGaN 管理层将于今天晚上举行首次员工会议，讨论陷入困境的奥德纳尔德芯片制造公司的未来。

总经理 Rob Willems 证实了破产的消息，并补充说法院已任命了管理人员。管理层没有披露与这些管理人员会面的更多信息。

BelGaN 在对氮化镓 (GaN) 芯片进行风险投资 2 年后陷入了财务困境。这项前景光明的技术不仅用于电动充电器、电动汽车和数据中心，还用于高品质音响、LED 照明、激光雷达传感器，甚至太空旅行。

有兴趣的买家可能会前来。在此期间，该公司拥有约 300 名员工的生产部门将暂时停止运营。

据报道，员工们对这一消息感到震惊，管理层也给了他们时间来消化这一情况。“有些人认为我们仍有机会。也许会有解决办法。但可能并不适合所有人。很多人都有这种感觉。”工会消息人士今日透露。📸

长飞先进与怀柔实验室签署碳化硅功率器件成果转化意向协议

据长飞先进官微消息，近日，长飞先进与怀柔实验室在北京成功举办了碳化硅项目科技成果合作转化意向签约仪式。未来，双方将共同推动碳化硅功率器件先进技术研发及成果转化进程，加快能源绿色低碳转型，助力可持续发展。

据了解，未来，长飞先进与怀柔实验室将遵循“优势互

补、资源共享、共同发展”的原则，面向国家清洁低碳能源体系构建和“碳达峰、碳中和”战略目标，共同探索、推动碳化硅功率器件在风电、光伏、储能、电力电网、轨道交通等领域的研发及成果转化进程，推动能源绿色低碳转型和高质量发展。📸

Crystal IS 使 100 mm 块状 AlN 衬底的可用面积达到 99%

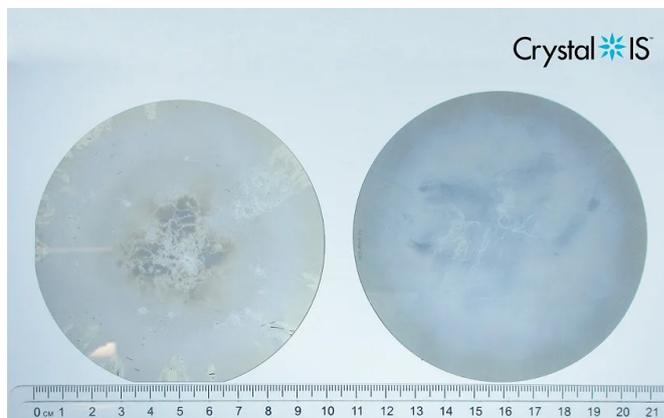
旭化成总部位于东京，主要制造专有紫外发光二极管 (UVC LED)，其位于美国纽约州绿岛的子公司 Crystal IS Inc 宣布，根据目前对 UVC LED 的需求，将在美国批量生产可用面积达 99% 的直径 100 mm 单晶氮化铝 (AlN) 衬底。AlN 的超宽带隙和高热导率有助于提高 UVC LED 和其他下一代射频和功率器件的可靠性和性能。

图片：2024 年第一季度 Crystal IS 100 mm 块状 AlN 衬底的可用面积为 90% (左)，2024 年第二季度 Crystal IS 100 mm 块状 AlN 衬底的可用面积为 99.3% (右)。

总裁兼首席执行官 Eoin Connolly 表示：“过去九个月中，我们大直径衬底的质量得到了提高，展示了我们晶体生长团队的专业知识。氮化铝固有的热优势可以使射频和功率器件在关键任务和电信应用中的性能更高。”

取得这一成就之前，该公司于 2023 年 8 月宣布生产出首款直径为 100 mm 的单晶 AlN 衬底。

Crystal IS 制造块状单晶氮化铝衬底，并于 2023 年底开始销售用于射频和功率器件研发的直径 2 英寸衬底。达到直



2024 年第一季度 Crystal IS 100 mm 块状 AlN 衬底的可用面积为 90% (左)，2024 年第二季度 Crystal IS 100 mm 块状 AlN 衬底的可用面积为 99.3% (右)。

径 100 mm 的里程碑加速了 AlN 衬底上新应用的开发，因为 100 mm AlN 衬底可集成到使用替代材料的射频和功率器件的现有制造线中。该公司计划在今年向主要合作伙伴供应直径为 100 mm 的衬底 (将由其美国工厂独家生产)，以便他们继续拓展 UVC LED 以外的应用。☎

IQE 计划让台湾子公司在台湾证券交易所进行首次公开募股

英国威尔士卡迪夫的外延片和衬底制造商 IQE plc 正计划让其台湾经营子公司 (IQE Taiwan) 在台湾证券交易所 (TWSE) 进行首次公开募股。

该公司打算出售少数股权，保留对 IQE Taiwan 的控制权，以继续发挥其战略价值。公开募股所得资金将用于资助 IQE 的发展战略。

虽然上市进程尚处于早期阶段，但 IQE 已聘请台新综合证券股份有限公司为其财务顾问，协助 IQE Taiwan 为首次

公开募股做好准备。首次公开募股将分两个阶段进行，在符合常规监管程序和要求的情况下，IQE Taiwan 预计于 2025 年上半年在新兴市场板完成上市的初始阶段。

IQE 首席执行官 Americo Lemos 认为，首次公开募股将“加快我们对增长战略的投资，因为我们将抓住未来的市场机遇，包括 GaN 电源领域的机遇”。“如果 IQE Taiwan 成功完成首次公开募股，我们就能最大化资产价值，同时继续为我们的全球客户提供安全、弹性的供应链。”☎

最新公告：中国对这些物项实施出口管制

8 月 15 日，商务部、海关总署联合发布公告，决定对部分锑、超硬材料相关物项实施出口管制。上述政策将于 2024 年 9 月 15 日起正式施行。

商务部表示，对锑、超硬材料相关物项实施出口管制系国际通行做法。中国借鉴国际做法，并根据自身需要，对有关物项实施出口管制，旨在更好维护国家安全、履行

防扩散等国际义务。相关政策不针对任何特定国家和地区。出口符合相关规定的，将予以许可。中国政府坚定维护世界和平和周边地区稳定，保障全球产业链供应链安全，促进合规贸易发展。同时，反对任何国家和地区利用来自中国的管制物项，从事损害中国国家主权、安全、发展利益的活动。☎

化合物半导体外延技术及应用

作者：潘磊，张伟，董浩，刘力，徐爽，刘洋博文，应豪，徐豪，卢双赞，孙义远，何传奇，柯鑫池，樊庆男，柳俊，丁琪超

一、从硅（Si）到化合物半导体材料

随着新一轮科技革命和产业变革的持续深入发展，半导体材料的应用逐渐从集成电路向功率、微波和光电子等领域拓展。以 Si 为代表的传统元素半导体性能已经接近物理极限，难以满足高性能和多元化的应用需求。在此背景下，化合物半导体应运而生并快速发展，目前最常用的材料有 GaAs、InP、GaN 以及 SiC 等，作为第二代和第三代半导体的主要代表，因其在高频率、高功率等方面特有的优势，在光电子、电力电子、射频通信以及新能源汽车等产业中有着不可替代的作用。

Si 的室温下禁带宽度是 1.12eV，可以支持高浓度的掺杂工艺，使得 Si 材料适合于制造 MOSFET、IGBT 等多种类型的半导体器件，但也限制了其在高温、大功率等场景的应用。与之相比，化合物半导体材料覆盖的禁带宽度范围很广，如宽禁带材料 GaN 的禁带宽度为 3.4eV，窄禁带材料 InAs 的禁带宽度仅为 0.36eV，利用化合物半导体的这一特性，通过运用能带工程，可以设计出多种多样的特殊功能材料和器件。此外，许多化合物半导体材料属于直接带隙半导体，这也成为化合物半导体在高效率固态激光器和探测器应用的独特优势。

表1：几种重要半导体材料的性能参数

材料	Si	GaAs	InP	4H-SiC	GaN
禁带宽度	1.12	1.43	1.34	3.26	3.45
能带类型	间接带隙	直接带隙	直接带隙	间接带隙	直接带隙
击穿场强(MV/cm)	0.3	0.65	0.5	3.1	4.9
电子饱和速度(10^7 cm/s)	1.0	2.0	1.0	2.0	2.5
迁移率($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)	1350	6000	5400	800	900(bulk) 2000(2DEG)
相对介电常数	11.9	13.2	12.5	9.7	8.9
热导率(W/K·cm)	1.4	0.54	0.7	4.9	1.5
熔点	1420	1238	1070	2830	1700
JFOM	1	11	13	410	790

二、化合物半导体外延技术

化合物半导体器件主要依赖于二维或三维材料结构以实现符合器件要求的特性，而这些特定的结构就需要通过外延技术实现。外延技术是一种常用的单晶薄膜制备工艺技术，按照半导体器件设计要求在单晶衬底上生长具有一定晶体取向的单晶层，即外延层。外延层通常是具有特定功能的单一或多层外延薄膜，通过膜厚、掺杂、组分以及界面等的精确调控，达到具备设计需求的电学或光电器件特性，后续的器件制造正是围绕外延层展开。外延结构和工艺直接决定了外延材料的质量，而外延材料很大程度上决定了器件和芯片的性能，它为制造高性能、高可靠性的半导体器件提供重要基础。

目前主流的化合物半导体材料外延技术分为四类：(1) 化学气相沉积 (CVD)[1]，通过气相化学反应在衬底表面沉积固态薄膜，可以精确控制生长工艺中的气体源流量、反应室温度和压力等参数，适合批量生产大尺寸、高均匀性的外延薄膜。目前 4H-SiC 外延普遍采用 CVD 技术。(2) 金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 技术。MOCVD 技术主要用于生长 III-V 族化合物半导体材料，采用 III 族金属有机物 (TMGa、TMAI、

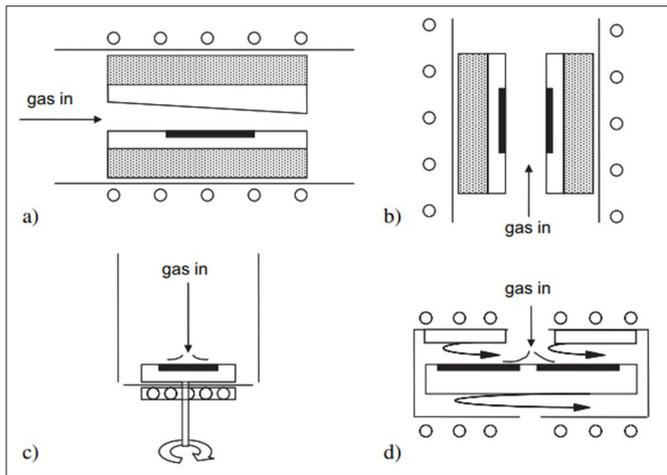


图1: 常用的CVD反应室示意图^[1], (a) 水平热壁反应室, (b) 烟囱式热壁反应室, (c) 垂直冷壁反应室, (d) 多片行架式反应室。

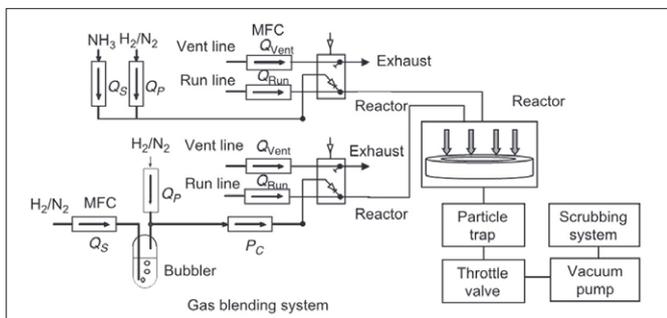


图2: MOCVD系统示意图^[2]

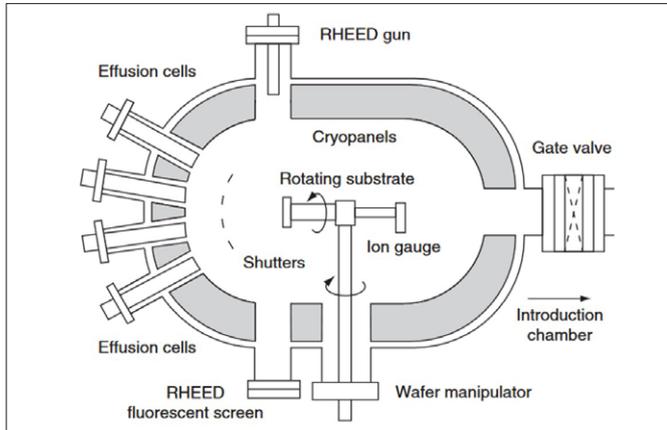


图3: MBE生长腔示意图^[3]

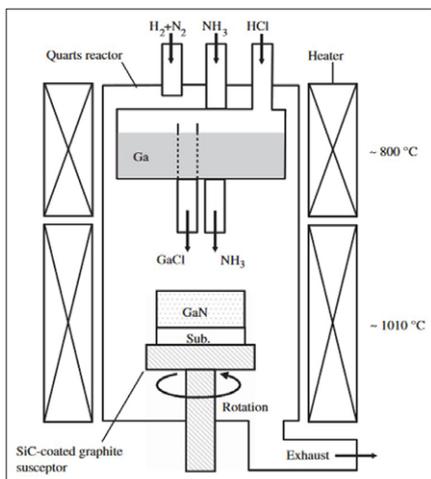


图4: HVPE生长腔示意图^[4]

TMIn、TEGa 等) 作为 III 族源, V 族元素的氢化物 (AsH₃、PH₃、NH₃ 等) 作为 V 族源, 通过高温裂解、合成等化学反应和表面迁移等物理过程在衬底上形成 III-V 族化合物半导体薄膜材料。MOCVD 技术已广泛应用于 GaAs、InP 和 GaN 外延薄膜的研发和生产。(3) 分子束外延 (MBE), 在超高真空条件下, 将所需元素以原子束或分子束的形式按照一定的比例、速度喷射到衬底表面, 经过物理化学过程, 排列形成单晶薄膜材料。MBE 技术能够精准控制多层膜厚、组分和掺杂, 可实现原子级的表面平整度和陡峭界面, 非常适合生长超薄层和异质结、超晶格等复杂结构。(4) 氢化物气相沉积 (HVPE)。HVPE 是一种常压热壁化学气相沉积技术, 其技术特点为生长速率非常高 (100 μ m/h 以上) 且容易实现 p 型和 n 型掺杂, 适合生长厚膜材料, 是目前制备 GaN 单晶衬底的主要技术方法。

三、GaAs、InP 基材料外延技术及应用

GaAs/InP 基化合物半导体光电子器件距今发展已有半个多世纪的历史, 其广泛应用于光纤通信、工业加工、显示、激光传感等工业、民用和国防等领域。近年来随着高端制造业、智慧城市、智能驾驶、人工智能等领域快速发展, GaAs/InP 化合物半导体应用场景也日益丰富。

GaAs/InP 基化合物半导体光电子器件覆盖的工作波长范围大约为 600-1700nm, 其中 GaAs 基器件的工作波长范围为 600-1100nm, 典型应用有用于显示的 6 \times nm InGaP/AlInGaP 材料体系红光光源、8 \times nm 和 9 \times nm In(Al)GaAs/AlGaAs 材料体系大功率半导体激光光源、用于短距离数据通信的 850 nm 和用于 3D 传感的 940nm 垂直腔面发射激光器 (VCSEL)。InP 基器件的工作波长范围为 1250-1700nm, 典型应用为 1310nm 和 1550nm 光纤通信波段的激光器 (FP/DFB/EML) 和探测器 (PIN/APD), 涉及的材料体系有 InAl-GaAs/InP 和 InGaAs(P)/InP。以下分类介绍这几种常见的材料体系及相关应用。

大功率半导体激光器及 AlGaAs 材料系。 波长在 760~1060nm 的大功率激光器应用广泛, 其中 808nm 和 880nm 半导体激光器分别用于泵浦 Nd³⁺:YAG 固态激光器和 Nd³⁺:YVO₄ 固态激光器; 915nm 和 976nm 半导体激光器主要用于泵浦掺 Yb³⁺ 光纤激光器和掺 Er³⁺ 光纤放大器; 940nm 半导体激光器也用于泵浦 Nd³⁺:YAG 固态激光器。随着激光在工业加工领域的快速发展, 作为光纤激光器和固体激光器泵浦源的 8 \times -9 \times nm 大功率半导体激光器已经成为业界竞争最为激烈的热点之一^[5]。以 8 \times nm 激光器为例, 2016 年德国 JENOPTIK 制备出条宽 100 μ m 808nm 半导体激光器输出功率达 15W, 条宽 200 μ m 时输出功率可达 22 W。中科院半导体所在 2020 年研制的 200 μ m 条宽 880nm

单管芯半导体激光器输出功率达 19W。8×nm 半导体激光器国际上主流供应商如美国的 Coherent、nLight、德国的 JENOPTIK，其产品不同发光宽度对应的典型功率参数为 5W@100um、10W@200um、15~20W@400um。国内产品的成熟度与国外尚有差距^[6]。

In(Al)GaAs/AlGaAs 材料是此类激光器中的关键材料，其中 $Al_xGa_{1-x}As$ 用于构建其波导层和限制层，在 VCSEL 中用于构建上下 DBR 层；In(Al)GaAs/AlGaAs 用于构建量子阱有源区。 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 异质结构器件性能强烈地依赖于 $Al_xGa_{1-x}As$ 材料的外延质量，它将直接影响 $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$ 的界面和表面的质量，从而影响器件的性能。其生长质量与生长温度、V/III 比、生长速度、外延环境的洁净度等因素都有很密切的关系。由于 Al 原子在外延表面迁移速度较慢，所以较高的生长温度是获得高质量 $Al_xGa_{1-x}As$ 材料的关键，并且随着 Al 组分 x 的增加和 $Al_xGa_{1-x}As$ 厚度的加厚，需进一步提高生长温度，如 750℃ 甚至以上，同时较高的生长温度也有利于抑制因 Al 元素引入的 C、O 杂质浓度。适当的 V/III 比和生长速度也是提高 $Al_xGa_{1-x}As$ 材料质量的重要因素^[7]，V/III 过低会引起外延晶体质量下降，出现表面粗化；提高 V/III 比即提升 AsH_3 分压，也可以降低外延层中的 C、O 沾污，但过高的 V/III 比不仅会引入更多杂质，而且不利于 Al 原子的迁移。

照明显示及 GaInP 材料系。 $Ga_xIn_{1-x}P/(Al)GaInP$ 是一种重要的宽带隙材料，与 GaAs 晶格匹配的 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ 常用于红光激光器、高效多结太阳能电池和 GaAs 晶体管器件结构中。使用 MOCVD 生长 $Ga_xIn_{1-x}P$ 材料时会面临合金有序化问题。有序的 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ 禁带宽度比 Ga、In 原子完全随机分布的无序结构的禁带宽度低约 0.2eV，生长红光激光器时一般需要得到无序结构的 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ 。外延生长条件如：生长温度、V/III 比、生长速度、衬底偏角等都会对材料有序度产生影响，且影响机理较为复杂，如图 5 所示。在高温 750℃ 和低温 600℃， E_g 与 V/III 比成相反的单调升降关系。搭配合适的生长温度、V/III 比和生长速度是调试 $Ga_{0.5}In_{0.5}P$ 外延工艺的关键，在实际生长时可以使用高偏角衬底，如 10°、15° 等以增大外延工艺窗口。

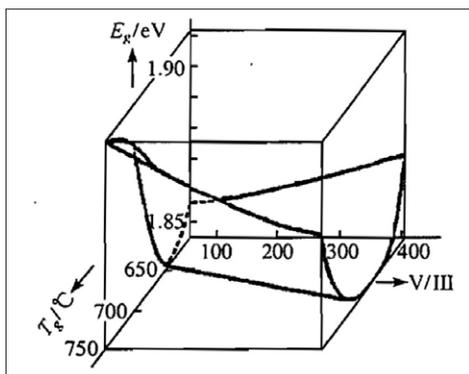


图5: GaInP材料带隙与外延生长温度及V/III比关系图

光通信激光器及四元材料体系。在光通信领域基于 InP 衬底的高速激光器主要有分布式反馈激光器 (DFB) 和电吸收调制激光器 (EML) 两种类型，探测器主要分为 PIN 和 APD 两种结构类型。其中 DFB 主要适用于传输速率在 25G 及以下的数据中心、城域网及接入网，传输距离在 10 千米以内；EML 适用于高速长距离传输，速率在 50G 及以上，传输距离在 80 千米以内，如骨干网、城域网及数据中心之间的互联。

在 EML/DFB/APD 器件外延结构中，常用的材料有 In-AlGaAs 和 InGaAs(P) 四元材料，其中 InGaAsP 作为一种 III-III'-V-V' 四元化合物半导体材料，可以通过 III、V 族元素组分的独立调控，对其发光波长进行调控，实现从 900nm 到 1650nm 的发光波长。与此同时，也能够最大程度的保持与 InP 衬底的晶格匹配，从而得到质量极高的外延材料。Ga 和 In 元素在固相中的分布基本与气相中的比例相同，分配系数固定，近似为 1~1.5，而 V 族元素 As、P 随着固相组分的不同，分配系数变化较大，因此精确的组分控制难度较大，对生长工艺的要求也相对较高。由于砷和磷氢化物的热稳定性不同，InGaAsP 组分对于生长温度也极为敏感，温度的微小变化就会导致 As 元素的并入差异，进而改变发光波长，影响外延片的均匀性。因此高质量外延 InGaAsP 材料对温度的均匀性有着非常高的要求，这也提升了材料外延对设备的要求。

无磷 InAlGaAs 体系为传统的 InGaAsP 体系提供了一个可行的替代方案，它在材料性能和 MOCVD 生长控制方面具有以下优势。在器件结构方面与 GaInAsP/GaInAs 相比，AlGaInAs/GaInAs 异质结构中更大的导带偏移有效提高了电子限制能力，从而改善多量子阱激光器 (MQW 激光器) 的温度特性。在 MOCVD 外延生长方面，无磷体系中 III 族元素组分与气相组成几乎呈线性关系，这使得无论是在非应变还是应变的四元层中，都很容易精确地控制成分，大面积的组分均匀性和再现性要优于传统的 InGaAsP 体系。当然，Al 元素的引入也不可避免的带来 C、O 沾污问题，同时由于 Al 的活泼性，外延生长时需要精确匹配生长温度和生长速率等工艺条件以实现表面无缺陷的 AlGaInAs 外延层生长。

硅基 As/P 材料外延。随着全球不断增长的数据通信带宽需求，传统的硅基信息技术正逐渐饱和，在该背景下具有高带宽密度、高能效和低延迟等优点的硅基光子集成电路 (Si-PICs) 应运而生，在同一个芯片上单片集成所有光学有源和无源组件。然而硅作为一种间接半导体材料，虽可有效进行光的传输、调制和探测，但无法实现基于硅材料的有效直接发光光源。量子点激光器因其更高的晶格缺陷耐受性、更优的温度特性为硅基光源提供了一种可靠的解决方案，图 6 所示。

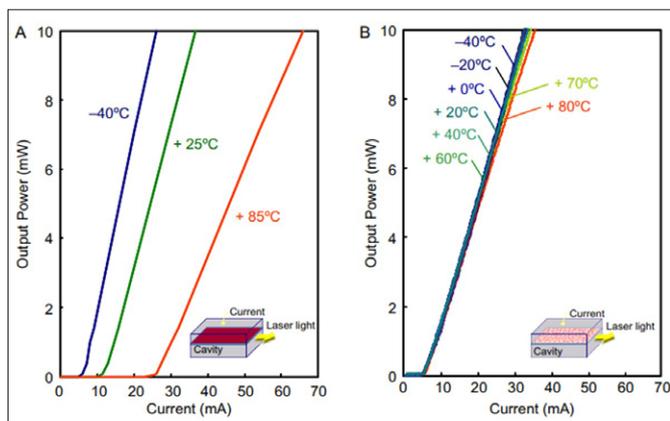


图6: 不同温度下量子阱激光器 (A) 和量子点激光器 (B) 的L-I特性^[8]

目前已开发的硅基激光器集成方法有芯片级倒装键合、微转印、晶圆级键合或者直接外延, 其中在硅衬底上直接外延 III-V 量子点激光器是最具潜力的解决方案。自 1999 年 Linder 等首次报道硅衬底上 InGaAs 量子点的自组装生长以来, 硅上直接外延量子点激光器已研究 20 余年, 主要的挑战为解决异质外延过程中面临的晶格失配、热失配和极性失配问题。2012 年伦敦大学学院刘会赟教授团队通过将成核层和位错过滤层与原位热退火相结合的方法在偏角 Si(001) 衬底上生长的 InAs/GaAs 量子点激光器, 实现室温激射 [9]。2020 年, 万雅婷等报道了在 CMOS 兼容的 Si (001) 衬底上生长的量子点 DFB 激光器, 实现了稳定单纵模工作, 边模抑制比超过 50dB, 阈值电流密度为 440 A/cm²。

为结合 MOCVD 生长速率快、成本低和 MBE 生长量子点 (QD) 质量高的优点, 可采用 MOCVD 生长底部缓冲层 (buffer) 和位错阻挡层 (DFL), 而采用 MBE 生长上部分激光器主体结构。MOCVD 生长的较厚的 buffer 和 DFL 层可以抑制因极性失配导致的反向筹缺陷和因晶格失配导致的位

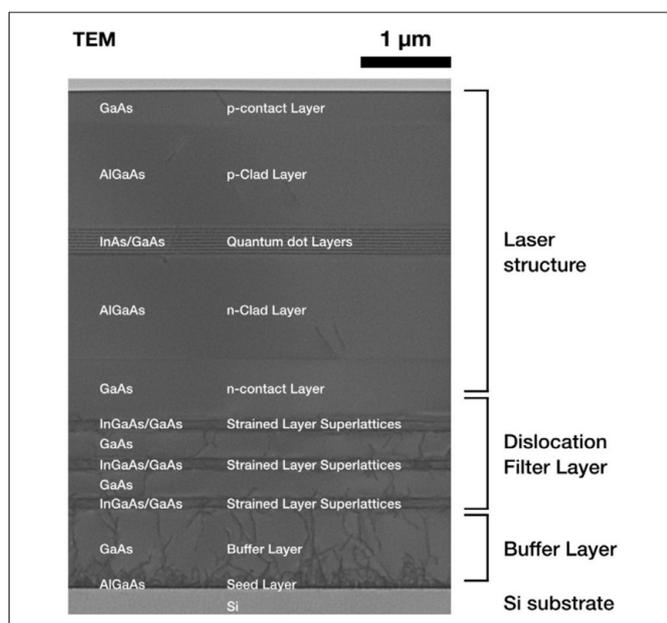


图7: Si (001) 衬底上直接外延生长的QD激光器结构^[10]

错缺陷, MBE 可以对 QD 外延进行精确控制, 以生长出高质量 QD 有源区, 图 7 所示。实现硅基量子点光源的产业化应用仍需解决以下问题: (1) 采用更有效的位错疏导方案, 如在有源区附近引入位错疏导层, 以显著降低有源区的位错密度; (2) 有效抑制因材料热失配导致的热裂纹, 以提升芯片良率; (3) 与其他材料和元件更加高效的耦合集成^[11]。

晶圆上的直接 III-V 族外延技术, 代表了激光集成的最高水平。科研机构需联合产业界在材料质量和晶圆级集成方面取得进一步突破, 才能释放其应用潜力。

四、GaN 体系半导体材料外延技术及应用

以 GaN 为代表的 III 族氮化物半导体材料具有全组分带隙可调 (0.63-6.2eV)、全组分直接带隙、强极化、耐高温、抗辐照、高电子迁移率、可实现低维量子结构等特性, 是目前为止带隙调制范围最广的半导体材料体系^[12]。随着外延技术的进步, GaN 基半导体器件在光电、射频和电力电子等领域得到了广泛应用。

GaN 外延生长常用的衬底材料有 GaN、蓝宝石、SiC 和 Si, 按照衬底划分, GaN 基半导体外延技术路线主要分为 GaN-on-GaN、GaN-on-Sapphire、GaN-on-SiC 和 GaN-on-Si 这四大类。在 GaN 自支撑衬底上生长 GaN 属于同质外延, 可以从根本上解决外延层与衬底之间的晶格失配与热失配问题, 但 GaN 单晶生长难度较高, 阻碍了其产业化应用, 目前主要用于 GaN 基半导体激光器等对位错要求极其严格的器件外延生长。蓝宝石衬底的制备工艺成熟, 大尺寸、高质量的单晶材料制造成本较低, 蓝宝石基的 GaN 外延技术发展成熟, 已广泛应用于 LED 照明、紫外及蓝绿探测器和激光器等光电领域。SiC 衬底与 GaN 之间的晶格失配和热失配较小, 且 SiC 导热性和绝缘性能优异, GaN-on-SiC 的器件可以在高电压和高漏极电流下工作, 散热和射频性能优异, 主要用于制作大功率器件和射频器件。Si 衬底价格低廉, 大尺寸制备技术成熟, 且 GaN-on-Si 器件与 CMOS 工艺兼容, 容易实现 GaN 器件与 CMOS 的单片集成, 并利用 CMOS 晶圆厂进行规模生产, GaN-on-Si 目前主要用于消费电子、工业、数据中心和电动汽车等领域的功率器件和射频器件制造。

目前应用最广泛的 GaN 半导体外延技术还是采用异质外延体系, 要获得大尺寸、高质量的 GaN 外延薄膜, 首先需要克服的就是异质外延的应力控制问题, 尤其是对于 GaN-on-Si 和 GaN-on-Sapphire 的大失配异质外延体系, 这就需要使用应力调控外延工程技术。应力调控技术的整体思路是通过采用特殊设计的缓冲层或插入层结构, 在外延生长过程中引入一定压应力或张应力, 以此来平衡降温过程中由于衬底和外延层间的热膨胀系数失配所产生的张应力或压应力, 最终获得无裂纹、低翘曲度的外延片。以 GaN-on-Si 外

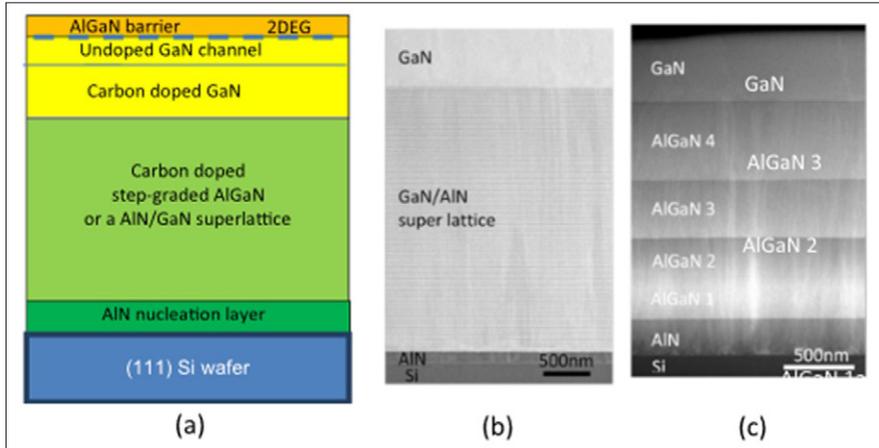


图8: (a) GaN-on-Si HEMT的典型外延结构。(b) GaN/AlN超晶格缓冲层的TEM图像。(c) 阶变AlGaIn缓冲层的TEM图像^[13]。

延为例，利用 AlN 和 GaN 晶格常数的差异，生长于 AlN 等缓冲层上的 GaN 外延层会受到压应力，常用的应力调控缓冲层有 AlN、AlGaIn、Al(GaN)/GaIn 超晶格和低温 AlN 插入层等^[13]，如图 8 所示。此外，使用图形化衬底和工程复合衬底也能起到缓解应力的作用，比如 IMEC 在 2022 年采用 Qromis 公司开发的 QST 衬底，实现 17 μm 厚的 GaN 外延生长，材料垂直耐压达到 1800V^[14]，如图 9 所示。

降低缓冲层漏电是 GaN 异质外延工艺需要解决的另一个关键问题。由于氮空位、O 和 Si 等杂质的影响，非故意掺杂外延生长的 GaN 薄膜的背景载流子浓度通常在 10^{16} - 10^{17}cm^{-3} 范围，导致制备而成的功率器件容易通过缓冲层漏电或预先击穿。较好的解决方法是在缓冲层外延生长中进行补偿掺杂，通过引入 Fe、Mg、C 等受主杂质，以补偿背景电子从而提高缓冲层的电阻率。其中，Fe 和 Mg 具有较强的记忆效应，容易在腔体中残留并在后续外延层中造成一定量的残留。相比而言，C 杂质没有记忆效应和偏析，其在 GaN 中替代 N 位形成浅受主，从而对背景载流子形成补偿效应，是 GaN 高阻缓冲层较为适合的掺杂剂。对于 GaN-on-Si 技术路线，Si 衬底和 AlN 成核层间会形成一层寄生导电沟道，目前比较公认的来源是外延生长过程中 Al 或 Ga 原子扩散进入 Si 所形成的 p 型沟道或电子反型层，该寄生

导电层不仅会降低整个外延缓冲层的耐压能力，在高频器件应用中还会造成较高的射频能量损耗。研究人员针对此问题提出了多种解决办法，如降低 AlN 成核层的生长温度以减少扩散^[15]，在 AlN 生长前引入 3C-SiC^[16] 或 SiNx^[17] 阻挡层，以及对 Si 衬底进行离子注入处理等。2023 年，北京大学对高阻 Si 衬底采用 C 离子注入工艺，显著抑制了生长过程中自间隙辅助的 Al 原子扩散作用，缓冲层的射频损耗在 10GHz 下降低到 0.13dB/mm^[18]。

除了以上介绍的技术之外，对外延层的缺陷控制、n/p 型掺杂和电学参数调控

等也是 GaN 体系半导体外延技术需要解决的问题，针对不同的器件应用，还有一些特殊的材料结构或功能需要通过外延技术实现。下面继续介绍 GaN 的两个主要应用领域以及未来发展所面临的外延技术难点。

GaN 在微电子领域的应用。由于 GaN 具有大禁带宽度、高电子迁移率、高饱和电子漂移速度等优良的特性，相比 GaAs 基电子器件，GaN 基电子器件可工作在更高的电压下及具有更高的功率密度，相比于 Si 基射频电子器件，其具有更高的工作频率。特别的，利用 III 族氮化物材料的自发极化和压电极化特性，在 AlGaIn/GaN 异质结的界面处可以形成高浓度的二维电子气 (2DEG)，由于被限制在界面的二维空间内，2DEG 具有极高的饱和速度和电子迁移率，以此异质结为基础制备的 GaN 基高电子迁移率晶体管 (HEMT) 适合大功率、高工作频率的电力电子器件和微波功率器件应用。未来，GaN 功率器件技术将向更高输出功率密度、更高频率的应用发展，在 EV 逆变器、太阳能逆变器、数据中心等电力电子目标市场以及雷达、卫星通讯、5G 基站、移动终端等微波射频领域将不断拓展其应用空间。现阶段 GaN 基 HEMT 器件还未能完全发挥出 GaN 材料的全部价值和潜力，通过在缓冲层、沟道层、势垒层、冷却结构等方面的外延技术创新，支撑 GaN 基 HEMT 器件向更高击穿电压、更

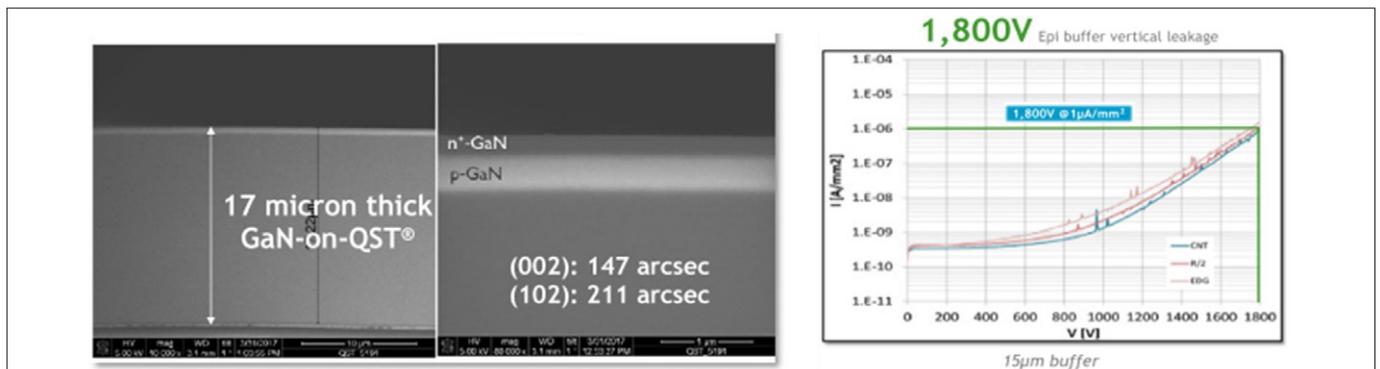


图9: QST衬底上生长的17 μm 厚GaN薄膜截面SEM图及15 μm 厚GaN外延层的I-V测试曲线^[14]。

低导通电阻、更小动态导通电阻和更小关态漏电流不断发展进步，拓展其应用空间。

GaN 在光电子领域的应用。氮化物发光二极管 (LED) 和激光二极管 (LD) 能够可靠地发出明亮的绿色、蓝色、紫色和紫外光，具有发光波长可调、节能环保、寿命长、体积小等优点，氮化物材料还可用于制备光电探测器、太阳能电池等光电子器件，在照明、高分辨全彩显示、光通讯、紫外消杀等领域具有重要应用价值。随着 Micro-LED、激光显示等下一代显示技术的发展，对氮化物光电子器件外延技术提出了更高要求，目前看来仍然存在以下关键科学和技术问题：

(1) 低缺陷密度外延关键技术；(2) 高波长均匀性调控；(3) 高质量有源区外延关键技术；(4) p 型 (Al)GaN 导电难题；(5) 激光器光场限制问题；(6) 激光器腔面退化问题。GaN 基光电子器件的外延技术还有较大研究和提升空间，这些问题需要研究技术人员从外延结构设计、外延生长技术以及反应腔体设计等多方面进行持续优化。

五、SiC 外延技术及应用

SiC 是第三代半导体材料的典型代表，具有耐击穿、宽禁带、高热导等一系列优良的物理化学性质，在功率二极管、晶体管、晶闸管等电力电子器件方面具有广泛的应用前景^[19, 20]。随着 SiC 晶圆质量的显著提高和器件技术的进步，高压 SiC 基肖特基势垒二极管 (SBD) 和场效应晶体管 (FET) 的性能明显优于硅基器件。自 2001 年以来，SiC SBD 已经进入市场，600-1700 V SiC FET 的生产也随之而来^[21]。近些年来，随着新能源车市场的爆发，SiC 功率器件已成为各种电源、电控等模块中显著降低功率损耗的关键器件。

与传统的 Si 基器件不同，几乎所有的 SiC 电力电子器件工艺均在 4H-SiC 同质外延层上实现。一方面不同类型的高压碳化硅功率器件对漂移层的掺杂浓度和厚度有不同的需求；另一方面由物理气相传输法 (PVT) 生长的 SiC 单晶衬底具有较高密度的位错等晶体缺陷，导致碳化硅器件无法直接在碳化硅晶圆衬底上进行设计制造，因此，开发具有均匀厚度和掺杂浓度的低缺陷高质量 SiC 外延生长工艺是研制各种 SiC 器件所必须的关键技术。

SiC 台阶流外延生长。目前，已知的 SiC 晶型达 250 多种，其中 4H-SiC 是 SiC 材料体系中最适合用于制作功率器件的晶型，正晶向 4H-SiC 衬底表面原子台阶的密度低，外延过

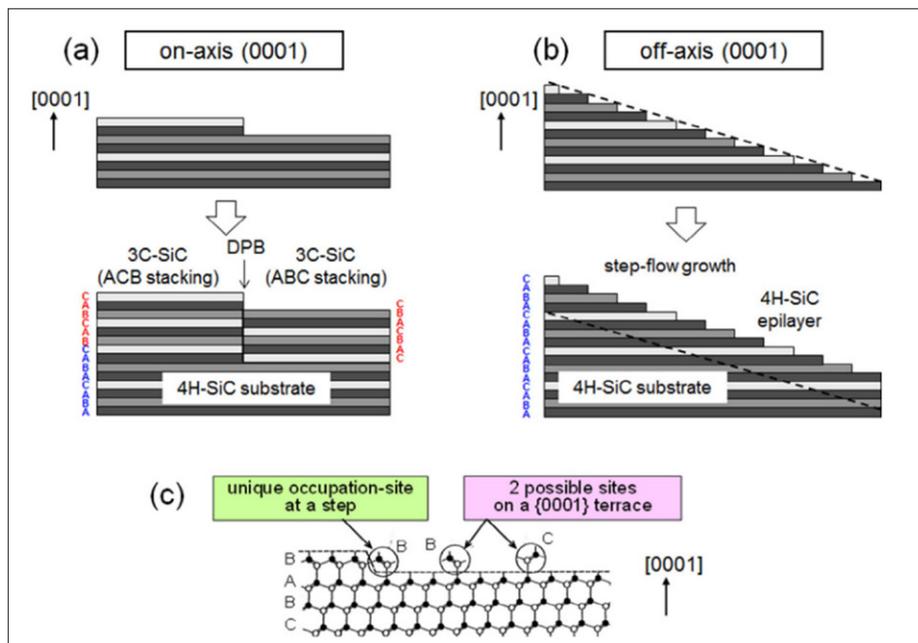


图10: (a) 正晶向4H-SiC (0001) 和 (b) 离轴4H-SiC (0001) 上下延层的生长方式和堆叠顺序示意图，(c) 吸附原子台阶附近和 (0001) 台上的成键情况示意图^[22]。

程中容易出现二维成核生长形成 3C-SiC，如图 10 (a) 所示。为了获得单一晶型的 4H-SiC 外延层，研究人员采用斜切衬底进行外延生长，斜切衬底大大提高了衬底表面的台阶密度，在台阶生长模式下，SiC 衬底的原子堆垛次序很容易被复制到外延膜中，大幅度降低了其他晶型成核几率，从而获得了单一晶型的 4H-SiC 外延膜，如图 10 (b)、10 (c) 所示^[22]。理论上讲，斜切角度越大，衬底上的台阶密度越高，外延膜单一晶型的质量越好，但随着 SiC 晶圆的扩径，衬底斜切带来的晶锭浪费问题不容忽视，斜切衬底的斜切角度逐渐降低，此外，降低衬底的斜切角度也可提高衬底到外延的基平面位错 (BPD) 的转化率^[23]，经研究者的不断探索与权衡，4° 斜切 SiC 衬底逐渐成为 SiC 市场的主流。

氯基法高速外延生长。常见的 SiC 外延生长技术包括：化学气相沉积 (CVD)、分子束外延 (MBE)、液相外延 (LPE) 等；其中，CVD 法生长 SiC 外延具有外延质量好、生长速率高、成本低等优势，是现阶段最常用的外延生长技术。传统的 CVD 法生长 SiC 外延过程中，通常采 H₂ 作为载气，硅烷 (SiH₄) 和丙烷 (C₃H₈) 或乙烯 (C₂H₄) 作为 Si 源和 C 源。但是 CVD 法外延生长时间过长易造成腔体掉落物增多，外延片缺陷密度提高。因此，高质量的 SiC 外延生长需要开发高速外延生长技术。但是较高的 Si 源流量易在衬底表面形成 Si 团簇，这些 Si 团簇在衬底表面形成 Si 液滴，成为缺陷成核点，造成外延层表面形貌退化，如图 11 (a) 所示，从而影响器件性能。

后来，研究人员发现，在外延过程中引入 HCl 气体或者采用氯基硅源，如 SiHCl₃ (TCS)、SiH₂Cl₂ (DCS) 等可有效减小 Si 团簇的形成，并抑制高速外延情况下 SiC 表面

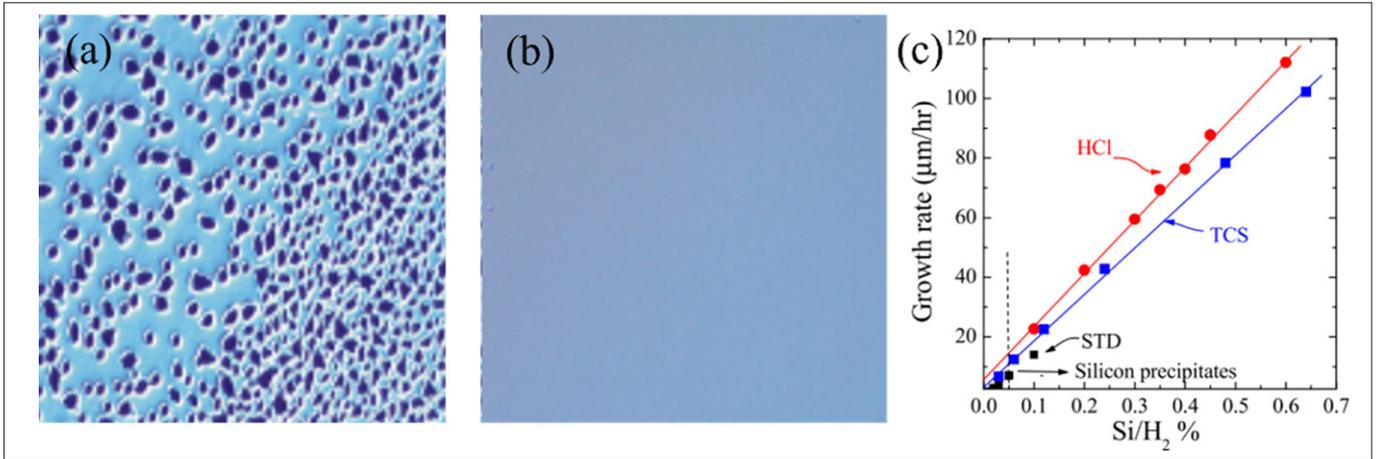


图11: (a) 外延Si/H₂=0.1%不添加HCl, (b) Si/H₂=0.1%含HCl的外延片光学图片^[24], (c) 不同外延反应体系中Si/H₂比与生长速率关系曲线图^[24]。

形貌与结晶质量的退化^[24, 25], 如图11(b)所示。氯基法解决了高速外延SiC表面Si团簇的难题, 使SiC外延的速率轻松达到60 μm/h, 如图11(c)所示, 极大提高了外延效率, 降低了外延成本, 成为SiC外延的主流方法。

SiC外延膜厚与载流子浓度对器件的影响。SiC功率器件中, 漂移层即外延层厚度及掺杂浓度是获得高耐压器件的关键。不同耐压等级的功率器件对外延层厚度和掺杂浓度的要求不同, 外延层膜厚和掺杂浓度的设计也需要对外延层的阻断电压和比导通电阻进行综合考虑, 当在满足耐压条件下的外延层参数设计中选择一个组合时, 比导通电阻达到最小, 这样的外延层参数则为最优设计^[26], 如图12所示。

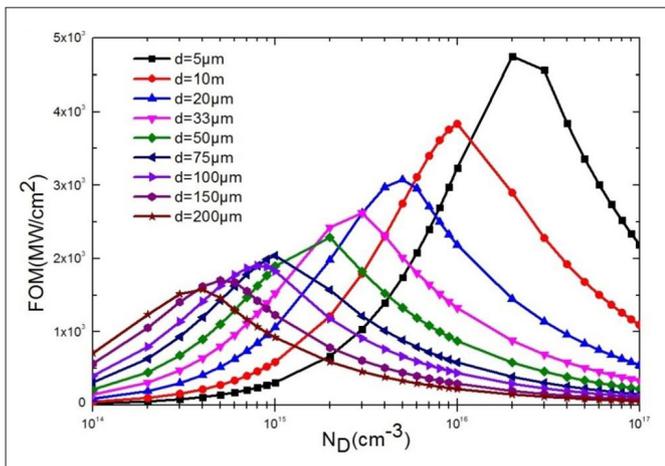


图12: 耗尽层厚度确定, 碳化硅的品质因素 (figure of merit) FOM随碳化硅外延层掺杂浓度的变化曲线^[26]。

在SiC外延的原位掺杂中, 氮气(N₂)和三甲基铝(TMAI)为典型的N型和P型掺杂剂。SiC外延的掺杂浓度与掺杂源流量、温度、反应室压强等因素相关, 也与反应腔室中的C/Si比有关。因此, 在合适的C/Si比下, 通过调节的n型或p型掺杂浓度, 可以实现650~6500 V SiC器件制作对SiC外延的要求。

SiC外延中的缺陷。现有的晶体生长技术还不能生长出具有理想结晶结构的4H-SiC晶体, 4H-SiC衬底和外延中都

包含了大量缺陷。SiC外延层的缺陷整体上可分为两大类, 结构缺陷和表面形貌缺陷。SiC外延层的缺陷整体上可分为两大类, 结构缺陷和表面形貌缺陷。结构缺陷包括各种类型的位错和层错, 位错又分为贯穿型位错(TD)和基平面位错(BPD), 其中贯穿型位错可分为微管(MP)、螺位错(TSD)、刃位错(TED)等几种类型。外延层中的位错缺陷绝大部分是由衬底中的缺陷复制或扩展而来, 因此SiC外延中的位错称为扩展缺陷, 如图13所示。粗略地讲, SiC外延层的总位错密度与衬底表面总位错密度大致相同, 这是由于衬底中超过99%的螺位错会完全复制到外延层中, 同时衬底中接近100%的刃位错会复制到外延层中, 但是与TSD和TED不同的是, 衬底中的大部分的BPD会转化为TED, 相比于BPD, TED对SiC器件的影响较小。与位错缺陷类似, 衬底中的层错(SF)缺陷在外延生长过程中也会直接复制到外延层中, 在PL激发下呈现长条状, 称为条状层错(BSF)。除BSF外, 外延工艺的影响也会生成层错, 在PL激发下呈现三角形, 称为SSF, 外延中的层错缺陷也会对SiC功率器件的耐压产生不利影响。

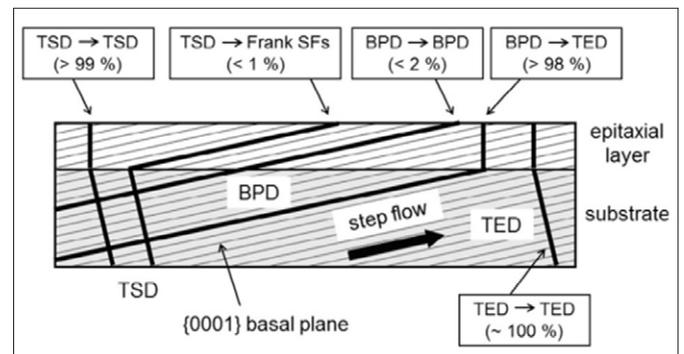


图13: SiC衬底与外延层中的缺陷扩展示意图^[22]

与结构缺陷不同的是, SiC外延层中的形貌缺陷绝大多数都是在外延生长过程中产生, SiC外延层中的形貌缺陷主要包括掉落物、三角形、胡萝卜、台阶聚束、凹坑、划痕、颗粒等。其中掉落物、三角形和胡萝卜缺陷会导致漏电流增

加并大幅降低器件的耐压，这些缺陷称为致命缺陷，如何降低 SiC 外延层中致命缺陷密度，提高 BPD 转换效率是 SiC 外延的研究重点。

六、九峰山实验室外延技术平台介绍

九峰山实验室致力于化合物半导体技术研发，已建立覆盖 GaAs、InP、GaN、SiC 等化合物半导体材料的多元化外延技术平台，在光电子、功率器件、无线通讯等领域为国内外合作伙伴提供高质量、产业化、稳定可靠的外延技术服务，助力产业发展和核心关键技术自主可控。目前，九峰山实验室外延技术平台已完成多项化合物外延关键工艺技术开发，达到行业先进的工艺技术能力：

- 1) 基于国产 HTCVD 设备开发了外延厚度 10-60 μm 的高均匀性、低缺陷密度 SiC 外延技术，致命缺陷密

度 $< 0.5\text{ea}/\text{cm}^2$ ，外延厚度不均匀性 $\leq 2\%$ ，载流子浓度不均匀性 $\leq 5\%$ ，满足 600V~6500V 应用的 MOS-FET、SBD、IGBT 等功率器件研制需求。

- 2) 8 英寸 Si 基 GaN 外延片外延膜厚最高可达 8 μm ，垂直击穿电压 $> 1500\text{V}$ @ 1 $\mu\text{A}/\text{mm}^2$ ，翘曲度 $< 30\ \mu\text{m}$ ，GaN(002) 和 (102) 面 XRD 摇摆曲线半高宽分别为 318 arcsec 和 468 arcsec，2DEG 室温迁移率 $\geq 1800\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，满足高压功率器件研制需求。

- 3) 建立 GaAs 基和 InP 基 LD、PD 等多种规格光电子器件以及定制化结构的外延技术能力，同时具备 MOCVD 高均匀性 Zn 扩散工艺能力。

未来，九峰山实验室将持续聚焦化合物半导体外延关键科学技术问题和产业需求，不断提升外延工艺技术能力，为产业界合作伙伴提供优质的化合物半导体外延技术服务。

扩展阅读

- [1] G. Wagner, D. Schulz, D. Siche. Vapour phase growth of epitaxial silicon carbide layers. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 47, 2003.
- [2] F. H. Yang. Modern metal-organic chemical vapor deposition (MOCVD) reactors and growing nitride-based materials. *Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes, Nitride Semiconductor Light-Emitting Diodes (LEDs)*, 2014.
- [3] P Frigeri, L Seravalli, G Trevisi, and S Franchi. *Molecular Beam Epitaxy: An Overview*, 2011.
- [4] Kenji Fujito, Shuichi Kubo, Hirobumi Nagaoka et al. Bulk GaN crystals grown by HVPE. *Journal of Crystal Growth*, 311(10), 2009.
- [5] 陈良惠, 杨国文, 刘育衔. 半导体激光器研究进展, *中国激光*, 47(05), 2020.
- [6] 马骁宇, 张娜玲, 仲莉, 刘素平, 井红旗. 高功率半导体激光泵浦源研究进展. *强激光与粒子束*, 32(12), 2020.
- [7] 陆大成, 段树坤. 金属有机化合物气相外延及其应用, 2010.
- [8] K. Otsubo, N. Hatori, M. Ishida, S. Okumura, Y. Arakawa, Temperature-insensitive eye-opening under 10-Gb/s modulation of 1.3- μm P-doped quantum-dot lasers without current adjustments. *Jpn. J. Appl. Phys.* 43, 2004.
- [9] S. Chen, W. Li, M. Tang. Electrically pumped continuous-wave III-V quantum dot lasers on silicon. *Nature Photonics*, 10(5), 2016.
- [10] Y. I. Arakawa, T. Nakamura, J. Kwoen. Quantum dot lasers for silicon photonics. *Semiconduct. Semimet.*, 101, 2019.
- [11] 王俊, 葛庆, 刘帅呈, 马博杰等. 用于单片集成的硅基外延 III - V 族量子阱和量子点激光器研究, *人工晶体学报*, 52(05), 2023.
- [12] 沈波. GaN 基半导体新热点: 从半导体照明到功率电子器件. *光学与光电技术*, 13(1), 2015
- [13] H. Amano, Y. Baines, E. Beam, Matteo Borga et al. The 2018 GaN power electronics roadmap, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 51, 2018.
- [14] C. Basceri, V. Odnoblyudov, O. Aktas et al. Propelling the Power Electronics Revolution: 200 mm Diameter, 100 V to 1800 V and Beyond GaN-on-QST® High Volume Device Manufacturing Platform. CS MANTECH Conference, 2022.
- [15] C. Mauder, H. Hahn, M. Marx et al. Investigation and reduction of RF loss induced by Al diffusion at the AlN/Si(111) interface in GaN-based HEMT buffer stacks. *Semicond. Semiconductor Science and Technology*, 36, 2021.
- [16] E. Frayssinet, L. Nguyen, M. Lesecq et al. Metalorganic chemical vapor phase epitaxy growth of buffer layers on 3C-SiC/Si (111) Templates for AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with low RF losses. *Phys. Status Solidi A* 217, 2020.
- [17] L. Wei, X. L. Yang, J. F. Shen et al. Al diffusion at AlN/Si interface and its suppression through substrate nitridation, *Appl. Phys. Lett.* 116, 2020.

- [18] Z. D. Cai, X. L. Yang, Z. H. Shen et al. RF loss reduction by a carbon-regulated Si substrate engineering in GaN-based HEMT buffer stacks. Appl. Phys. Lett. 123, 2023.
- [19] Bhatnagar M, Baliga B J. Comparison of 6H-SiC, 3C-SiC, and Si for power devices [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1993, 40(3): 645-55.
- [20] 李许军, 坚葆林. 高压 SiC 功率半导体器件的发展现状与挑战 [J]. 集成电路应用, 2020, 37(02): 30-3.
- [21] Kimoto T, Kawahara K, Niwa H, et al. Ion implantation technology in SiC for power device applications; proceedings of the 2014 International Workshop on Junction Technology (IWJT), F 18-20 May 2014, 2014 [C].
- [22] Kimoto T. Bulk and epitaxial growth of silicon carbide [J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2016, 62(2): 329-51.
- [23] Chen W, Capano M A. Growth and characterization of 4H-SiC epilayers on substrates with different off-cut angles [J]. Journal of Applied Physics, 2005, 98(11): 114907.
- [24] Crippa D, Valente G L, Ruggiero A, et al. New Achievements on CVD Based Methods for SiC Epitaxial Growth [J]. Materials Science Forum, 2005, 483-485: 67-72.
- [25] La Via F, Izzo G, Mauceri M, et al. SiC-4H Epitaxial Layer Growth by Trichlorosilane (TCS) as Silicon Precursor at Very High Growth Rate [J]. Materials Science Forum, 2008, 600-603: 123-6.
- [26] 钮应喜. 4H-SiC 厚膜外延关键技术研究 and 器件验证 [D]; 西安电子科技大学, 2021.



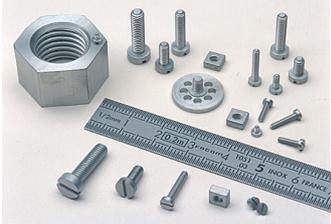


Large stock of Molybdenum and Tantalum

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

面向 5G 应用的高线性度氮化镓射频器件研究进展

作者：芦浩，杨凌*，张濛，侯斌，时春州，于谦，武玫，马晓华*，郝跃

(1. 宽禁带半导体国家工程研究中心，西安 710071; 2. 西安电子科技大学微电子学院，西安 710071)

邮箱：yangling@xidian.edu.cn; xhma@xidian.edu.cn

摘要：在 5G 应用中，功率放大器作为决定发射机性能的核心组件，受到广泛关注。氮化镓 (GaN) 器件凭借其卓越的材料特性，已成为功率放大器应用领域的关键元件。由于信息传输流量激增以及大规模 5G 部署需求，通讯模块对 GaN 功率放大器提出了严苛的线性度指标要求。本文深入回顾并展望了国内外在高线性度射频 GaN 器件技术方面的研究工作，剖析了 GaN 线性度工作的关键问题，并介绍了高线性度氮化镓器件方面的最新研究进展，旨在为 5G 通信应用中 GaN 功放器件高线性结构设计提供指导。

1. 引言

5G 移动通信发展迅速，可实现超高的数据传输速度，有望为诸多行业注入新的增长活力。5G 移动通信要求实现万物互联，并支持数 Gbps 的数据速率，其目标是实现比现有 4G 移动系统大数千倍的承载能力^[1]。5G 可以拓展商业应用场景，并在增强 / 虚拟 / 混合现实应用 (AR/VR/MR)、视频会议、工业自动化、自动驾驶汽车和网络医疗设备等领域带来全新的用户体验 (如图 1a 所示)。

5G 的频谱部署分为 Sub-6G 频段 (FR1) 和毫米波频段 (FR2)。为了实现 5G 高性能工作，在硬件开发、系统架构和网络部署方面存在诸多挑战。在 5G 通讯模块设计中，需要模拟前端 (AFE) 来支持多人多出 (MIMO) 架构中的多重发射和接

收路径。图 1b 为子阵有源相控阵天线 (APAA) 中的 Massive MIMO 方框图。如图所示，射频前端模块由功率放大器 (PA)、低噪声放大器 (LNA) 和开关等元件组成。众所周知，射频功率放大器的性能主导着整个发射机 (TX) 的系统性能，因为功放的功率附加效率 (PAE) 决定了整个 TX 的功率和散热。为了增强用户体验和高频下的 Massive MIMO 天线应用，5G 系统需要尽可能在射频前端模块 (FEM) 中集成更多的 PA，这使得 5G 功放设计比 4G 功放更加严苛。

对于 5G 基站应用，考虑到输出功率 (P_{out})、功放线性度、成本、电路拓扑设计和形状因素，功放半导体材料的选择非常重要。自横向扩散金

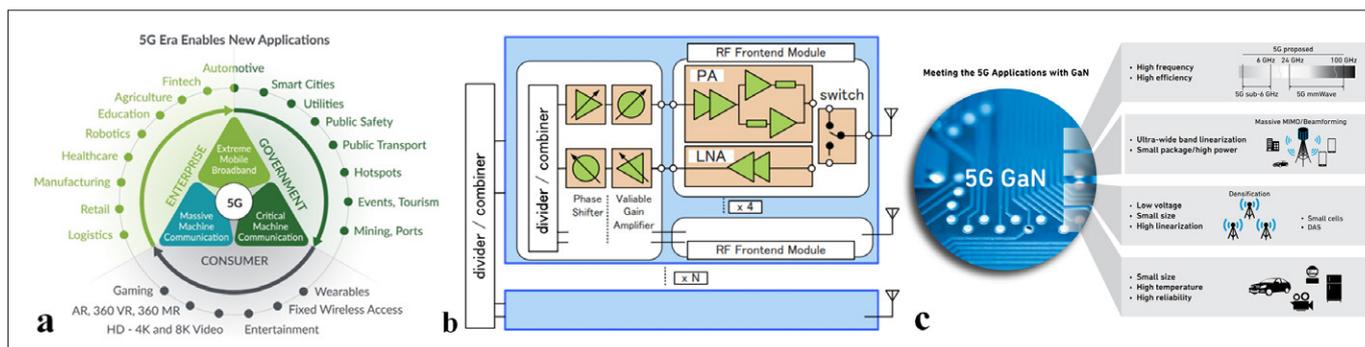


图 1: (a) 5G 赋能的新应用场景示意图^[2]; (b) 子阵列 APAA, Massive MIMO 模块原理示意图^[3]; (c) 氮化镓功率放大器在 5G 通讯应用中的特点及应用场景^[4]

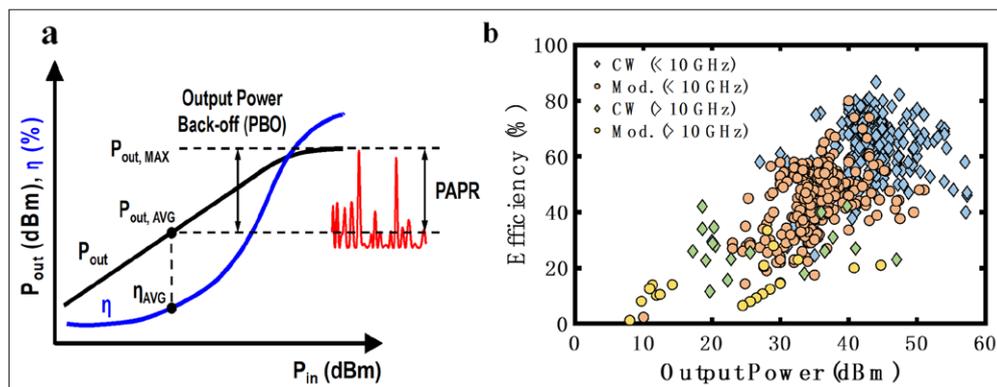


图2: (a)输出功率和效率与具有高PAPR值的调制信号输入功率的关系。(b)氮化镓PA在连续波峰值DE/PAE与饱和输出功率之间的关系和调制下平均DE/PAE与平均功率的关系^[9]。

属氧化物半导体 (LDMOS) 器件技术在 20 世纪 90 年代进入市场以来, 由于其较低的成本优势, 射频功率放大器市场一直被其所主导, 尤其是在频率低于 2 GHz 的应用场景。其最大的竞争对象是砷化镓 (GaAs) 功放技术, GaAs 适用于更高的频率, 但较低的功率传输水平和高成本限制了市场应用。与 Si 和 GaAs 等化合物半导体材料相比, GaN 是一种具有高击穿电场强度、高电子饱和速度、高导热率、低介电常数的宽禁带半导体。氮化镓可以应用于高温、强辐射等极端环境下工作, 因此更适用于 5G 电子通讯基站, 航空防务和车用电子等新场景^{[5],[6]}。

然而, 尽管 GaN 器件尽管有不错的功率响应, 但是器件直流跨导随着栅压的增加过快降低, 大信号明显的增益压缩, 使得器件线性度较差, 使得输入到器件中的大信号超出线性工作区, 导致信号失真乃至错码, 严重损坏移动通信系统的通信质量, 这一问题对于 5G 毫米波工作的亚微米栅长 GaN 器件尤为严重。随着 5G 时代海量的数据传输需求, 为保证整个系统通信质量, 对氮化镓功率放大器的高线性度研究亟待开展。基于此, 本文系统回顾了高线性度 GaN 功放器件的关键问题和研究进展, 旨在剖析 GaN 非线性的关键问题, 为 5G 通信应用中 GaN 功放器件高线性结构设计提供指导。

2. 氮化镓器件线性度概述

5G/B5G 等无线链路系统具有严格的有效各向同性辐射功率 (EIRP) 要求。氮化镓因其超越传统的 III-V 族化合物半导体和 Si 基 CMOS 器件的材料特性, 使其作为功率放大器优势明显。这一优势归因于氮化镓固有的材料特性, 包括宽带隙 (3.4 eV), 高峰值漂移速度 (2.5×10^7 cm/s) 和高临界电场 (3.3 MV/cm), 从而提高了工作电压、功率密度、效率、鲁棒性, 以及高 Johnson 品质因子优点 (JFoM), 使其能够在高压、高温和高频率下工作^[7]。与其他半导体技术相比, GaN 基 HEMT 的高输出功率密度是其主要优势。在这项优势下, 产生相同的输出功率密度, GaN 可以采用面积更小的晶体管设计, 从而带来较低的寄生电容和更宽的带宽, 实现了系统

的小型化和轻量化优势, 减少电子系统在各种应用场景中的规模 and 成本。

然而, 氮化镓 HEMT 器件存在一系列挑战, 限制了在实际的功放设计中达到材料理论的最高指标。增益软压缩、DC-RF 电流崩塌和自热效应等问题限制了器件的输出功率、功率附加效率 (PAE) 和线性度工作^[8]。此外, 现代无线链路在使用交调技

术时, 如频分复用 (OFDM)、高阶正交调幅 (QAMs)、正交相移键控 (QPSK)、二元相移键控 (BPSK) 和载波聚合来增加信道容量, 也存在不同的挑战。这些调制方法具有高的动态范围, 需要功放高峰值平均功率比 (PAPR)。如图 2a 所示, 高 PAPR 的信号需要严格的线性要求, 并以相邻信道功率比 (ACPR) 和误差向量幅度 (EVM) 的形式表示, 以保持信号质量。这些要求迫使功放在其峰值输出功率下工作, 导致平均输出功率和效率低于峰值连续波 (CW) 性能。

为了避免上述问题, 对于氮化镓 HEMT 的工作提出了更严苛的使用要求, 需要器件进行更深的功率回退 (PBO) 来解决由软压缩等非线性引起的振幅 - 振幅 (AM-AM) 和相位 - 振幅 (AM-PM) 失真。从图 2a 可以看出, 比较连续波下的性能饱和输出功率和峰值效率, 调制后的平均输出功率和效率显著下降。图 2b 所示为 GaN 器件在连续波与调制信号下峰值漏极效率 (DE) 与饱和输出功率之间的关系点图系。基于这些数据, 连续波和调制信号性能之间存在着较大差距, 可以通过提高器件或电路级的线性度来解决。

线性度影响了目标数据吞吐量、平均输出功率 ($P_{out,avg}$) 和平均功率附加效率 (PAEavg), 因此提高功放线性度至关重要。在电路级上, 线性晶体管具有线性输出的功率响应, 如增益与 P_{out} 以及相位与 P_{out} 指标之间呈线性响应。线性晶体管和线性晶体管之间的一个关键区别是输出 1dB 和 3dB 压缩点等线性晶体管和线性晶体管之间的一个关键区别是输出 1dB 或 3dB 压缩点 (P_{1dB}/P_{3dB}) 和饱和功率指标之间的差异程度。该差值越小, 表明晶体管线性度越高。因此, 在器件级提高晶体管本征线性度, 可以有效提升电路乃至系统级线性度。

3. 器件级高线性度技术

由上可知, GaN 基 HEMT 可以实现优越的输出功率 (P_{out}) 和功率附加效率 (PAE)。然而, 基于 GaN 基 HEMT 依然存在严重非线性问题, 限制了其在无线通信中的应用。功率放大器 (PA) 晶体管的非线性会导致带边、高输入功率下输出

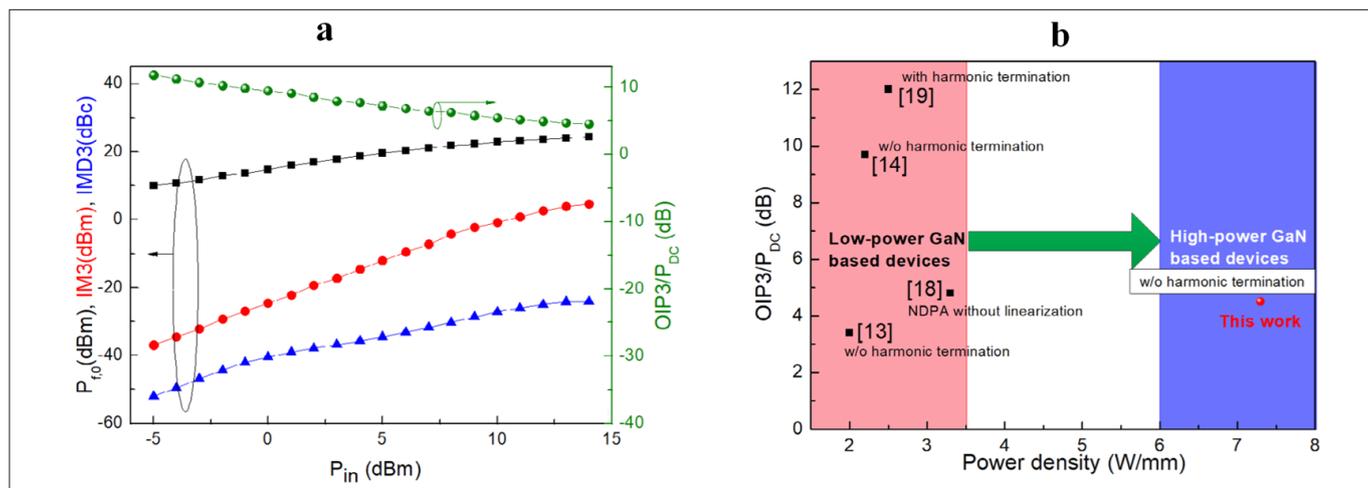


图4: (a) 三明治势垒结构HEMT在10GHz的双音特性, 双音间隔10MHz, 漏极电压60V。 (b) 国内外在X波段下各类器件的OIP3/P_{DC}与峰值功率密度对比^[31]。

的耦合效应会提升, 因此出现了耦合沟道结构^[25]。如图 3c 所示, 利用耦合效应, 可以调制跨导分布, 抑制动态源电阻的非线性提升。港科大陈敬课题组报道, 与传统双沟道氮化镓 HEMT 相比, 强耦合的双沟道氮化镓 HEMT 会将 OIP3 提高 5.2 dB, 在 4 GHz 下, 器件 OIP3 达到 33.9 dBm^[26]。此外, 美国俄亥俄州立大学报道了具有渐变 InGaN 辅沟道的 AlGaIn/GaN 双沟道 HEMT, 通过复合二维和三维电子沟道, 形成了平坦的跨导形状和增益曲线。在 X 波段下 OIP3 达到 38dBm, 对应的线性品质因子 OIP3/P_{DC} 为 9.7 dB^[27]。

此外, 近年来, N 面极化 GaN 基异质结 HEMT 备受关注。到目前为止, 仅有美国 UCSB 大学报道了基于 N 面极化的 GaN 基 HEMT 的电学特性, 包括从 X 波段、Ka 波段乃至到 W 波段^{[28]-[30]}。基于 N 面极化的 GaN 基 HEMT 提高线性度的物理机制是由于 N 面极化的 GaN 异质结的天然背垒结构带来的沟道载流子限域性提升, 改善了器件增益压缩。如图 3d 所示, 美国 UCSB 大学研制的 N 面器件实现了 10 GHz 时线性品质因子 OIP3/P_{DC} 为 12 dB, 在 30 GHz 时更是达到 15 dB。

西安电子科技大学宽禁带半导体国工中心在高线性外延结构研究开展了深入且成体系的研究工作。首先在渐变

势垒结构上, 如图 4 所示, 为了使氮化镓器件在高压下的线性度提升, 侯斌等人提出了一种基于三明治渐变势垒的高线性 GaN 外延结构, 三明治势垒结构实现了沟道峰值电场调制, 抑制了漏极电压增加所引起的器件峰值非本征跨导的退化。研制器件在 X 波段 60 V 高漏压下, 单音峰值 P_{out} 为 7.3W/mm, 双音 OIP3 为 38 dBm, 线性品质因子 OIP3/P_{DC} 达到 4.5 dB^[31]。上述结果表明通过采用三明治渐变势垒结构, 能够有效实现高压下器件线性度调制, 满足 GaN 基功率器件的高压高线性的应用场景工作。

在高频高线性度的结构设计中, 传统薄势垒器件在大信号下增益压缩明显。针对此问题, 如图 5 所示, 西电国工中心研究人员创新地提出了 AlN/GaN/InGaN 耦合沟道结构来增强超薄势垒 AlN 器件的线性度, 通过沟道势阱间的强耦合效应, 来抑制单沟道在源漏电流增加时的动态源电阻非线性上升问题, 最终提高跨导和增益线性度。与传统 AlN/GaN 基 HEMT 相比, 耦合沟道 f_T 和 f_{max} 栅压摆幅提高至 4V, 理论 OIP3 值显著提高了 7.1 dB^[14]。之后, 研究人员持续优化了器件工艺, 研制的器件关态漏电流仅为 1.6 nA/mm, 并且表征了耦合沟道 HEMT 的双音功率级线性度, 在毫米波频

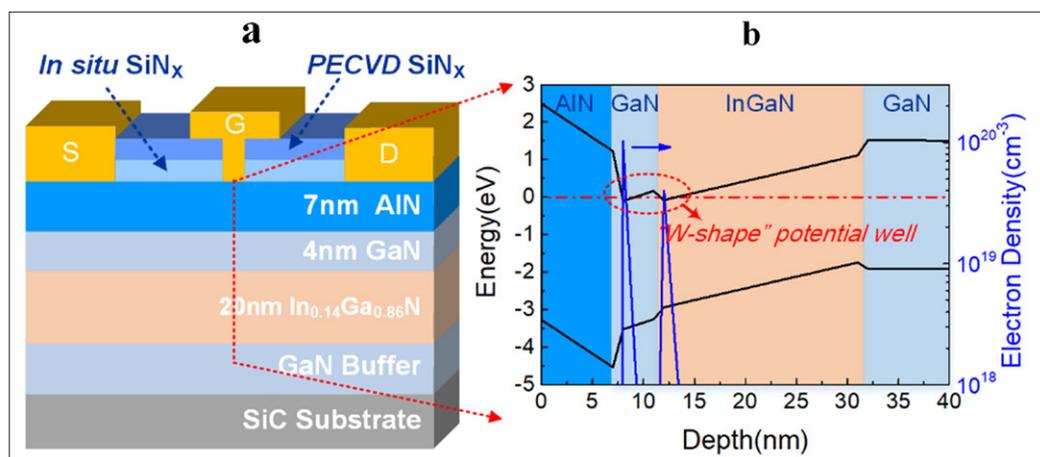


图5: (a) 耦合沟道CC-HEMT结构示意图; (b) CC-HEMT器件栅下能带和载流子分布示意图。

段器件 OIP3 为 36.4 dBm, OIP3/P_{DC} 达到 12.9 dB, 实际证明了耦合沟道器件的功率线性度提升。对比国际主流课题组报道, 优化后的耦合沟道 HEMT 线性度指标处于先进水平^[32]。

综上所述, 材料外延设计中改善线性特性的关键是对材料能带结构的调制。通过外延层结构和相关能带

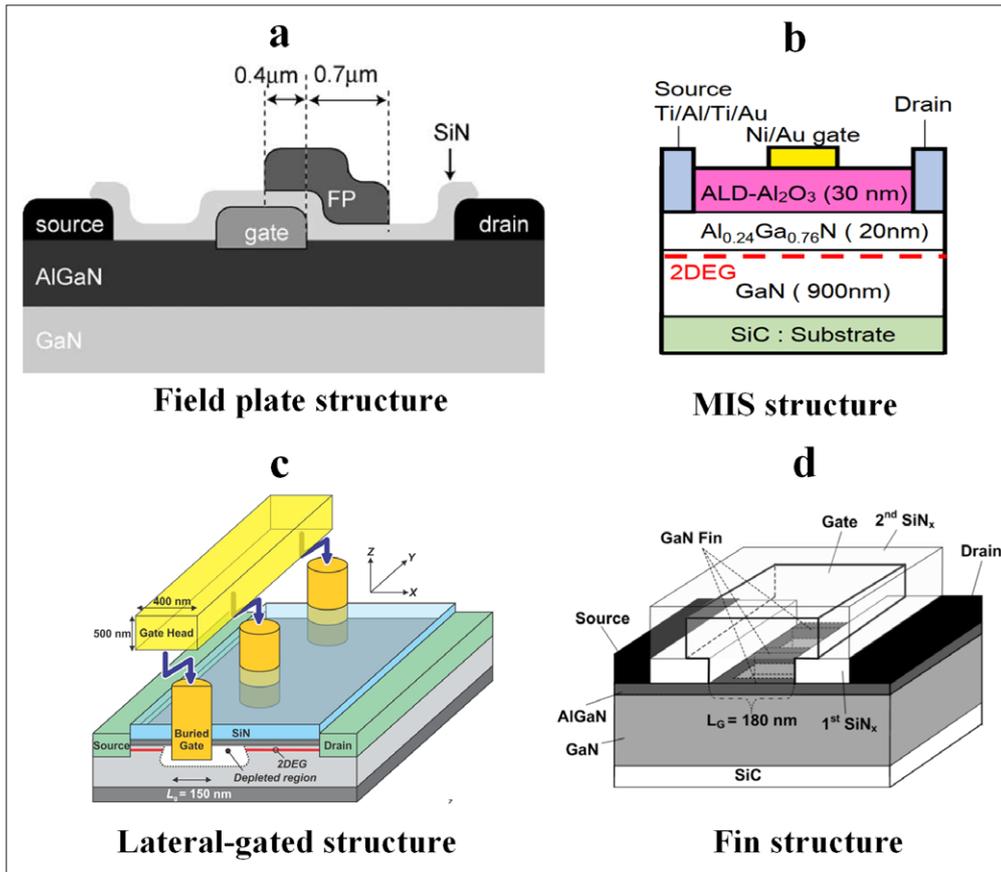


图6: 高线性GaN基器件的典型器件结构设计。(a)场板结构^[35]; (b) MIS结构^[36]; (c)横向栅控结构^[37]; (d)鳍型栅Fin结构^[38]。

结构的设计, 调制极化场或电场及其相关输运特性, 从而可有效提高器件的线性度。

3.2 高线性器件结构设计

尽管氮化镓具有天然的材料优势, 但基于高线性氮化镓基器件的器件结构设计和工艺优化也亟待研究。在早期研究中, 如图 6a 所示, 研究人员更多地关注电场调制技术, 如槽栅结构和场板结构^{[33]-[34]}。然而随着研究深入, 研究人员发现槽栅结构未能有效改善传统异质结构线性度, 甚至呈现线性度恶化的趋势, 而凹槽栅结构结合双沟道结构或 N 面极化外延结构对线性度具有调制作用。场板结构对于器件的线性度提升具有积极作用, 美国 UCSB 团队发现与无场板的器件相比, 具有场板设计的 GaN 基 HEMTs 的 C/IM3 提高了约 2 dB^[34]。然而, 由场板引入的寄生电容限制了器件的高频工作特性, 需要找到更合适的器件结构, 来有效提升器件频率和线性度特性。

金属-绝缘体-半导体 (MIS) 结构, 如图 6b 所示, 也是调制 GaN 基 HEMT 线性的有效方法。通过引入原子层沉积 Al₂O₃, 可有效增加 GaN 基 MIS-HEMT 的跨导栅压摆幅, 研制的 MIS-HEMTs 器件 C/IM3 比传统 HEMT 器件提高约 5 dB。此外, 研究人员还尝试改变栅介质的介电常数, 引入铁电介质等手段, 以进一步提高跨导的栅压摆幅^{[39]-[40]}。然而, 目前 MIS 结构的界面问题是制约其进一步应用在高线性场景的瓶

颈问题, 需要研究人员持续的工艺优化以改善此问题。

除了槽栅结构、场板结构和 MIS 结构外, 栅下区域的结构设计同样受到许多关注, 如图 6c 所示的横向栅控结构, 如图 6d 所示的鳍型栅 Fin 结构, 均可用于提高 GaN 基 HEMT 的线性度。横向栅控结构通过将静电势拓展到 2DEG 以下来增强电子限域性, 改善源电阻, 可以提升跨导和增益轮廓的平坦度。与横向栅控结构相比, 鳍型栅 Fin 结构进一步增强了沟道来自顶栅的调控作用。与传统的平面 GaN 基 HEMT 相比, Fin 结构增强了侧壁栅的静电控制能力。基于 Fin 侧墙的电容控制和差分源电阻的调制, Fin 结构可有效提高跨导分布的平坦度和器件线性度^{[41]-[42]}。中国

电科 55 所张凯等人研制了高性能的 AlGaIn/GaN Fin-HEMT, 器件输出功率密度为 11.3W/mm, 在高输入功率水平下 IM3 特性显著提高了 5.5 dBc^[43]。进一步, 西安电子科技大学国工中心张濛等人研究了具有三栅和双栅结构的 AlGaIn/GaN 纳米沟道高电子迁移率晶体管 (HEMTs), 提升了对于顶栅作用沟道的调控理论研究^[44]。此外, 一些研究小组还通过平面离子注入的方法制备了平面纳米栅沟道, 实现了跨导栅压摆幅和 C/IM3 的提高^{[45]-[47]}。然而, 在 GaN 基 HEMT 制造流程中引入离子注入工艺会显著增加工艺的复杂性, 并且注入离子的温度扩散效应会限制 Fin 结构的最小几何形状, 不利于在高频高线性度场景下工作^[48]。

4. 结论与展望

本文全面回顾了射频氮化镓器件技术的研究进展, 深入回顾了通信应用的高线性度 GaN 器件进展。除了上述讨论的线性度设计之外, 当将氮化镓器件应用在实际的无线通信中时, 还必须评估氮化镓射频器件的可靠性、使用寿命及工艺重复性。未来的研究工作需要评估射频 GaN 器件的长期可靠性, 如金半接触电极、外延层和钝化介质的应力和温度鲁棒性。本文旨在为氮化镓 5G 通信应用提供指导, 相信通过合理的器件设计和严格的可靠性验证, 氮化镓器件可以为我国电信基础设施开创一个高效可靠的新时代。CS。

扩展阅读

- [1] H. Lu, M. Zhang, L. Yang, B. Hou, R. P. Martinez, M. Mi, J. Du, L. Deng, M. Wu, S. Chowdhury, X. Ma, and Y. Hao, A review of GaN RF devices and power amplifiers for 5G communication applications, *Fundamental Research*, 2023, doi: 10.1016/j.fm-re.2023.11.005.
- [2] <https://www.facebook.com/UG-5G-Phone-104416058108429/>
- [3] S. Shinjo, K. Nakatani, J. Kamioka, et al. Highly integrated RF frontend module for high SHF wide-band massive MIMO in 5G, and switching-mode amplifiers beyond 4G[C]//2017 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT). IEEE, 2017: 1-4.
- [4] Schnaufer D, Peterson B. Gallium Nitride—A Critical Technology for 5G[J]. White paper, Qorvo, 2016: 1-8.
- [5] R. Soman et al., “Novel all-around diamond integration with GaN HEMTs demonstrating highly efficient device cooling,” in 2022 International Electron Devices Meeting (IEDM), 2022: IEEE, pp. 30.8. 1-30.8. 4.
- [6] D. Shoemaker et al., “Diamond-incorporated flip-chip integration for thermal management of GaN and ultra-wide bandgap RF power amplifiers,” *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, vol. 11, no. 8, pp. 1177-1186, 2021.
- [7] U. K. Mishra, P. Parikh, and Y.-F. Wu, “AlGaIn/GaN HEMTs—an overview of device operation and applications,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 90, no. 6, pp. 1022-1031, 2002.
- [8] J. C. Pedro, L. C. Nunes, and P. M. Cabral, “Soft compression and the origins of nonlinear behavior of GaN HEMTs,” in 2014 44th European Microwave Conference, 2014: IEEE, pp. 1297-1300.
- [9] H. Wang et al., “Power amplifiers performance survey 2000-present,” *Georgia Tech Electronics and Micro-System Lab (GEMS)*, 2018.
- [10] P. Shrestha et al., “High linearity and high gain performance of N-polar GaN MIS-HEMT at 30 GHz,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 41, no. 5, pp. 681-684, 2020.
- [11] R. P. Martinez, D. J. Munzer, B. Shankar, B. Murmann, and S. Chowdhury, “Linearity Performance of Derivative Superposition in GaN HEMTs: A Device-to-Circuit Perspective,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 70, no. 5, pp. 2247-2254, 2023, doi: 10.1109/TED.2023.3259383.
- [12] S. H. Sohel et al., “X-band power and linearity performance of compositionally graded AlGaIn channel transistors,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, no. 12, pp. 1884-1887, 2018.
- [13] T. Palacios et al., “Use of double-channel heterostructures to improve the access resistance and linearity in GaN-based HEMTs,” *IEEE transactions on electron devices*, vol. 53, no. 3, pp. 562-565, 2006.
- [14] H. Lu et al., “Aln/GaN/InGaIn coupling-channel HEMTs for improved gm and gain linearity,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 68, no. 7, pp. 3308-3313, 2021.
- [15] S. Bajaj et al., “Graded AlGaIn Channel Transistors for Improved Current and Power Gain Linearity,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 64, no. 8, pp. 3114-3119, 2017, doi: 10.1109/ted.2017.2713784.
- [16] S. H. Sohel et al., “Linearity improvement with AlGaIn polarization-graded field effect transistors with low pressure chemical vapor deposition grown SiNx passivation,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 41, no. 1, pp. 19-22, 2019.
- [17] P. Fay, N. Venkatesan, and J.-S. Moon, “Polarization-Engineering of III-N mm-Wave Transistors for High Efficiency and Linearity,” in 2022 Device Research Conference (DRC), 2022: IEEE, pp. 1-2.
- [18] J.-s. Moon et al., “Novel high-speed linear GaN technology with high efficiency,” in 2019 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), 2019: IEEE, pp. 1130-1132.
- [19] R. Chu, Y. Zhou, J. Liu, D. Wang, K. J. Chen, and K. M. Lau, “AlGaIn-GaN double-channel HEMTs,” *IEEE Transactions on electron devices*, vol. 52, no. 4, pp. 438-446, 2005.
- [20] Y. Zhang et al., “High performance InGaIn double channel high electron mobility transistors with strong coupling effect between the channels,” *Applied Physics Letters*, vol. 113, no. 23, p. 233503, 2018.
- [21] A. Kamath et al., “Double-channel AlGaIn/GaN high electron mobility transistor with back barriers,” *IEEE electron device letters*, vol. 33, no. 12, pp. 1690-1692, 2012.
- [22] Q. Yu et al., “High Current and Linearity AlGaIn/GaN/-Graded-AlGaIn: Si-doped/GaN Heterostructure for Low Voltage Power Amplifier Application,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 44, no. 4, pp. 582-585, 2023.
- [23] L. Yang et al., “Investigation on the influence of ohmic structure on channel-to-channel coupling effect in InAlN/GaN double channel HEMTs,” *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, vol. 10, pp. 474-480, 2022.

- [24] L. Yang et al., “Investigation of contact mechanism and gate electrostatic control in multi-channel AlGaIn/GaN high electron mobility transistors with deep recessed ohmic contact,” *Journal of Applied Physics*, vol. 132, no. 16, 2022.
- [25] J. Wei, J. Lei, X. Tang, B. Li, S. Liu, and K. J. Chen, “Channel-to-channel coupling in normally-off GaN double-channel MOS-HEMT,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, no. 1, pp. 59-62, 2017.
- [26] W. Song, Z. Zheng, T. Chen, J. Wei, L. Yuan, and K. J. Chen, “RF linearity enhancement of GaN-on-Si HEMTs with a closely coupled double-channel structure,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 42, no. 8, pp. 1116-1119, 2021.
- [27] S. H. Sohel et al., “Polarization engineering of AlGaIn/GaN HEMT with graded InGaIn sub-channel for high-linearity X-band applications,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 40, no. 4, pp. 522-525, 2019.
- [28] A. Arias et al., “High performance N-polar GaN HEMTs with OIP3/P dc 12dB at 10GHz,” in *2017 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS)*, 2017: IEEE, pp. 1-3.
- [29] B. Romanczyk et al., “Evaluation of linearity at 30 GHz for N-polar GaN deep recess transistors with 10.3 W/mm of output power and 47.4% PAE,” *Applied Physics Letters*, vol. 119, no. 7, p. 072105, 2021, doi: 10.1063/5.0058587.
- [30] B. Romanczyk, et al., “W-band N-polar GaN MISHEMTs with high power and record 27.8% efficiency at 94 GHz,” , 2016 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*. IEEE, 2016: 3.5. 1-3.5. 4.
- [31] B. Hou et al., “High linearity and high power performance with barrier layer of sandwich structure and Al_{0.05}GaN back barrier for X-band application,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 53, no. 14, p. 145102, 2020.
- [32] H. Lu et al., “High Power Linearity and Low Leakage Current of AlN/GaN/InGaIn Coupling Channel HEMTs With N₂O Oxidation Treatment,” in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 45, no. 6, pp. 960-963, 2024.
- [33] A. Chini et al., “Effect of gate recessing on linearity characteristics of AlGaIn/GaN HEMTs,” in *Conference Digest [Includes Late News Papers] Device Research Conference, 2004. 62nd DRC., 2004: IEEE*, pp. 33-34.
- [34] J.-C. Huang et al., “Linearity characteristics of field-plated AlGaIn/GaN high electron mobility transistors for microwave applications,” *Japanese journal of applied physics*, vol. 49, no. 1R, p. 014103, 2010.
- [35] A. Chini et al., “Power and linearity characteristics of field-plated recessed-gate AlGaIn-GaN HEMTs,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 25, no. 5, pp. 229-231, 2004.
- [36] Z. Liu et al., “Improved Linearity for Low-Noise Applications in 0.25- μ m GaN MISHEMTs Using ALD Al₂O₃ as Gate Dielectric,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 31, no. 8, pp. 803-805, 2010.
- [37] K. Shinohara et al., “GaN-Based Field-Effect Transistors With Laterally Gated Two-Dimensional Electron Gas,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, no. 3, pp. 417-420, 2018, doi: 10.1109/led.2018.2797940.
- [38] Y.-W. Jo et al., “AlGaIn/GaN FinFET with extremely broad transconductance by side-wall wet etch,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 36, no. 10, pp. 1008-1010, 2015.
- [39] C.-H. Hsu et al., “Improved linearity and reliability in GaN metal-oxide-semiconductor high-electron-mobility transistors using nanolaminate La₂O₃/SiO₂ gate dielectric,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 55, no. 4S, p. 04EG04, 2016.
- [40] T. Gao et al., “Improved linearity in AlGaIn/GaN metal-insulator-semiconductor high electron mobility transistors with nonlinear polarization dielectric,” *Applied Physics Letters*, vol. 106, no. 24, p. 243501, 2015.
- [41] M. Zhang et al., “Influence of fin configuration on the characteristics of AlGaIn/GaN fin-HEMTs,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 65, no. 5, pp. 1745-1752, 2018.
- [42] T. Palacios et al., “Influence of the dynamic access resistance in the $g_{sub m}$ /and $f_{sub T}$ /linearity of AlGaIn/GaN HEMTs,” *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 52, no. 10, pp. 2117-2123, 2005.
- [43] K. Zhang et al., “High-linearity AlGaIn/GaN FinFETs for microwave power applications,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 38, no. 5, pp. 615-618, 2017.
- [44] M. Zhang et al., “Influence of Gate Geometry on the Characteristics of AlGaIn/GaN Nanochannel HEMTs for High-Linearity Applications,” *Micromachines*, vol. 14, no. 8, p. 1513, 2023.
- [45] W. Xing, Z. Liu, H. Qiu, G. I. Ng, and T. Palacios, “Planar-Nanostrip-Channel InAlN/GaN HEMTs on Si With Improved g_m and f_T Linearity,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 38, no. 5, pp. 619-622, 2017.
- [46] W. Xing, Z. Liu, K. Ranjan, G. I. Ng, and T. Palacios, “Planar nanostrip-channel Al₂O₃/InAlN/GaN MISHEMTs on Si with improved linearity,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 39, no. 7, pp. 947-950, 2018.
- [47] Z. Zheng et al., “GaN HEMT With Convergent Channel for Low Intrinsic Knee Voltage,” *IEEE Electron Device Letters*, vol. 41, no. 9, pp. 1304-1307, 2020.
- [48] A. Soltani et al., “A cost-effective technology to improve power performance of nanoribbons GaN HEMTs,” *Applied Physics Letters*, vol. 120, no. 4, p. 042102, 2022.

未来晶体管

衬底质量和尺寸的改进，加上市场对新型半导体的接受度，为金刚石晶体管带来了巨大的商业成功机会。

Gauthier Chicot 和 Ivan Llaurodo 来自 Diamfab

数十年来，金刚石晶体管一直充满希望。然而，它的性能尚未达到预期。那么，为什么我们有理由乐观呢？

这是一个很好的问题。有人可能会轻率地回答：“为什么不呢？”但你可能有健康的怀疑态度，要求一个更细致的解释——我很高兴提供这个，通过分享我们在 Diamfab 对这项技术的愿景。

在我们深入讨论之前，让我们先回顾一下金刚石在技术应用中的发展。故事始于 1954 年，当时人类首次使用高温高压技术制造金刚石。在这个里程碑的基础上，1980 年代见证了金刚石的首次化学气相沉积 (CVD) 生长，随后在 1990 年代探索掺杂过程。从那时起，那些参与开发合成金刚石的人已经扩展了他们对这种材料的表征、制造和加工的知识。随着我们对金刚石作为半导体的属性了解得越来越多，它的承诺看起来越来越大——但对一些人来说，由于其巨大潜力，我们可能期望一个更快的发展过程，因此也更加令人沮丧。

作为电力电子的材料

金刚石的承诺是什么？它具有超宽带隙、异常的载流子迁移率、估计为 10 兆伏 / 厘米的击穿电压，以及已知的最佳热导率。由于这些非凡的属性，金刚石被称为终极功率半导体。由这种形式的碳制成的器件有潜力提高组件的电压，同时提高它们的效率，减少损失并降低成本。

为了说明不同材料性能上的巨大差距，想象一个篮球和它的球场。球的表面积代表一个具有 1000 伏击穿电压容量的金刚石组件的相应电阻。球场呢？它的表面积代表硅器件相应电阻。所以，正如你看到的，这两种材料在功率半导体的关键

性能上有着惊人的差异。

在系统级别，金刚石承诺改善所有关键特性，以提高功率效率。收益来自于：简化的热管理；在组件和系统竞争力 / 能效增加之间的更好权衡，以及体积和重量的减少；与制造碳化硅基板相比，减少二氧化碳排放。这些是令人信服的优势，给出了乐观的好理由。而且，当考虑到决定商业成功的两个最大因素——技术成熟度和市场情况时，这种积极的看法不应减少。

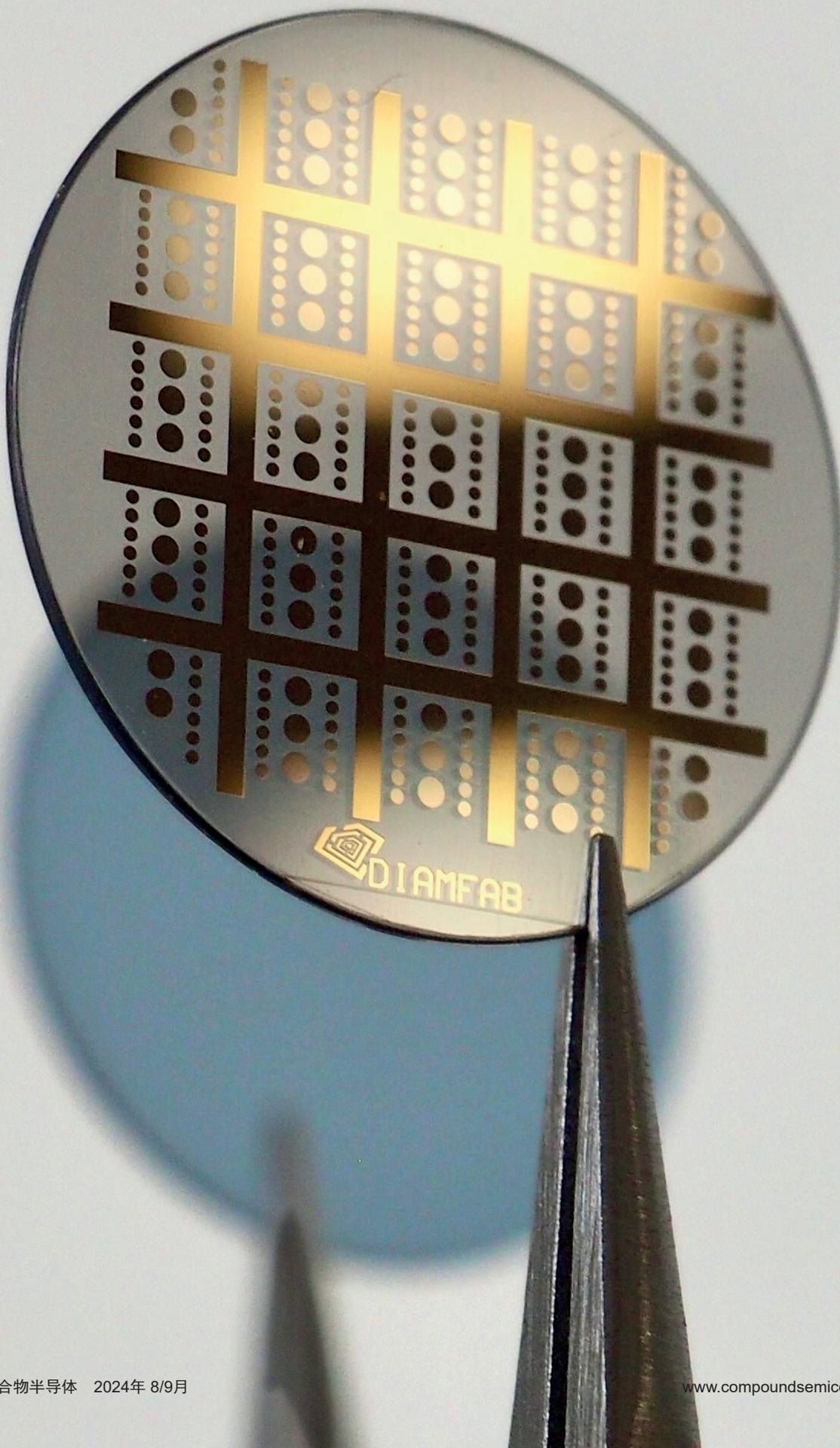
当涉及到技术时，有三个历史障碍必须解决，金刚石才会成为商业现实。这些障碍是增加金刚石晶圆的尺寸、提高其质量以及更好的掺杂方法。

好消息是，金刚石行业正在解决所有这些挑战。在 Diamfab，我们正在为这一努力做出重大贡献，我们的开发重点是通过减少缺陷密度来提高材料质量，并掌握掺杂技术。

生长大型金刚石晶体绝非易事，这是衬底生产的起点。对于其他半导体技术，晶体生长的研发投入来自国防应用。虽然这也是发展金刚石的资金来源之一，但它并不是唯一的来源——还可以利用珠宝行业的知识。利用所有这些确保了材料的快速进展。已经有 100 毫米直径的单晶晶圆被展示出来，这是一个巨大的进步，因为就在几年前，只有 2 毫米或 3 毫米的晶圆是商业上可获得的。

金刚石的掺杂是一个相当大的挑战。不幸的是，扩散和注入既不适合也不推荐。通过扩散掺杂金刚石的尝试被一个如此密集的碳晶格所挫败，以至于潜在的掺杂剂，如硼、氮和磷，无法渗透到这种材料中。与此同时，注入受到效率低下下的阻碍，对晶格造成不可挽回的损害。

由于这些艰巨的问题，掺杂必须在金刚石生



长期间就地进行。这是我们在 Diamfab 掌握的一个过程，实现了从非故意掺杂到金属级掺杂的各种掺杂水平。我们也在提高晶体质量方面取得了良好的进展，我们预计很快将宣布令人兴奋的消息。

简而言之，从材料和组件制造的角度来看，主要的技术障碍要么已经被克服，要么有明确的解决路径。在需要进一步进展的地方，通过研究与化合物半导体材料和器件相关的开发，可以获得很多。

就市场接受度而言，我们生活在一个正处于革命中的世界，主要的宏观趋势有一个共同因素：对电气化、可持续性和效率的追求。这推动了对高效电力电子的需求。这与本世纪初的情况形成了鲜明对比，当时火车、电动机驱动和不间断电源（UPS）基本上占据了所有电力电子领域——而这些行业都没有推动经济发展。

最近的一个趋势在 2023 年的彭博新能源财

经（BloombergNEF）报告中得到了强调，该报告声称 2023 年全球能源转型的投资达到了创纪录的 1.8 万亿美元，比上一年增长了 17%。随着大量资金现在流入电力电子行业，金刚石电力电子的商业化应该能找到财务支持。

最后，当我们仔细看看电力电子市场时，我们会发现，由于碳化硅（SiC）和氮化镓（GaN）的出现，工程师们现在开始意识到半导体的选择如何决定系统的性能和成本。这种超越硅的好处的直接经验将降低采用金刚石晶体管的障碍。

在 Diamfab，我们毫不怀疑金刚石将在未来十年提供一类替代的电力电子，这种半导体注定要实现其承诺。因此，我们邀请所有在电力电子领域与其他半导体合作的人，从学者到集成商，探索金刚石的潜力，并考虑他们如何能够为这项明天的技术贡献他们的专业知识。金刚石确保了一个非常有希望的未来，有许多令人兴奋的话题值得追求。☞

evatec
process systems

20
ANNIVERSARY

赋能全球大趋势

从增强现实到人工智能和远程医疗，Evatec 的薄膜技术赋能了芯片、传感器和连接技术，这些技术正在塑造全球人们的生活。

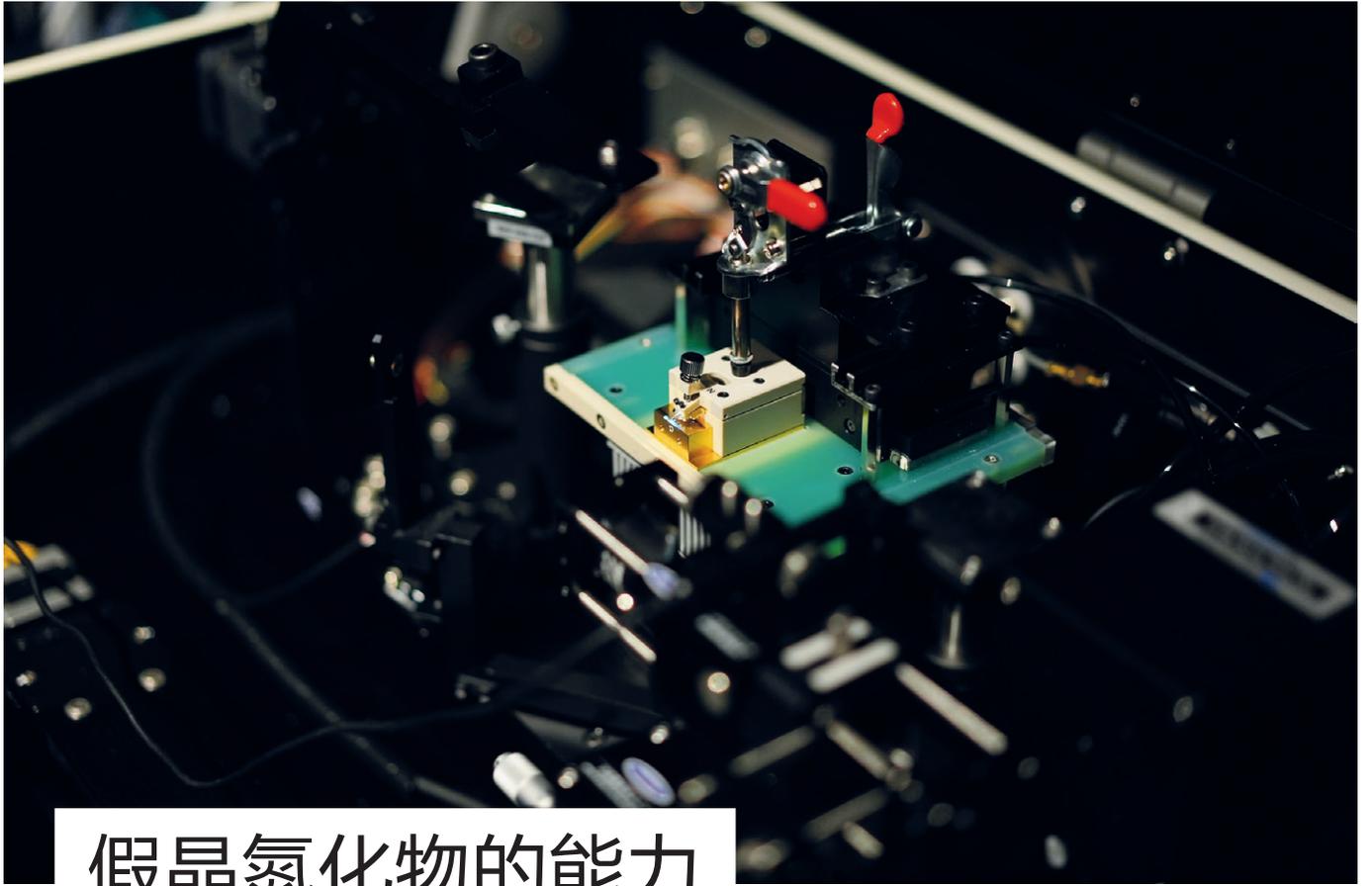
如需了解更多信息，请联系您当地的 Evatec 销售和服务办公室
[http:// evatecnet.com/about-us/sales-service](http://evatecnet.com/about-us/sales-service)

- 能源效率
- 移动技术
- 数据处理
- 连接技术
- 智能传感

扫码观看视频

CIOE 中国光博会 #7C36

半导体和先进封装 | 化合物和光电子 | The Thin Film Powerhouse | evatecnet.com/cn



假晶氮化物的能力

假晶 AlGa_n/AlN 有望提高 UVC 激光器、远 UVC 发射器和高功率固态器件的性能

作者：Leo Schowalter^{1,2}、Maki Kushimoto¹、Ziyi Zhang¹、Akira Yoshikawa¹ 和 Hiroshi Amano¹
(¹名古屋大学, ²Lit Thinking)

近期，大家对超宽禁带半导体表现出了浓厚的兴趣，对此是有充分理由的。其部分吸引力在于它们有可能制造出在 UVC 中发射的光电器件，UVC 是 280nm 以下波长相关的光谱域(见图 1)。此外，此类半导体是创建更高性能、高功率射频器件以及提高功率器件和功率开关的功率密度和性能的有力备选者。

不幸的是，超宽禁带半导体具有吸引力，但也因此具有挑战性。通常情况下，非常大的禁带宽度伴随着非常强的化学键，导致晶体生长的温度非常高。同样，大禁带宽度阻碍了 *p* 型和 *n* 型载流子的受控掺杂。

这种情况非常严重，以至于在不久前，我们将现在所说的超宽禁带半导体列为绝缘体！即使

是现在，除了一些特殊情况外，在这些材料中实现可靠的空穴和电子电导仍然具有极大的挑战性。

例如，高铝含量的 Al_{1-x}Ga_xN 这种超宽禁带半导体。当该合金中的铝含量超过约 50% 时（即 *x* 值小于 0.5 时），直至纯 AlN 时，其禁带宽度随着铝浓度从约 4.4 eV 单调增加到 6.1eV。

与高铝含量 Al_{1-x}Ga_xN 相关的是 GaN，以及禁带宽度小于 3.5eV 的 Al_{1-x}Ga_xN 和 AlInGa_n 合金。这些材料已经取得了很大的成功，因此很自然地会在 *x* 值小于 0.5 的 Al_{1-x}Ga_xN 超宽禁带合金的性能基础上进行尝试和发展。

虽然这听起来很简单，但现实远非如此，成功之路存在着两个主要障碍。一是在异质衬底上外延生长高质量、高铝含量的 AlGa_n 相对困难。

而在同质 AlN 上进行外延生长要容易得多，特别是在高铝组分下，但由于缺乏高质量衬底，其发展受到阻碍。

另一个主要问题是高铝组分 AlGa_xN 的掺杂难度。直到最近，最常见的掺杂方法是添加硅来生产 *n* 型材料。这种掺杂剂在铝浓度低于 85% 时效果很好，最近，佐治亚理工学院的研究人员甚至成功展示了 AlN 的 *n* 型掺杂。然而，生产 *p* 型掺杂要更困难。

我们名古屋大学的团队一直与旭化成 /Crystal IS 进行合作，通过克服这两个问题开辟了新天地。

近期我们对 UVC 激光二极管的演示突出表明，我们已经建立了一条可以解决这些问题的明确途径，从而打开新大门，允许高铝组分的 AlGa_xN 在超宽禁带器件应用中发挥更大的作用（见图 1）。

我们的研究是 UVC 激光二极管开发的一个重要里程碑，这种器件 20 多年来一直是领域热点。UVC 中低成本激光二极管的商业化将彻底改变便携式、经济高效的化学和粒子探测器、医疗仪器以及表面监测和加工现状。所有这些应用都是利用短波长高能光子及其在大多数材料中非常短的吸收长度性能。

然而，尽管对这种光源的巨大需求激发了无数的研发工作，但在 2019 年 10 月成功演示 271nm 激光二极管之前，我们研发的最短波长激光二极管的波长仅达到 315nm（见图 2）。

我们成功的关键点有两个。一是在高质量 AlN 衬底上可以获得假晶 Al_{1-x}Ga_xN，二是使用分布式极化掺杂。通过这种形式的掺杂，可以实现低电阻率空穴注入，而无需在 *p* 型限制层中使用杂质掺杂。

什么是假晶 AlGa_xN/AlN？

由于 AlN 块状晶体生长的发展，包括 Crystal IS 在内的多家公司目前可供应相关衬底。外延生长的基础来自于缺陷密度极低的 AlN 晶体切片材料。

在氮化物半导体异质结构的生长过程中，外延层中出现的一种缺陷是所谓的穿透位错。由于晶格失配，在异质衬底（例如蓝宝石、SiC 或 Si）上的生长期间往往会出现这种类型的高密度位错。由于这些穿透位错会降低器件性能，氮化物界投入了大量精力来降低其密度，减轻其对器件的影响。即使做了这么多努力，但仍需要非常

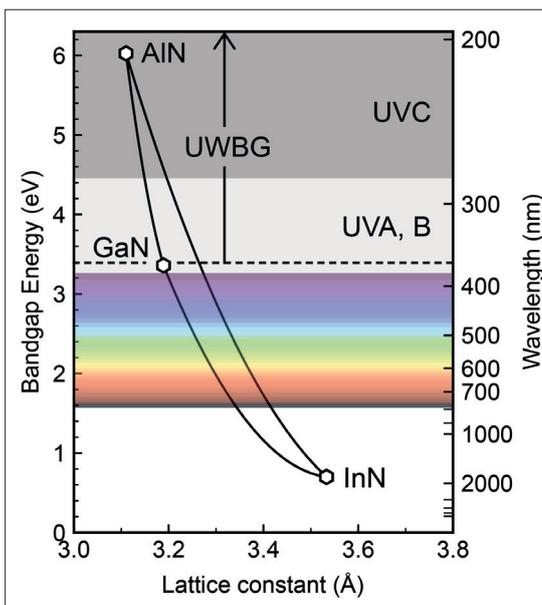


图 1：高铝组分的 AlGa_xN 禁带宽度。

小心才能将高铝组分 AlGa_xN 中的穿透位错控制在 10^8 cm^{-2} 以下，从而导致了成本高昂。好消息是，目前有几家供应商可以提供穿透位错密度小于 10^3 cm^{-2} 的 2 寸 AlN 衬底，并且即将出现更多生产商。当这些衬底的表面经过适当处理（最典型的是 Al 极性 c 面）时，通常会产生穿透位错密度低于 10^4 cm^{-2} 的 AlN 同质外延。

至关重要的一点是，AlN 衬底还可以为具有非常低的穿透位错密度的 AlGa_xN 合金奠定基础。由于 GaN、AlN 和相关合金的晶体结构相同，因此精心准备的原生 AlN 表面有望能够作为所有 AlGa_xN 合金生长的良好模板。不幸的是，块状 GaN 和 AlN 之间存在明显的晶格失配——高达 2.4%。因此，如果使用 c 面晶体表面作为模板在 AlN 上生长 GaN，则外延 GaN 层在 c 面中的压缩应变为 2.4%。这会产生巨大的应变能，并随着 GaN 层的厚度线性增加。最终，必须采用某种方式缓解这种应变。

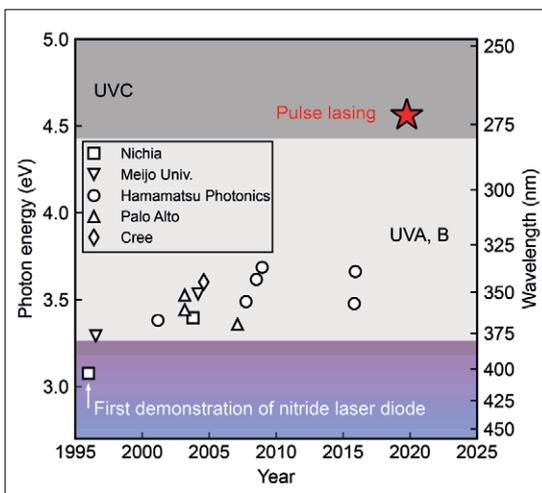
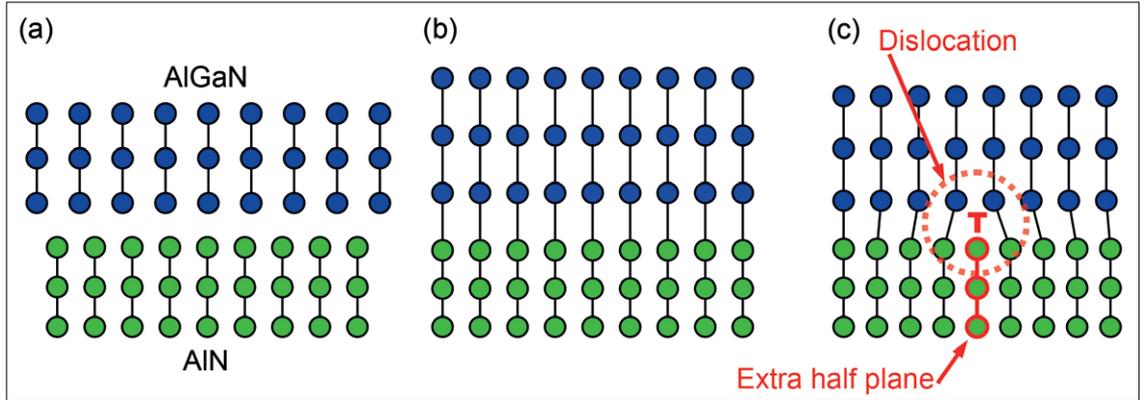


图 2：名古屋大学与旭化成 /Crystal IS 合作，展示了首款 UVC 激光二极管。

图3：在高铝组分的 AlGa_{0.4}N 中，可能会沿着界面形成失配位错。



作为外延生长领域的人员都很清楚，有许多机制可以缓解应变，包括形成岛，造成表面粗糙。然而，对于高铝组分 AlGa_{0.4}N 最重要的机制是沿界面形成失配位错（见图 3）。如图所示，当原子平面沿着界面跳跃时，会形成边缘失配位错，从而导致适合底层 AlN 晶格的 GaN 外延层压缩减少。

失配位错的核心是一排带有悬挂键的原子。然而，这并不是唯一的难题，因为失配位错周围存在不均匀的应变场。它们共同作用产生了与每个失配位错和非均匀性引起的额外应变能相关的“核心能量”。半个多世纪以来，众所周知，一旦应变外延层超过临界厚度，失配位错阵列引入的额外能量可以通过降低失配阵列产生的弹性应变能来进行平衡。

如果该层的厚度低于临界厚度，则外延膜处于较低的能量状态并且进行假晶应变来精确匹配衬底的晶格参数。对于在 AlN 上生长 GaN，其临界厚度仅为几纳米。利用 Vegard 定律，可以预估 AlGa_{0.4}N 和 AlN 之间的晶格失配。这种涉及线性插

值的方法确定了 Al_{0.6}Ga_{0.4}N 的晶格失配率仍然接近 1%——粗略地说，其临界厚度仅增加了 2.5 倍，远远低于大多数器件结构所需的厚度。

幸运的是，实际上比这些预测要好。早在 2009 年，我们 Crystal IS 的同事就展示了，可以在 AlN 衬底的 c 面上假晶生长 0.5μm 厚的 Al_{0.6}Ga_{0.4}N 层。从那时起，就已经证明了更厚的假晶层具有铝组分更高的 AlGa_{0.4}N 层。

虽然这在当时是一个非常令人惊讶的结果，但也是可以解释的。虽然通过形成位错失配网络可以降低外延层中的应变能，但其不存在易滑面。这点很重要，因为如果没有这些滑移面，外延层表面形成的位错就无法向下推至 AlGa_{0.4}N/AlN 界面来减轻应变。最终结果，外延层中的应变能可能会变得比平衡模型预测的大得多。

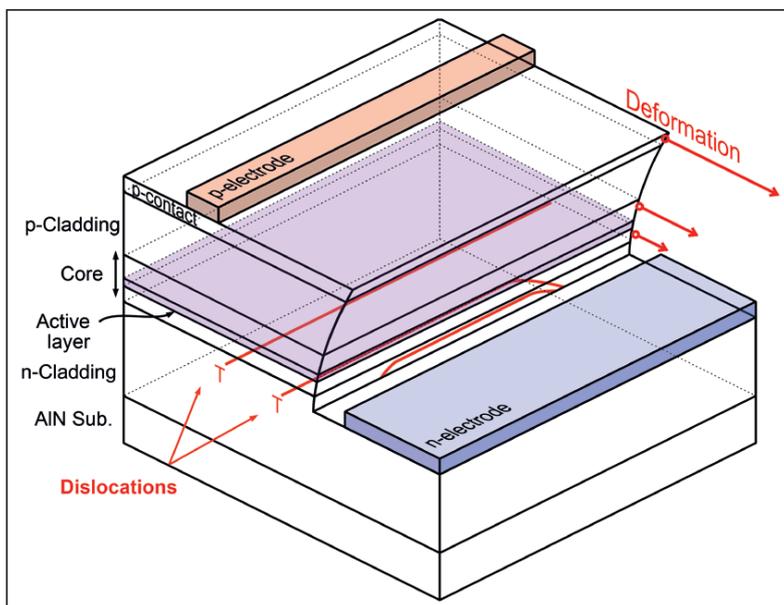
P 型极化掺杂

氮化物半导体的一个相当特殊的特征是，至少在原则上，可以通过简单地改变界面处的合金成分来创建 n 型或 p 型载流子区域。利用这一现象，高性能 GaN HEMT 可应用于射频和电力行业。其成功应用是建立在 20 世纪 90 年代的研究成果之上，当时的研究表明，二维电子气可以在 GaN 和 AlGa_{0.4}N 之间的界面处产生。这种气体未掺杂任何外在杂质，是由 GaN 顶部的 AlGa_{0.4}N 层沿金属极性方向生长而形成的。

请注意，这与立方半导体中的情况非常不同。例如，为了在 GaAs 和 AlGaAs 的界面处产生二维电子气，必须在较宽禁带的 AlGaAs 外延层中引入 n 型杂质掺杂剂（通常是硅）。

对于氮化物，在界面处产生二维电子气并不限于 AlGa_{0.4}N 和 GaN 的配对。当在金属极性 c 面衬底上生长时，只要缺陷密度不太高，这种气体就会出现在 AlGa_{0.4}N 的铝浓度升高的任何界面处。

图4：在该假晶 UVC 激光二极管中，蚀刻台阶的顶部边缘不再应变，而台阶的底角仍然完全应变。



更重要的是，正如加利福尼亚大学圣塔芭芭拉分校的研究人员早在 2002 年所证明的那样，即使将外延层从较低的铝组分分级到较高的铝浓度，也能产生分布式电子气，而无需外在杂质掺杂。注意，这种类型的掺杂被称为分布式极化掺杂。

当在金属极性 c 面衬底上生长时，沿相反方向分级（即从高铝组分到低铝组分）会怎么样？预计将在不使用任何外在杂质掺杂的情况下产生分布式 p 型半导体。然而，尽管在外源掺杂的 p 型材料（通常掺杂镁）中观察到空穴浓度的增加，超过了仅外源掺杂的预期，但实验演示并没有立即进行。这项早期研究中，在没有外在掺杂的情况下形成空穴气体的障碍似乎是高密度的缺陷。这些缺陷会俘获空穴，空穴必须饱和才能观察到分布极化掺杂的效果。

在此背景下，我们对首个 UVC 激光二极管的演示无疑是振奋人心的。为了生产该器件，我们在分布式极化掺杂 p 侧覆盖层中实现了高空穴电导率。这里没有使用外来掺杂剂，铝组分增加到了 63%。激光性能这一突破的另一个关键是假晶生长产生的穿透位错密度非常低。我们认为假晶 AlGaIn/AlN 的开发对于在器件中实现分布式极化掺杂至关重要。

需要付出的代价

任何技术几乎都有其缺点。在这方面，假晶外延生长符合规范，必须在其诸多好处和需要解决的问题之间进行权衡。

其中一个缺点是，假晶层的厚度可能非常高，但它仍然是有限的。虽然外延生长的人员可以修改其工艺条件并让其超出平衡模型预测的极限至少三个数量级，但即便如此，也是相当有限，特别是当某些外延层的镓浓度增加时。一般来说，一旦超过假晶极限，外延层就会变得粗糙。由于该极限取决于外延条件，因此尚未开发该极限的正式模型。这阻碍了解释外延工艺对异质结构质量的影响，也影响了与器件设计相关的考虑。而另一个限制则并不那么明显。生产器件需要蚀刻高应变外延层，这会破坏二维对称性。所有局部三维特征都没有被均匀压缩来适应底层的 AlN 晶格，而是在平面上具有不均匀的应变，这种不均匀性会导致局部高应力。

这种高度的局部应力发生在蚀刻产生的台阶角落处。例如，图 4 展示了 UVC 激光二极管假

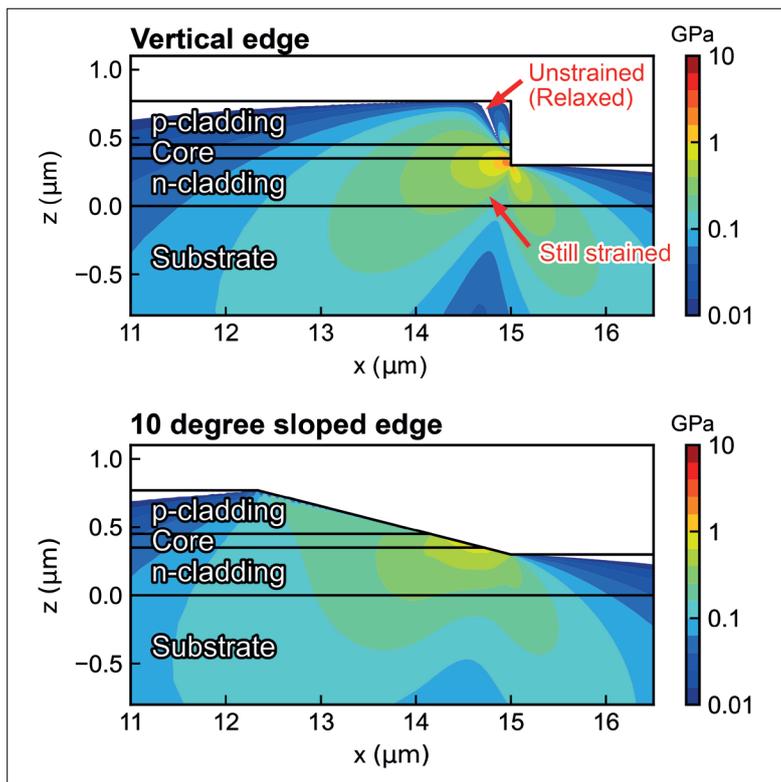


图5：严重的应变不均匀性会在台阶的拐角处产生非常大的剪切应力，会从结构的侧面驱动形成失配位错。

晶层的蚀刻。在这种特殊情况下，蚀刻台阶的顶部边缘不再应变，而台阶的底角保持完全应变。这种严重的应变不均匀性肯定会引起关注，因为它会在台阶的拐角处产生非常大的剪切应力，从而导致结构侧面（在这种情况下是台阶壁）的失配位错（如图 5 所示）。如果这些位错到达器件的有源区域，包括高电流密度区域，则会降低器件性能。

我们在制造激光二极管结构时观察到了蚀刻外延层的这种机械不稳定性。器件设计人员期望 n 接触点和 p 接触点尽可能靠近放置，以降低激光器的电阻。因此，必须将电阻最小化，以减少由此产生的焦耳热，因为焦耳热可能会提高激光发射所需的阈值电流。为了使 n 型和 p 型接触点尽可能靠近，我们蚀刻了垂直壁台阶，并将位于台阶顶部的 p 型金属化层和位于台阶底部的 n 型金属化层，尽可能地靠近台阶壁。不幸的是，在金属触点热退火期间，垂直台阶壁导致失配位错注入到器件结构中（如图 4 所示）。问题更加复杂的是，我们用于退火的高温降低了位错运动所需的 Peierls 应力，从而导致 AlGaIn 发生塑性变形。从平面透射电子显微镜图像中可以看到，从台阶边缘注入的位错（见图 6）在侧壁附近形成了一个有效的死区，并迫使 p 接触点为了避免该位错区域，从侧壁移得更远。而将 p 接触点移离台阶

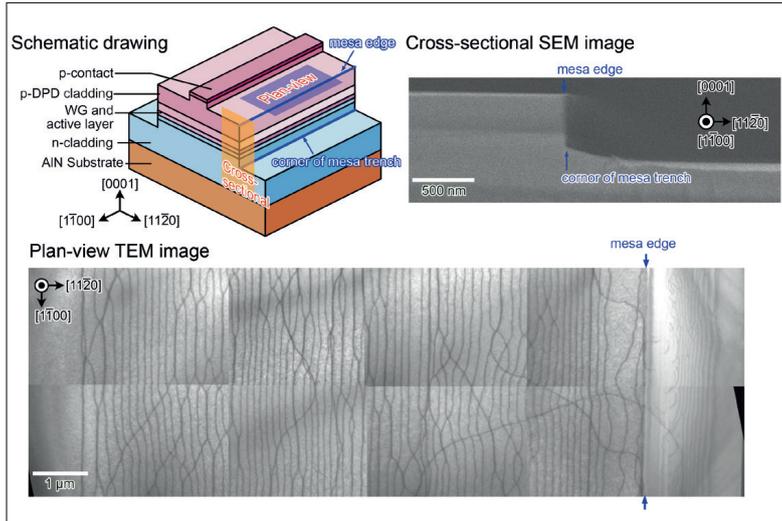


图6. 通过各种形式的电子显微镜可以看到从台阶边缘注入的位错。

壁有利也有弊。通过降低阈值电流和延长器件寿命可提高激光器性能，但也会增加电阻率——会导致自热，阻碍室温 CW 操作，因为阈值电流增加得太快。

我们的解决方案是对蚀刻台阶的侧壁进行设计，以确保减少剪切应力的积累。通过引入倾斜台阶壁，我们显著降低了蚀刻结构中存在的最大剪切应力（见图 5）。借助这种新架构，我们器件的退火不会引起失配位错，并且 p 金属可以放置得更靠近台阶边缘，从而降低激光二极管的电阻。

这里的关键点是，即使在高温下，也可以通过避免超过最小剪切应力的方式设计侧壁的应力，从而避免失配位错注入。这是假晶外延结构实际应用的重大突破。

其他应用领域呢？

除了 UVC 激光二极管之外，超宽禁带半导体还有其他令人兴奋的机会，可用于解决一些社会问题。例如，此类材料可用于开发远 UVC 辐射的固态源，其发射波长低于 235nm，这对应于超过 5.3eV 的光子能量。在如此短的波长下，辐

射被蛋白质和其他有机分子强烈吸收，以至于无法穿透皮肤或眼睛表面，从而防止对活细胞中的 DNA 造成损害。而与此同时，病毒和细菌病原体没有这种保护，并且会通过相对较小的辐射暴露而被中和。因此，可以对有人存在的房间进行安全消毒。

值得注意的是，远 UVC 辐射的气体源是可用的。然而，由于远 UVC LED 效率相当低且昂贵，因此有望成为一种具有吸引力的替代品，可提供更低的成本和卓越的鲁棒性。在超宽禁带半导体家族中，假晶高铝组分 AlGaN/AlN 系统十分具有潜力：其禁带接近 6.1eV，并且可以形成具有分布式极化掺杂的 p 型材料。

超宽禁带半导体的其他应用机会可与电网有关，电网需要不断发展以满足未来对分布式发电和存储的需求。当我们转向低碳世界时，我们将摆脱依赖化石燃料的集中式巨型发电机，继而转向许多相对小型的可再生能源发电。这些绿色替代方案通常既不是连续的也不是“按需”的，因此需要提高储能能力。到那时所需要的是一个“智能电网”，它可以处理电力调节，而不必在每个街区都建立变电站——至少不是目前使用的那种大型的、难看且脆弱的变电站。氮化铝 (AlN) 是可以促进实现这一目标的超宽禁带半导体之一，它有开发能够可靠地处理更高功率密度的电力控制系统的潜力，同时可以缩小体积，实现箱式变电站。实现 p 型和 n 型载流子，对于任何超宽禁带半导体来说始终都面临着挑战。但分布式极化掺杂为高功率器件设计人员提供了一种实现这一目标的新有效途径，此外假晶生长也对此有帮助，是实现低缺陷密度，确保器件长期可靠运行的关键。

显而易见的是，假晶高铝组分 AlGaN/GaN 的潜力巨大。☞

扩展阅读

- J.Y. Tsao et al. “Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges” Adv. Electron.Mater. 4 1600501 (2018)
- Jena et al. ” Realization of wide electron slabs by polarization bulk doping in graded III–V nitride semiconductor alloys,” Appl. Phys. Lett. 81 4395 (2002)
- J.R. Grandusky et al. “Pseudomorphic growth of thick n-type Al_xGa_{1-x}N layers on low-defect density bulk AlN substrates for UV LED applications,” J. Crystal Growth 311 2864 (2009)
- M. Kushimoto et al. “Local stress control to suppress dislocation generation for pseudomorphically grown AlGaN UV-C laser diodes” Appl. Phys. Lett. 121 222101 (2022)
- “New Type of Ultraviolet Light Makes Indoor Air as Safe as Outdoors,” <https://www.cuimc.columbia.edu/news/new-typeultraviolet-light-makes-indoor-air-safe-outdoors> (2022)

A futuristic rover with a wind turbine on a desert planet. The rover is a six-wheeled vehicle with a large, three-bladed wind turbine mounted on its chassis. It is positioned on a reddish-brown, rocky terrain under a hazy, orange sky. The wind turbine is the central focus, with its blades extending upwards. The rover's wheels are large and have a complex, multi-spoke design. The overall scene suggests a high-tech, off-world environment.

氮化镓： 在极端条件下的卓越表现

消除氮化镓外延层中的高密度缺陷将使器件在极端环境中大放异彩，它们在极端环境中能够承受高温、强腐蚀和强辐射

作者：斯坦福大学的 Savannah Eisner、Jessica Frick 和 Debbie Senesky

氮化镓 (GaN) 具有卓越的性能，现已成为功率和射频电子器件的主流材料。它的优势在于击穿电压高，二维电子气 (2DEG) 通道的迁移率和载流子饱和速度值高。但这种材料更令人称道的是，它将这些特性与耐高温和极强的抗辐射能力结合在一起 -- 正是这些特性使氮化镓成为一种极具吸引力的材料，可用于将物联网 (IoT) 扩展到极端环境中。

这一特殊的前景并没有被忽视，研究人员已经开始探索将氮化镓作为平台，用于太空探索应用中的远程物联网通信技术，以及需要在恶劣条件下进行计算、计时和传感的地面应用中的中程物联网通信技术。与地热、石油和天然气以及高超音速技术相关的氮化镓应用机会不断涌现。

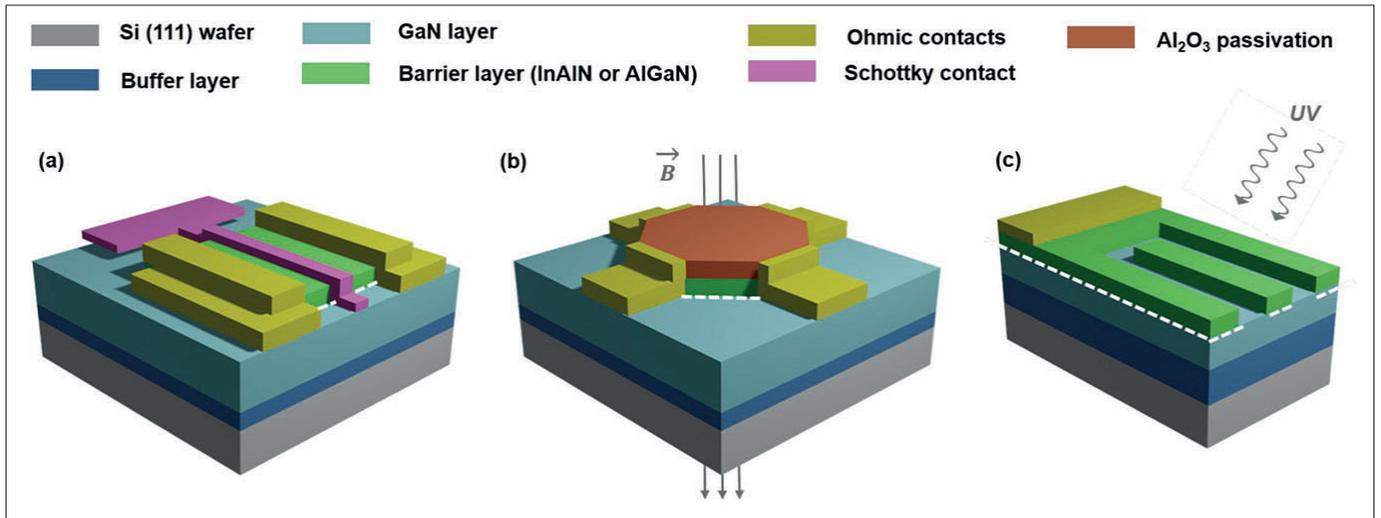
氮化镓可被用于所有这些机会，因为硅作为几十年来的主流半导体，在极端环境中的性能很差。自 1954 年发明以来，硅晶体管的应用范围从根本上仅限于常规环境。

由于硅的带隙只有 1.2 eV 左右，因此硅器件无法在 200°C 以上的温度下工作。这种严重的限制导致硅器件和电路需要主动冷却才能在恶劣环境中工作。

但请注意，超越硅技术所带来的远不止是简化热管理。随着电子应用的功率密度越来越高，基于硅后继产品的平台可以满足这一需求，同时还能可靠地运行，并且不需要复杂、昂贵的封装。考虑到现代工程系统对有效载荷和成本的严格要求，实现这些功能具有巨大的价值。

硅的优质替代品不仅限于氮化镓，还包括其他一些宽带隙材料，如碳化硅和金刚石。所有这些材料都具有更高的功率密度和更低的功耗。

就氮化镓 (GaN) 而言，实现高效率、高频率运行的材料特性也是器件在高温环境中运行的令人信服的初步演示的背后原因。异质结构 InAlN/GaN 平台的工作温度已达到令人惊叹的 1000°C，这一了不起的成就得益于互补的高温金



暴露在全星模拟环境中的 (a) InAlN/GaN HEMT、(b) InAlN/GaN 霍尔效应传感器和 (c) AlGaN/GaN 紫外线光电探测器的横截面示意图。存在 2DEG 的界面用白色虚线表示。转载自：S. R. Eisner et al., “Extended Exposure of Gallium Nitride Heterostructure Devices to a Simulated Venus Environment,” 2021 IEEE Aerospace Conference (50100), Big Sky, MT, USA, 2021, pp. 1-12.

属接触和减少的应变弛豫效应。

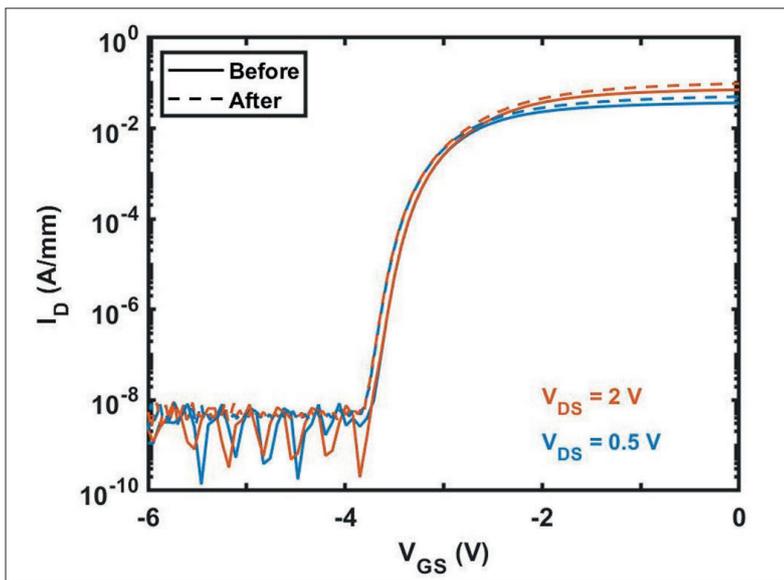
硅不可能实现这样的性能，因为其内在载流子浓度过高，无法确保高温下的电流调制。在这种情况下，硅中被热激活进入导带的载流子将淹没沟道。由于氮化镓的带隙比硅宽三倍，且背景载流子浓度较低，因此不会出现同样的情况。

氮化镓材料系统的一个备受期待的独特特征是在异质界面上形成极化诱导的 2DEG 沟道。由于这些极化效应，无需掺杂就能形成导电沟道。其主要意义在于，氮化镓器件中的沟道不会受到有害掺杂散射和扩散的影响，而众所周知，掺杂散射和扩散会对器件在高温和低温下的性能产生负面影响。氮化镓异质结构中的二维沟道在室温下可

支持非常高的电子迁移率，大约为 $2200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

具有 2DEG 的氮化镓异质结构的优点激发了大量微米和纳米级固态和微机电系统传感器的演示。利用 2DEG 进行压电转换的氮化镓谐振器的应用机会包括：(1) 在恶劣环境中部署，用于红外和化学传感；(2) 在振荡器中部署，为基于氮化镓的物联网平台提供稳定的芯片级时钟。其他令人兴奋的发展包括：在氮化镓异质结构膜中制造的微压力传感器，已证明可在高达 300°C 的空气中工作；用于恶劣环境的机械传感器，如地震仪、加速度计、陀螺仪；以及应变传感器，同样可受益于氮化镓中的应变传导。此外，利用氮化镓异质结构外延层中的价带偏移，使用 2DEG 相互咬合电极形成的器件也有机会实现高增益紫外线光电探测器。此外，AlGaN/GaN 和 InAlN/GaN 还实现了高灵敏度的磁场传感功能；异质结构 GaN 通过热电和光伏技术，在极端环境中实现了能量收集功能。也可以在不引入另一种材料系统的情况下放大来自这些传感器的信号，因为信号放大和逻辑可以通过众所周知的 GaN-HEMT 来执行。

得益于氮化镓异质结构的横向布局以及兼容的微加工工艺，可以生产大量适合单片集成的传感器。因此，我们才可能生产出集传感、通信和电源功能于一体的单个非冷却异质结构氮化镓芯片；这些芯片可以在极端环境下长时间运行，同时与物联网网络连接；而且无需冷却或屏蔽。除了这些优点外，这种单片集成电子产品还能产生更轻、更便宜的物联网系统。



在全星模拟舱中暴露 10 天后的 InAlN/GaN HEMT 传输特性。转载自：S. R. Eisner et al. “Extended Exposure of Gallium Nitride Heterostructure Devices to a Simulated Venus Environment,” 2021 IEEE Aerospace Conference (50100), Big Sky, MT, USA, 2021, pp. 1-12.

探索金星

利用氮化镓物联网技术可以解锁太空探索中一个令人兴奋的新前沿，就是在金星恶劣表面执行长期任务。由于金星的大小、组成和在太阳系中的相对位置都与地球相似，因此它经常被称为地球的“姐妹行星”。

大多数金星表面探测计划可追溯到 20 世纪 70 年代和 80 年代，由苏联领导。其中，持续时间最长的金星表面任务 Venera 13 只持续了 2 个多小时。从这个时间跨度来看，火星表面任务的记录寿命为 14 年 138 天，是由美国国家航空航天局 (NASA) 的机遇号火星车在 2004 年至 2018 年期间创下的。

在金星和火星表面执行任务的时间长度存在着惊人的差异，这充分反映出恶劣的金星环境给探索带来了巨大的技术障碍。虽然金星和地球之间可能存在相似之处，但气候却完全不同。金星表面温度高达 464℃，大气压力超过 90 bar-- 相当于海洋 1 公里深处的压力。大气的成分也不尽相同，金星大气层的主要成分是具有腐蚀性的二氧化碳，在高温高压的作用下变成了超临界状态。金星大气中的其他成分包括令人恶心的、腐蚀性和腐蚀性化合物，如二氧化硫、氢氟酸和盐酸。

这种有毒成分加上极端的物理条件，造成了金星表面的恶劣环境，超出了传统硅微电子器件的工作极限，使机器人探索任务在技术上面面临着极大的挑战。硅在很多方面都无法满足需求，因为它与金星大气层的化学成分不相容，即使引入了硅绝缘体等战略技术，也无法在金星表面温度下运行。采用主动冷却和屏蔽措施几乎没有任何作用。Venera 13 上的硅微电子器件在达到环境温度后出现传输故障，就证明了这一点。

自从上一次专门的金星表面任务（苏联 1985 年的 Vega 1 号任务）以来的几十年里，对这颗行星的科学研究主要集中在绕轨道运行的航天器和卫星上，主要是飞往其他目的地的飞行任务。虽然这种方法可以获得有用的信息，但金星周围厚



斯坦福大学极端环境微系统实验室 (XLab) 中的定制金星模拟舱，用于将器件置于真实的恶劣环境条件下。

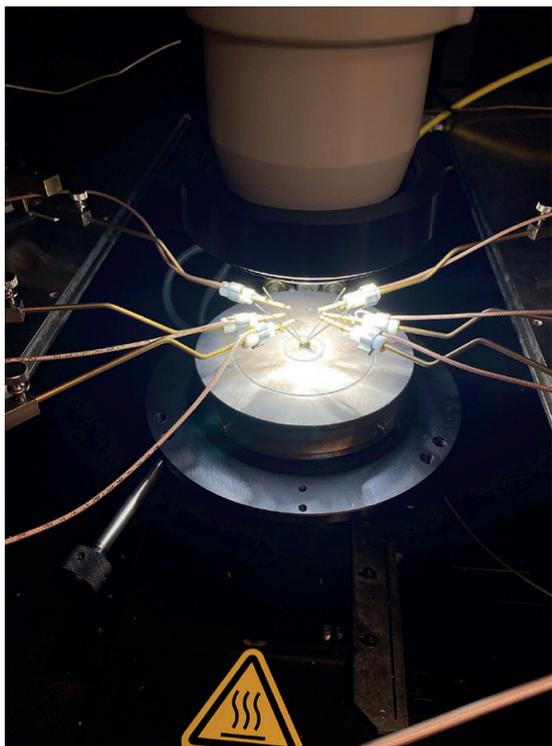
厚的云层阻碍了科学家对金星的深入了解，使他们无法回答关于金星的许多悬而未决的问题。

由美国国家航空航天局恢复

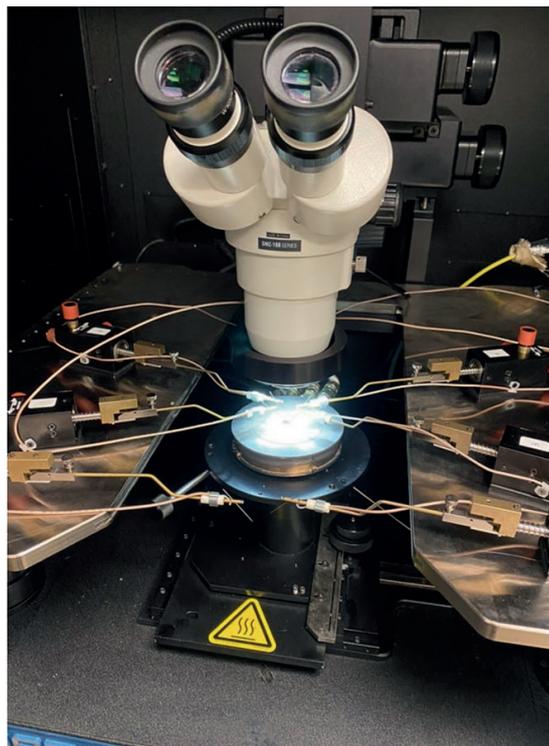
美国国家航空航天局 (NASA) 的金星探索分析小组 (VEXAG) 已经确定了未来任务中应优先发现的内容。该小组强调了对矿物学、地震学、计量学以及地表和大气层之间的化学相互作用进行研究的必要性。为了获得足够的信息，任务的时间长度需要远远超过 Venera 13 的时间长度 -- 时间尺度应为几周或几个月 -- 以便能够在一天内的不同时间和不同的天气条件下进行观测。延长飞行任务的持续时间还能带来额外的好处，因为这样就能实现远程、人机交互决策能。火星表面探测器就是这种情况，地球上的一个团队正在确定在哪里钻探和进行样本分析。

从这一任务中获得的科学知识不仅限于扩大我们对金星的了解。这项工作还将为我们揭示影响行星天体多样性的新因素，包括更深入地了

金星主要由腐蚀性的二氧化碳组成，在高温高压下变成超临界状态。其他成分包括令人讨厌的、腐蚀性和腐蚀性化合物，如二氧化硫、氢氟酸和盐酸。



斯坦福大学极端环境微系统实验室 (XLab) 在 600°C 的空气中对氮化镓异质结构器件进行测试。



解地球和金星演化过程中出现差异背后的驱动因素，以及为什么这两个天体支持不同的气候和地质特征。尽管金星今天的环境极端恶劣，但它可能曾经存在过古代海洋，甚至可能在其表面也存在生命。关于这些海洋的范围和时间跨度仍存在争议。通过加深对金星的了解，我们可以解决这一争论，同时更好地了解类似的过程，以及它们可能对地球产生的影响。实现这些目标有助于我们在寻找其他潜在宜居外行星时制定标准。

金星表面任务所需的仪器需要多种半导体器件。它们需要用于：传感器和成像仪；质谱仪和激光光谱仪的控制和读出电子设备；指挥钻头所需的低功耗样品处理处理器；以及电力系统电子设备，用于控制开关和配电。由于氮化镓异质结构具有单片集成的潜力，未来的金星任务可能包括由多个机器人漫游车进行的大规模地表探索，

这些漫游车会生成大量传感器数据，并通过物联网相互通信和与轨道卫星通信。

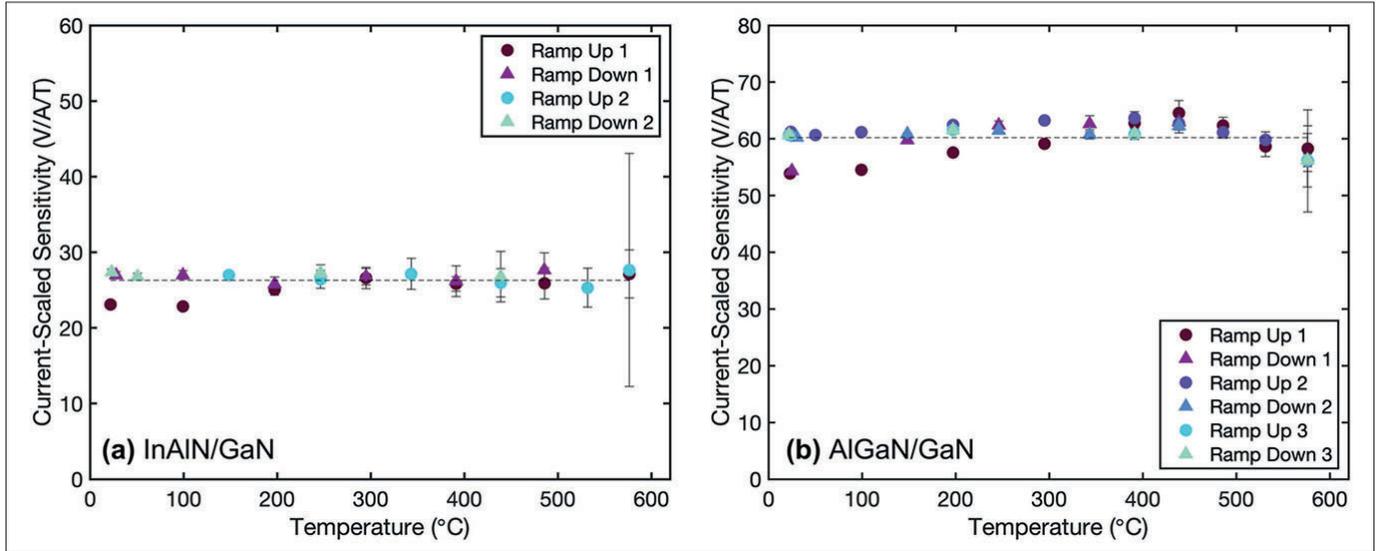
随着金星表面探测最近获得越来越多的支持，此类任务的前景正在不断上升。美国国家航空航天局刚刚通过“发现”计划向两项新的金星探测任务提供了资金。虽然 DAVINCI+（金星深层大气惰性气体、化学和成像研究）和 VERITAS（金星发射率、无线电科学、InSAR、地形学和光谱学）都不会在这颗行星表面安装仪器，但这些计划代表着金星探索令人兴奋的新篇章的开始。人们希望，这些计划最终将为未来需要物联网能力的地表研究任务概念提供可信度。朝这一方向努力还将带来更多益处，因为它们将支持前往水星或气态巨行星等其他高温行星体的任务 -- 这类项目将重视由异质结构氮化镓实现的非制冷仪器技术。



Savannah Eisner在斯坦福大学纳米制造厂的Aixtron MOCVD III-N系统旁，该系统正在生长氮化镓异质结构外延薄膜。

氮化镓的致命弱点

不幸的是，氮化镓固有的鲁棒性使其非常适合在极端环境中工作 -- 耐高温、抗辐射损伤和化学侵蚀 -- 但这是有代价的。其缺点是氮化镓的合成具有挑战性。氮化镓微电子 / 纳米电子器件在高功率、高频率和高温方面取得的可喜成果，往往依赖于在异质衬底上薄膜的外延生长，例如由硅、蓝宝石或碳化硅制成的衬底。这些非同质衬



(a) InAlN/GaN 和 (b) AlGaIn/GaN 霍尔效应磁场传感器在室温和 576°C 空气中的电流标准灵敏度。转载自：H.S. Alpert et al. Rev Sci Instrum. 91 025003 (2020)

底上的生长导致外延层中的缺陷密度相对较高，这给极端环境下的工作带来了挑战。

相对较高的缺陷密度导致的性能缺陷包括可靠性受损，例如高断态漏电流和捕获相关现象（例如电流崩塌）。高缺陷密度和由此产生的陷阱的另一个缺点是瞬时持续光电导性，这降低了氮化镓的光传感能力。除了困扰横向异质结构 GaN 2DEG 器件外，与缺陷相关的问题也对垂直器件架构提出了挑战，而垂直器件架构是高功率应用的理想选择。

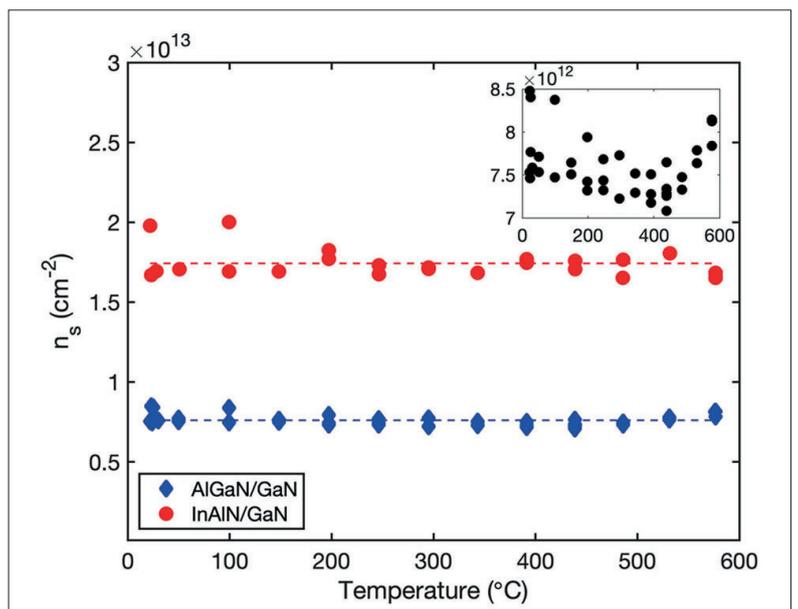
显而易见的解决方案是降低器件中的缺陷密度。将生长衬底转为氮化镓应能解决这一问题，但要实现具有成本效益的原生块状氮化镓衬底和外延层的生长却很有挑战性。

在这方面缺乏进展并不意味着缺乏努力。多年来，世界各地的许多研究小组一直在追求氮化镓单晶衬底的生长。但正如一些人所说，氮化镓衬底仍然难以打破、难以制造。这种状态源于镓和氮这两种复合元素之间的关系，它们的电负性相差 1.2，这个高值反映了键的高极性共价性质。在 2500 °C 和 4.5 GPa 左右的极端条件下，这种键合作用会导致熔化。低于这个压力时，氮化镓不会熔化，而是会分解成液态镓和氮气。

为了规避与当今工业能力不相容的极高加工压力需求，氮化镓的生产采用了三种标准方法生产：卤化物气相外延（HVPE）、氨热法和钠溶剂。在这三种方法中，氨热法在生产相对大规模的块状氮化镓晶片方面最为稳定。2021 年，日本钢铁公司和三菱化学公司合作生产了 4 英寸块状氮化

镓晶片，这是迄今为止使用氨热法生产的最大尺寸晶片。氨热反应是溶热合成的一个特定子集，即在压力安全的容器中将有有机液相相互作用加热到沸点以上。在氨热反应中，氨在液态镓的存在下提供溶剂。

与所有液相反应一样，氨热合成容易出现重力诱导的现象。这些现象包括：容器相互作用、热对流、浮力和沉降。这些现象都不利于低缺陷、大直径单晶体的形成。我们希望，新的太空制造能力将消除合成过程中的重力现象，并生产出高质量、商业规模的氮化镓晶片。太空半导体合成是一个令人兴奋的新领域，有望在“超越硅”时代的数十年中发挥至关重要的作用。



InAlN/GaN 和 AlGaIn/GaN 样品从室温到 576°C 的 2DEG 密度。插图显示了较紧轴上 AlGaIn/GaN 2DEG 密度随温度变化的情况。转载自：H.S. Alpert et al. Rev Sci Instrum. 91 025003 (2020)

THE 14TH SESSION
第14届

中国国际纳米技术产业博览会(纳博会®)

时间: 2024年10月23-25日 **地点:** 苏州国际博览中心A1&A2&B1&C1

主办单位:

中国微米纳米技术学会
中国国际科学技术合作协会
国家第三代半导体技术创新中心(苏州)

同期会议:

China MEMS 2024 中国MEMS制造大会
FLEX China 2024全国柔性印刷电子研讨会
第四届纳米大健康-活体测量与精准医学论坛
第二届NTAC 全球纳米压印技术与应用大会
第二届纳米新材料技术与产业论坛
第十二届半导体器件与加工工艺论坛
第六届纳博会分析测试应用论坛
第四届新型纤维材料与应用前沿论坛
第三届先进凝胶材料及产业应用论坛
新加坡国际论坛
2024国家纳米标准化论坛
2024纳博会知识产权论坛
中国MEMS创新创业大赛
第三代半导体创新创业大赛



主题论坛

10+

展位数目

600+

预期观众

27000+

展览面积

24000m²



扫描获取
更多纳米产业讯息



扫码报名
参会观展

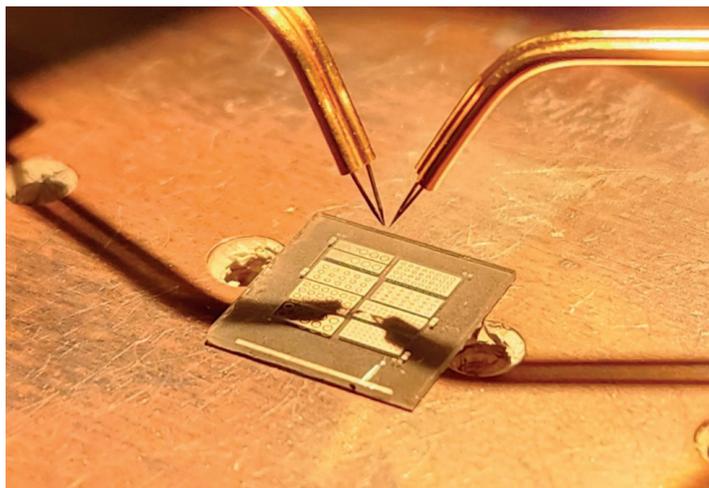
参会联系:

张女士
手机: +86-15261825960
邮箱: zhangzx@nanopolis.cn

参展联系:

陆先生
手机: +86-15050142680
邮箱: luw@nanopolis.cn

网址: www.chinanosz.com



AlN： 用低温外延 打开大门

可惜的是，目前的材料无法满足未来的需求。这并不是说 GaN 和 SiC 没有取得实质性成功——它们正在改变电力电子技术并使固态照明成为现实。然而，这些宽禁带材料在用于电网规模电子和电动汽车的高功率二极管和晶体管时存在局限性，它们不能用于制造用于灭菌和光刻的紫外线发射器。

近年来，许多具有更宽禁带的材料在所有方面都提供了很大的希望，这些材料越来越受到人们的关注。包括 Ga₂O₃、金刚石以及最近的 AlN。

对于所有这些材料，在器件层面取得进展绝非易事。Ga₂O₃ 具有许多出色的属性，包括 4.9eV 的禁带宽度、高临界电场以及与便宜的体生长方法的兼容性。但也有缺点：由于只有 n 型掺杂，器件仅限于单极器件；近期的研究结果凸显了这种氧化物的低导热性，阻碍了其在电力电子领域的应用。

金刚石的禁带达 5.5 eV，受益于高导热率和其他有利的材料特性。然而，尽管最近衬底取得了令人瞩目的进展，但金刚石难以掺杂且生产成本昂贵。这种材料还受到其间接带隙的阻碍，使其不适合光电应用，这是推动其他半导体（例如 GaN）早期投资和研究的杠杆因素。

AlN 也因其 6.1 eV 的直接带隙、15.4 V/cm 的高临界电场、319 W/mK 的高导热率，以及其与已建立的 III 氮化物基础设施的兼容性，而引起了人们的兴趣。然而，掺杂 AlN 具有挑战性。

2020 年之前，已公布的空穴载流子浓度限制在 10¹⁰ cm⁻³ 左右，电子载流子浓度限制在 10¹⁵ cm⁻³ 左右。

通过在 AlN 中提供创纪录的电子和空穴浓度，低温外延有望释放新一代超宽带隙器件

作者：Christopher Matthews¹、Habib Ahmad¹、Keisuke Motoki¹、Sangho Lee¹、Aheli Ghosh¹、Emily Marshall¹、Amanda Tang¹ 和 W. ALAN DOOLITTLE¹
(¹ 佐治亚理工学院)

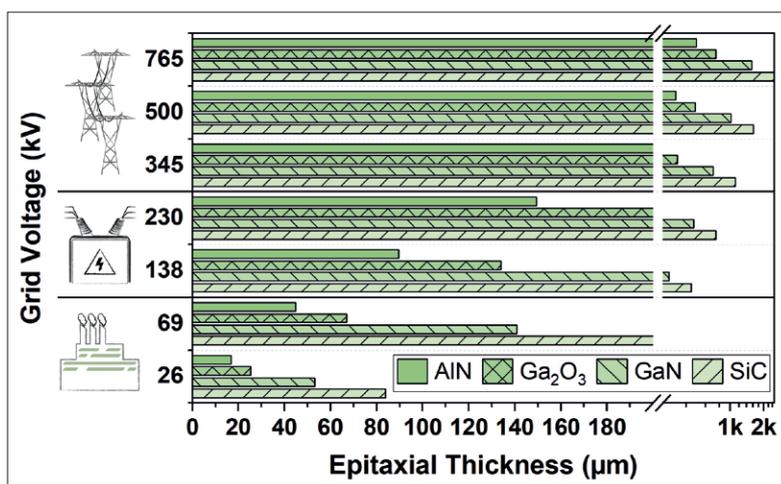


图1：假设理论临界电场限制（引自J. Y. Tsao等人，Adv. Electron. Mater. 4 1600501 (2018)），电力传输网沿线不同点的最小所需器件厚度与电网电压的关系。200微米以下的厚度被认为是半导体器件合理的。对于更高电压传输应用，每种材料都需要不切实际的高器件厚度。然而，AlN是唯一一种在230千伏和138千伏的变电站级别应用中兼容的材料。虽然有多种材料可以承受较低的电压，但AlN器件所需的材料最少，这使它们成为相对经济的选择。

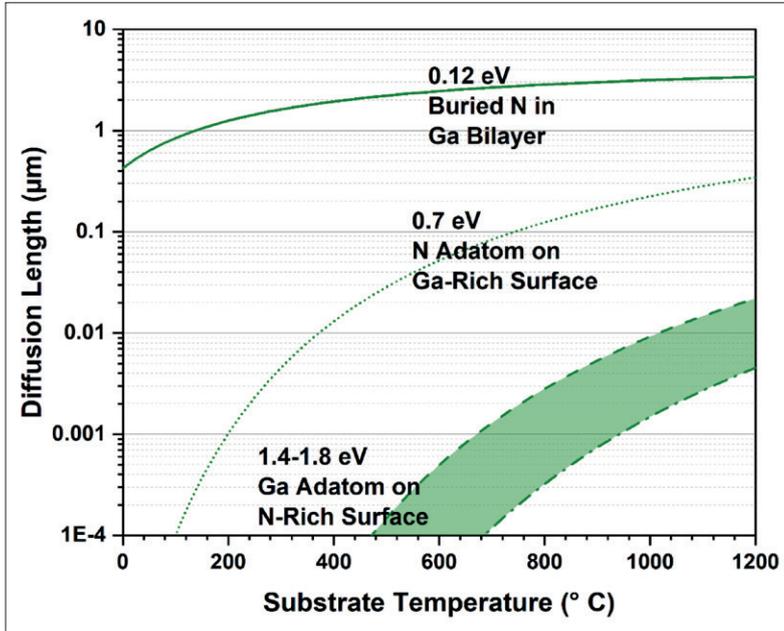


图2: 作为各种原子扩散路径势垒函数的跃迁速率和表面扩散长度的代表性计算。即使在低生长温度下, 镓双层中的氮也具有微米量级的扩散长度。

我们佐治亚理工学院的团队利用金属调制外延(MME)(MBE的低温变体)突破了这一天花板。应用MME, 我们分别在AlN中用铍和硅掺杂剂实现了p型和n型掺杂, 获得的载流子浓度大大超过了之前报道的值——远高于 10^{18} cm^{-3} 。请继续阅读, 了解低温MMS如何取得这一成功。

外延考虑因素

在III族氮化物半导体中, 掺杂效率很大程度上受非故意点缺陷的浓度影响。它们包括: 污染物原子, 通常是氧、碳和氢; 阳离子空位; N-空位(AlN的 V_{Al} 和 V_N); 以及可重新配置的缺陷, 例如DX中心。因此, 限制不需要的杂质掺入和空位形成至关重要, 尤其是在尝试掺杂众所周知的绝缘材料(例如氮化铝)时。

这些杂质有多种来源, 取决于生长技术。对于氧和碳污染, 两种相互竞争的热机制在发挥作用。较高的温度会增加生长室内结构部件中这些元素的脱气程度, 但这在一定程度上会被它们在半导体表面上的粘附系数的同步降低所抵消。为了限制薄膜中氧和碳的结合, 生长通常在直径温度下进行, 即尽可能低或尽可能高。

对于III族氮化物外延, 空位的形成通常被认为仅与III/V(或V/III)比率相关, 其中 V_{Al} 发生在富N生长中, V_N 发生在富金属生长中, 大部分通量用于取代因解吸而失去的原子。更普遍的是, 空位浓度与温度呈指数关系, 因此降低空

位浓度的一种有用策略是大幅降低温度。

正相反方法的一个例子是MOCVD。这种外延生长技术采用高温并通过热力学产生高浓度的 V_N 。然而, 从动力学上来说, MOCVD中使用的大量V/III比率在生成这些 V_N 时会取代它们。

相反的方法, 关于低温方法, 则永远不会通过消除热力学驱动力来产生巨大的表面空位浓度。因此, 无论使用何种前驱体, 即使富含铝的III/V比率过高也会导致 V_N 浓度较低。在大多数情况下, 化合物半导体层的外延生长通常在该材料可承受的最高温度附近进行, 这样通常有利于光滑薄膜的生长。对于III族氮化物, 这种方法一直被用来优化在富氮生长条件下生长的薄膜。然而, 富含金属生长的物理学发生了巨大的转变, 但却被忽视了。本质上, 富氮区域需要高温来克服大的表面结合能垒并促进长程吸附原子跃迁, 这对于形成光滑薄膜至关重要。当吸附原子存在于富含金属的表面上时, 这些势垒要低得多, 从而确保在低得多的温度下可以实现类似程度的扩散。

当比较不同GaN表面终端上GaN生长的限制反应物的扩散长度时, 很容易看出这些因素的作用。对于N面(或干燥)GaN表面, 镓的扩散势垒介于1.4 eV和1.8 eV之间。相比之下, 氮在镓面表面上扩散的势垒仅为0.7 eV, 而覆盖双层镓的表面则低至0.12 eV。由于这些变化, 与富氮生长的长度相比, 富金属生长的吸附原子表面扩散长度明显更高, 超过 $3 \mu\text{m}$, 即使在低得多的温度下也是如此。

基于这一观察, 重新考虑使用高生长温度是值得的。毕竟, 利用富含金属的条件, 在低生长温度下可实现高质量的III族氮化物薄膜, 然而高生长温度有几个缺点: 由于结构部件的脱气, 杂质的产生会增加; 发生更大的热膨胀, 引入不必要的应变; 并且掺杂可能会受到影响。

可惜的是, 这并不像简单地降低生长温度和仅使用富含金属的条件那么容易。如果采用这种方法, 会导致金属液滴堆积过多, 最终对III族氮化物薄膜质量产生不利影响。我们需要的是调制生长技术, 在富含金属和富含氮的生长条件之间交替使用。这种方法通常作为MBE的变体实施, 利用富金属生长的优势并限制过量金属的积累。

这些改进的生长方法中最主要的是MME。

采用这种形式的外延，MBE 金属通量比氮气通量高出 30% 到 200%。该工艺的一个关键部分是物理关闭金属源，通过定期去除所有金属积累来确保时均生长条件富含氮（见图 3）。当金属百叶窗打开时，表面很快就会被金属粘附层终止。积累持续进行，直到金属百叶窗关闭，此时金属吸附层被持续供应的活性氮消耗。一旦金属吸附层完全耗尽，薄膜就会短暂停止生长，直到金属百叶窗重新打开并重复该循环。然而，由于生长反应仅取决于表面吸附金属的量，而不是金属通量，因此生长（几乎）总是发生在富含金属的条件下。

我们团队于 2007 年开发出 MME。从那时起，我们使用这种形式的外延在 III 族氮化物中取得了许多令人印象深刻的成果，包括：近 10 $\mu\text{m/hr}$ 的生长速率；单相三元 III 族氮化物，在整个 InGaN 的混溶间隙中以及在 AlInN 的混溶间隙中具有技术相关的成分，没有相分离；高 n 型掺杂，GaN 中电子浓度高于 10^{20}cm^{-3} ；极高的 p 型掺杂，GaN 中的空穴浓度高于 $6 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ；GaN 隧道结的压降极低 (0.14 V)，AlGaN 合金中铝含量高达 60%。请注意，所有这些成功都是在不影响薄膜质量的情况下取得的。正如多个器件所展示的那样，典型的 MME 生长薄膜可产生出色的 X 射线衍射品质因数（即，摇摆曲线线宽与基底匹配）以及光滑表面，其均方根粗糙度低于 1 nm。

最初，我们的结果，尤其是掺杂的成功，相当有争议，因为它们与传统方法生长的 III 族氮化物的理解不相符。例如，先前的理论和实验结果发现，镁在 GaN 中具有深受主激活能，限制了空穴浓度，但我们在 MME 生长的薄膜中发现了浅受主激活能。这一发现令人惊讶。经过进一步检测，我们意识到理论报告往往只考虑接近掺杂剂杂质平衡溶解度极限的掺杂水平，这种限制会在带隙中产生深的、孤立的受主态。对于 MME，生长在动力学上受到限制，允许偏离平衡条件，特别是超出溶解度限制的超掺杂。有一个结果是，掺杂剂可以以高于平衡溶解度极限的浓度强制进入薄膜，当浓度特别高时，这些掺杂剂的玻尔轨道开始重叠，形成掺杂剂带。对于 GaN 中的镁掺杂剂，受主带的形成将有效活化能从约 210 meV 降低至 50 meV。这导致空穴浓度接近 $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 。

继这项工作之后，我们在 AlGaN 中发现了一个受主带，其铝成分高达 60%。这一观察结果为研究掺杂 AlN 提供了基础。

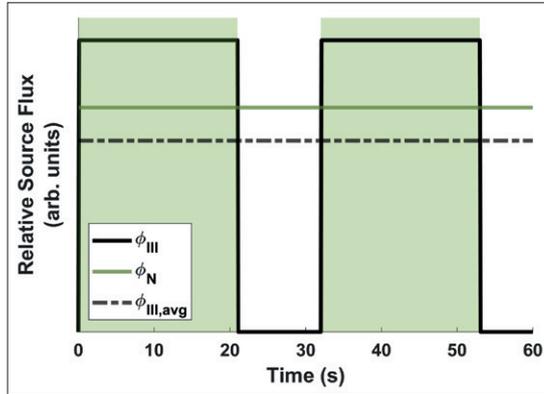


图3：金属调制外延中典型的通量分布随着时间变化。瞬时金属通量 (ϕ_{III}) 高于氮通量 (ϕ_{N})，确保生长发生在金属丰富的条件下。时均金属通量 ($\phi_{\text{III,avg}}$) 低于 (ϕ_{N})，消除了液滴堆积。

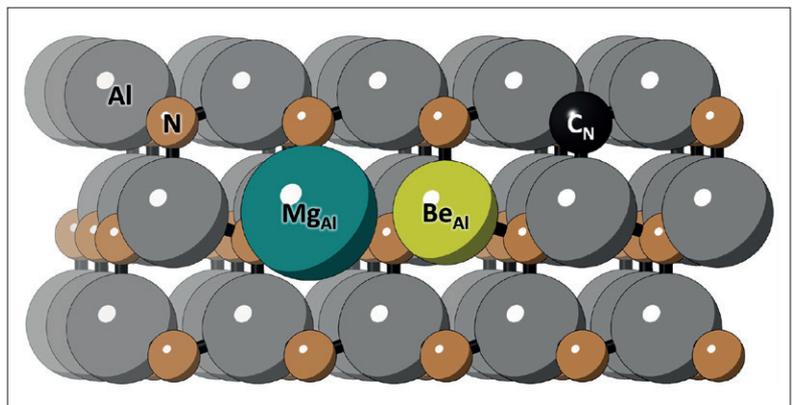
生产 p 型

我们考虑了 p 型 AlN 的三种潜在掺杂剂：其中两种是阳离子取代的镁 (Mg_{Al}) 和铍 (Be_{Al})，另一种是阴离子取代的碳 (C_{N})。镁自然是首选，因为它用作 GaN 的主要 p 型掺杂剂。然而，据报道，镁掺杂 AlN 中的最高空穴浓度低于 10^{10}cm^{-3} 。根据理论研究，镁作为深受主，活化能为 510-630 meV。虽然这种掺杂剂有可能形成镁受主带，但这不太可能。由于铝 (118 pm) 和镁 (145 pm) 之间的原子半径较大不匹配，镁在 AlN 中的溶解度降低，如图 4 所示。还值得注意的是，有报道称，随着 AlGaN 中铝含量的增加，镁掺杂对空穴生成的功效降低，从而导致平均阳离子尺寸减小。

碳同样是一种不切实际的掺杂剂，但出于不同的原因。虽然有报道称碳掺杂的 AlN 具有有限的表面能级 p 型传导，但这种候选掺杂剂未在 AlN 中提供显著的体空穴浓度，并且通常将其理解为 AlN 中的补偿杂质。另一个主要问题是，由于金属有机源中的碳，MOCVD 生长的 III 族氮化物中的碳浓度在每次运行中都不一致。这种不需要的变化很可能会使碳掺杂难以控制。

这使得铍成为最有前景的 p 型掺杂剂。虽然它也被预测为深受主，具有 220-340 meV 的活化能，但它不会遇到与碳和镁相同的问题。与镁不

图4：AlN中镁、铍和碳受主的位置和相对尺寸（按比例）。



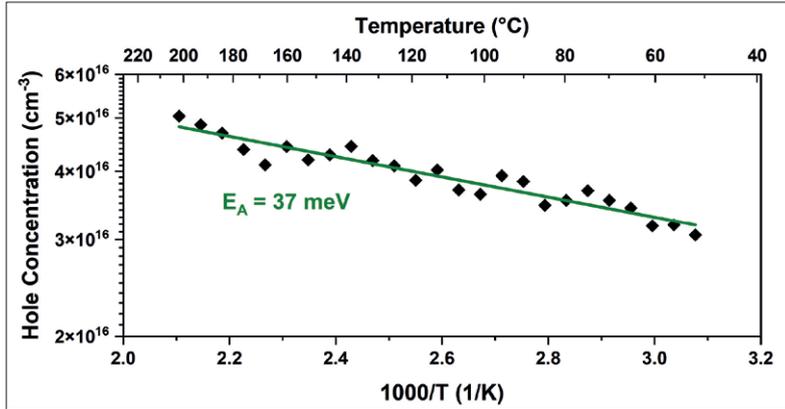


图5: p-AIN的温度相关霍尔测量显示激活能为37 meV。在此感谢Lake Shore Cryotronics, Inc.的Jeff Lindemuth执行此次测量。

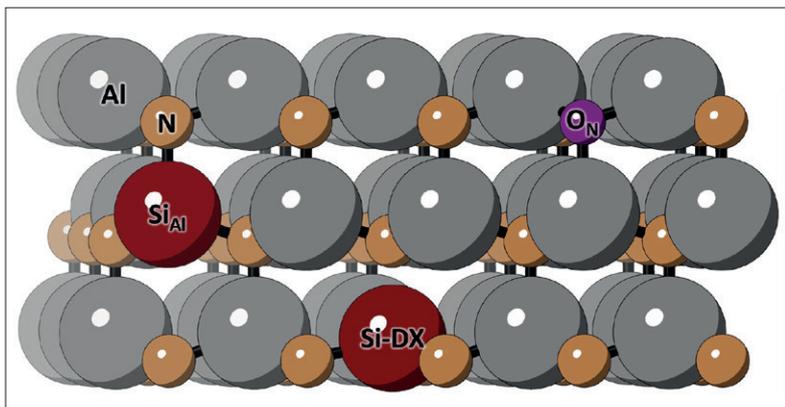
同，铍的原子半径不匹配相当小，因为铍的半径为 112 pm (见图 4)。因此，铍在 AlN 中的高溶解度有望促进受主带的形成。我们最近的研究支持了这种可能性，通过研究确定铍掺杂 AlN 中的室温空穴浓度为 $4.4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，有效活化能为 37 meV (见图 5)。

基于诺贝尔奖获得者凝聚态物理学家 Neville Mott 爵士与 W.D. Twose 的合作的成果，可预计能带开始形成的临界掺杂剂浓度。对于 AlN 中的铍，AlN 中的铍浓度预计将达到惊人的 $4 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ ，大约相当于 AlN 原子密度的 4%。

为何值这么高？这是因为此次计算假设 AlN 的价带结构与其他 III 族氮化物相似，但实际情况并非如此。对于 AlN，分裂带具有更大的曲率，并且比重空穴带和轻空穴带在能量上更接近导带。因此，AlN 中能量最低的空穴的有效质量远低于其他 III 族氮化物中的有效质量。一旦考虑到这一点，受主带形成的临界掺杂剂浓度将被修正为仅 $1.2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。这个值与实验证据一致，表明只有铍浓度超过 10^{17} cm^{-3} 范围才能测量到 p 型传导，此时存在足够的空穴可允许良好的接触。

尽管我们取得了成功，但在 AlN 中掺杂铍仍

图6: AlN 中硅和氧供体的位置和相对尺寸 (按比例)，以及补偿硅 DX 中心配置。



然存在挑战，主要与生长温度有关。我们面临的与温度相关的最大问题是铍具有中等蒸气压，因此即使在相对较低的生长温度 (略高于 750 °C) 下，它也很容易解吸。因此，在高温下生长铍掺杂 AlN 会导致铍掺入量减少，从而降低空穴浓度。提高铍通量不是一种好的选择，因为生长室中过多的铍解吸会导致铍失控，使生长室本身成为不可控的铍源。

用铍掺杂 AlN 时的另一个重要考虑因素是限制薄膜中可能出现的补偿缺陷的数量，例如 V_N 和氧——后者特别容易被铝和铍吸引，并可能形成 O_N 和 Be-O 缺陷复合物。如前所述，可以通过适当调整 MME 生长条件来限制 V_N 缺陷，并通过在金属成分不脱气的低温下生长来降低氧气的产生速率。

铍出现的另一个问题是，由于其尺寸小 (比铝阳离子稍小)，它可以在晶格中进行物理重新配置，从 Be_{Al} 受主转变为补偿铍间隙原子。由于热膨胀，这种重新配置更可能发生在高温生长的薄膜中，这也是低温生长 p 型 AlN 至关重要的另一个原因。

n 型材料

对于 n 型 AlN，潜在的掺杂剂是阴离子取代的氧 (O_N) 和阳离子取代的硅 (Si_{Al})，如图 6 所示。然而，我们可以很快排除氧，因为它与高浓度的铝空位结合形成带负电的缺陷复合物时，它只会在 AlN 中产生浅施主，这限制了它的用途。

幸运的是，硅掺杂稍微简单一些，可以实现 $6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的体电子浓度，这比之前的技术水平提高了近 3000 倍。虽然硅的蒸气压比铍低得多，因此在典型的 III 族氮化物生长温度下不会解吸，如此看来，MME 的低生长温度仍然发挥着至关重要的作用，硅掺杂受益于低温、富含金属的生长条件。与 AlN 硅掺杂相关的主要复杂问题是硅 -DX 中心，它是在 Si_{Al} 原子与其相邻氮原子之间的 c 轴键断裂时形成的。与铍掺杂一样，较高的生长温度是不利的，因为它们可能导致更大的热膨胀并促进不良的晶格重构。此外， V_{Al} 缺陷的存在可以“软化”晶格，使这些类型的 DX 中心更容易形成。为了解决这个问题，我们已经讨论过的方法——使用富金属生长——可以大大降低 V_{Al} 形成的可能性。

到目前为止，尝试掺杂 AlN 的最常见方法是

通过 MOCVD，这需要高生长温度和富氮生长条件。两者都是实现高效硅掺杂的障碍。另一个障碍是碳的补偿性质，这在 MOCVD 生长的薄膜中是不可避免的。考虑到所有这些因素，我们能够大幅超越先前 n 型 AlN 技术水平也就不足为奇了。

开发器件

利用 MME 在 AlN 中产生相当高的空穴和电子浓度的能力，我们已经展示了 p-i-n 二极管的整流。我们预备的二极管显示出六个数量级的整流、接近 6 V 的理想导通电压以及高达 2.8 A cm^{-2} 的电流密度。

这些器件的性能主要取决于正向偏压中的高串联电阻，这可能源于这些准垂直二极管的蚀刻 n 型表面需要解决的接触问题。我们关于高接触电阻的初步理论包括当 6.1 eV 禁带材料与功函数限制在 2.8 eV 至 5.8 eV 的金属接触时的基本问题，以及未优化的等离子蚀刻对 n-AlN 薄膜的损坏。

我们对这些二极管进行了与温度相关的电流 - 电压特性分析，揭示了在高于导通电压时的热激活过程。对于低于导通的电压，电流与温度无关，这表明接触方式是以穿隧效应为主，而不是传统的欧姆传导。我们需要对二极管进行进一步研究，以便确定决定 AlN 二极管电气特性的物理过程。必须包括研究建立更好的接触解决方案在内的工作，将消除分析电流 - 电压曲线时的一个复杂问题并启用更高电流的器件。

毫无疑问，低温外延对于实现高 p 型和 n 型掺杂的 AlN 和 AlN 二极管起着至关重要的作用。

利用 MME 在 AlN 中产生相当高的空穴和电子浓度的能力，我们已经展示了 p-i-n 二极管的整流

低温使得铍和硅掺杂剂能够融入 AlN 薄膜中，而无需重新配置到补偿中心。这限制了 AlN 中补偿空位的产生，并降低了从生长室中的结构部件中逸出的补偿杂质（例如碳和氧）的水平。

由于富金属表面上吸附原子的扩散长度较大，富金属真空工艺可以在如此低的温度下进行，而不会牺牲这些薄膜的结构质量。通过避免掺杂剂解吸引起的复杂情况，铍以足够高的浓度融入 AlN 薄膜中，形成受主带，大大降低了有效活化能并提高了 p 型 AlN 的可行性。这种材料组合的另一个好处是，由于 AlN 独特的价带结构，杂质能带在比 GaN 低得多的铍浓度下形成，从而有望实现更高的空穴迁移率。

这种材料组合的另一个好处是，由于 AlN 独特的价带结构，杂质能带在比 GaN 低得多的铍浓度下形成，从而有望实现更高的空穴迁移率。我们还发现，在相同载流子浓度下，AlN 的空穴迁移率比 GaN 高十倍，这表明 AlN 可能为 p 型器件提供更多应用可能。虽然还有很多工作要做，但这些迹象令人振奋，表明 AlN 提供了一种材料解决方案，能够满足电子和光电子学未来性能需求。🔬

扩展阅读

- ▶ J. Y. Tsao et al. "Ultrawide-Bandgap Semiconductors: Research Opportunities and Challenges" *Adv. Electron. Mater.* 4 1600501 (2018)
- ▶ M. A. Khan et al. "III-Nitride UV Devices" *Jpn. J. Appl. Phys.* 44 7191 (2005)
- ▶ C. Stampfl et al. "Theoretical Investigation of Native Defects, Impurities, and Complexes in Aluminum Nitride" *Phys. Rev. B* 65 155212 (2002)
- ▶ J. L. Lyons et al. "Effects of Hole Localization on Limiting P-Type Conductivity in Oxide and Nitride Semiconductors" *J. Appl. Phys.* 115 012014 (2014)
- ▶ G. A. Slack et al. "Some Effects of Oxygen Impurities on AlN and GaN, *Journal of Crystal Growth*" 246 287 (2002)
- ▶ W. A. Doolittle et al. "Prospectives for AlN Electronics and Optoelectronics and the Important Role of Alternative Synthesis" *Appl. Phys. Lett.* 123 070501 (2023).
- ▶ H. Ahmad et al. "Realization of Homo Junction PN AlN Diodes" *J. Appl. Phys.* 131 175701 (2022)
- ▶ H. Ahmad et al. "Comprehensive Analysis of Metal Modulated Epitaxial GaN" *ACS Appl. Mater. Interfaces* 12 37693 (2020)
- ▶ Y. Taniyasu et al. "An Aluminium Nitride Light-Emitting Diode with a Wavelength of 210 Nanometres" *Nature* 441 7091 (2006)
- ▶ T. Ive et al. "Controlled N-Type Doping of AlN:Si Films Grown on 6H-SiC(0001) by Plasma Assisted Molecular Beam Epitaxy" *Appl. Phys. Lett.* 86 024106 (2005)
- ▶ P. Bagheri et al. "Doping and Compensation in Heavily Mg Doped Al-Rich AlGaIn Films" *Appl. Phys. Lett.* 120 082102 (2022)



利用 InP PIC 实现相干光通信

将 InP PIC 与最先进的硅 CMOS 工艺节点相结合，创造出一种具有卓越数据速率的极其高效的相干技术

作者：Paul Momtahan，英飞朗

相干光技术于 2000 年代末兴起，彻底改变了长途、海底、数据中心互连和城域网的光传输。在引入该技术之前，光通信还比较基础，仅涉及开/关调制。这个先前标准通常称为强度调制直接检测，涉及每个波长的每个符号传输位，最初为 2.5Gbit/s，之后为 10Gbit/s。

向相干调制的转变大幅度提高了波长速度、光谱效率和光纤容量。波长速度从 10Gbit/s 飙升至 100 Gbit/s，之后达到 200 Gbit/s、400 Gbit/s、600 Gbit/s，近期达到 800Gbit/s。这当然还没有结束，甚至更高速度的相干引擎也即将上市，其中包括我们公司英飞朗 (Infinera) 推出的 1.2 Tbit/s ICE7。

光纤容量得益于波长速度的提高。对于带宽为 4.8 THz 的扩展 C 频段，光纤容量已从 960 Gbit/s (例如 96 x 10 Gbit/s) 发展到 9.6 Tbit/s (例如 96 x 100 Gbit/s)，并且最近已超过 40 Tbit/s (例如 53 x 800 Gbit/s)。

引入相干技术还有着其他优势。一是，更简单的光学基础设施，不再需要仔细规划色散补偿模块的放置。另一个原因是，相干技术现在可以以紧凑的可插拔尺寸器件提供 400 Gbit/s 的数据速率，例如 QSFP-DD 可以直接插入非传输主机器件 (例如路由器)。此外，功耗比以往任何时候都低——从 10 Gbit/s 时的约 5 W/G 下降到第一代 100 Gbit/s 相干技术时的约 2 W/G，而目前的 400 Gbit/s 可插拔器件仅在 0.05 W/G 左右。那么这些神奇的器件是如何工作的，InP 在其中扮演着什么角色呢？

相干光学引擎内部

要了解 InP 的作用，必须了解相干光学引擎内部的构建模块和功能 (见图 1)。这些引擎包含三个基本的高级构建模块：数字 ASIC/DSP、模拟电路和光子。通常，模拟电路和光子被封装在一起作为发射 - 接收光子子组件。这三个基本构建模块，与射频互连和封装一起构成了相干光学引擎。但请注意，每个构建模块实际上都包含多个功能。

在数字 ASIC (通常简称为“DSP”) 中，采用最先进的硅 CMOS 工艺节点 (例如 7 nm，但逐渐发展到 5 nm，然后是 3 nm 及更小)，配有用于接收和发送方向的数字信号处理 (DSP) 功能以及数模转换器 (DAC) 和模数转换器 (ADC)。此外，数字 ASIC 往往还会结合其他功能，例如前向纠

错、成帧、复用、加密和性能监控等。

在发送方向，驱动器从 DAC 获取低电压，并将其转换为调制器所需的高电压。同时，在接收方向，跨阻放大器从光电探测器获取电流并将其转换为 ADC 所需的电压。模拟电路构建块通常封装为单个 ASIC，由数字 ASIC 所用 CMOS 硅以外的材料制成。例如，在英飞朗 (Infinera) 的相干引擎中，模拟 ASIC 是由 SiGe 制成的。

光子内部

对于提供光子的第三个构建模块，关键的发送功能包括激光器和调制器。激光器一直是由 InP 制成，产生所需频率的光，发射耦合到调制器中，调制器通过改变光的相位和幅度，利用电场改变光穿过的材料的折射率来编码数据。

一个相干调制器采用四个马赫 - 曾德尔调制器。每个调制器将光分成两个桥臂，相位变化要么发生在一个桥臂上，要么更典型地发生在两个桥臂上。随后当光组合时，通过干涉控制所产生的幅度。由于需要一对相移马赫 - 曾德尔调制器来控制幅度和相位，因此，两个偏振，相干传输需要四个。

相干调制器内部还有许多其他组件，包括分束器、组合器、相移器、偏振旋转器和偏振光束组合器。此外，在发送方向，一些相干引擎加入放大器以提高波长功率。根据放大器的类型，还可能包含可调谐光学滤波器，以最大限度地减少放大器的带外噪声。

接收方向包含无源光子和光电探测器。无源器件包括：偏振分束器，用于分离相干信号的两个偏振；一对 90° 混合器，以同相和正交分量的形式从每个偏振中提取相位和幅度。而光电探测

图 1：相干光学引擎高级构建模块

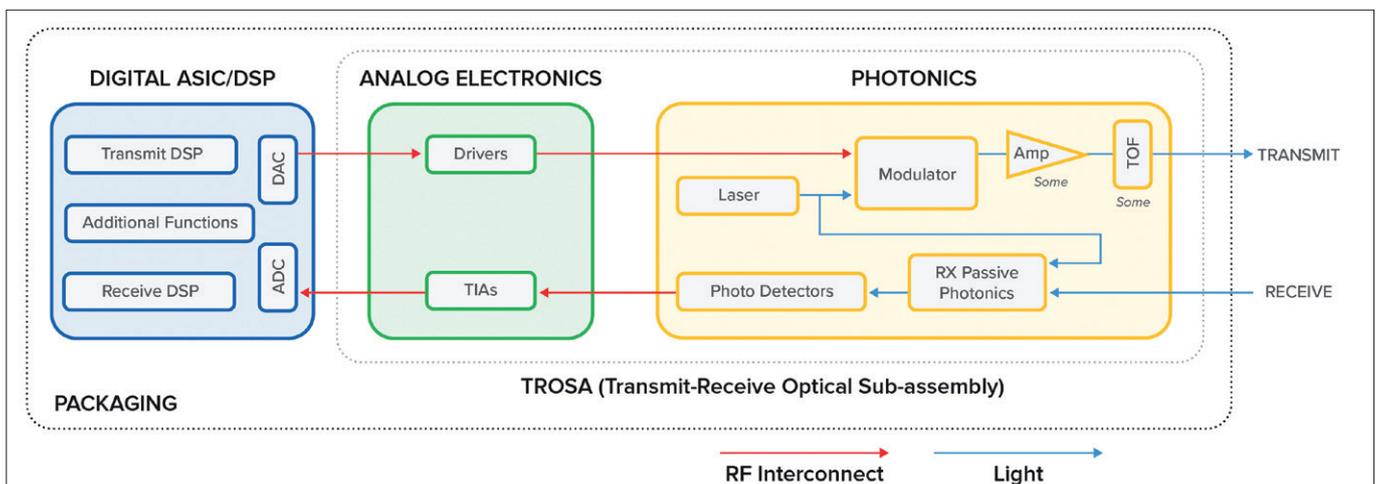
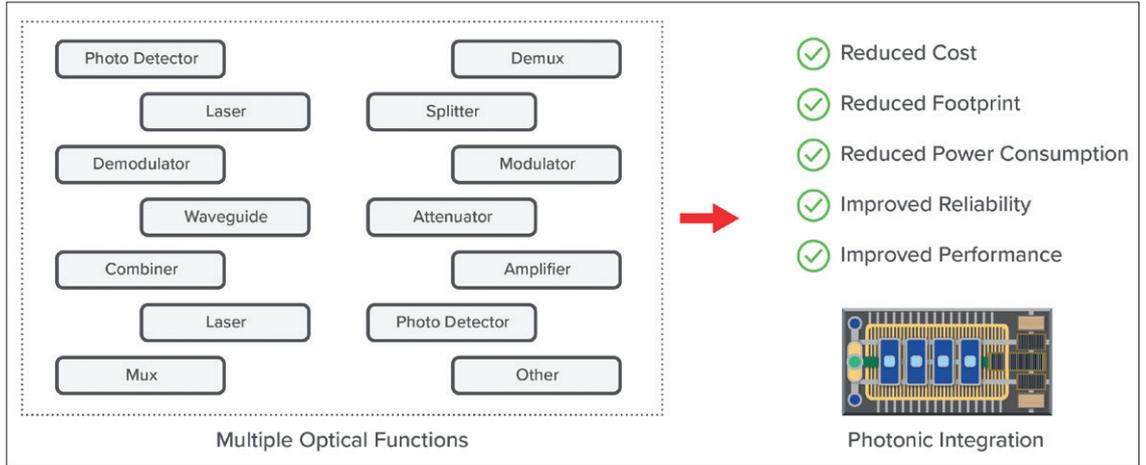


图2: 光子集成的优势



器的作用是探测光并将其转换为电流。光子构建模块的这一部分还有一个激光器，用于帮助从接收到的调制波长中提取相位信息。在许多器件中，这种激光器也用在发射部分。然而，在一些例如英飞朗的 ICE6 等器件中，有应用于发送和接收的单独激光器。

光子集成电路

当相干光学引擎处于起步阶段时，其光子构建模块是由数百个分立组件构成的，并与耦合光学器件连接。但这样的设计肯定不理想。这导致器件体积庞大、价格昂贵，平均故障间隔时间也达不到最佳水平。而这个问题可以通过将数百个以前分离的光子组件集成到单个芯片中来解决（见图 2），该方法由我们公司首创，最初用于 2005 年第一批 10 × 10 Gbit/s PIC 的预相干光通信。

与传统电子产品的影响因素一样，先进制造和集成能力的运用，使得在集成和封装之前制造一个 PIC 比制造许多单独的光学元件更具成本效益。PIC 在许多其他方面也占据上风，其优势

包括占用空间小、能够实现光学器件的小型化和降低功耗。另一个优点是

可以最大限度地减少光耦合损耗，这是通过用分立元件

替换耦合光学器件以及连接 PIC 内部光

学功能的波导来减少的。使用波导进行耦合还可以确保减少设备故障，这是因为消除了耦合光学器件作为故障源的可能性。

InP 的优点

通信元件和设备制造商在 PIC 方面有两种材料选择：InP 和 Si。在它们之间做出决定需要权衡各种利弊。在 DWDM 频率下提供激光和光学放大功能的唯一备选材料是 InP，因此一些材料会一直存在于相干光学引擎中，而硅在这方面存在不足，因为它的间接带隙会导致受激电子产生热量而不是光。因此，硅光子倾向于与外部 DWDM 激光器和放大器一起使用。

克服这一缺点的一种可行方法已经吸引了大量的研究和开发，即将发光材料（例如 InP）异质集成到硅 PIC 中。然而，这种形式的集成需要专门的硅代工生产线。因此，目前硅代工厂不支持将异质集成作为标准产品。

InP 除了具有优异的发光特性外，还具有固有的优越调制效果。这是相干光学引擎市场高性能嵌入式领域的一项重要优势。此外，InP 可以检测 DWDM 光。而硅光子的情况并非如此，硅光子需利用锗的集成来实现此功能。

如今，多家硅代工厂正在传统 CMOS 生产线上制造硅光子器件，生产的芯片使用外部光源和放大器。这项服务降低了想要制造 PIC 但缺乏必要的制造专业知识和设施的供应商的入门壁垒。对于一些简单应用，利用这些代工厂，公司能够生产基于硅光子的产品，这些产品在大批量生产（例如每年数百万件）时具有成本优势。

由于 CMOS 工艺节点的发展和市场需求的多多样化，相干光学引擎市场分为两个不同的部



分：高性能嵌入式光学引擎和紧凑型相干可插拔器件。

高性能引擎利用更大、更强大、更耗电的数字 ASIC 来提供尽可能高的波特率和先进功能，从而最大限度地提高波长容量范围和频谱效率。这些高性能引擎嵌入转发器中，是长途和海底应用的首选尺寸器件，其中采用了 7 nm CMOS 数字 ASIC 支持 800 Gbit/s-per-wavelength 的引擎，例如 Infinera ICE6，以及 5 nm CMOS 支持 1.2 Tbit/s-per-Wavelength 的引擎，例如 Infinera ICE7。同时，使用相同的 CMOS 工艺节点，相干 DSP 设计人员构建了针对低功耗和小占用空间进行优化的 ASIC。这一重点使得 QSFP-DD、OSFP 和 CFP2 可插拔尺寸器件的 400 Gbit/s 成为可能。采用 7 nm CMOS 数字 ASIC 生产的 400 Gbit/s 可插拔器件有多种版本可供选择：400ZR 用于长达 120 公里的点对点数据中心互连；作为具有增强性能的 400 Gbit/s 可插拔器件的总称的 ZR+；以及可提供变革性的点对点选项的 XR 光学器件。

除了已经讨论过的一般优势外，InP PIC 在两种类型的光学引擎有着特定的优势。在高性能嵌入式领域，InP 中的电光调制器效应本质上优于硅的等离子体色散效应，在给定的单位长度和电压下，相变可提高十倍。因此，InP 可实现更紧凑、更节能的调制器，确保更低的损耗、卓越的线性度、更大的调制电压以实现更高的发射器信噪比，从而实现更大的覆盖范围。

对于紧凑型可插拔器件，InP 的一个关键优势与高发射功率所需的集成放大有关。采用硅光子的相干可插拔器件往往具有较低的发射功率，通常仅为 -10 dBm 左右，这远低于现有光线路系统所需的功率，它们需要约 0 dBm 的发射功率。有一个不完美的解决方案是将硅光子与掺铟光纤放大器集成，并添加一个可调谐光学滤波器来阻止额外放大引入的带外噪声。但这是要付出代价的，因为这些额外组件的引入会增加成本和功耗。更好的选择是基于 InP 的可插拔器件。其中包括 Infinera ICE-X，通过将半导体光放大器集成到 PIC 中来提供高发射功率。

下一步是什么？

在高性能嵌入式领域，演变向量包括：更高的波特率；提高频谱效率和光纤容量；与非线性补偿、高级调制、前向纠错、监控和自动化相关



的高级功能；支持空分复用；以及新型光纤类型，如多芯光纤、多模光纤和空心光纤。然而，随着这一领域开始渐渐触碰到频谱效率的极限，对于拥有一个超高速接口（即 3.2 Tbit/s）或多个低速接口（即 2×1.6 Gbit/s）是否有意义存在很多讨论。InP PIC 在这两种情况下都可以发挥强大的作用，具有经过验证的 200+ Gbaud 路径，并且能够将多个波长的发送和接收集成到单个 PIC 中。英飞朗生产的最新相干光学引擎展示了这种能力，例如 ICE6 (2×800 Gbit/s) 和 ICE4 (6×200 Gbit/s)。

在可插拔领域，可能推出的产品包括用于城域边缘的低功耗 100 Gbit/s、用于地铁和数据中心互连的更高速度（800 Gbit/s、1.6 Tbit/s），以及支持长途用例的更长传输距离。相干技术在数据中心内的作用正在引发争论，一些供应商将目标定为采用简化的 800 Gbit/s 相干引擎（例如 800LR）的园区数据中心互连应用。由于需要降低数据中心的功耗（随着人工智能集群和工作负载肯定会扩展，这一问题日益受到关注），数据中心的电力和冷却基础设施面临着巨大的压力。InP 调制器是帮助缓解这种压力的有力竞争者。这些组件在低电压和低功率下运行，即使在当今数据中心主导的非相干强度调制直接检测收发器中也是引人注目的备选者。

除了光通信之外，InP PIC 也是一种前景广阔的技术，可用于广泛的新兴和潜在应用。其中包括国防、汽车激光雷达、可穿戴设备和智能手机的 3D 传感、太阳能电池和医疗传感。此类 PIC 还可以在量子计算以及人工智能和机器学习的神经形态计算中发挥作用。OS



深圳国际电子元器件及物料采购展览会
Electronics Sourcing Show

2024年11月6日-8日

深圳国际会展中心（宝安）



160,000平方米电子产业综合大展
从元件到系统，从设计到制造全产业链

主办单位：



深圳市电子商会
Shenzhen Electronic Chamber Of Commerce



励展博览集团
同励百业·共展商机

同期展览：



国际全触与显示屏
C-TOUCH & DISPLAY



参展请联系：王先生 0755-83759287

扫码咨询



公众号

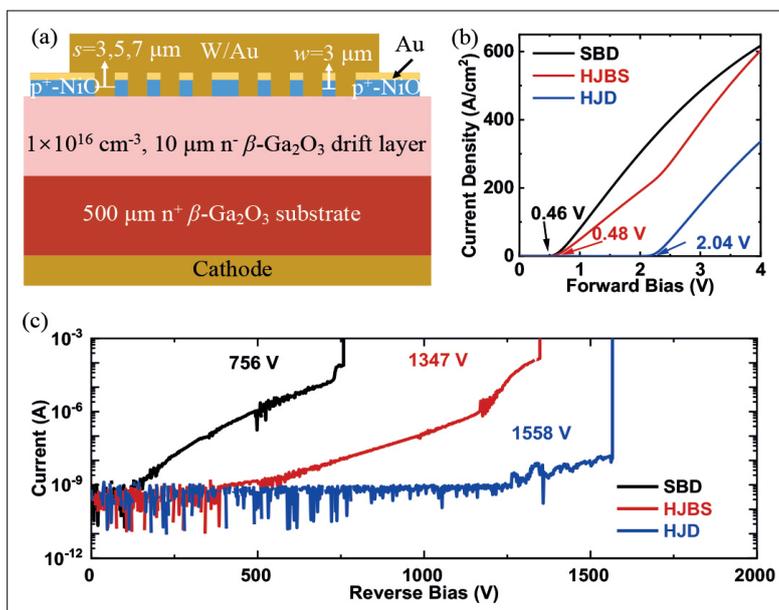
提高 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 二极管的标准

异质结势垒肖特基二极管结合了低开启电压和高击穿电压

为了释放 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 二极管在整流效率方面的潜在增长，这些器件需要结合更低的开启电压和降低导电电阻，同时还要更好地抑制反向漏电流。应对这一挑战的是中国科学技术大学的团队，他们展示了一种配备钨肖特基接触的 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 异质结势垒肖特基二极管。根据团队发言人 Quiyan Li 的说法，他们最近工作最重大的突破是验证了低功函数金属对 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的肖特基势垒高度较低，显著降低了这些器件的开启电压。通常， $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 二极管采用高功函数金属作为肖特基接触，如镍和铂，导致开启电压为 0.8 V。当引入金属氧化物如 PtO_x 和 NiO 来修剪反向漏电流时，甚至高达 2 V 的更高值得以实现。与此截然不同，Li 及其同事制作的二极管，采用钨肖特基接触，其开启电压仅为 0.48 V。Li 及其同事开创的器件另一个重要方面是使用 p 型 NiO 来抑制反向漏电流。“因此，我们制造了一个单极性二极管，其击穿电压超过 1.3 kV，” Li 说。为了量化这种特殊设计的能力，Li 及其同事评估了异质结势垒肖特基二极管、肖特基势垒二极管和异质结二极管的性能。

所有三种都是从 Novel Crystal Technology 购买的外延晶片制造的，其中包含一个 10 微米厚的轻掺杂 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 层，通过 HVPE 生长。从 HVPE 生长的外延晶片开始生产器件，首先化学清洁表面，然后在晶片的背面添加 $\text{Ti}/\text{Al}/\text{Ni}/\text{Au}$ 接触。形成顶部接触包括使用光刻定义间隔宽度，并溅射沉积重掺杂区域 220 纳米厚的 NiO ，上面覆盖 50 纳米厚的金。为了形成阳极，团队添加了 50 纳米厚的钨层和 150 纳米厚的金层（见图，了解最终的器件架构）。

对于正向电流密度为 100 mA cm^{-2} 的开启电压的测量，异质结势垒肖特基二极管的值为 0.48 V，而肖特基势垒二极管为 0.46 V，异质结二极管为 2.04 V。对于异质结势垒肖特基二极管，由于在异质结二极管的开启电压之上的电压处切换到双



异质结势垒肖特基二极管在开启特性上几乎与肖特基二极管相匹配，同时提供了最高的击穿电压。

极性操作，正向电流密度的增加速度更快。异质结势垒肖特基二极管的击穿电压为 1558 V，显著高于肖特基势垒二极管和异质结二极管，后者的这一关键指标的值分别为 756 V 和 1347 V。然而，即使是异质结势垒肖特基二极管也在 2.46 MV cm^{-1} 的场强下击穿，远低于 $\beta\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 的最大场强 8 MV cm^{-1} 。Li 及其同事的下一个目标是使用嵌入的 NiO 用于具有更强耗尽能力的结势垒肖特基结构，以抑制反向漏电流。“然而，这种结构将带来修复侧壁刻蚀损伤的挑战，” Li 说。“之后，我们将进一步完善外延层的参数，例如采用双层漂移层，以实现低导电电阻，同时保持低表面电场、低反向漏电流和良好的击穿能力。”异质结势垒肖特基二极管在开启特性上几乎与肖特基二极管相匹配，同时提供了最高的击穿电压。CS。

参考文献

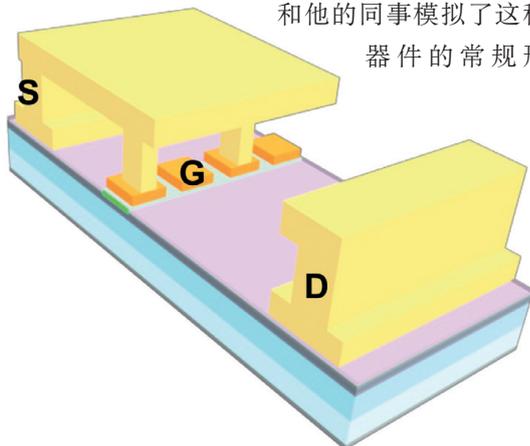
Q. Li et al. Appl. Phys. Express 17 066501 (2024)

辐射加固的 GaN HEMTs

采用源连接埋藏金属结构的增强型 p-GaN HEMTs 提供强大的单事件辐射硬度

这 南京大学和 CorEnergy Semiconductor 的工程师之间的合作声称，在新型 p-GaN HEMTs 中展示了强大的辐射硬度，开创了新的领域。据南京大学的团队发言人 Feng Zhou 称，这一胜利可能为 GaN HEMT 开辟新的和有利的市场。“我们相信，GaN 器件在辐射环境中拥有非常广阔的市场，可能达到数亿美元甚至更多，”周说，他声称，对于轨道卫星、航天器和武器设施中的先进宽带隙半导体存在迫切需求。为了展示他们的 p-GaN HEMTs 的优越辐射硬度，这些器件消除了辐射下积累的空穴，周和他的同事将他们的器件与传统的 GaN HEMTs 进行了基准测试，使用了大约 $78 \text{ MeV cm}^2 \text{ mg}^{-1}$ 的单事件烧毁值。线性能量转移是沿电离粒子轨迹单位路径长度平均沉积的辐射能量。“线性能量转移描述了特定类型辐射的能量沉积密度，这在很大程度上决定了辐射暴露的不利后果，例如电气性能的退化和辐射损伤，”周解释说。对于团队的 p-GaN HEMTs，在大约 $78 \text{ MeV cm}^2 \text{ mg}^{-1}$ 的线性能量转移下发生单事件烧毁的电压为 558 V。相比之下，典型的 GaN HEMTs 的值在 100 V 到 200 V 之间。周和他的同事工作的另一个重要方面是开发了一种紫外线脉冲激光辐照系统，该系统通过集成功率开关电路使器件动态特性的评估成为可能。据周说，这种新型的替代重离子加速器的方法使首次测量 GaN 功率器件在辐射下的功率转换效率成为可能。在制造他们的 p-GaN HEMTs 之前，周

和他的同事模拟了这种器件的常规形



辐射加固的高电子迁移率晶体管 (HEMT) 涉及在非门区移动 p-GaN 层，并在源极连接的埋入金属区域，接着在图案化的源极和漏极区域以及源极连接的埋入金属区域沉积 Ti/Al/TiN 金属堆叠层。

式。他们发现，由于 p-i-n 结的反向阻断，辐射诱导的空穴在靠近栅堆叠的通道 / 缓冲区域中积累，该结由 p-GaN/AlGaIn/GaN 组成。基于这一见解，团队引入了栅堆叠的分区设计，安全地耗散积累的空穴并提高对单电子烧毁的容忍度。他们的新型 HEMT 架构是通过在 p-GaN 层上沉积的栅金属层进行图案化，将其分成段，使一些间隔的金属指不再作为栅极电极，而是通过场板互连过程连接到源金属。另一个与常规不同的方法是在源连接金属下 p-GaN 的中间区域进行刻蚀，以便这些金属可以直接沉积在 AlGaIn 层上形成欧姆接触。通过这种方法，源连接金属 / AlGaIn/GaN 欧姆接触有助于耗散空穴。电气测量，将辐射硬化的 HEMT 与对照组进行比较，显示前者具有更高的阈值电压和导电电阻—3.3 V，而不是 3.0 V；以及 223 mΩ，与 188 mΩ 相比。两者的增加都归因于占据原始栅极区域一部分的源连接埋藏金属结构，这削弱了电流传导能力。使用大约 $76 \text{ MeV cm}^2 \text{ mg}^{-1}$ 和 $86 \text{ MeV cm}^2 \text{ mg}^{-1}$ 的线性能量转移进行的重离子加速器基辐照实验，导致辐射硬化 HEMT 的平均单事件烧毁电压分别为 558 V 和 467 V。相比之下，传统 HEMT 的等效值仅为 217 V 和 89 V。在激光辐照下运行，一个 300 W 功率因数转换系统在大约 $76 \text{ MeV cm}^2 \text{ mg}^{-1}$ 的线性能量转移下被发现具有 95% 的效率，而具有辐射硬化 400 V 垂直双扩散硅 MOSFET 的等效系统的效率为 91%。周说，下一个目标是将他们的辐射硬化器件应用于电路系统，并进行航空航天电子系统的应用程序验证。辐射硬化 HEMTs 的制造涉及去除非栅极区域和源连接埋藏金属区域中的 p-GaN 层，然后在图案化的源和漏区域以及源连接埋藏金属区域中沉积 Ti/Al/TiN 金属堆叠。

参考文献

F. Zhou et al. IEEE Electron Dev. Lett 45 976 (2024)

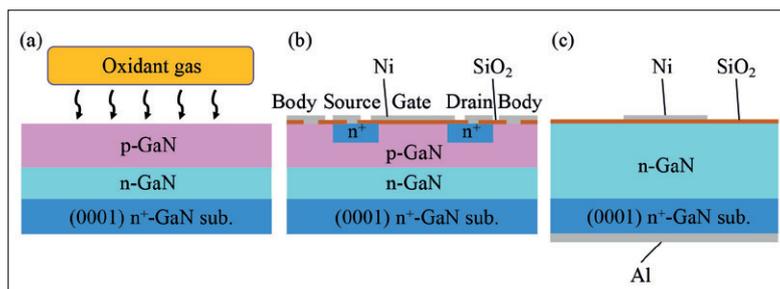
通过雾 CVD 提高迁移率

通过雾 CVD 沉积 GaN MOSFETs 的栅氧化层可提高场效应迁移率

SiC MOSFETs 的销量正在飙升，因为它们通过提供比硅同类产品更高的开关效率来延长电动汽车的行驶范围。这些垂直晶体管的优势包括高阈值电压和高电流处理能力，但由于通道迁移率仅为大约 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ，损失并不像它们可能的那样低。然而，这种有限的迁移率可以通过转向使用雾 CVD 生长的 SiO_2 栅氧化层的 GaN MOSFETs 来解决，这是 Miris Technologies 和 Kochi University of Technology 之间的合作伙伴关系。根据这个日本团队最近的工作，使用这种沉积技术生产的 GaN MOSFETs 结合了高阈值电压和超过 $250 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的迁移率。对于 GaN MOSFETs，另一个要求是高阈值电压，因为这确保了如果这些器件被部署在电动汽车的逆变器中，它们将提供故障安全操作。团队发言人 Kauki Miyake 告诉 Compound Semiconductor，SiC MOSFETs 的数据表显示这种器件的阈值电压约为 4 V，这导致人们假设如果 GaN 变体要具有竞争力，就需要类似的值。Miyake 和他的同事并不是第一个研究 GaN MOSFETs 迁移率的人。以前的研究表明，界面上的 GaOx 影响 GaN MOSFET 迁移率，这种氧化物的厚度受到使用的气体以及氧化时间和温度的影响。早期的工作还考虑了通过各种技术沉积 SiO_2 的 GaN MOSFETs 的通道迁移率，但是通过氧化控制提高迁移率的努力取得了有限的成功。来自日本的研究人员已经解决了这个问题，通过等离子增强 CVD、原子层沉积 (ALD) 和雾 CVD 减少了 GaN 表面氧化，这是一种成本效益高的方法，不需要真空系统。此外，团队还研究了他们的样品中 GaN 表面氧化的水平，以及测量通道迁移率和界面态密度。为了评估所有三种沉积技术的能力，Miyake 和他的同事将氧化剂气体应用于外延层；生产横向 MOSFETs 以评估通道迁移率；并制造 n 型 MOS 电容器，以确定界面态密度 (见图)。X 射线光电子能谱分析提供了在不同氧化条件下各种样品氧化比率的见解。

对于所有三种生长技术，长时间的氧化会增加氧化比率。这个比率也在 ALD 样品中通过从

H_2O 移动到 O_3 ，然后到 O_2 等离子体而增加。通过雾 CVD 生产的样品的氧化比率低于使用相同氧化时间和相同的氧化剂气体 O_3 的 ALD 生产的样品。团队将此归因于 O_3 浓度的变化、沉积设备中加热器配置的差异以及通过室内气体流量的变化。对横向 MOSFETs 的测量显示，阈值电压 (定义为电流为 $1 \times 10^{-8} \text{ A}$ 时的电压) 分别为等离子体增强 CVD 生长的 4.4 V，ALD 的 -9.0 V，以及雾 CVD 的 4.8 V。后者使用 O_3 的技术，导致了 $266 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的最高场迁移率——这是其他技术生产的 GaN MOSFETs 的两倍多。



来自 Mirise Technologies 和高知工业大学的研究人员生产了：(a) 用于氧化评估的外延层；(b) 用于确定沟道迁移率的横向 MOSFET；以及 (c) 用于找出界面态密度的 n 型 MOS 电容器。

通过对这些横向 MOSFETs 的界面进行横截面扫描透射显微镜检查，并应用电子能量损失光谱，发现在 ALD 生长的器件中， SiO_2 和 GaN 界面处的氮到镓比率降低，表明存在厚的 GaOx 。这种技术还揭示了使用 O_3 的雾 CVD 是抑制 GaOx 的有效 SiO_2 沉积方法。电容 - 电压曲线图提供了使用 O_3 的雾 CVD 生产的电容器界面态密度仅为 $8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 的值。相比之下，等离子体增强 CVD 和 ALD 生产的电容器的值分别为 $1.2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 和 $2.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。Miyake 表示，团队现在将把雾 CVD 应用于垂直 GaN MOSFETs 的制造。☞

参考文献

K. Ikeyamam et al. Appl. Phys. Express 17 064002 (2024)

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
CHInano 2024	第十四届中国国际纳米技术产业博览会 (纳博会®)	www.chinanosz.com	38
Evatec AG		www.evatecnet.com/cn	27
Park Systems		parksystems.cn/fx200	1
ABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	17
Riber		www.riber.com	IFC
2024 慕尼黑华南激光展		www.lasersouth.cn	5
2024 年深圳电子元器件及物料采购展览会		https://esshow.cn/	48

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

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

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

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)
floydc@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

China (中国)
Lisa Cheng (程丽娜)
lisac@actintl.com.hk
Tel: 86 185 7156 2977

Mini Xu (徐若男)
minix@actintl.com.hk
Tel: 86 187 7196 7314

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

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

Mandy Wu (吴漫)
mandyw@actintl.com.hk
Tel: 86 187 7196 7324

Grace Zhu (朱婉婷)
gracez@actintl.com.hk
Tel: 86 159 1532 6267

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

Taiwan, Singapore, Malaysia
(台湾, 新加坡, 马来西亚)
Floyd Chun (秦泽峰)
floydc@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

—◆ 线下 ◆—

化合物半导体&半导体芯科技 综合论坛

05月苏州 半导体先进技术创新发展和机遇大会

- 化合物半导体材料生长与设备技术 · 功率电子器件及应用 · 高功率电子器件可靠性和失效分析 · 超宽禁带器件:解决方案
- 先进封装工艺与键合技术 · 封装关键材料与创新

化合物半导体先进技术及应用大会

10月常州 化合物半导体先进技术及应用大会

- 化合物半导体材料生长与设备技术 · 功率电子器件及应用 · 光电子器件及应用 · 先进显示与照明取得的进展 · AI趋势下高速光互联演进
- 光子器件可靠性和失效分析 · 超快通信射频器件新应用

CHIP China晶芯研讨会

11月厦门 第二届-半导体先进封测产业技术创新大会

- TGV的封装工艺与技术 · IP/SoC/3D/异构集成 · 封装关键材料与创新 · 应用需求驱动下,先进封测发展进入快车道专场会议
- 系统级SiP芯片,物联网下一个竞争高地 · 赋能光电产业发展新高度

—◆ 线上 ◆—

化合物半导体先进技术及应用大会

确保SiC取得巨大成功

GaN功率应用,厚积薄发

MicroLED取得的进展

超宽禁带材料器件解决方案

光互联及光子集成电路

CHIP China晶芯研讨会

先进封装工艺与键合技术

封装关键材料与创新

IP/SoC/3D/异构集成

先进半导体材料和器件的可靠性和失效分析

芯片与器件的测试和可靠性验证

—◆ 定制专场论坛 ◆—

重点依据企业需求定制化会议主题,线上直播与线下执行双向选择,垂直听众定向邀约,充分发挥资源链接优势,突破原有格局,助力泛半导体产业客户实现多元化探索路径。

论坛优势:推介目的性强 会议听众垂直 议题内容聚焦 直击产品核心



线下会议



线上会议

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 5x200 mm (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

