

化合物半导体

CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA

2024年 12月 / 2025年 1月

块状 AlN 的有效扩大



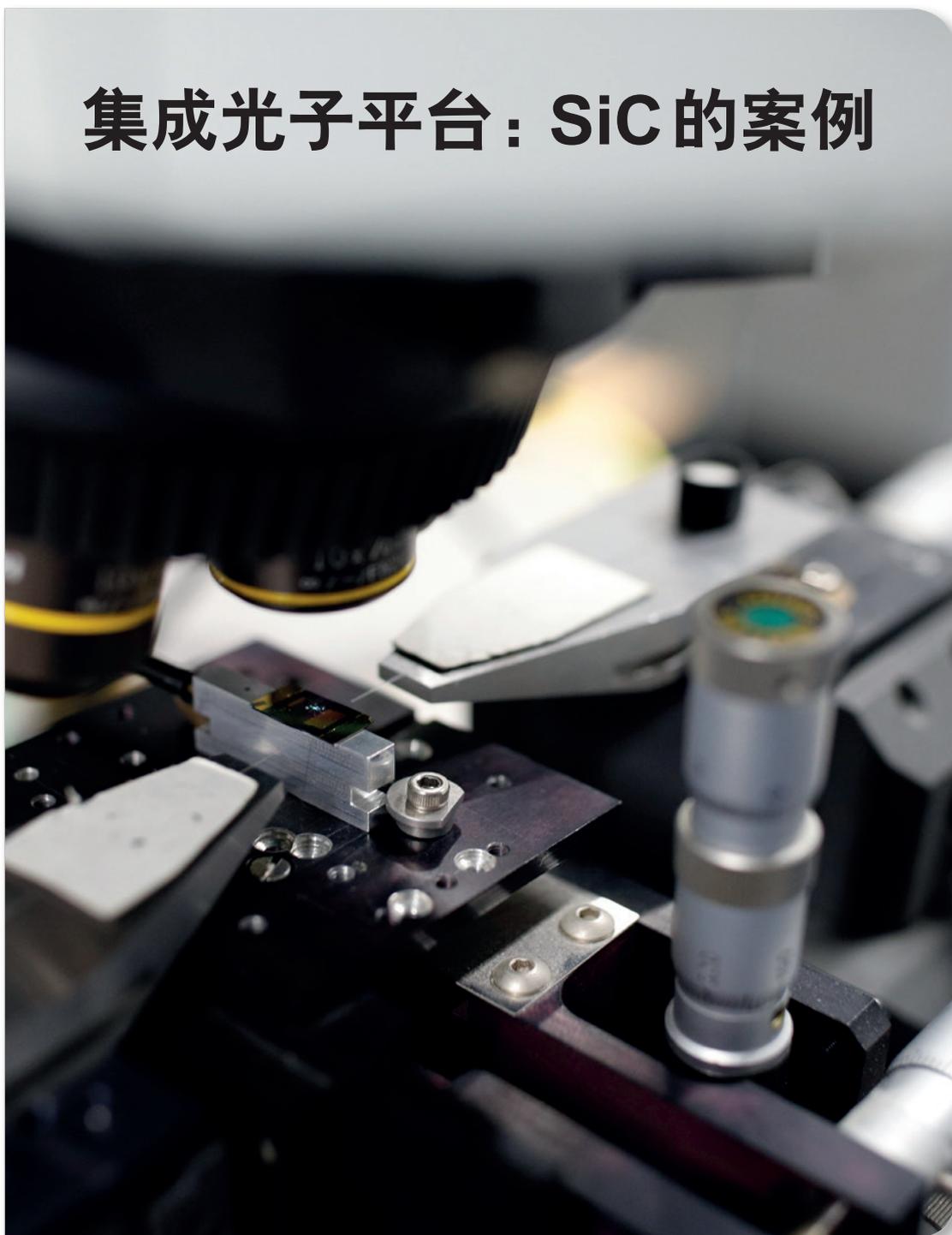
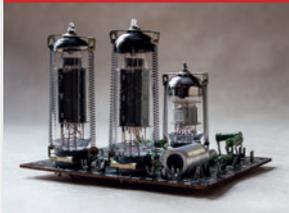
氮化物的近室温外延技术



当失败不再是一种选择



III族氮化物场致发射真空晶体管



集成光子平台：SiC 的案例

ACT INTERNATIONAL



ISSN 2789-2735

www.compoundsemiconductorchina.net

深得 MBE 精髓

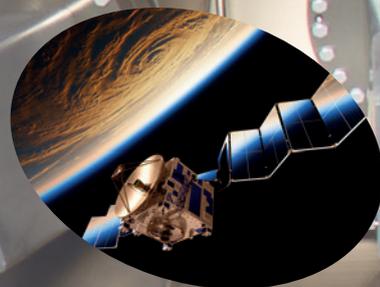
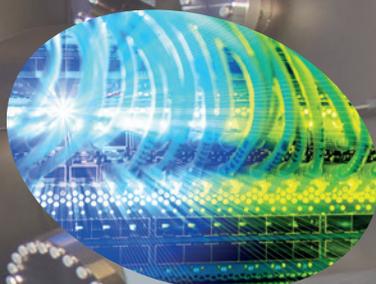
研发及生产设备全球市场最大拥有者

MBE不仅可以让我们去发现，更可以让我们去实现。

*Riber*是MBE设备和相关服务的世界主要的供应商。

拥有30年的经验，设计与客户密切相关的系统是公司的核心理念。*Riber*发明并设计的主要功能目前在所有MBE系统中都能找到。

*Riber*在MBE技术的发展中起着关键作用，为客户提供从设备配置到外延生长的整套解决方案。



RIBER

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com
www.riber.com

国际知名媒体授权 报道全球高新科技信息



免费
索阅



服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体
半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的专业读者及与会者

品牌会议



国际代理

CQ Publishing (Japan)

Chomdan (Korea)

Pan Global (Europe)

Endeavor Business Media (USA)

Horizon House (USA)

Angel Business Communications (UK)

封面故事 Cover Story

18 集成光子平台：SiC的案例
Integrated photonic platforms: The case for SiC

SiC集成光子的潜力开始被释放，这得益于这种材料独特的光子特性和高质量外延生长技术的发展。现代微电子学中最成熟和应用最广泛的半导体——硅，是现代微电子学的支柱。在过去的50年或更长时间内，它一直在推动人类生活的进步，通过遵循摩尔定律，利用平面处理技术，计算能力得到了提升。然而，器件尺寸的缩小不能永远持续下去。线宽现在已接近物理极限，这使得这项技术的前沿人士开始寻找前进的道路，以解决即将到来的瓶颈问题。一个有希望的选择是转向集成光子学。

- 丹麦技术大学的Haiyan Ou

编者话 Editor's Note

04 SiC功率器件模块封装技术：超级英雄的战衣
SiC Power Device Module Packaging Technology: The Superhero's Battle Suit

- 陆敏

业界动态 Industry

06 天科合达8英寸SiC衬底二期项目开工
Tankblue's 8-inch SiC substrate phase II project has commenced construction

06 SEMI中国化合物半导体标准技术委员会2024冬季会议在无锡顺利召开
The SEMI China Compound Semiconductor Standard Technology Committee's 2024 Winter Meeting was successfully held in Wuxi

07 随着首席执行官的卸任，Wolfspeed将发生巨大变化
All change at Wolfspeed as CEO steps down

07 总投资超200亿，长飞先进武汉基地SiC项目首批设备搬入
The total investment exceeds 20 billion yuan, and the first batch of equipment for Changfei Advanced's Wuhan base SiC project has been moved in.

08 GaN和SiC“首次”用于数据中心PSU
GaN and SiC 'first' for data centre PSU

08 安世半导体与KOSTAL就车规级宽禁带器件展开合作
Nexperia and KOSTAL partner on automotive-grade wide-bandgap devices

09 X-FAB与SMART Photonics就微印刷展开合作
X-FAB and SMART Photonics partner on micro-printing

09 西门子推出基于SiC的电子启动器
Siemens launches SiC-based e-Starter

九峰山实验室专栏 JFS Laboratory Column

10 高性能硅基集成无源器件技术
High-performance silicon-based integrated passive device technology

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



扫一扫
免费下载电子书

技术 Technology

- 23 块状AlN的有效扩大
Efficient enlargement of bulk AlN
- Carsten Hartmann和Thomas Straubinger, 莱布尼茨晶体生长技术研究所
- 27 氮化物的近室温外延技术
The near room temperature epitaxy of nitrides
- 吕文来, 王艳会, 林茹, 谢斌平, 费勉仪器科技(上海)有限公司
- 31 当失败不再是一种选择
When failure isn't an option
- Nick Mcneal, Thyag Sadasiwan和Pragati Verma, Greene Tweed
- 35 III族氮化物场致发射真空晶体管
III-Nitride field-emission vacuum transistors
- Pao-Chuan Shih和Tomás Palacios, 麻省理工学院

科技前沿 Research Review

- 40 在SOI上打印高速调制器
Printing high-speed modulators on SOI
- 41 调整GaN MOSFET的导通电阻
Trimming the on-resistance of GaN MOSFETs
- 42 垂直范德瓦尔斯集成p-W0.09Re0.91S2/GaN异质结用于超高探测率紫外图像传感
Vertical van der Waals Integrated p-W0.09Re0.91S2/GaN Heterojunction for Ultra-High Detectivity UV Image Sensing
- 44 广告索引 Advertisement Index

《化合物半导体》编委会 (排名不分先后)

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

专业半导体设备制造商

专注于化合物半导体、Si材料、集成电路(IC)微机电系统(MEMS)等领域

- 槽式湿法制程设备**
用于批量多尺寸晶圆片湿法清洗工艺, 清洗过程将晶圆直接放入工艺槽内, 无需片盒, 进一步提高晶圆的清洗效果。
- 单片湿法制程设备**
主要用于多尺寸SiC等化合物半导体晶片、Si晶片等材料的单片腐蚀、清洗、刷洗工艺。
- 全自动晶圆倒角机**
采用日本先进技术, 主要用于6"、8" SiC等化合物半导体晶圆片、Si晶圆片等的外圆倒角, 利用精密砂轮对晶圆片进行研磨整形加工。
- CDS化学供给系统**
为清洗设备供给化学药液的专业系统, 能够有效防止药液泄漏和环境污染。

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: 北京市经济技术开发区科创十三街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)
(华南区) 负责人: 139 1029 7918
(华东/海外区) 负责人: 130 5158 6635
(华中区) 负责人: 139 1127 1076
(西南/西北区) 负责人: 180 1536 7016
(京津冀) 负责人: 193 2206 6460
(MEMS专区/山东区) 负责人: 130 5158 6631
(技术支持) 负责人: 180 1239 7806
郭生钢: 139 1127 9276

公众号
官网

SiC 功率器件模块封装技术： 超级英雄的战衣

想象一下，如果超级英雄没有合适的战衣，他们的能力可能无法完全发挥，甚至可能会受到伤害。同样，SiC 功率器件模块也需要一种特殊的“战衣”——封装技术，来保护它们并充分发挥其超能力。SiC 功率器件就像是电子世界中的超级英雄，它们能够在极端的条件下工作：高温、高压、高频和高功率。这些特性使得 SiC 器件在电动汽车、光伏、数据中心、家电产品和工业控制等领域有着广泛的应用前景。然而，就像老旧的盔甲无法适应超级英雄的高速移动一样，传统的封装技术也无法满足 SiC 器件的需求。SiC 器件的开关速度极快，这导致在开关过程中会产生极高的电压和电流变化率。这些变化率在传统封装中会产生较大的电压过冲和振荡，增加器件的电压应力和损耗，甚至引发电磁干扰问题。为了解决这些问题，需要不断开发创新型的封装技术，它们就像是 SiC 器件量身定做的战衣，让这些超级英雄能够更好地发挥其能力。

低寄生电感封装技术，其目标是减少电流回路的面积，从而降低杂散电感。这就像是给超级英雄设计了一套流线型的战衣，减少了空气阻力，让它能够更灵活地行动。如单管翻转贴片封装，这种技术借鉴了 BGA 封装技术，通过金属连接件将芯片背部电极翻转到与正面电极相同的平面位置。这样做的好处是体积可减小了十倍以上，导通电阻可减小 20% 以上，就像是超级英雄的战衣变得更加轻便和高效。如 DBC+PCB 混合封装，这种技术将 DBC 工艺和 PCB 板相结合，利用金属键合线将芯片上表面连接到 PCB 板。这样做可以控制换流回路在 PCB 层间，大大减小了电流回路面积，进而减小杂散电感参数。如芯片正面平面互连封装，这种技术使用平面互连的连接方式实现芯片正面的连接，不仅可以减小电流回路，进而减小杂散电感、电阻，还拥有更出色的温度循环特性以及可靠性。三维 (3D) 封装技术，利用了 SiC 功率器件垂直型的结构特点，将开关桥臂的下管直接叠在上管之上，消除了桥臂中点的多余布线，可将回路寄生电感降至 1nH 以下。这就像是给超级英雄的战衣增加了一个立体的战斗平台，消除了多余的动作，直接、高效。

高温封装技术，就像是给超级英雄的战衣增加了耐高温的材质，让它能够在极端的环境下工作。如铜线/带替代铝线/带，消除了键合线与 DBC 铜层之间的热膨胀系数差异，具有更大的截流能力、更好的功率循环以及散热能力。烧结银连接技术，凭借其极高的热导率，低烧结温度，高熔点等优势，成为 SiC 器件的新型连接方法。AlN、Si₃N₄ 是两种适合碳化硅器件高温工作的绝缘材料。双面散热封装技术，就像是给超级英雄的战衣装上了双引擎，让它能够从两面散热，保持冷静。这种封装技术通过上下表面同时散热，减少了热量积聚，就像是超级英雄在战斗中始终保持冷静一样。相较于直接改变功率模块的整体封装结构或减少封装层数的方案，通过引入热扩散装置、对流换热技术和相变散热技术等先进热管理方法，可在尽可能保持现存封装结构的基础上，为高热流密度碳化硅功率芯片提供可靠冷却。

多功能集成封装技术，就像是给超级英雄的战衣增加了多功能模块，比如集成了驱动芯片、保护电路、传感器等，让超级英雄在战斗中更加智能和强大。三菱、英飞凌等公司均提出了 SiC 智能功率模块 (IPM)，将驱动芯片以及相关保护电路集成到模块内部，并用于家电等设备当中。另外温度、电流传感器集成、微通道散热集成及 EMI 滤波器集成等均有运用到碳化硅封装设计当中。

SiC 功率器件模块封装技术作为超级英雄的战衣，这种技术的发展，不仅仅是对材料科学的挑战，也是对工程设计和创新思维的考验。随着技术的不断进步，我们有理由相信，SiC 功率器件模块封装技术将在未来发挥更加重要的作用，推动 SiC 电力电子技术迈向新的高度。



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

汽车半导体 – SiC

实现 零缺陷策略的需求

掌握 车规级芯片的质量与可靠性

运用 8 Series的高产能及先进深度学习技术与
I-PAT®筛选方案



8 Series 图形晶圆检测系统

For more information on
8913, 8920, 8930 and 8935,
scan here



天科合达 8 英寸 SiC 衬底二期项目开工

据天科合达官微消息，11 月 12 日，北京天科合达半导体股份有限公司（以下简称“天科合达”）“第三代半导体碳化硅衬底产业化基地建设二期项目”开工仪式在北京顺利举行。

据悉，为把握行业发展先机，加大布局优势产能，天科合达启动了二期扩产项目。该扩产项目旨在打造行业内领先的智能化生产线，量产 8 英寸碳化硅衬底。该项目全面投产后，天科合达的产能将得到显著提升，进一步巩固其在碳化

硅衬底市场的领先地位，不仅将推动公司在碳化硅衬底材料领域的技术进步和产能扩张，也能通过优化生产流程和提高效率，有效降低成本。

仪式上，总经理杨建表示，天科合达核心产品为 6-8 英寸碳化硅衬底，技术参数指标与国际龙头企业相当，产品质量达到国际领先水平，已向国内外多家企业及科研机构批量供应，为国产碳化硅材料在功率器件、微波射频器件等领域的应用奠定了基础。CS

SEMI 中国化合物半导体标准技术委员会 2024 冬季会议在无锡顺利召开

由 SEMI 中国主办，SEMILAB 承办及赞助，TUV 莱茵、北方华创、盖泽半导体、大族半导体、南砂晶圆、中机新材料、晶瑞电子赞助的 SEMI 中国化合物半导体标准技术委员会冬季会议于 2024 年 12 月 5 日在无锡太湖新城洲际酒店顺利召开。



本次会议上，华灿光电、株洲中车、SEMILAB、北方华创、中图半导体、昂坤视觉、晶湛半导体、长光华芯、苏州能讯、润新微电子、中科半导体、连科半导体、拓思精工、哈工大、浙江大学、政应上海、皓天新材料、瀚天天成、常州臻晶、Monocrystal 等共计 40 余家企业及科研院所的近 60 余位委员及专家代表参加了会议。

会议过程中，经委员会表决，批准由常州臻晶主导的 Doc.6769《碳化硅晶片残余应力光弹效应测试方法》进入 2025 Cycle 2 全球投票。另外，经委员会审核，批准了由中图半导体主导的《用于高亮度 LED 的 GaN 基外延生长的复合材料衬底规范》，以及由连科半导体主导的《SiC 单晶用高纯碳化硅粉体规范》正式新建立项。



本次会议上，经委员会的审议和投票，北京特思迪半导体设备有限公司蒋继乐、北京通美晶体技术股份有限公司任殿胜成功当选 SEMI 中国化合物半导体标准技术委员会核心委员。政应上海科技有限公司魏明德、浙江大学黄宏嘉到期成功续任。CS

随着首席执行官的卸任，Wolfspeed 将发生巨大变化

Wolfspeed 宣布，领导公司向纯 SiC 公司转型的 Gregg Lowe 将于本月卸任总裁兼首席执行官以及董事会成员的职务。



与此同时，董事长 Thomas Werner 已被任命为执行董事长，同时董事会正在物色 Wolfspeed 的下一任首席执行官。

Thomas Werner 表示：“我谨代表董事会全体成员感谢 Gregg Lowe 为 Wolfspeed 提供的服务和做出的贡献。自 2017 年加入公司担任首席执行官以来，Gregg Lowe 带领我们转型为一家领先的纯 SiC 公司，为抓住未来的长期机遇做好了充分准备。董事会一直专注于推动长期价值，在 Wolfspeed 发展历程的这个拐点上，董事会一致认为现在是领导层过渡的合适时机。”

Thomas Werner 补充道：“展望未来，我们将坚定地致力于我们的关键战略举措，包括执行我们最近的 CHIPS PMT 协议中列出的里程碑，完成我们的重组举措以降低我们的盈亏平衡点并加快我们实现盈利的步伐，以及实现销售额的持续增长。相对于其战略价值而言，Wolfspeed 的价值被严重

低估，我将专注于推动公司的优先事项，并与董事会财务委员会合作，探索释放价值的方案。”

Gregg Lowe 表示：“我很荣幸有机会领导 Wolfspeed，并与这些才华横溢、兢兢业业的同事们一起工作。在过去的七年里，我们已将 Wolfspeed 转变为美国国内唯一一家纯粹的、垂直整合的 SiC 运营商，以充分利用市场对下一代半导体技术的结构性需求和长期需求。虽然仍有工作要做，但我坚信 Wolfspeed 将执行其战略重点，并在未来几年内扩大其在 SiC 领域的领先地位。”

Thomas Werner 将与 Wolfspeed 的高级领导团队、董事会、董事会运营委员会和财务委员会紧密合作，监督 Wolfspeed 战略的持续执行。在 Thomas Werner 被任命为执行董事长后，董事会成员 Stacy Smith 被任命为首席独立董事。

Thomas Werner 自 2006 年 3 月起担任董事会成员，自 2023 年 10 月起担任董事长。他自 2024 年 2 月起担任太阳能电池和太阳能板上市公司 SunPower Corporation 的执行董事长，并于 2024 年 2 月至 2024 年 8 月担任 SunPower 的首席执行官。Thomas Werner 曾于 2010 年 6 月至 2021 年 11 月担任 SunPower 公司的董事长，并于 2003 年 6 月至 2021 年 4 月担任其首席执行官。在加入 SunPower 之前，他于 2001 年 7 月至 2003 年 6 月担任 Cypress Semiconductor 旗下光学解决方案子公司 Silicon Light Machines Corporation 的首席执行官。更早之前，Thomas Werner 还曾担任网络解决方案公司 3Com Corporation 业务连接部的副总裁兼总经理。☑️

总投资超 200 亿，长飞先进武汉基地 SiC 项目首批设备搬入

据长飞先进官微消息，12 月 18 日，长飞先进武汉基地项目举行首批设备搬入仪式，标志着长飞先进武汉基地即将迈入工艺验证新阶段，全面投产正式进入倒计时。据悉，本次搬入的设备涵盖芯片制造各个环节，包括薄膜沉积、离子注入、光刻、刻蚀等，较原定设备搬入时间大幅提前。长飞先进总裁陈重国表示，首批设备的进驻，标志着武汉基地项目正式进入产能建设新阶段，接下来还将面临工艺验证、产品通线等更多、更难的挑战。目前，长飞先进武汉基地项目正加快推进建设并对设备进行安装调试，预计 2025 年 5 月实现量产通线。据了解，长飞先进武汉基地聚焦第三代半导体功率器件研发与生产，总投资预计超过 200 亿元，其中项目一期总投资 80 亿元，规划年产 36 万片 6 英寸碳化硅晶圆。☑️



GaN 和 SiC “首次” 用于数据中心 PSU

纳微半导体宣布推出全球首款 8.5kW 电源供应单元 (PSU)，该 PSU 采用 GaN 和 SiC 技术，效率高达 98%，适用于下一代人工智能数据中心和超大规模数据中心。

这款经过人工智能优化的 54V 输出 PSU 符合开放计算项目 (OCP) 和开放机架 v3 (ORv3) 规范，并使用大功率 GaNSafe 和第三代快速 SiC MOSFET，配置为三相交错 PFC 和 LLC 拓扑。

纳微表示，该 PSU 的 PFC 和 LLC 均采用三相拓扑（对比同类 PSU 采用的两相拓扑），实现了业界最低的纹波电流和电磁干扰。此外，与最接近的竞争系统相比，该 PSU 将 GaN 和 SiC 器件的数量减少了 25%，从而降低了总体成本。

该 PSU 的输入电压范围为 180 至 264 Vac，待机输出电压为 12 V，工作温度范围为 -5℃ 至 45℃。8.5 kW 时的保持时间为 10 ms，通过延长器可达到 20 ms。

三相 LLC 拓扑由大功率 GaNSafe 实现，它集成了控制、驱动、传感和关键保护功能。GaNSafe 具有短路保护（最大延迟为 350ns），所有引脚上都有 2kV ESD 保护，消除了负栅极驱动，并具有可编程的压摆率控制。所有这些功能均通过四引脚控制，因此可以将封装看作分立 GaN FET，而无需 VCC 引脚。

三相交错连续电流模式 (CCM) TP-PFC 由采用“沟槽



纳微发布效率高达98%的8.5kW人工智能数据中心PSU

辅助平面”技术的第三代快速 SiC MOSFET 供电。

纳微首席执行官兼联合创始人 Gene Sheridan 表示：“这一完整的 GaN 和 SiC 宽带隙解决方案使纳微的人工智能电源路线图得以延续，实现了 8.5kW 的功率，并计划在短期内将功率提升至 12kW 及以上。全球多达 95% 的数据中心无法支持运行英伟达最新 Blackwell GPU 的服务器的功率需求，这凸显了生态系统的准备不足。这款 PSU 设计直接解决了人工智能数据中心和超大规模数据中心面临的这些挑战。” 

安世半导体与 KOSTAL 就车规级宽禁带器件展开合作

荷兰奈梅亨 (Nijmegen) 的分立器件设计商和制造商安世半导体（在德国汉堡和英国曼彻斯特的 Hazel Grove 设有晶圆厂）与德国吕登沙伊德 (Lüdenscheid) 的汽车供应商 KOSTAL 建立了战略合作伙伴关系，此举将使安世半导体能够生产更符合汽车应用严格要求的宽禁带 (WBG) 器件。安世半导体将供应、开发并制造宽禁带功率电子器件，而 Kostal 将对这些器件进行设计导入和验证。

除了成熟的硅基产品组合，安世半导体还提供一系列宽禁带半导体技术，包括碳化硅 (SiC) 二极管和 MOSFET，以及 GaN E-mode 和 D-mode 器件。

此次合作的初期重点是开发用于电动汽车 (EV) 车载充电器 (OBC) 的顶部散热 (TSC) QDPAK 封装 SiC MOSFET。全球近一半的汽车配备了 KOSTAL 的产品，其中包括 450 多万个车载充电器。

安世半导体 SiC 分立元件和模块资深总监兼负责人 Katrin Feurle 表示：“多年来，安世半导体一直是 KOSTAL

值得信赖的硅元件供应商，我们非常高兴能与 KOSTAL 建立战略合作伙伴关系，并将合作扩展到宽禁带器件领域。”她补充道：“KOSTAL 将协助在其充电应用中验证我们的器件，从而为我们提供宝贵的‘真实世界’数据，使我们能够进一步提高器件的性能。”

KOSTAL 集团采购与供应链执行副总裁 Georg Mohr 博士表示：“KOSTAL 正在扩展战略性 SiC 供应组合，以支持我们面向 2030 年的发展道路，尤其是针对普通路面和越野路面的电动汽车应用。”他补充道：“这一战略合作伙伴关系加强了我们长期的客户 - 供应商关系，KOSTAL 将充分利用安世半导体在宽禁带技术方面的专业知识，特别是 SiC MOSFET，我们相信这些器件是市场上数一数二的。通过分享我们从实际电动汽车充电应用中获得的见解，我们的目标是为开发更加优化和量身定制的 SiC 器件做出贡献，以满足我们下一代解决方案的特定需求。” 

X-FAB 与 SMART Photonics 就微印刷展开合作

专业代工厂 X-FAB 和 InP 光子代工厂 SMART Photonics 宣布展开合作，将 X-FAB 的硅光子平台与 SMART Photonics 的 InP 小芯片相集成。

他们的目标是利用从 X-Celeprint 获得授权的微转印 (MTP) 实现异质集成，从而为数据通信应用和电信应用带来新的功能。

InP 技术支持超过 120 GHz 的调制器带宽，是下一代多太比特电信标准和数据通信标准的理想解决方案，可将收发器速度提升到太比特水平。相比之下，硅光子技术在 70 GHz 左右就达到性能上限。此次合作旨在提供可扩展的大批量解决方案，将两种技术的优点结合起来。

通过共同优化硅光子、InP、微转印等技术以满足客户需求，此次合作将实现新的功能并提高系统性能，同时通过放宽光子封装要求来降低集成成本。

微转印技术可将各种材料系统小芯片灵活地集成到产品设计中，从而为系统设计师和产品设计师提供广泛的自由度。

SMART Photonics 首席执行官 Johan Feenstra 解释道：“由于人工智能和数据传输的发展，对集成光子学的需求迅速增加，我们的联合解决方案将在降低总体功耗和环境足迹的同时，实现快得多的数据传输速率。”

X-FAB 首席执行官 Rudi De Winter 补充道：“通过异质集成，我们将 InP 领域和硅光子领域的精华结合在一起。这



两家公司将利用 X-Celeprint 的微转印来制造集成硅光子和 InP 的下一代收发器

将使我们的客户能够开发创新的解决方案，以应对脱碳等当代社会挑战。这也是建立强大欧洲价值链的绝佳机会。”

此次合作基于 PhotonixFAB 欧盟资助项目，该项目旨在为 SOI 和 SiN 硅光子学、微转印就绪的 InP 小芯片、小芯片的微转印实现可扩展的大批量制造提供一条道路。

X-FAB 与 SMART Photonics 近期签署了一份谅解备忘录，正式确立双方的合作关系。双方的目标是到 2026 年为领先客户提供工业原型支持，到 2027 年为风险生产做好准备。早期客户参与可在持续进行的 PhotonixFAB 项目框架内得到支持。OSc

西门子推出基于 SiC 的电子启动器

西门子智能基础设施集团 (Siemens Smart Infrastructure) 推出了首款采用半导体技术的全电子启动器。与传统的断路器或保险丝相比，基于 SiC MOSFET 的 SIMATIC ET 200SP



短路保护速度比传统技术快1000倍

提供的短路保护快 1000 倍 (其关断时间小于 4 μ s)。

西门子智能基础设施集团电气产品首席执行官 Andreas Matthé 表示：“西门子是首家推出完全集成到 ET 200SP 和 TIA Portal 中的全电子启动器的制造商，专门应对工业领域的两大挑战：容易发生短路的应用、启动高效电机时的高电流峰值。”

高浪涌电流是高效电机 (例如能效等级为 IE3 和 IE4 的电机) 的典型特征，可能导致保护装置意外跳闸。西门子表示，SIMATIC ET 200SP 电子启动器的相位优化开关和智能启动功能可以中和浪涌电流，显著降低启动电流，从而减少启动期间电网承受的电力负荷。此外，直接启动时产生的扭矩浪涌也降到了最低，从而显著减少了机械磨损。这意味着所需的维护工作更少——这对于开关频率较高的应用来说是一项宝贵的优势。OSc

高性能硅基集成无源器件技术

作者：吴畅，刘捷龙，刘安，郭涛，吴佳燕，王凯，曾宇磊，王瑜，李程程，张涛，熊鑫，周瑞，何琦，邢绍琨，刘钊，黄镇，丁琪超

引言

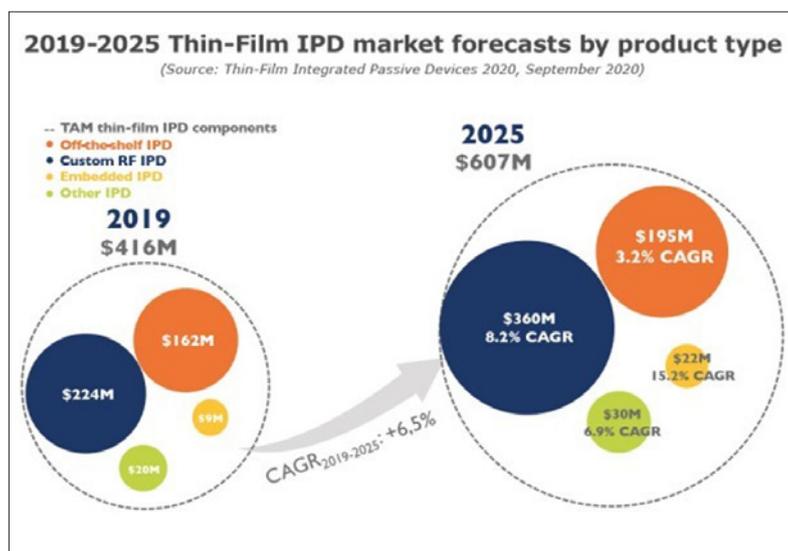
近年来，电子信息系统正朝着小型化、多功能和智能化的方向迅速发展，以满足日益复杂的功能叠加和电磁环境对其提出的严苛要求。随着半导体工艺技术的不断进步，电子信息系统中的有源器件及电路，通过特征尺寸的等比例缩小，获得了集成度和参数性能的持续提升。与之相匹配的，无源器件的需求量也迅速增加。而无源器件仍面临着难以实现高质量集成的问题，因此占据了较大面积，以至于成为制约电子信息系统及设备发展的主要因素^[1-4]。

无源器件是不需要外加电源的条件下，就可以显示其特性的一类器件，在微波技术中占有非常重要的地位。按照类型划分主要包括电阻类、电感类和电容类器件；按照功能划分则包括电阻，电容，电感，转换器，渐变器，匹配网络，谐振器，滤波器，混频器和开关等。无源器件几乎占据着超过 80% 的系统电路板面积以及超过 70% 的系统

成本。并且随着有源部分的集成度的大幅提升和成本的不断下降，无源部分的面积和成本占比问题，还将进一步加剧。

为了突破这一瓶颈，集成无源器件 (Integrated Passive Device, IPD) 技术应运而生，成为解决无源系统高性能、小型化和低成本问题的关键技术。IPD 技术通过“一次流片”即可成功将多个无源器件 (如电阻器、电感器和电容器等) 集成，可以实现模块化的封装，节省了大量的电路表面积，提高了封装密度，同时大幅降低了元件之间的引线互连，减小了寄生效应，提高了 RF 性能并降低了成本。得益于 IPD 技术的应用，无源产品相较于传统技术，在功耗、体积、性能等方面均表现出显著优势。因此 IPD 技术在通信、航空航天、消费电子、汽车电子、工业控制等领域具有很大的市场潜力，将广泛应用于 5G 通信系统、雷达传感器、数据中心设备等^{[5],[6]}。

尽管薄膜集成无源器件 (IPD) 进入市场较晚，但在过去十年中，它已经成功渗透了不少无源应用，并找到了增长动力。现在显示出强劲增长的主要市场是射频模块中的定制化射频 IPD，尤其是针对 5G 应用，它包宽带滤波器的应用和用于阻抗匹配的离散器件电路。从 2019 年到 2025 年，该市场的复合年增长率 (CAGR) 预计将达到 8.2%。到 2025 年，该市场总值将超过 3.6 亿美元。另一个高价值市场是用于屏蔽电磁干扰 (EMI) 的货架 IPD，它适用于各种严苛的应用以及基础的射频功能，例如巴伦和滤波器等。如 Yole Développement 的《IPD2020 年报告》所述，到 2025 年，该市场的价值将达到 1.95 亿美元，从 2019 到 2025 年的复合年增长率为 3.15%。



IPD 优势及挑战

(1) IPD 技术介绍

集成无源器件 (IPD) 技术是一种可以集成多种电子功能, 将多个无源器件 (如电阻器、电感器和电容器等) 集成在一个小型封装中的技术。该技术可以取代

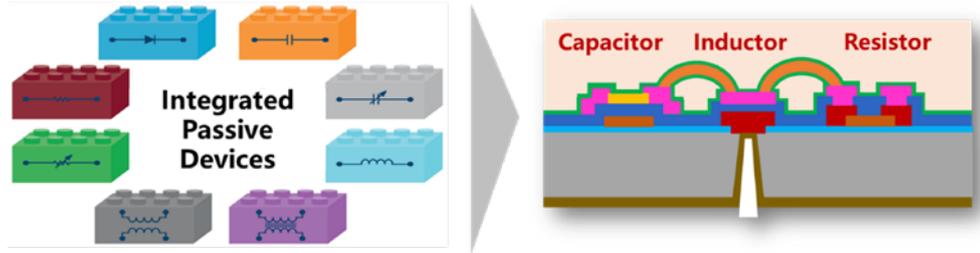


图2: 集成无源器件技术 (IPD)

体积庞大的分立无源元件, 进一步加大系统的集成度。IPD 将电容器、电阻器和电感器三大无源元件像搭积木一样, 在同一衬底上使之成为一个独立的封装模块。IPD 在滤波器、双工器、功分器、衰减器、耦合器等无源器件上应用越来越广泛, 涉及到智能手机、汽车电子、智能可穿戴设备、高端通信等多个领域。

(2) IPD 的优势

集成无源器件技术是随着电子设备不断小型化而发展起来的一种新技术, 在 IPD 技术发展之前无源器件都是分立的, 而采用 IPD 技术后, 元件不再大量贴装于电路表面, 可以实现模块化的封装, 节省了大量的电路表面积, 提高了封装密度。图 3 展示了传统分立无源器件与封装 IPD 的尺寸大小, 可以看出, IPD 在尺寸上具有绝对优势。

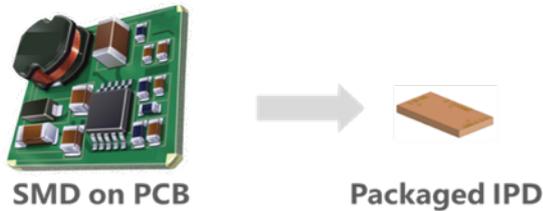


图3: 分立无源器件与集成无源器件尺寸对比

同时, IPD 技术由于大幅降低了元件之间的引线互连, 寄生效应得以大大降低, 由此达到了提高 RF 性能并降低成

本的效果。这里对比了 IPD 相较于分立器件及厚膜的 LTCC 技术, 可以看到无论是厚度、集成度、灵活性、性能以及集成匹配度上, IPD 技术都表现出了明显的优势, 因此 IPD 技术已经被广泛使用于包括射频、数字及混合电路在内的多中系统电路中。

表1: IPD与其他无源器件工艺的性能比较

	IPD	LTCC	Discretes
厚度	薄	较薄	厚
集成度	好	较好	差
灵活度	较好	中	好
体积	好	中	差
性能	好	中	差
标准化	中	好	好
可集成度	好	中	差
总结	★★★	★★	★

(3) IPD 的分类

IPD 的衬底种类繁多, 包括玻璃、GaAs、Si、SOI 等。由于 Si 衬底成熟稳定, 有大尺寸、低成本且与 CMOS 工艺兼容的优势, 在 ESD/EM 和数字混合领域基本被硅衬底垄断。在射频市场, 玻璃衬底及砷化镓等衬底有射频损耗低的优点, 玻璃基板具有低介电损耗、高热稳定性、高电阻率、可调热膨胀系数等优势, 可进一步提高无源器件的性能和集成度。GaAs 凭借更小的尺寸, 以及高频率下的线性度和噪声方面

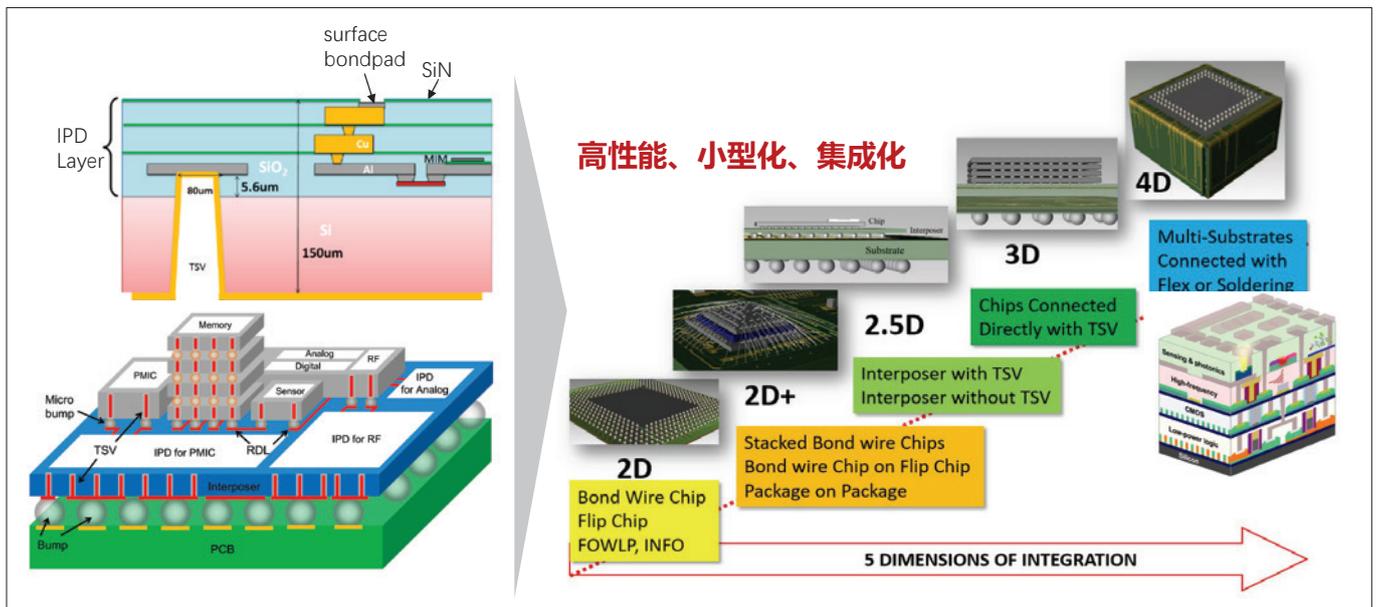


图4: 硅基IPD的优势

有较大的优势。硅衬底在先进封装上的优势使得它的市场份额将逐步向砷化镓等衬底渗透，在射频领域应用的硅基 IPD 将是未来的发展方向。

(4) 硅基 IPD 的优势

硅基 IPD 最大的优势是与大尺寸标准 CMOS 工艺相兼容，可以充分利用硅基半导体的高加工精度、高集成度、大尺寸。同时基于硅通孔 (Through-Silicon Via, TSV) 工艺助力 2.5D/3D 先进封装，将射频 IPD 芯片与存储、传感等芯片实现晶圆级三维堆叠和无引线键合，为多功能、一体化的系统级封装提供一条标准化方案。未来芯片朝着高性能小型化和集成化方向发展，必须要用到 TSV 工艺。结合 TSV 工艺的硅基 IPD 相比于其它衬底的 IPD 将表现出非常大的优势^{[7],[8]}。同样硅基 IPD 也面临一些挑战，主要是技术要求高、受到材料和工艺限制等。技术要求高体现在硅基 IPD 的制造需要高精度的微加工技术，包括光刻、蚀刻等工艺；受到材料和工艺的限制体现在硅基材料的特性限制了某些高频应用场景，无法达到理想的性能。

九峰山实验室硅基 IPD_PDK

在系统小型化的趋势下，九峰山实验室也积极开发新的 IPD 解决方案，以适配 IPD 的增长和 5G 新机遇。基于自身工艺平台和自研 IPD 工艺 Flow，通过开发先进无源器件工艺，九峰山实验室实现了 6 英寸高性能集成无源器件。如图 5 所示，主要包括电阻、电容、圆形电感、方形电感等器件。同时，实验室采用精确的建模技术和规范化的 PDK 设计流程，为设计者提供高性能、小型化、低成本的无源器件及电路解决方案。

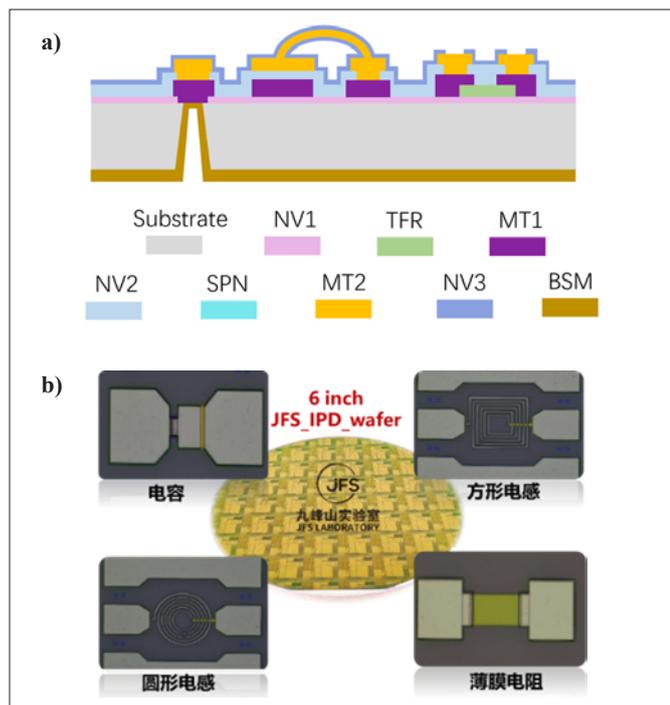


图5：九峰山实验室IPD。(a) IPD工艺flow；(b) IPD主要器件及wafer。

九峰山实验室所开发的集成无源器件工艺，具有两层走线金属、低寄生背孔工艺和空气桥工艺，可支撑包括 ESD/EMI 领域、数模混合电路领域及射频电路领域中的匹配电路、功分器/合路器、滤波器、均衡器、巴伦等的设计实现。

(1) 性能表现

九峰山实验室开发的 IPD_PDK 中包含电感、电阻、电容和传输线等多种无源器件，可支撑实现滤波器、巴伦、功分器等多种高性能无源电路。

PDK 中的电感包含圆形和方形两种平面螺旋电感，在多个尺寸参数上可缩放，能满足不同的电路设计需求。硅基 IPD 所采用的衬底为高阻硅，由于电阻率相比于砷化镓和碳化硅更低，衬底的损耗更大，因此，硅基电感的品质因子 Q 值往往不高。针对硅衬底存在的损耗大导致器件 Q 值较低的难题，我们通过电感线圈金属跨线的空气桥设计，以及介质和衬底的工艺优化，可进一步提升电感的品质因子 Q 值。对比发现，相同尺寸参数下 Q 值已经和砷化镓衬底相当，且谐振频率更高。

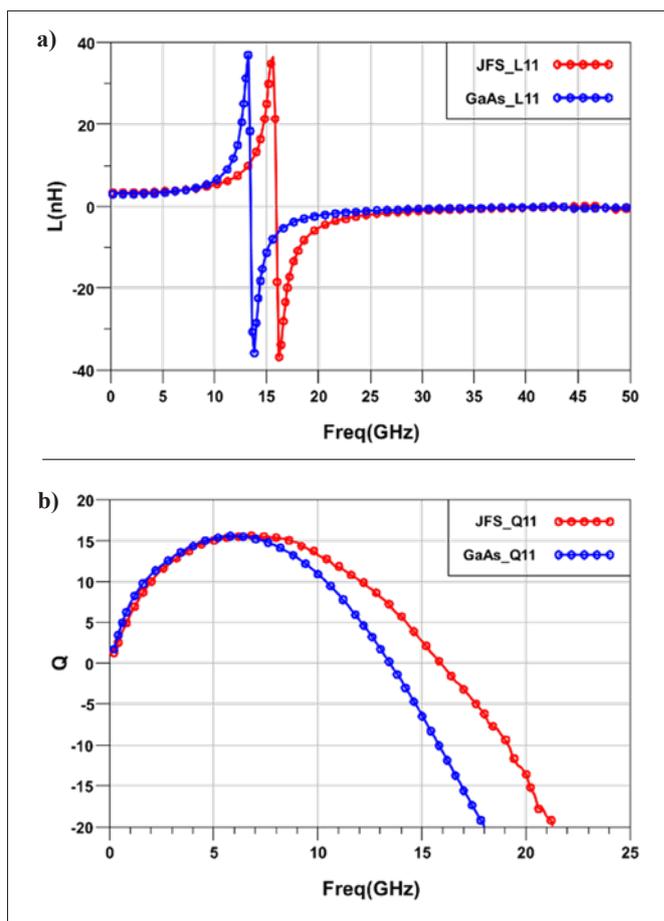


图6：相同尺寸电感不同衬底对比。(a) L值对比；(b) Q值对比。

MIM 电容的单位面积容值达到 445 pF/mm²，可实现更小面积下的大电容设计，节省芯片面积。这主要得益于电容金属基板间介质层的工艺和参数优化。较大的单位面积容值也意味着较小的介质层厚度，这对工艺成膜的要求更高，也

可能会导致更小的击穿电压。我们基于电容边缘空气桥设计，电容的击穿电压达到 100V 以上，可满足大电压的使用需求。

薄膜电阻的方阻接近标准的 50 Ω/sq，其主要材料 TaN 在工艺成膜时具有良好的膜厚均一性，不同尺寸电阻的方阻也能保持较好的稳定性。薄膜电阻的长宽比可做到 100:1，有较大的阻值可调范围。此外，薄膜电阻的温度系数约为 -126 ppm/°C，温度变化导致的阻值变化较小，在实际使用中也能保持良好的稳定性和可靠性。

表2: 硅基IPD器件性能参数

性能参数	数值	单位
Rs_TFR	50	Ω/sq
TCR_TFR	-126	ppm/°C
Cap_density	445	pF/mm ²
BV_Cap	>100	V
L_Ind (Nt=5.5)	3.41	nH@0.2GHz
Q_Ind (Nt=5.5)	15.59	@6.4GHz

基于九峰山实验室工艺平台开发的硅基 IPD 器件，在金属的方阻、电阻的温度系数和电容的击穿电压等参数上均表现出优异的性能。IPD 器件所使用的金属膜层电阻率低，且采用双层金属设计，可进一步减小传输损耗。金属层 1 (MT1) 的厚度约为 1 μm，方阻约为 0.023 Ω/sq，金属层 2 (MT2) 的厚度约为 3 μm，方阻约为 0.008 Ω/sq，传输损耗低。

表3: 不同PDK金属方阻对比

金属层	JFS IPD		商用PDK A		商用PDK B	
	厚度 (um)	方阻 (Ω/sq)	厚度 (um)	方阻 (Ω/sq)	厚度 (um)	方阻 (Ω/sq)
MT1	1	0.023	1	0.027	1	0.025
MT2	3	0.008	2	0.013	4	0.005

(2) 模型精度

九峰山实验室在器件模型 DOE、TEG 及去嵌入结构设计方面，具有雄厚的实力与丰富的经验，可独立承担完成无源、有源器件的商业化精准建模以及 PDK、模型开发任务。九峰山实验室具有国际先进的材料分析、失效分析、微观分析以及测试与量测平台，为无源、有源器件的精准建模，奠定了雄厚的技术基础。

对于 PDK 中常见的无源器件，例如：电感、电容、电阻以及传输线等，实验室从工艺角度出发，不断迭代器件的模型公式，使得模型在保证较高精度的基础上，更加具有物理意义。对于电感的感值与 Q 值、电容的容值、电阻的阻值等基本参数，模型拟合误差均小于 2%。在保证器件性能的同时，坚持探究新的建模方法，我们采用神经网络 (ANN) 建模思路，对无源器件的尺寸参数与器件的量测数据进行训练，建立尺寸参数与器件性能的精准映射，大大缩短了数据拟合与公式提取的时间，实现可缩放模型的建立。

其中，电感器件在利用 ANN 进行建模后，建模周期大大缩短。与此同时，电感的感值与 Q 值等参数的拟合误差控制在 1% 以内，取得了较好的建模效果。

(3) 完善的 PDK 功能

基于九峰山实验室研发的高性能集成无源器件和高精度模型，实验室规范化地开发了可商业化使用的硅基 IPD_PDK。该 PDK 功能完整，包含了从元件库中的 symbol 功能、Pcell 中的 layout 功能，一直到 Tech 文件里面的材料、layer，EM 仿真和自定义的菜单功能，如图 8 所示。基于这些文件，设计人员可以实现基于九峰山实验室 IPD 工艺的电路设计，完成包括从原理图仿真、EM 仿真以及 DRC 和 LVS 检查等完整的电路设计流程。

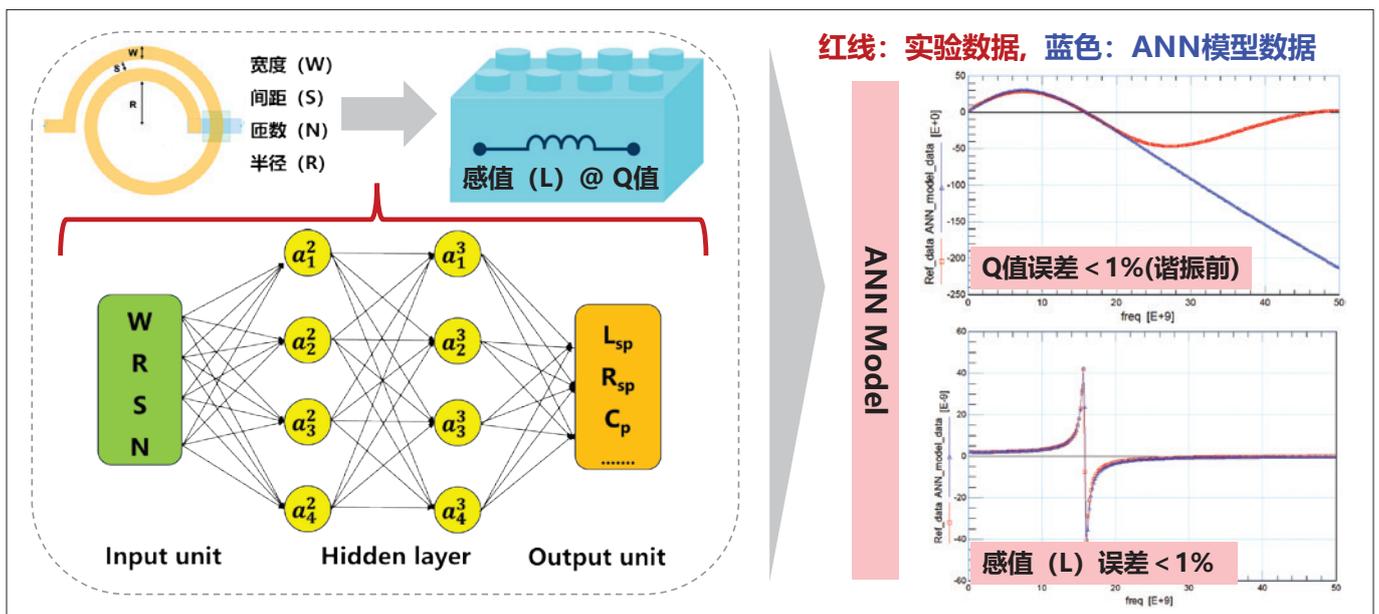


图7: 基于神经网络的无源器件建模

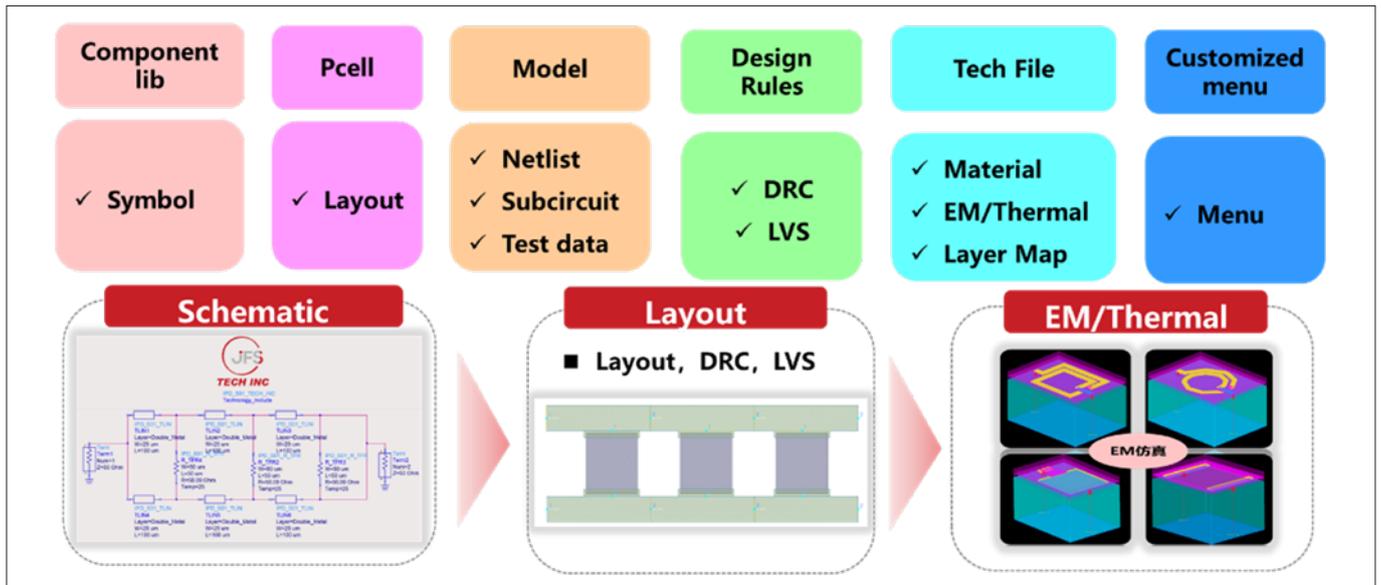


图8: 九峰山实验室IPD_PDK。

九峰山实验室开发的 IPD_PDK 中共计包括电感、电阻、电容和传输线等 20 余类器件，如图 9 所示。每类器件参数可变、版图可参数化，以满足电路不同性能需求，为设计人员提供了极大的设计自由度。

在版图检查方面，DRC 功能是用于检查版图设计是否

满足工艺设计规则要求的工具，是确保设计人员的设计能够“无失真”呈现的强有力保障。九峰山实验室所开发的 IPD_PDK 提供完整的 DRC 规则文件，总共包含 10 余类检查项，共 120 余条规则，可充分检查各类器件及电路的版图设计，确保芯片流片前光刻掩模版的加工准确无误，提高流片一次成功率。

而 LVS 是用于检查电路版图和原理图一致性的工具，能够确保版图设计可以实现对应的电路功能。九峰山实验室 IPD_PDK 建立了完善的 LVS 规则文件，可充分检查版图中各类器件的参数、数目及连接关系是否符合电路原理图，降低流片失败率。

除了高精度的器件模型保障原理图设计仿真的准确性，九峰山实验室 IPD_PDK 对衬底进行了准确的参数优化和仿真验证，能够保障版图进行高准确度的 EM 仿真，为设计人员提供精准的后仿真验证，提高流片的一次成功率。

(4) PDK 功能性验证

通过较为常用的无源模块（包括功分器、巴伦等电路）的设计验证，我们验证了九峰山实验室 IPD_PDK 的可商用性和准确性。我们已完成原理图仿真、版图 EM 仿真、调谐优化等功能性验证，PDK 功能完善且使用便捷。所设计的无源电路性能突出，其中功分器带宽覆盖 3-20 GHz 频率范围，回波损耗优于 15 dB；巴伦在频带 5-18 GHz 范围内，回波优于 10 dB，幅度不平衡度优于 1 dB，相位不平衡度优于 5°。

九峰山实验室技术团队能够协助完成基于 IPD 的无源电路拓补选型，layout 布板建议、DRC 问题处理等芯片开发过程中的常见问题。确保整个设计过程在风险可控的范围内展开。充分考虑工艺可制造性、模型准确度、设计冗余量等问题，为设计人员提供全面的开发建议及计划，提高设计人员的设计成功率。

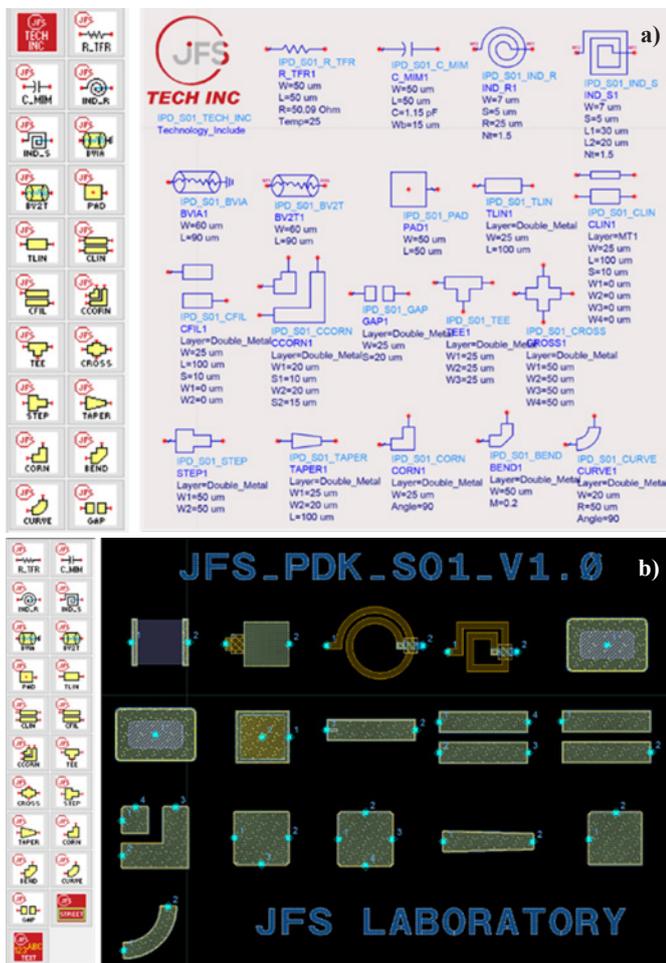


图9: 九峰山实验室IPD_PDK所含器件。(a) 器件原理图；(b) 器件版图。

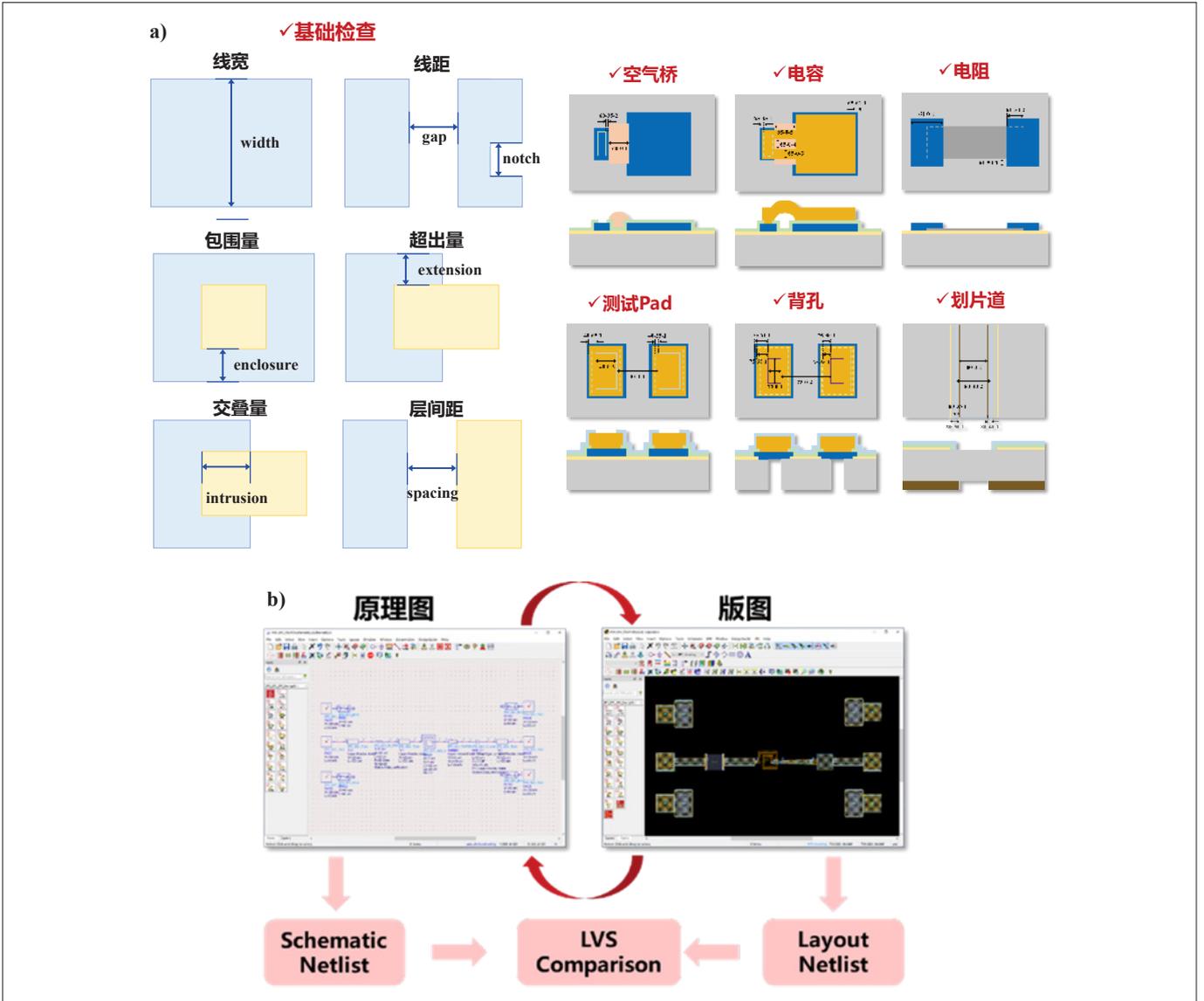


图10：九峰山实验室IPD_PDK规则检查。(a) DRC；(b) LVS。

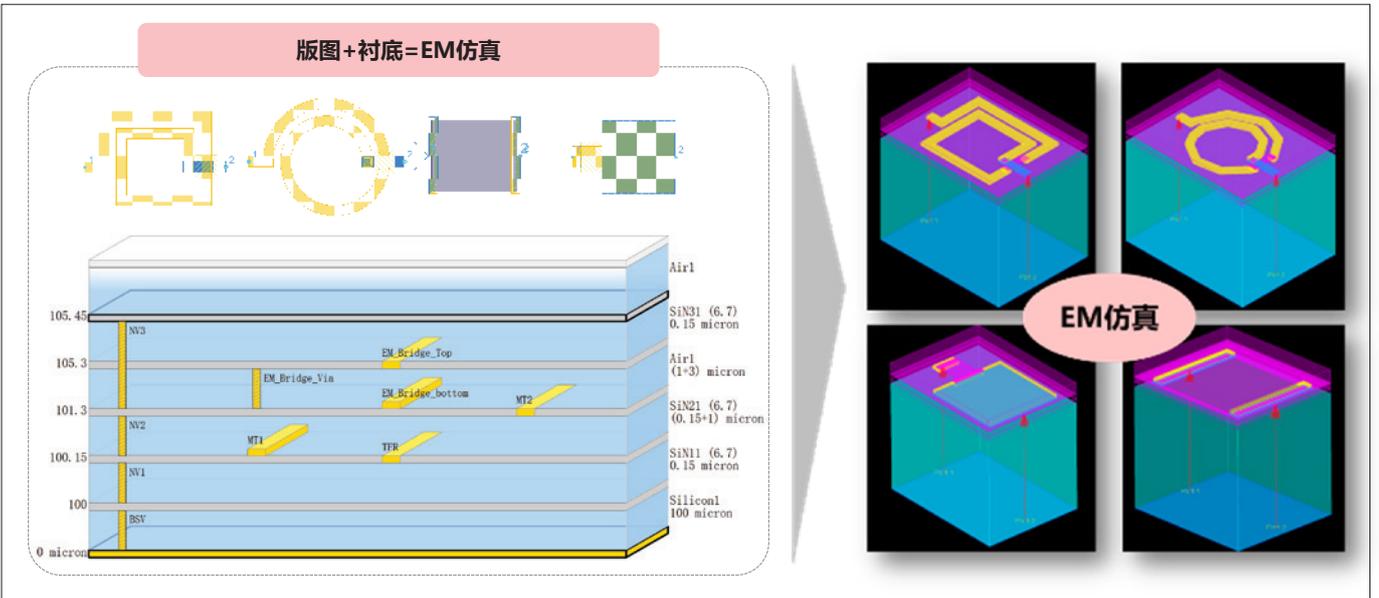


图11：九峰山实验室IPD_PDK精确的EM仿真

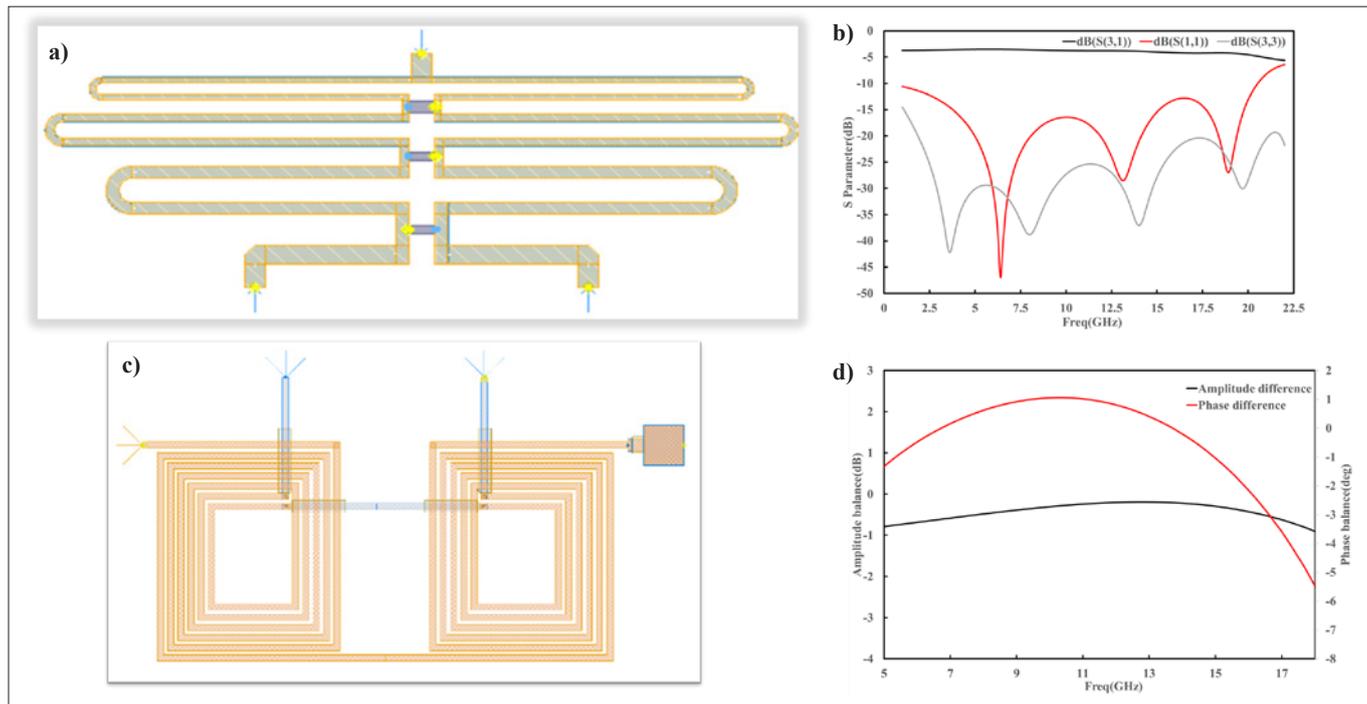


图12: 基于九峰山实验室IPD_PDK设计的巴伦。(a) 功分器; (b) 功分器性能表现; (c) 巴伦; (d) 巴伦性能表现。

集成无源器件 IPD 技术未来展望

随着万物互联走向万物“智”联，对通信系统的高性能和小型化提出了更严苛的要求。而占电路绝大部分面积的无源部分的集成和性能优化在系统升级的进程中更是承担了举足轻重的作用。九峰山实验室面对时代的新挑战，将从性能、集成和多功能三个方面继续发力。

第一个方面是提高无源器件的性能，其中包括电感 Q 值的提升；使用新的介质材料提高电容密度和击穿电压；继续探索和使用 ANN 人工神经网络建模提高建模效率和模型精度，来达到 IPD 整体性能的提升。第二个方面是提高无源器件的集成度，包括开发高质量的 TSV 工艺，增加互联质量，采用多种衬底材料及器件小型化设计来达到集成的灵活性和提高集成度。第三个方面是多功能性，在原有的 IPD 中集成相变射频开关，降低无源网络的功耗，同时将巴伦、耦合器等无源模块设计成参数化功能模块，集成到 IPD_PDK 中，提供电路设计人员的设计效率。

此外，将相变开关应用于可重构超表面，可以在提高集成度的同时降低无源电路的功耗，如图 13(a) 所示。图 13(b) 中利用硅转接板 (Silicon Interposer, SIW) 和 TSV 工艺设计了天线阵列，SIW 还能用于设计滤波器，功分器等多种无源电路，充分利用 3D 集成中的转接板，大大减小电路面积。片上芯片互联系统由于传输距离短、尺寸小的特点 (如图 13(c) 所示)，需要在高频进行系统设计，IPD 的高频高性能和小型化特点能够很好应对这种场景。相信不久的将来，集成无源器件技术不仅能够传统优势领域继续发光发热，还能在新兴方向上发挥更重要的作用。☞

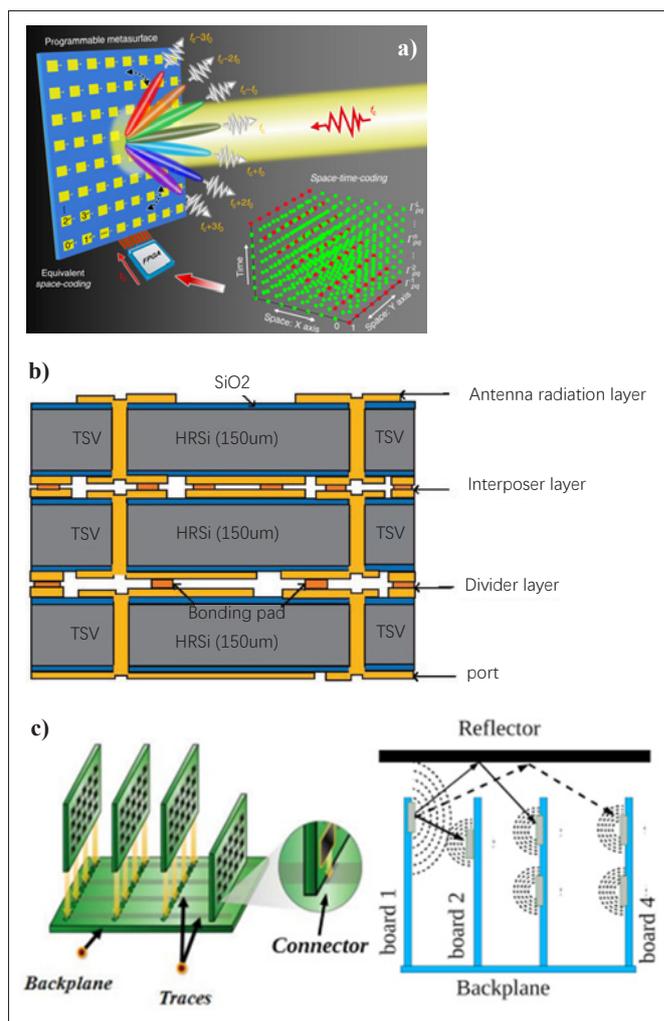


图13: IPD技术未来展望。(a) 时空编码数字超表面^[7]; (b) 三层层叠硅天线阵列^[8]; (c) 片上通信^[9]。

扩展阅读

- [1] ZHU Z M, YIN X K, LIU X X, et al. Research progress of silicon-based 3D integrated RF passive devices and circuits[J]. Microelectronics & Computer, 2023, 40 (1) : 11-17.
- [2] LIU S, SHAN G B. An Improved 3D interconnection technology of through-silicon capacitors[J]. Micro-nanoelectronic Technology, 2017, 54 (8): 558-564.
- [3] LIN Y, TAN C S. Modeling, fabrication, and characterization of 3-D capacitor embedded in through-Silicon Via[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018, 8 (9) : 1524-1532.
- [4] LI J W, MA S L, LIU H, et al. Design, fabrication and characterization of TSV interposer integrated 3D capacitor for SIP applications[C]//2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). San Diego, CA, USA: IEEE, 2018: 1974-1980.
- [5] 吴昊, 侯芳, 栾华凯, 李晨晨, 吴林晟等, 硅基 MEMS IPD 元件的设计与工艺研究, 全国微波毫米波会议, 2020.
- [6] 吕立明, 曾荣, 方芝清, 魏启甫等, 基于高阻硅的毫米波 TPD 滤波器研究, 微波学报, 2018.
- [7] Zhang L, Chen X Q, Liu S, et al. Space-time-coding digital metasurfaces[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 4334.
- [8] C. Y. Lei, Z. Jian, H. Fang, J. Z. Lei and H. Min, "The Fabrication of Three-layer Silicon Stacked Antenna," 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), 2021, pp. 1057-1061.
- [9] S. P. Voinigescu et al., "Silicon D-band wireless transceivers and applications," 2010 Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, Japan, 2010, pp. 1857-1864.



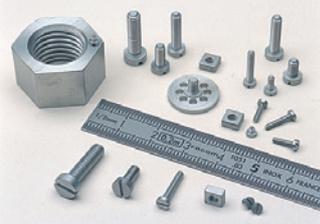


Large stock of Molybdenum and Tantalum

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

➤ A SiCOI chip under test



集成光子平台：SiC 的案例

SiC 集成光子的潜力开始被释放，这得益于这种材料独特的光子特性和高质量外延生长技术的发展。

作者：丹麦技术大学的 Haiyan Ou

现代微电子学中最成熟和应用最广泛的半导体——硅，是现代微电子学的支柱。在过去的 50 年或更长时间内，它一直在推动人类生活的进步，通过遵循摩尔定律，利用平面处理技术，计算能力得到了提升。

然而，器件尺寸的缩小不能永远持续下去。线宽现在已接近物理极限，这使得这项技术的前沿人士开始寻找前进的道路，以解决即将到来的瓶颈问题。一个有希望的选择是转向集成光子学。

电子与光子

集成电子学和集成光子学之间的一个关键区别在于载流子。在这方面，后者具有很大的吸引

力。光子的优点包括：没有电荷，防止电磁场的干扰；没有质量，使得器件的运行速度远快于电子器件（见表 1）。然而，在光子领域也存在挑战，包括对这种载流子的操控。

在集成电子学中，硅占据主导地位。与此同时，在集成光子学中，多种材料平台并存，包括硅、 Si_3N_4 、GaAs、InP、GaP、AlN、 LiNbO_3 和 SiC。这种高度多样性反映了没有单一材料能为集成光子芯片提供六个基本构建块：光源、波导、调制器、检测、低成本组装和智能。

硅在光子学中扮演着非常活跃的角色，这得益于其材料的成熟和制造工艺的完善，这些工艺在集成电子学的制造中经过了几十年的提炼。然

表1: 光子和电子基本属性比较

	Photons	Electrons
Mass	0	9×10^{-31} kg
Charge	0	-1.6×10^{-19} Coulombs
Speed	3.0×10^8 m/s	0, or less than 3.0×10^8 m/s
Spin	1	Half
Antiparticle	None	positrons

而，硅有两个显著的缺点。首先，它是一个间接带隙半导体，因此在光发射方面天生效率低下；其次，由于其带隙为 1.12 eV，在电信波长下会发生强烈的双光子吸收，这掩盖了其他非线性效应，如四波混频，后者提供了波长转换。

这两个限制为其他材料创造了机会，如 III-V 族和宽带隙半导体。例如，直接带隙 III-V 族半导体是理想的集成激光解决方案，而宽带隙半导体在电信波长范围内几乎没有双光子吸收。

SiC：优点和缺点

在这些化合物半导体家族中，SiC 作为集成光子学的一个非常有希望的候选材料正在出现。这种宽带隙材料有许多优点，包括与 CMOS 兼容、生物相容、丰富、无毒且因此可持续；它具有独特的光子特性，如高二阶和三阶非线性、高折射率、宽带隙和低固有材料损耗。其他优点包括具有超过 250 种多型性，具有可变特性，热导率是硅的三倍以上，以及稳定的机械、物理和化学特性。此外，SiC 的处理技术先进——已有成熟的生长技术用于生产高晶体质量的 SiC，工程师知道如何掺杂这种材料，并且 SiC 功率电子学的材料生长和器件制造已经成熟，为 SiC 在集成光子学的扩展奠定了基础。

SiC 功率器件的广泛采用，特别是在电动汽车中，为这种材料系统在 SiC 光子学中的部署奠定了坚实的基础。然而，尽管在材料和制造方面取得了这些进步，但必须解决三个重大挑战：形成 SiC-on-insulator (SiCOI) 堆叠，以限制 SiC 中的光；发展纳米制造技术，用于低损耗和色散控制；引入高效的耦合方案，用于光的进出耦合。在光子电路中，光子的路径由波导控制，使用全内反射来引导光通过结构。为确保光子被限制在 SiC 层内，这种材料被嵌入在低折射率材料中，如 SiO₂。商业上可用的 SiC 通常以晶圆形式存在，

厚度通常为 500 微米，而 SiCOI 堆叠中的 SiC 层通常小于 1 微米。

第一个需要解决的大挑战是将 SiC 从晶圆转移到薄层。我们在丹麦技术大学的团队最初采用离子切割方法，也称为智能切割，这是生产 SOI 晶圆的成熟方法。不幸的是，这种方法导致了大约 6 dB/cm 的高光学损耗，这是由于离子注入引起的。

这种损耗不能通过热退火大幅度降低，这是由于硅基底的熔点较低的限制。一个可能的解决方案可能是转向激光退火，而不是炉退火，因为这种光源可以聚焦到一个小点，只允许 SiC 层经历高温以恢复缺陷，同时保持硅基底在其熔点以下。我们目前的方法与此不同。我们完全避免离子注入，使用键合和磨削方法来形成我们的 SiCOI 结构。然而，产量仍然很低。

另一个关注点是波导损耗，这是由于制造缺陷造成的。如果 SiC 波导表面有任何粗糙度，这会增加其损耗。为了最小化这一点，我们优化了 SiC 波导制造工艺，包括电子束光刻、干法刻蚀和顶部覆 SiO₂ 沉积。这种方法使我们能够形成具有良好几何形状和光滑表面的 SiC 波导。

我们的 SiC 波导的典型横截面几何形状约为 500 纳米乘以 500 纳米。虽然这比用于控制集成电路中电子传输的场效应晶体管 (FET) 的特征尺寸大得多，但仍然比标准单模光纤的光斑尺寸小得多——大约为 10 微米。由于这种尺寸差异显著，我们投入了大量努力以确保标准单模光纤和 SiC 波导之间的高效光耦合，使用芯片上的模式转换。我们还旨在实现波导内的极低损耗，以便我们不需要芯片上的放大器，这种器件目前还不存在。

为了测试我们的 SiC 光子芯片，我们使用高倍显微镜来辅助对准 SiC 波导和光纤（见附图）。这项任务得到了将光子芯片和光纤端部安装在三维可调平台上。

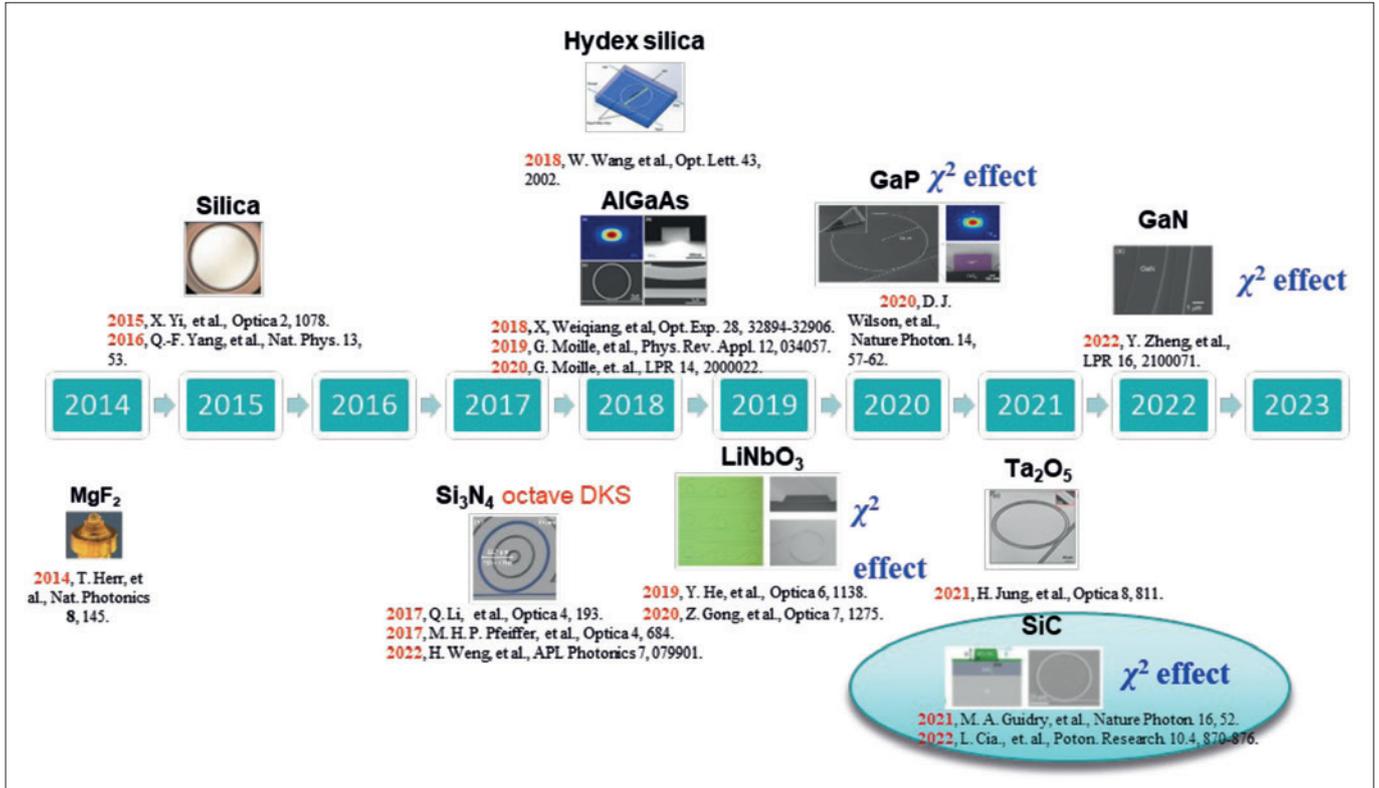


图1: 微梳发展路线图。

光学频率梳

早在 2005 年，诺贝尔物理学奖授予了光学领域的先驱。Roy Glauber 因对光学相干的量子理论的贡献获得了一半的奖项，另一半由 John Hall 和 Theodor Hänsch 分享，因为他们对基于激光的精密光谱学的发展，包括光学频率梳 (OFC) 技术做出了贡献。OFC 产生具有离散、独特且等间隔频率线的光谱——它就像一把测量光频率的尺子。

芯片级频率梳，也称为微梳，代表了 OFC 的第三代。它紧随模式锁定激光 OFC，这是这项技术的第一代，以及更近期的光纤激光 OFC，这是这项技术的第二代。微梳结合了纳米制造和非线性光学的进步，引起了极大的兴趣。由于其紧凑性、效率、超宽带输出以及在一系列应用中的潜力，它现在是一个非常热门的研究课题。微梳

芯片级频率梳，也称为微梳，代表了 OFC 的第三代。它紧随模式锁定激光 OFC，这是这项技术的第一代，以及更近期的光纤激光 OFC，这是这项技术的第二代。

可以用于光谱学、光通信、计量学、光学原子钟、生物 / 化学传感、距离测量和寻找系外行星。

微梳的进步推动了它们发展到一个先进的状态，称为八度和耗散性克尔孤子，实现了自参考和相干。由于高度紧凑的几何形状，梳齿间距现在可以在数十吉赫到太赫兹的范围内，进一步扩展了传统模式锁定激光梳的应用范围。

在可考虑用于光子集成的不同材料平台中 (见表 2)，SiC 是将开启新光器件之门的材料，包括微梳，这得益于其独特的光学特性。其优点包括宽带隙和高二阶和三阶光学非线性。

由于其宽带隙，基于 SiC 的频率梳光源可以覆盖从近紫外到中红外的超宽带。在这个广泛的光谱领域内，消毒、照明、通信、生物传感和气体传感都有各自的足迹，其中一些尚未被标准激光器覆盖。SiC 的高二阶和三阶非线性是有利的，因为它们使 SiC 频率梳能效高且范围广。

SiC OFC 在量子光学和量子网络、量子计算、传感和成像等领域也有很大的机会。这项技术肯定会产生影响，使更安全、可扩展的集成量子网络成为可能，并可能实现新的嵌入式生物传感器，这将彻底改变医疗诊断，这得益于 SiC 材料的生物相容性。

表2: 碳化硅与其他材料平台在集成光子学中的比较。

Material	n	2nd NL (pm/V)	3rd NL (m ² /W)	Bandgap (eV)	Loss (dB/cm)
Si	3.5	0.6	6.7×10 ⁻¹⁸	1.12	0.3
SiO ₂	1.4	0	3×10 ⁻²⁰	9	0.06
MgF ₂	1.38	0	9×10 ⁻²¹	10	
Si ₃ N ₄	2	0.3	2.4×10 ⁻¹⁹	5	0.07
SiON	1.8	0	7×10 ⁻²⁰		0.06
AlN	2.1	1	2.3×10 ⁻¹⁹	6	0.6
Ta ₂ O ₅	2.1	0.34	7.23×10 ⁻¹⁹	3.8	0.3
LiNbO ₃	2.2	27		4	0.027
AlGaAs	3.3	0	2.6×10 ⁻¹⁷	1.4-2	1.4
GaP	3.1	82	1.2×10 ⁻¹⁷	2.26	1.2
SiC	2.6	50	8.6×10 ⁻¹⁹	2.4-3.3	0.08

在过去的10年中,芯片级 OFC,也称为微梳,取得了很大的进展(见图1,自2014年以来的简要发展路线图)。关键突破包括2014年使用MgF₂的芯片级 OFC 演示,2015年的SiO₂,2017年的Si₃N₄,2018年的AlGaAs和Hydex硅,2019年的LiNbO₃,2020年的GaP,2021年的Ta₂O₅和SiC,以及2022年的GaN。

除了通过二阶非线性(电光梳)产生 OFC 的LiNbO₃外,其余的 OFC 都是通过三阶非线性实现的,被称为克尔梳。其中, Si₃N₄ 被标记为八度耗散性克尔孤子,并提供了完全稳定的 OFC。

LiNbO₃、SiC、GaN 和 AlN 被标记为具有二阶非线性。与没有二阶非线性的材料不同,这四种材料有能力通过频率倍增实现八度带宽的波长转换。尽管 SiC 在 OFC 中的出现较晚,但这种材料已经迎头赶上,展示了其能力和在光子学中的巨大潜力,这得益于其纳米制造友好的特性和独特的光学特性。这一点由图2所示的 SiCOI 微环谐振器产生的克尔梳来说明。

SiC OFC 的先锋

我们的团队是 SiC OFC 技术的先驱,在过去

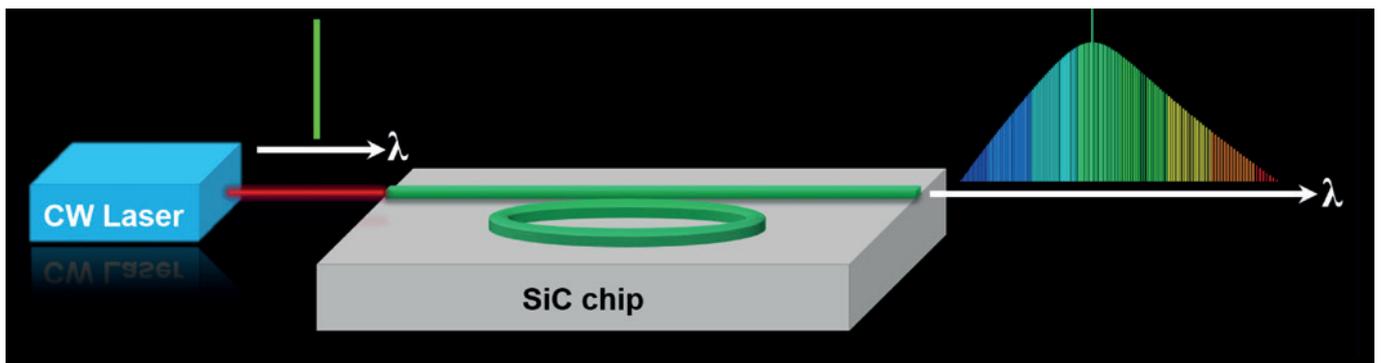


图2: 由微环谐振腔产生的SiCOI光频梳。

的几年中实现了一些重要的里程碑。2019年，我们报告了使用离子切割方法制作的首个集成SiC微环谐振器，以及展示了四波混频并导出了4H SiCOI的非线性折射率。一年后，我们展示了使用离子切割方法制作的4H SiCOI波导的超连续谱生成，并在2021年宣布了使用离子切割方法制作的4H SiCOI的光参量振荡。在过去的几年中，我们取得了进一步的突破。2022年，我们展示了4H SiCOI的波束分束器、偏振分束器和马赫-曾德尔干涉仪，并申请了制造4H SiCOI材料堆叠的专利。在2023年，我们展示了：4H SiCOI偏振和模式复用器；来自4H SiCOI的OFC；以及来自非晶SiCOI的四波混频，以及导出了这种特定材料的非线性折射率。

SiC现在因其在晶体生长、薄膜转移和纳米制造方面的进步而受到集成光子学的极大关注。迄今为止的关键突破包括在SiCOI中展示了二阶和三阶非线性。这些非线性使得波长转换、光调制/开关、光频率梳生成等成为可能。另一个重要进展是实现了一系列高性能被动组件。测试表明，这些组件中的一些在经典和量子领域都能工

作。利用SiC在集成光子学的成功，这种材料正在有希望地进入集成量子光子学。在这里，它的一个属性是多种颜色中心，这可能为在室温下工作的单光子源提供解决方案。

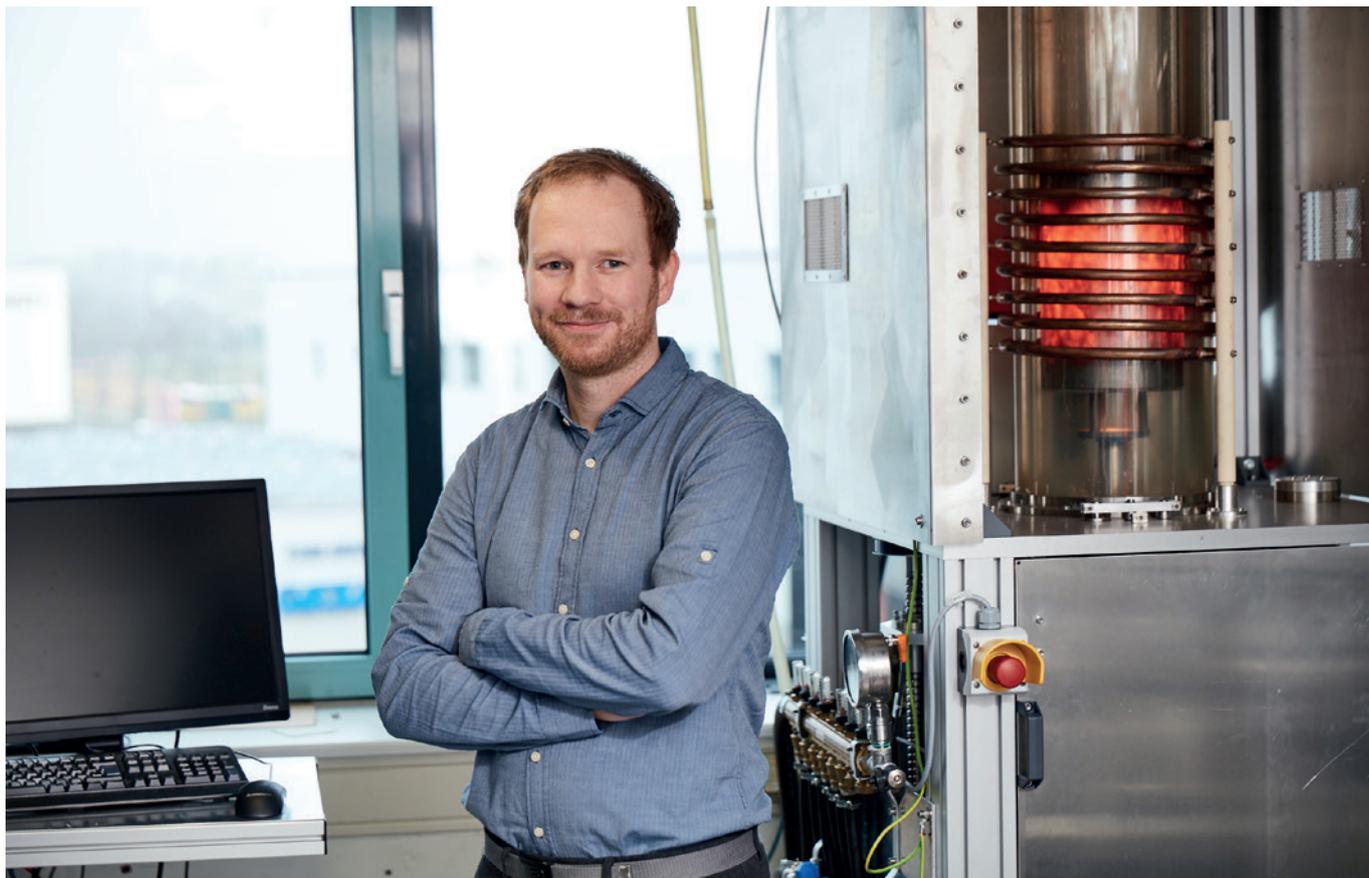
展望未来，短期内我们的计划包括开发和优化SiCOI的六个集成光子学构建块。从长远来看，SiC将作为量子光子集成电路的材料平台活跃起来，实现SiCOI中单光子源与其他构建块的单片集成。SiCOI在可扩展性和广泛的发射波长（从可见光到红外）方面有潜力超越钻石。这种材料似乎也优于III-V族量子点，因为SiCOI承诺提供在室温下工作的单光子源，这对于将量子技术从实验室转移到实际应用至关重要。

我们荣幸成为SiC光子学领域的先驱。我们期待拥抱即将到来的机会和挑战，推动这项技术的进一步发展，并为更可持续的未来提供新的解决方案。

致谢：欧盟H2020 FET Open项目“与CMOS兼容的超宽带片上SiC频率梳”（SiComb，项目编号899679）。

参考文献

- ▶ H. Ou et al. “Novel Photonic Applications of Silicon Carbide” *Materials* 16 1014 (2023)
- ▶ F. La Via et al. “Emerging SiC Applications beyond Power Electronic Devices” *Micromachines* 14 1200 (2023)
- ▶ X. Shi et al. “High-performance silicon carbide polarization beam splitting based on the asymmetric directional coupler for mode conversion” *Opt. Lett.* 48 616 (2023)
- ▶ X. Shi et al. “Compact low-birefringence polarization beam splitter using vertical-dual-slot waveguides in silicon carbide integrated platforms” *Photonics Res.* 10 A8-A13 (2022)
- ▶ X. Shi et al. “Thermal Behaviors and Optical Parametric Oscillation in 4H-Silicon Carbide Integrated Platforms” , *Advanced Photonics Research* 2100068 (2021)
- ▶ S. Castelletto et al. “Silicon Carbide Photonics Bridging Quantum Technology” *ACS Photonics* 9 1434 (2022)
- ▶ X. Shi et al. “Polarization and Spatial Mode Dependent Four-wave Mixing in a 4H-Silicon Carbide Microring Resonator” *APL Photonics* 6 076106 (2021)
- ▶ Y. Zheng et al. “4H-SiC microring resonators for nonlinear integrated photonics” *Opt. Lett.* 44 5784 (2019)
- ▶ Y. Zheng et al. “High-quality factor, high-confinement microring resonators in 4H-silicon carbide-on-insulator” *Optics Express* 27 13053 (2019)
- ▶ J.Li. et al. ‘ Efficient Raman Lasing and Raman Kerr Interaction in an Integrated Silicon Carbide Platform ’ , *ACS Photonics* 11 795 (2024)
- ▶ X. Shi et al. “High-performance polarization-independent beam splitters and MZI in silicon carbide integrated platforms for single-photon manipulation” *J. Light. Technol.* 40 7626 (2022)



块状 AlN 的有效扩大

引入超过 45 度的扩展角可以缩短通过物理气相传输实现具有工业相关晶体直径的块状 AlN 所需的时间

作者：Carsten Hartmann 和 Thomas Straubinger，莱布尼茨晶体生长技术研究所

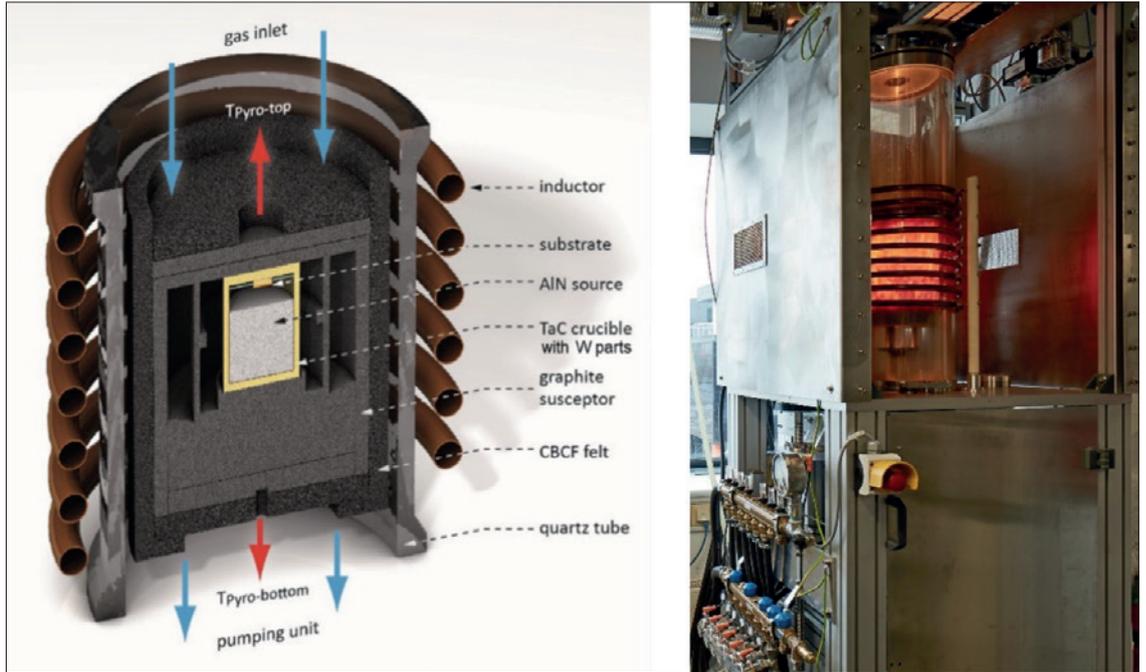
超宽禁带半导体 AlN 及其三元同系 AlGaIn 具有多种特性，因此这种材料体系成为电子和光电器件一个有前景的选择。此类氮化物可以承受恶劣的条件和高温，并且由于带隙非常宽，可用于制造发射深紫外光和远紫外光的 LED。此类器件（范围为 220 nm 至 280 nm）的最大市场是用于饮用水消毒和废水处理。然而，该光谱范围内的发射也可用于表面灭菌和生化传感。除了深紫外光子领域的这些机遇之外，AlN 基器件也是下一代高频功率转换的有力候选者。AlN 基高功率晶体管的性能已经优于由两种最常见的宽禁带半导体 SiC 和 GaN 制成的晶体管。

由于缺乏原生衬底，研究人员开始使用蓝宝石衬底来开发外延层，探索 AlN 及其合金的性能。然而，即使他们转向复杂的加工步骤，AlGaIn 层中的穿透位错密度也仍然很高，通常超过 $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。这些高密度位错是 AlN 材料体系充分开发的主要障碍之一。

PVT 的力量

利用物理气相传输（PVT）生长 AlN 晶体提供了一种有前景的前进方向。近年来，这种高结晶度 AlN 的生长方法取得了显著进展，为器件性能的大幅提高奠定了基础，成功制造出包括具有

图1: (a)装置草图, 其中带有在IKZ建造四个相同的PVT反应器。(b)此处所示, 外壳打开以便更好地观察加热装置。更多详情请见C. Hartmann等人的Cryst. Eng. Comm. 18 3488 (2016)。



高输出功率和长使用寿命的电注入深紫外激光二极管和LED。

利用PVT生产AlN衬底的前驱包括Hexatech Inc., 该公司推出了直径高达2英寸且穿透位错密度低于 $1 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 的AlN衬底。Hexatech目前在向选定的科学合作伙伴提供这种材料。

另一家供应商是Crystal IS, 该公司今年年初展示了可用面积达80%的4英寸AlN衬底, 并生产供内部使用的3英寸AlN衬底。

对于这两位开拓者来说, 进展缓慢且来之不易。为了将AlN晶体的直径增加到今天的尺寸, 这些公司的工程师花费了十多年的时间来生产一代又一代的晶体, 每个晶体的直径都越来越大。尺寸的增加来自于非刻面区域的动态增长。这种扩大发生在晶体生长(锥形)开始时, 仅限于小扩展角。

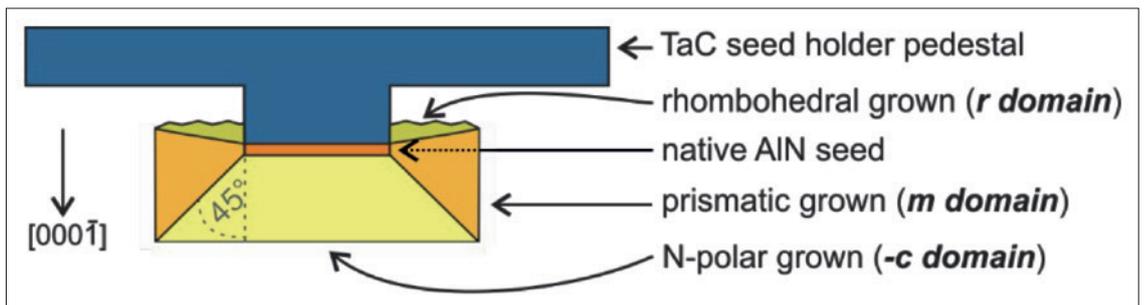
我们IKZ(德国柏林莱布尼茨晶体生长研究所)团队开发出一种克服这一限制的方法。PVT还可用于生长我们的块状AlN晶体, 该晶体是通过感应加热石墨装置生产的(见图1)。

我们最新成果的基础是我们利用PVT生长SiC晶锭获得的专业知识。当从SiC转向AlN生长时, 我们保留了反应器、隔热毡(碳粘合碳纤维)和大部分石墨组件。两种材料的生长温度约为 2200°C 。

AlN和SiC生长之间的一个主要区别是环境气氛。对于SiC, 采用低于50 mbar的氩气气氛, 而对于AlN, 则采用压力高于400 mbar的 N_2 。坩埚也有所不同, 石墨用于生长SiC, 而钨或TaC用于生长AlN。请注意, 这两种选择是能够在生长条件下承受反应性铝蒸气的唯一耐火材料。

为了生产高纯度AlN源(其氧含量低于150 ppm wt), 我们从市售AlN粉末开始, 应用多个升华-重结晶步骤。在晶体生长过程中, 位于坩埚下部的源逐渐分解为铝和 N_2 蒸气物质。坩埚中的铝蒸气压力取决于温度, 通常范围为50 mbar至150 mbar——可以想成 N_2 环境中存在铝“雾”。在生长过程中, 气态铝物质沿着浓度和温度梯度在 N_2 气氛环境中扩散, 然后在AlN籽晶上重新凝结。

图2: 籽晶支架设计的简化草图: TaC基座和扩展角为 45° 的全刻面生长晶体。更多详情请见C. Hartmann等人的Appl. Phys. Express 16 075502 (2023)。



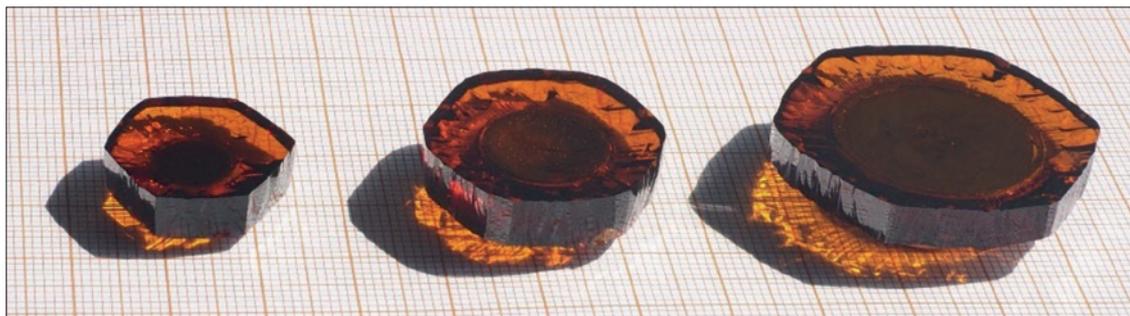


图3：后续几代的三个 AlN 晶体（直径17 mm、27 mm和37 mm）。

引晶生长

最近，我们开发了一种籽晶支架设计，可将籽晶放置在 TaC 基座上。通过这种排列，晶体可以自由生长，而不与寄生晶粒接触（见图 2）。这种设计允许产生高径向热梯度，即扩径的动力。

通过这种新配置，我们实现了更高的横向增长率。在 2230°C 的籽晶温度下，N 极性和棱柱 *m* 方向的生长速率均快至约 200 μm/h，从而导致沿整个晶体长度产生约 45° 的巨大扩展角。晶体习性由 (000 $\bar{1}$)N 极性顶面、(10 $\bar{1}$ 0) 棱柱 *m* 面和 (101 x) 菱形 *r* 面组成。全直径跨越整个晶体长度，确保所有切割的 *c* 面晶圆具有相同的（最终晶体）直径。

直径为 8 mm 且穿透位错密度低于 $1 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 的 AlN 籽晶为这项研究提供了突破点。这些第一代籽晶是由自发成核的 AlN 晶体制备的。利用我们的籽晶工艺，在籽晶上可生长长度为 5-7 毫米、直径在 18-24 毫米之间的晶体。只需两到三步，我们就扩大了尺寸，生产出直径超过 30 毫米的 AlN 晶体，非常适合制备 1 英寸衬底（见图 3）。根据目前的发现，我们还没有预见快速扩大到工业相关直径高达 4 英寸或更大衬底的任何障碍。

如果 AlN 衬底要产生重大影响，生产速度和可用性的大幅提高必须与保持材料高质量齐头并进——请注意，根据我们的特性描述，后者是可

能的。使用开放探测器孔径测量晶体 -*c* 面上的对称 (0002) 和不对称 (10 $\bar{1}$ 3) 摇摆曲线通常显示出半峰全宽为 11 弧秒的单个尖峰（见图 4）。如此尖锐的峰表明了其高结晶质量，包括低位错密度和不存在小角度晶界。

通常使用摇摆曲线来确定宽禁带材料和外延层中的位错密度。然而，这种方法只能为位错密度低至 $5 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ 的提供有意义的结果，因为与完美的无位错 AlN 相比，在较低位错密度下，峰不会展宽。另一个问题是块状晶体通常表现出分布不均匀的位错密度，具有广阔的区域，但位错和局部位错簇很少。不可能用摇摆曲线揭示这些变化的细节，摇摆曲线仅记录区域的平均值。为了识别横向位错分布，可以使用 X 射线形貌或缺陷选择性蚀刻。

我们使用白光 X 射线形貌检查了从直径 20 毫米的籽晶上切下的 *m* 平面样品。这涉及到 (11 $\bar{2}$) 面反射的选择，它对所有可能的位错类型 (*a*、*c* 和 *a+c* 类型) 很敏感。

从这种形式的 X 射线形貌来看，我们已经确定该样品的整个 -*c* 生长域是无位错的。唯一存在的位错位于 -*c/m* 边界附近的 *m* 域和 *r* 域中。我们发现位错从籽晶边缘开始并停留在 *m* 区域，但没有跨越 -*c/m* 域边界。到目前为止，我们尚未确定这些位错的起源。可能的解释包括：籽晶边缘抛

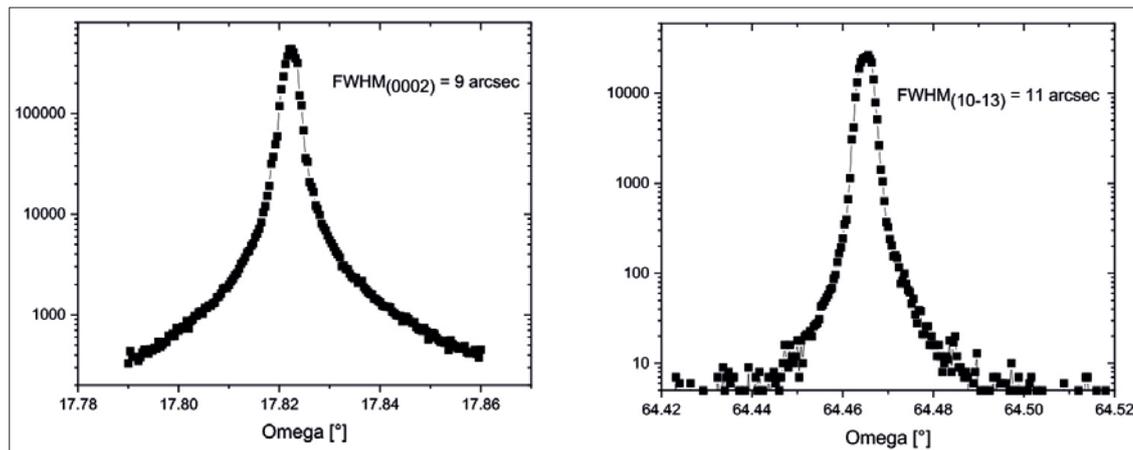


图4：在 (0002) (a) 和 (10 $\bar{1}$ 3) (b) 面反射中使用开放探测器孔径测量的双晶摇摆曲线（半对数标度）。

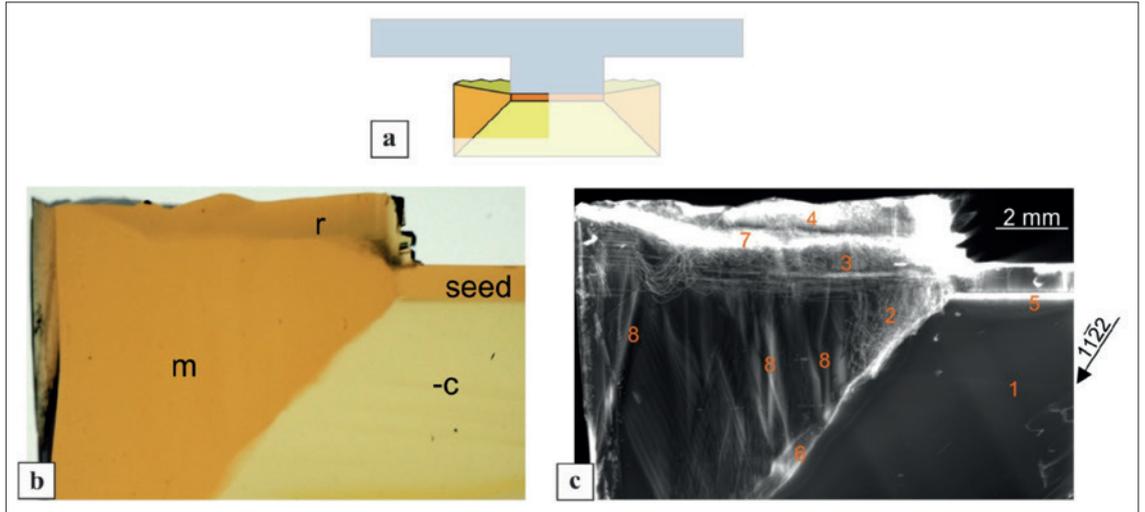


图5: (a)突出显示了由直径为20 mm的籽晶制备的m-平面样品的草图; (b) 1 mm厚的m-平面样品横截面的透射照片。几个生长域(-c、m和r)可通过不同的颜色来区分。(c)横截面样品的白光X射线线形貌(WB-XRT)拼接图像(1122反射)。-c生长域(1)中没有可见位错。位错仅存在于-c/m边界附近的m域中(2)。m域(3)的上部和r域(4)中存在更多位错。样品的下半部分没有位错。应变对比在域边界(5,6,7)和m域(8)内可见。更多详情请见C. Hartmann等人的Appl. Phys.Express 16 075502 (2023)。WB-XRT图像由卡尔斯鲁厄理工学院光子科学与同步辐射研究所的Merve Pinar Kabukcuoglu、Elias Hamann和Daniel Hänschke拍摄。非常感谢光束物理与技术研究所操作存储环、卡尔斯鲁厄研究加速器。

光质量不足; 不利的初始生长条件, 例如籽晶边缘的梯度太大; 以及r结构域和籽晶支架之间的

接触。我们还在几个域边界和m域内观察到了额外的对比特征, 这是由不同浓度杂质带来的应变引起的。

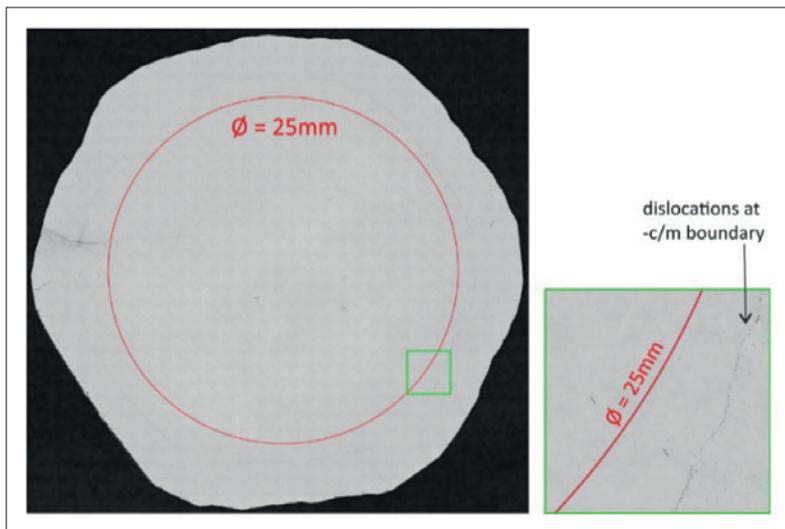


图6: 缺陷选择性蚀刻直径为34 mm的AlN晶圆, 在25 mm目标直径内平均蚀刻间距密度为 $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 。蚀坑密度增加的-c/m域边界位于25 mm目标直径(绿色方块)之外。更多详情请见C. Hartmann等人的Appl. Phys.Express 16 075502 (2023)。

为了获得整个直径的缺陷信息, 我们用直径为34mm的晶体制备了晶圆。我们通过缺陷选择性蚀刻对晶圆进行了表征(见图6)。通过这项技术, 我们使用标准化21点测量确定了25 mm目标直径内的中等蚀坑密度为 $5 \times 10^3 \text{ cm}^{-2}$ 。我们还发现了位错的线性排列, 发生在-c和m生长域之间的域边界处。相关蚀坑的起源可以追溯到籽晶边缘处形成的位错, 该位错沿着m域中的-c/m边界继续延伸(与图5(c)相比)。最近, 我们一直在寻求进一步扩大AlN晶体的直径。我们的研究包括选择靠近晶体顶部的c平面晶圆, 其中-c/m边界靠近晶体边缘, 并使用尽可能接近但低于-c/m边界的籽晶直径。这种方法有望为开发直径100毫米或以上的商业衬底提供一条捷径。 下转第43页

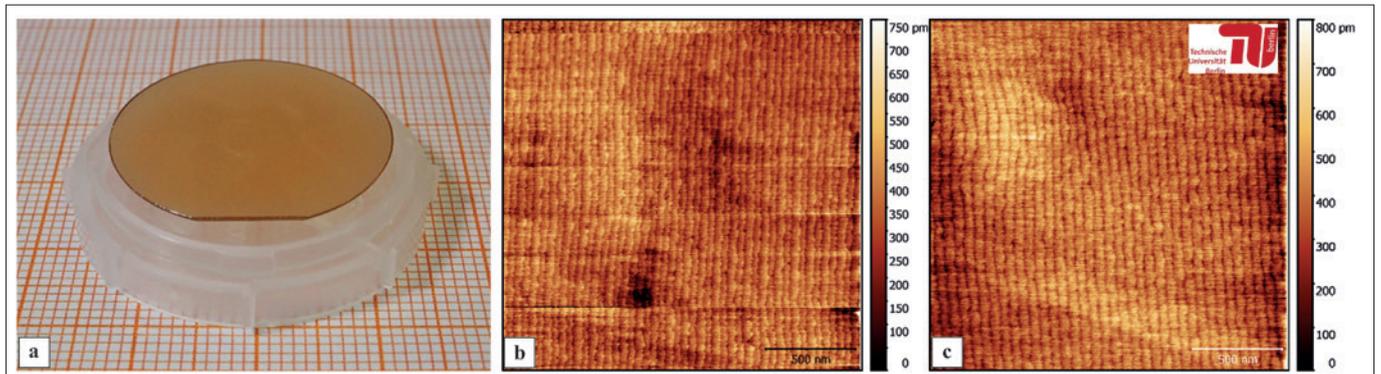


图7: (a) 25 mm epi ready (可直接用于外延生长)的Al极性AlN衬底; (b)化学机械抛光后Al极性epi ready表面的原子力显微镜(AFM)图像(切边0.4°); (c)通过MOCVD生长的5 μm厚Al极性AlN外延层(切边0.4°)的AFM图像。非常感谢柏林工业大学的Marcel Schilling、Tim Wernicke和Michael Kneissl(“实验纳米物理和光子”部)对AlN外延层进行同质外延生长并记录AFM图像。

氮化物的近室温外延技术

本文描述了一种新的降低氮化物外延温度的技术——动能调控分子束外延。该技术通过动能可调的中性粒子束可实现氮化物在 200°C -720°C 的外延。

作者：吕文来，王艳会，林茹，谢斌平，费勉仪器科技（上海）有限公司

氮化物的低温外延能力对于制备某些具有重要应用价值的材料比如高 In 组分 InGaN 和用于改善器件欧姆接触的二次外延高掺 GaN 有着无法替代的作用。此外，高温生长要求衬底能够承受高温条件，而这不可避免地限制了衬底材料的种类，无法满足基于氮化物的柔性化器件的需求。常见的几种外延生长技术中，金属有机物化学气相沉积 (MOCVD) 和分子束外延 (MBE) 通常需要在较高的温度下进行；而磁控溅射通过高能离子辅助虽然减少了对高温的依赖，但对薄膜表面有一定程度的损伤，难以获得高质量单晶外延薄膜。

最近，日本 ULVAC 利用自由基辅助反应溅射法实现了 GaN 在 600-700°C 衬底温度下的低温外延生长。* 该法构成要素如图 1(a) 所示，包括氮自由基源、布置在溅射阴极上的 Ga 靶和掺杂元素靶，以及衬底加热器。相比在磁控溅射等离子体源中产生的离子种类，由自由基辅助反应溅射法等离子体源产生、供应的氮自由基更具反应活性，可以将附着在衬底上的 Ga 进行充分氮化。

图 1(b) 和 (c) 分别是在 600°C 和 500°C 下沉积的掺 Ge 的 GaN 薄膜的透射电镜横截面图。结果显示，相较 600°C 下沉积的薄膜，在 500°C 下沉积的薄膜包含了大量缺陷，说明 500°C 不能实现高质量单晶 GaN 的外延生长。

为满足氮化物的低温外延需求，我们开发了一种动能调控分子束外延技术。该技术在等离子体辅助分子束外延 (PAMBE) 的基础上，通过将等离子体源和中和器相结合开发了中性束源，能够对等离子体中的带电粒子进行有效中和，使得源出口处只有携带一定动能的中性粒子束。此外，该中性束源的特殊结构设计使得中性粒子在源出口处具有一定的动能调节范围 (0.5-30eV)。动能调控分子束外延技术通过动能可调的中性粒子束可实现 GaN 在 200°C -720°C 的外延。

动能调控分子束外延系统的构成要素如图 2(a) 所示，包括产生带动能中性粒子束的中性束源、用于获得金属束流的热蒸发源以及衬底加热器。图 2(b) 展示了中性束源的启辉照片。

这里展示的动能调控分子束外延的氮化物近

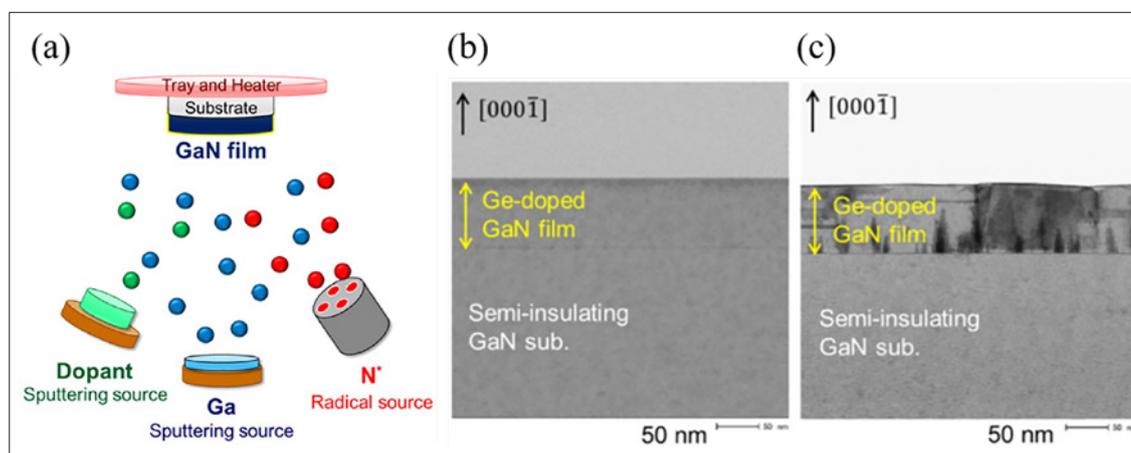


图1: (a)日本ULVAC自由基辅助反应溅射法示意图;利用自由基辅助反应溅射法在(b)600°C和在(c)500°C沉积的掺Ge的GaN薄膜的透射电镜横截面图*。

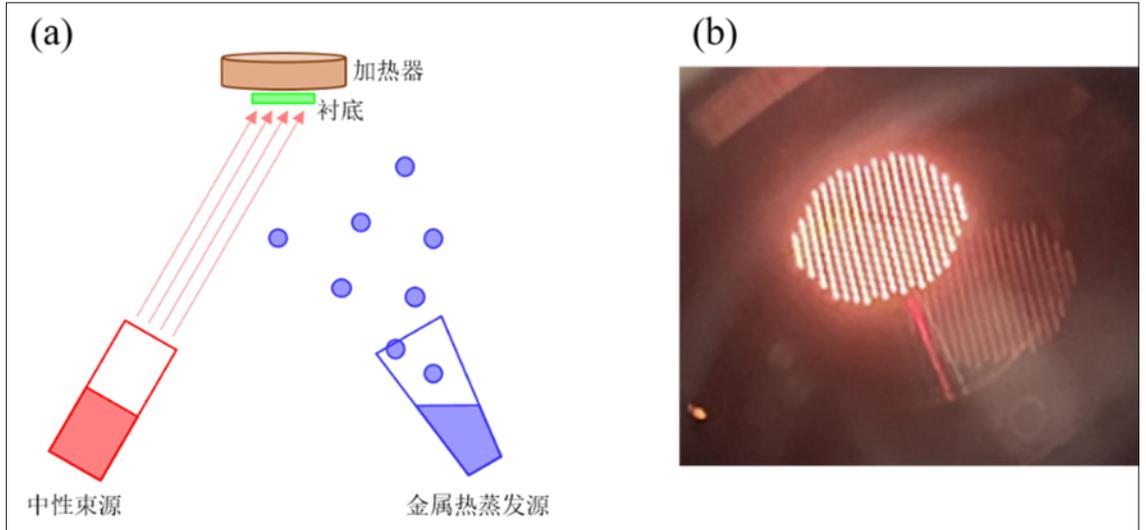


图2: (a)动能调控分子束外延系统的构成要素示意图; (b)动能调控分子束外延所使用中性束源的启辉照片, 启辉气体为氦气。

室温外延能力是在配备有中性束源的费勉仪器自产的 MBE 系统上进行的, 并通过 GaN 在 Si(111) 衬底上的外延实验来验证。我们首先在 Si(111) 衬底上外延了 ~100nm 的 AlN 缓冲层, 然后在 AlN/Si (111) 上制备了一系列生长温度低于常规 (对于 PAMBE 来说是 680-750 °C) 的 GaN 外延样品, 同时将 720 °C 下制备的 GaN 样品作为参考。对于所有的 AlN 和 GaN 外延, 中性束源均在相同的射频功率 300W 和相同的氮气流量 3sccm 下工作。图 3(a) 显示了在 450 °C 和在 720 °C 外延的 GaN 拥有几乎完全重合的 (002) 面摇摆曲线 (在 450 °C 和 720 °C 外延的 GaN 的 (002) 摇摆曲线半高宽均为 0.34°), 说明 GaN 外延膜的晶体质量在 450 °C - 720 °C 区间内几乎不受衬底温度的影响。这表明动能调控分子束外延能够在 450 °C 实现类似高温下的单晶 GaN 外延生长, 相较日本 ULVAC 自由基

辅助反应溅射法在 600 °C 实现的单晶 GaN 外延生长低了 150 °C。在 450 °C 以下, GaN (002) 的摇摆曲线有展宽趋势, 说明晶体质量随着衬底温度的降低而下降, 这与低温下原子在衬底表面的不充分迁移有关。但即使在 200 °C 下得到的 GaN 薄膜仍然具有较窄的摇摆曲线 (半高宽为 0.5°), 说明该温度下外延的 GaN 仍然拥有较高的晶体质量, 动能调控分子束外延实现了 GaN 的近室温外延。图 3(b) 展示了在 350 °C 下外延的 GaN 样品的扫描电镜横截面图, 可以看出在 Si 衬底上制备的 AlN/GaN 界面清晰。

在材料的外延生长中, 原材料原子 (即反应物) 需要获得一定的能量以克服化学反应势垒并完成其在衬底表面的充分迁移 (如图 4 所示)。在传统 MOCVD 或 MBE 中, 由于原材料原子本身几乎不带动能 (通常小于 0.1eV), 原子迁移的能

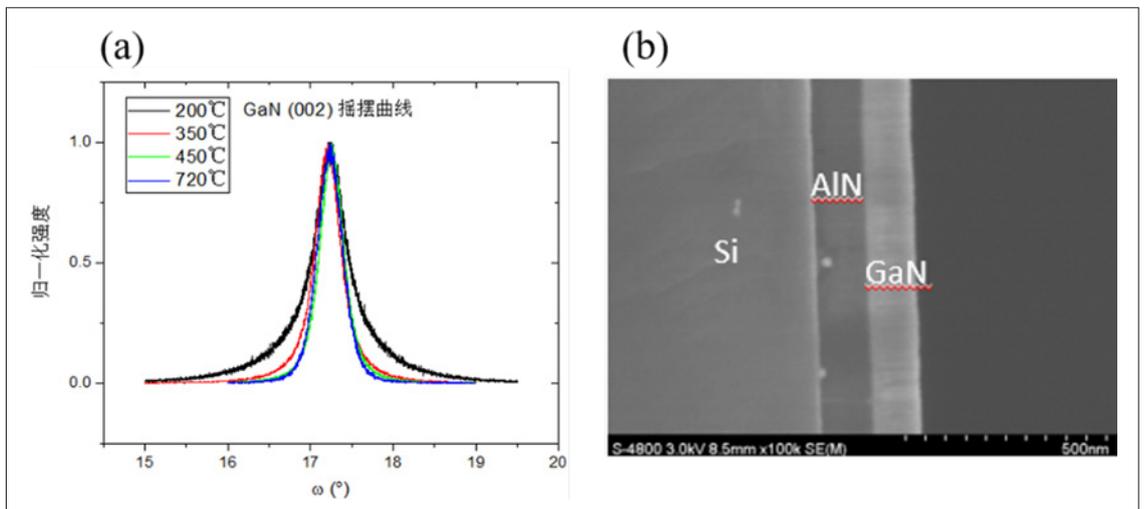


图3: (a) 在不同温度下外延的 GaN 薄膜的 (002) 面摇摆曲线; (b) 在 350 °C 外延的 GaN 薄膜的扫描电镜横截面图。

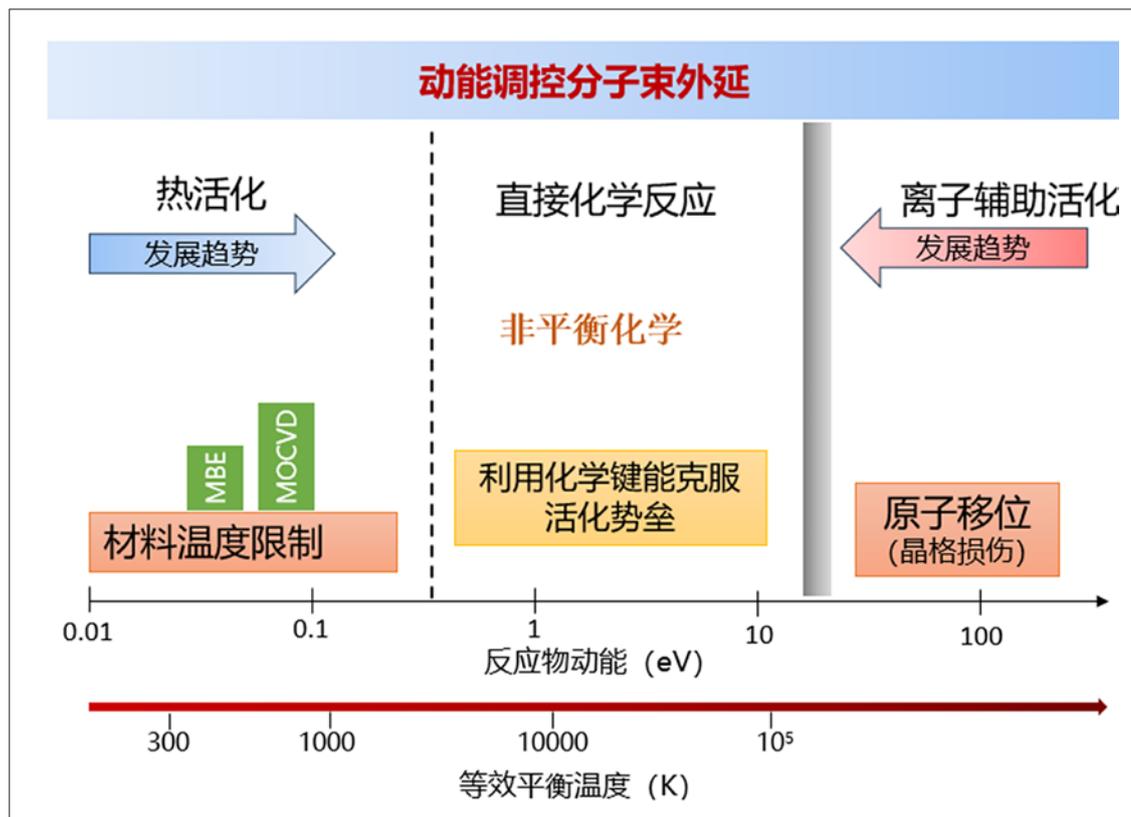


图4: 动能调控分子束外延降低外延温度的原理示意图。

量主要来自高温衬底，即通过热活化的方式来确保化学的进行和促进原子在衬底表面的迁移和有序排列。但这要求衬底材料能够承受高温条件，不可避免地限制了衬底材料的种类。而在磁控溅射中，这部分能量来自高能带电粒子，即通过离子辅助活化的方式促进薄膜材料的生长和重排结晶。但高能带电粒子过高的动能（通常高达几十 eV）和带电特性极易造成薄膜表面的原子移位以及刻蚀，导致晶格损伤。而我们所开发的动能调控分子束外延技术通过中和带电粒子并将粒子动能控制在适宜范围内，既能克服化学反应势垒，促进薄膜生长，又能避免带电粒子带来的晶格损伤问题，因而可以在低得多的温度下（如 450℃）实现类似高温下的外延生长。在 450℃ 以下，晶体质量随温度的下降是因为动能调控分子束外延所提供的中性粒子的动能无法满足原子在衬底表面充分迁移所需的能量。通过调整中性束

粒子的动能，有望在更低温度下实现 GaN 的高质量外延。

文中以 GaN 材料的低温外延生长为例展示了动能调控分子束外延的作用，然而其实际适用材料和应用范围不限于此。考虑到不同材料具有不同的化学反应势垒，通过更换工艺气体和灵活调控中性粒子束的动能大小可以满足不同材料体系的外延生长（如其他氮化物和氧化物），大幅扩展外延生长的材料范围。除了实现更低的外延温度、扩大掺杂范围和降低对衬底材料的需求，动能调控分子束外延技术在表面界面的高效低损伤处理方面也将发挥广泛的作用。☞

致谢：本工作受到国家重点研发计划资助（项目编号：2022YFF0707600）、上海市经信委项目（编号：240132）的研发基金支持

参考文献

- ▶ * S. Yamada 等, Appl. Phys. Express 17 036501(2024)



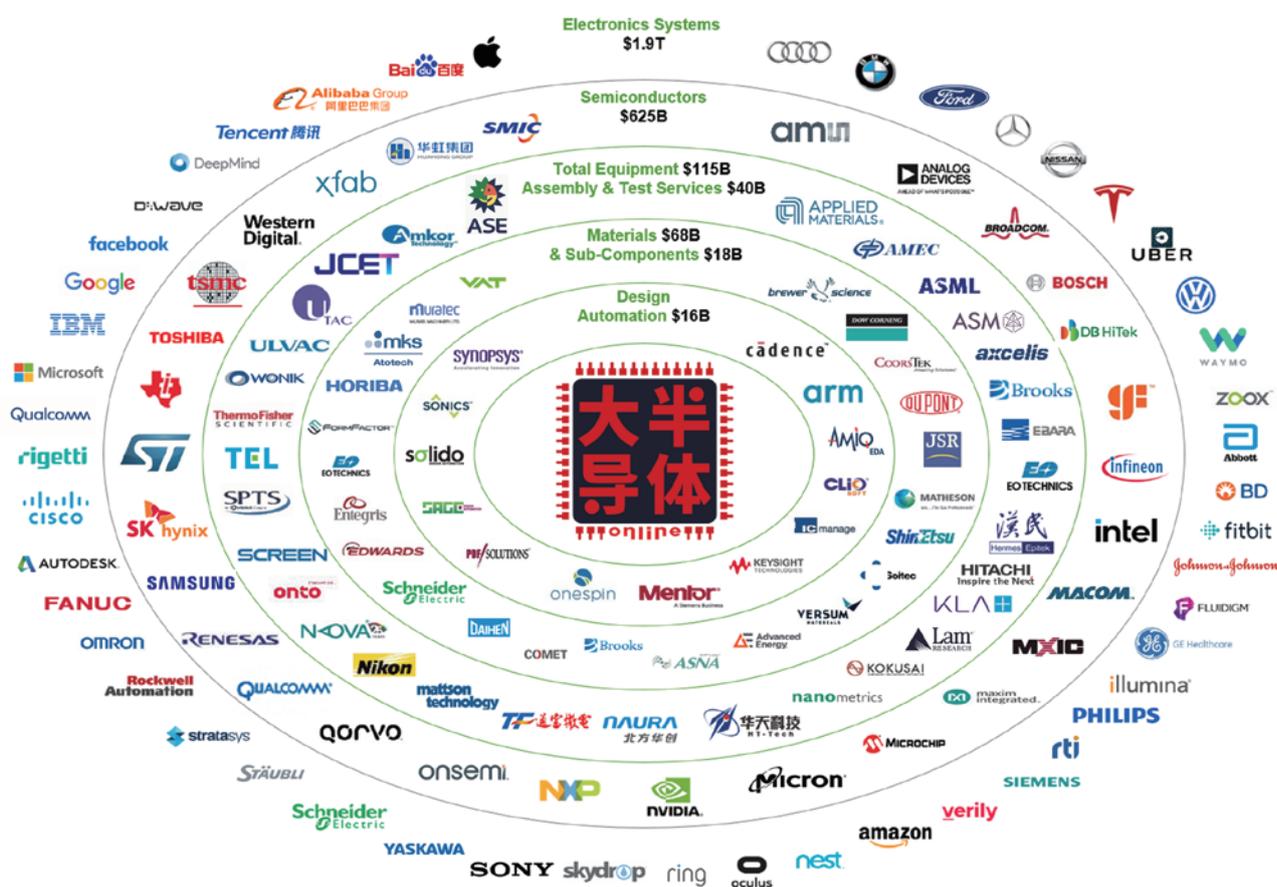
SEMICON[®] CHINA

FPDCHINA 跨界全球·心芯相联

2025年3月26-28日 | 上海新国际博览中心



全球最大的半导体行业盛会



免费自助发产品
 7000+公司 | 26万+专业观众
货比三家选精品





当失败不再是一种选择

Greene Tweed 设计的密封解决方案和结构部件在世界上要求最严苛的半导体制造应用中表现出色且经久耐用

作者：Nick Mcneal、Thyag Sadasiwan 和 Pragati Verma, Greene Tweed

电动汽车、嵌入式智能传感器件、5G 和 6G 连接、量子计算。它们有什么共同点？它们都需要由化合物半导体制成的芯片，处理硅芯片无法处理的高电压和高功率。

随着化合物半导体需求的飙升，这些器件的制造商除了需要更多的沉积和蚀刻设备、更多的衬底之外，还需要什么？是一些不起眼但不可或缺的稳定组件供应，这些组件对于制造新一代化合物半导体器件至关重要。

Chemraz 密封件：无名英雄

在 Greene Tweed，我们设计的密封解决方案

在世界上要求最严苛的半导体制造应用中表现出色且经久耐用。这是我们研究的杰出成果，在幕后努力为复杂的芯片制造机器提供支持。160 年来，我们一直在为关键领域配备材料和设计组件，保证关键运行。

例如，我们的全氟弹性体 (FFKM) Chemraz o-rings 和密封解决方案可满足现代芯片制造的关键需求。它们以防污染、可耐受腐蚀性化学品以及极高温度而闻名。

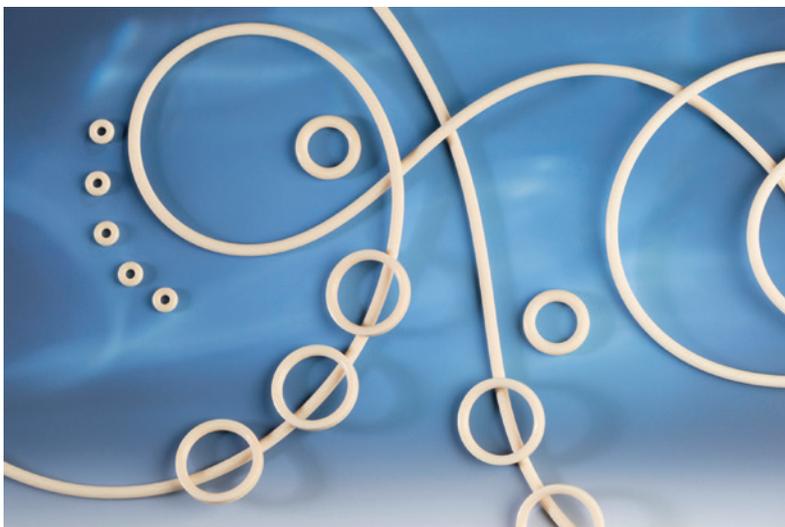
几十年来，我们一直处于复杂 FFKM 生产工艺的最前沿。这些高性能材料需要特定的制造原材料。因此，当仅仅一种成分供应短缺时，也会



发生中断。在过去几年中，意外且混乱的全行业供应紧缩影响了 FFKM 的多种材料。其供应短缺恰逢全球芯片需求激增，更加剧了这种情况。也因此，当半导体制造商正需要 FFKM 材料超速运转时，FFKM 材料供应发生短缺。这使 FFKM 行业陷入了一场完美风暴的中心，其供应延迟威胁到半导体的供应以及由此带来的经济复苏。

如果说近年来硅芯片短缺告诉了我们什么道理的话，那就是需要加强为半导体制造复杂机器提供动力的组件供应链。如今，芯片制造商敏锐地意识到半导体行业对 FFKM 密封件的依赖程度，特别是当其转向要求更高的依赖超洁净处理的工艺时。

Greene Tweed 是美国首家使用洁净室制造来生产密封解决方案的公司。我们率先采取了这一举措，因为我们非常了解超洁净操作在半导体行业中的重要性。我们知道，密封件必须在现代半导体制造工艺要求最严苛的环境中发挥作用，这



对于延长正常运行时间、减少污染和提高晶圆产量至关重要。

次优还远远不够

据 Yole Intelligence 称，过去几年，用于制造 SiC 和 GaN 功率器件的材料需求一直在飙升。如此下去，到 2027 年，化合物半导体衬底材料的销售额将增加一倍以上。这家法国市场分析公司预测，化合物衬底材料市场将从 2021 年的 9.45 亿美元增长到 2027 年的 23 亿美元，相当于复合年增长率为 17%。

为了满足对化合物半导体不断增长的需求，芯片制造商需要提高制造能力并加强 FFKM 密封件等组件的供应链，这些组件对于制造这些芯片至关重要。作为基于 FFKM 弹性体的密封件的全球领导者，我们认识到，在半导体制造这样复杂且富有挑战性的行业中，次优的密封件还远远不够。因此，我们已采取行动确保密封解决方案的稳定供应。由此，我们能够满足不断增长的需求，同时确保行业恢复力并最大限度地减少未来任何供应中断对 FFKM 材料供应的影响。

我们意识到，化合物半导体行业的动态和快速发展需要战略规划和远见。为了保证客户的战略规划和远见，我们正在积极采取措施，制定稳健的业务连续性计划，确保稳定、不间断的供应。首先，我们进行了全面的风险评估、识别漏洞并制定应急计划以减轻潜在的干扰。经过此次深入探索，我们推出了四项重大举措。将帮助我们应对这个动荡的形势，规避未来的干扰，并确保定期供应——所有这些关键举措都将帮助我们促进半导体客户的持续增长和成功。

第一个举措是，建立关键原材料的战略库存，为预期的经济复苏做好准备。虽然确保原材料至关重要，但这只是我们确保供应的多种方法之一。我们的科学家正在创新、开发新产品并重新配置现有产品，为不断变化的法规和瞬息万变的市场动态做好准备。我们正在积极识别供应受限的材料带来的风险，并通过更容易获得的原料来缓解这些风险。与此同时，我们正在与供应链合作伙伴进行合作，以确定政府审查和供应紧缩对其材料、化学品和生产工艺的潜在影响。同时，我们正在与客户合作开发和验证具有卓越技术和显著优势的替代化合物。

第二个举措是，在我们重新配置和开发新产

Chemraz	Plasma Performance		Maximum Temperature (°C)	Cracking
	O ₂ Etch Rate (% wt. loss, 90 min direct exposure)	O ₂ Remote Plasma (clean, 200°C % wt. loss)		
E38	1.003	0.100	260	Good
629	1.739	0.074	260	Good
657	0.417	0.053	280	Better
XPE	0.570	0.026	280	Best
G57	0.670	0.089	300	Better

品的同时，我们还采取积极措施实现供应链多元化，降低过度依赖单一供应商或地区的风险。我们意识到，建立多个 FFKM 工厂的资本过于密集，对于供应商来说不太可行。这就是为什么我们正在利用多个供应商来建立一个恢复力好、适应性强的供应链，以更好地应对半导体领域不断变化的挑战。

为此，我们正在开发等效产品作为原始产品的替代品。我们正在仔细筛选化合物，并从位于不同国家的不同供应商那里采购两种等效产品的原材料。例如，我们通过增加 Chemraz G57 来扩大我们的供应链。其等效产品是 Chemraz 657，在各种腐蚀性化学环境中有着出色的耐等离子性。

第三项举措是，扩大我们的制造足迹。我们在世界各地的新地点设立战略工厂，此举有助于为半导体客户提供稳定的供应链。我们最新即将设立的制造工厂位于韩国忠清北道清州市。该工厂预计将于明年年中准备就绪，最初将专门用于生产我们性能最高的弹性体 Chemraz 产品线，专为半导体应用而配置。通过分散生产和采购，我们将能够更好地管理供应紧张、克服生产瓶颈并确保向客户的交付时间。

四项关键举措中的最后一项与扩大制造能力同步实施，是库存优化的重大举措。目前我们正在建立合适的库存，以行业领先的交货时间来满足未来的需求。加上我们的新工厂，这一举措将

帮助我们提高产能和能力，更好地支持我们产品在全球各地的需求，并增强半导体行业供应链的稳定性。

回到正轨

增强供应恢复力的成果已经显而易见。在地缘政治和管控措施导致前所未有的 FFKM 供应紧缩之前，我们已经能够恢复到中断前客户享有的标准交货时间。让供应时间回到正轨不仅证明了我们的恢复力、适应性和以客户为中心的方法优势，而且对于支持化合物半导体器件制造商的强劲需求也至关重要。



为您解答所有的半导体密封问题

您是否需要一种弹性体 o-ring 或密封解决方案，能够在要求最严苛的半导体应用中的极端温度下承受腐蚀性液体、气体和等离子体？以下是半导体制造商面临的关键密封问题的答案……

哪种密封件最适合半导体制造工艺？

全氟弹性体 (FFKM) 密封材料以其对侵蚀性化学品、极端温度和等离子体环境的卓越耐受性而闻名，是半导体制造等侵蚀性制造工艺的理想选择。Greene Tweed 可提供 Chemraz 密封解决方案，该方案因其对极端温度、化学品和等离子体环境的卓越耐受性而知名。

是什么让 Greene Tweed 的 Chemraz 密封解决方案与众不同？

Greene Tweed 的 Chemraz 密封解决方案有何独特之处？160 年来，我们为包括半导体行业在内的关键行业配备了性能优异的材料和设计组件——没有任何借口，没有任何例外。Chemraz 具有所有弹性体材料中最广的温度范围和无与伦比的耐化学性，是最具挑战性的半导体应用的首选。卓越的品质、精密的设计和可定制性可减少停机时间并提高晶圆加工产量。

Greene Tweed 能否定制密封件以适应特定的半导体应用？

可以，在 Greene Tweed，我们可提供一系列密封解决方案，可以根据您的具体要求进行定制。我们的工程团队与半导体制造商密切合作，可设计符合设备规格并提供优化性能的定制密封件。

在这一变革之旅中我们持续奋勇前进，致力于将客户满意度和供应链稳定性作为我们一切事务的核心。我们知道，高性能 Chemraz 密封件具有其他密封件所没有的功能，此外，及时交付我们的产品对于客户的成功和持续增长至关重要。

什么样的半导体制造工艺可受益于 Greene Tweed 的 Chemraz 密封解决方案？

Chemraz FFKM 密封解决方案非常适合各种半导体设备，例如：

- 导体蚀刻
- 介电蚀刻
- PECVD
- ALD
- RTP
- 湿洗
- 腔室密封件
- 狭缝阀和 BSV
- 摆阀和闸阀
- 静电卡盘和基座屏障密封件
- 化学品输送

Greene Tweed 的密封解决方案可否耐受强力清洁和蚀刻化学物质？

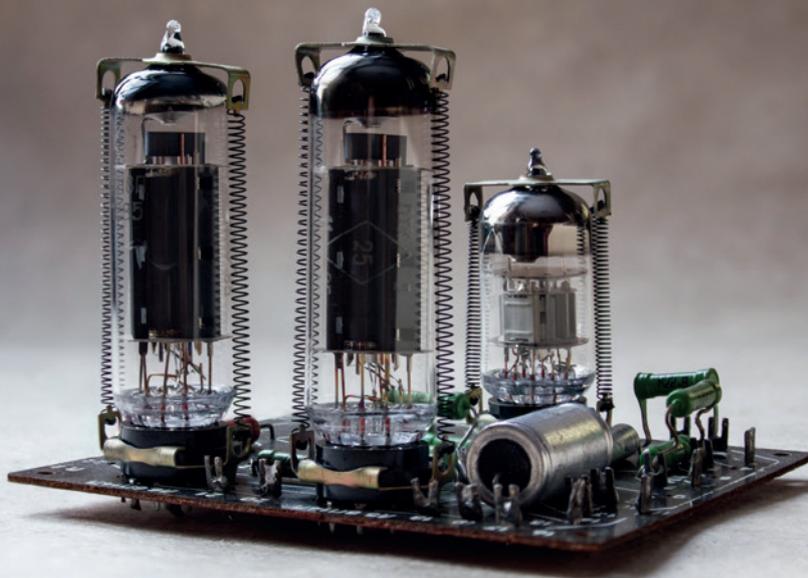
当然可以！Chemraz 有着卓越的耐化学性，与半导体制造中使用的强力清洁和蚀刻化学品高度兼容。即使暴露在严苛的等离子体环境和反应性化学物质中，也能保持稳定，能够确保最佳性能和使用寿命。

我想在半导体应用中采用 Greene Tweed 的最新密封解决方案。该怎么做？

想了解为半导体设备量身定制的 FFKM 密封解决方案的优势，请联系 Greene Tweed 的专家团队。我们的工程人员随时准备为您研究设备规格并提供技术指导。我们将继续努力迭代、改进和提供高质量的密封解决方案，来提升您的半导体制造工艺。

我们将与客户以及合作伙伴一起，继续塑造一个充满活力的未来。未来的蓬勃发展有赖于为化合物半导体制造商快速扩张的关键业务提供保证的创新和定制协作方法。CS。

III 族氮化物场致发射真空晶体管



III 族氮化物的场致发射晶体管可在高频下提供高功率，开启了稳定、紧凑的真空电子电路之门

作者：Pao-Chuan Shih 和 Tomás Palacios，麻省理工学院

真空电子产品有着极其丰富和成功的历史。二十世纪初，推出了第一个基于真空三极管的电子开关。真空管也是上世纪 40 年代建造的第一台可编程通用电子计算机 ENIAC 的核心组件。其结构革命性地提高了计算速度，比当时的机电机器快大约一千倍。然而，这台开创性的计算机体积庞大，不太绿色环保，尺寸为 $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 30\text{ m}$ ，占地 170 m^2 ，耗电量为 150 kW 。

1947 年固态晶体管发明以来，半导体器件由于生产成本较低且易于扩展，已逐渐取代真空电子器件。因此，真空电子器件现在仅用于少数利基应用。在行波管和速调管中，真空电子器件仍然有着重要作用，由于无散射电子传输和通道中的高击穿场，真空电子器件可分别在 $10\text{-}100\text{ GHz}$ 和 100 GHz 以上产生强烈的高频信号（见图 1）。真空电子器件的其他优点是在高温下具有鲁棒性，并且能够承受会降低固态器件性能的辐射环境。

发挥真空通道巨大潜力的关键是将电子注入真空。传统方法实现一种形式的电子发射（称为热电子发射）是加热阴极，以便为电子提供足够

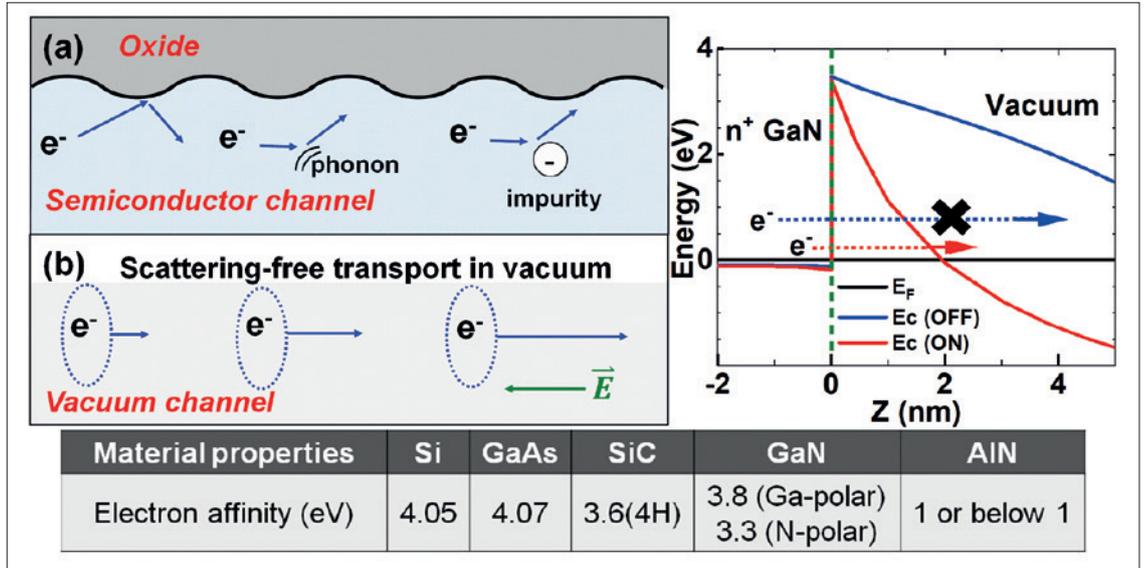
的能量来克服固体和真空之间的功函数势垒。然而，这就需要高温，由此阻碍了紧凑器件的构造。限制热电子阴极在大规模电路和系统中应用的其他因素包括高功耗、需要冷却以及相对较低的开关速度。

在场致发射方面获得青睐

幸运的是，所有这些问题都可以通过场致发射来解决。通过这种方法，电场可控制电子发射到真空中的隧道距离。许多半导体和金属已经被研究作为场致发射器，不过经常出现问题，例如有限的栅极控制效率、低于理想的电流密度和器件不稳定性等。

III 族氮化物是有望避免这些缺陷的一类材料，例如 GaN、AlGaN 和 AlN。最近，这些化合物因其可设计的电子亲和势引起了人们的关注（见图 1）。当 AlGaN 合金的铝成分增加以及当表面极化从金属极性变为 N 极性时，电子亲和势降低。根据理论，具有低电子亲和势的 n 掺杂简并型半导体应该具有非常低的功函数，从而导致高

图1: (a)半导体和(b)真空通道中的电子传输。真空中的无散射传输和高击穿场使真空通道成为高功率和高频电子器件的绝佳选择。理论上, n掺杂简并型III族氮化物(例如AlGaIn合金)由于其低电子亲和势而具有低电子发射势垒, 能够成为优异的真空发射器。



发射电流密度和低工作电压。

尽管 III 族氮化物在场致发射应用方面具有巨大潜力, 但研究工作仍集中在“自下而上”的方法上, 将这些材料生长为纳米结构。研究报告通常仅限于工作电压通常大于几百伏的两端几何结构。

缺乏第三个控制端子是一个重大缺点, 限制了其在严苛环境下的功率放大器、高压开关和计算电路等应用中的使用。

在过去的五年里, 我们麻省理工学院的团队一直在开发和改进基于 III 族氮化物场致发射的真空晶体管。我们的研究工作包括确定以下三个关键挑战并开发新技术来解决这些挑战: (1) 紧凑的自对准栅极; (2) 场致发射极尖端尖锐且均匀; (3) 集成阳极(见图 2)。

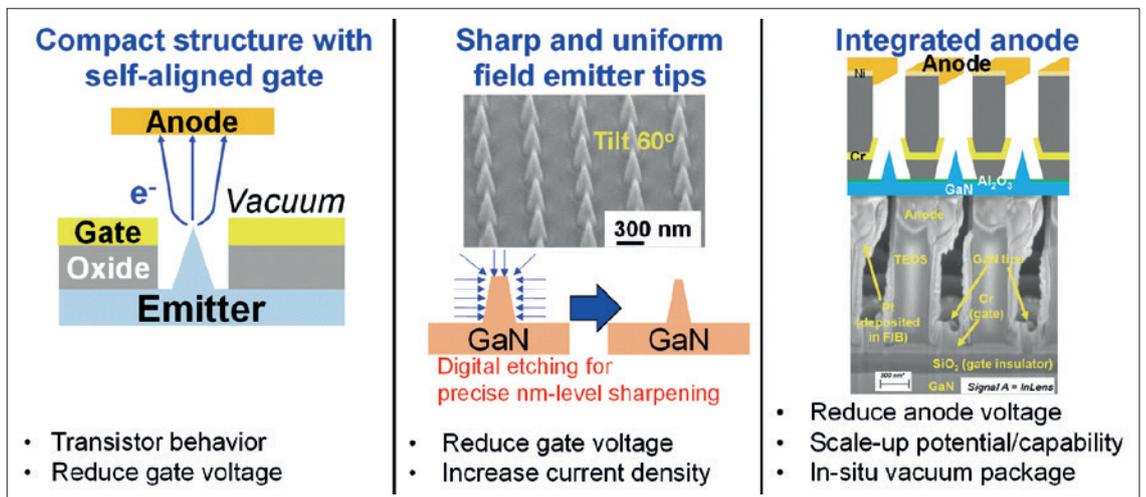
为了解决传统上限制 III 族氮化物场致发射器件应用的栅极端子缺乏的问题, 我们为此类材料开发了自对准栅极结构。对于这一开发, 我们借鉴了其他开发硅和金属场致发射极尖端团队的

研究成果。我们的团队采用了“自上而下”的方法, 使用干法蚀刻来生产结构良好的 GaN 场致发射阵列。我们在这些场发射阵列上沉积并定义了自对准栅极结构, 使它们能够在低于 100 V 的工作栅极电压下提供出色的栅极控制能力和类似晶体管的特性。

除了引入自对准栅极之外, 场致发射极尖端的均匀性和锐度的改进对于提高基于场致发射的真空晶体管的性能也至关重要。为了确保场致发射, 就需要高电场, 来减少从费米能级到真空能级的电子隧道势垒。这种量子隧道机制对表面电场具有指数依赖性, 即电场越强, 电子发射就越高。还可以通过改变发射极尖端的形状来局部增强电场。因此, 均匀且尖锐的尖端对于在场致发射阵列中实现均匀的电子发射至关重要, 可确保增加的电流密度。

我们的第三项举措——继开发栅极结构和 GaN 发射极尖端之后——涉及将阳极电极集成到

图2: 紧凑型场致发射真空晶体管由三个关键构建模块组成: 自对准栅极, 可实现类似晶体管的特性和电子发射的低工作电压; 尖锐、均匀的发射尖端, 对于均匀电子发射、降低工作电压和高电流密度至关重要; 具有原位真空腔封装的集成阳极, 是电路级放大能力所必需的。



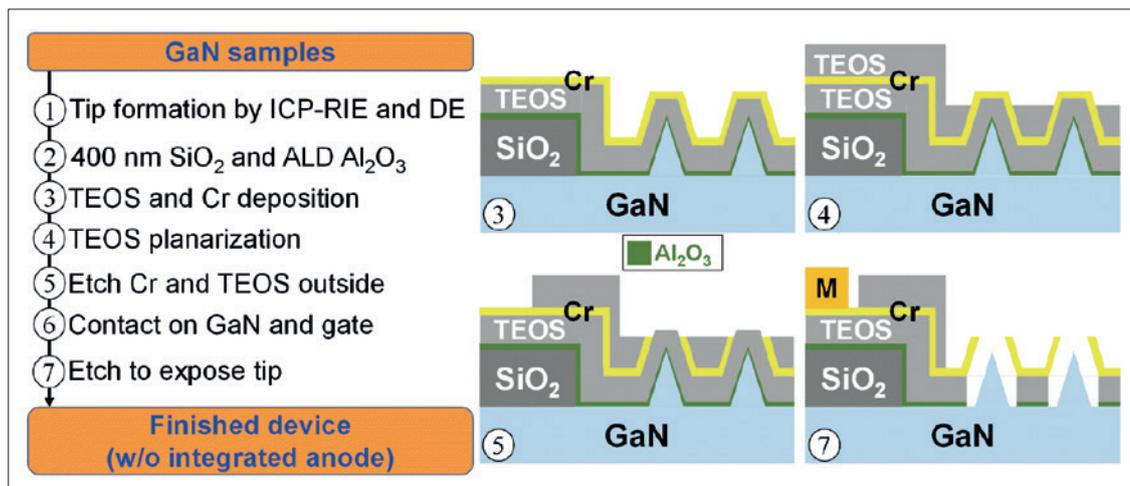


图3: GaN场致发射真空晶体管的工艺流程以及关键步骤后的器件横截面图。阳极电极尚未集成到这些器件中。

我们最先进的场致发射器中。通过采取这一步骤，我们已经能够形成三端全集成真空晶体管，这对于放大应用（例如基于真空电子的集成电路）是必需的。

这方面的研究工作使我们能够可靠地生产沟道长度低于 1 mm 的集成阳极。请注意，我们可以通过在器件制造过程中调整多个参数来改变沟道长度。我们的方法还提供了密封真空腔的潜力，从而放宽了对真空封装和电路级集成的限制。我们将很快发布阳极集成技术的详细信息，并阐述其对器件性能的影响。

发射阵列制备

蚀刻和清洁步骤已用于制造我们的 III 族氮

化物场致发射晶体管（有关主要步骤的概述，请参阅图 3）。我们从硅基 GaN 试样开始，试样是从 6 英寸晶圆上切割下来的。我们使用电子束光刻和剥离工艺定义的镍硬掩模等离子干法蚀刻，在这些试样上形成 GaN 场致发射阵列。GaN 发射极的尖端通过湿法数字蚀刻进行锐化（参见图 4 以及图 3 中的步骤 1）。

在数字蚀刻的一个周期中，首先用 H_2SO_4 和 H_2O_2 的混合物处理样品，来氧化 GaN 表面（步骤 1）。之后，用去离子水去除残留的化学物质（步骤 2），然后用稀 HCl 蚀刻掉表面氧化物层（步骤 3），并用去离子水再次冲洗样品（步骤 4）。经过几个数字蚀刻周期后，必须更换化学品，因为 H_2O_2 会分解，并且 H_2SO_4 和 H_2O_2 混合物的温度

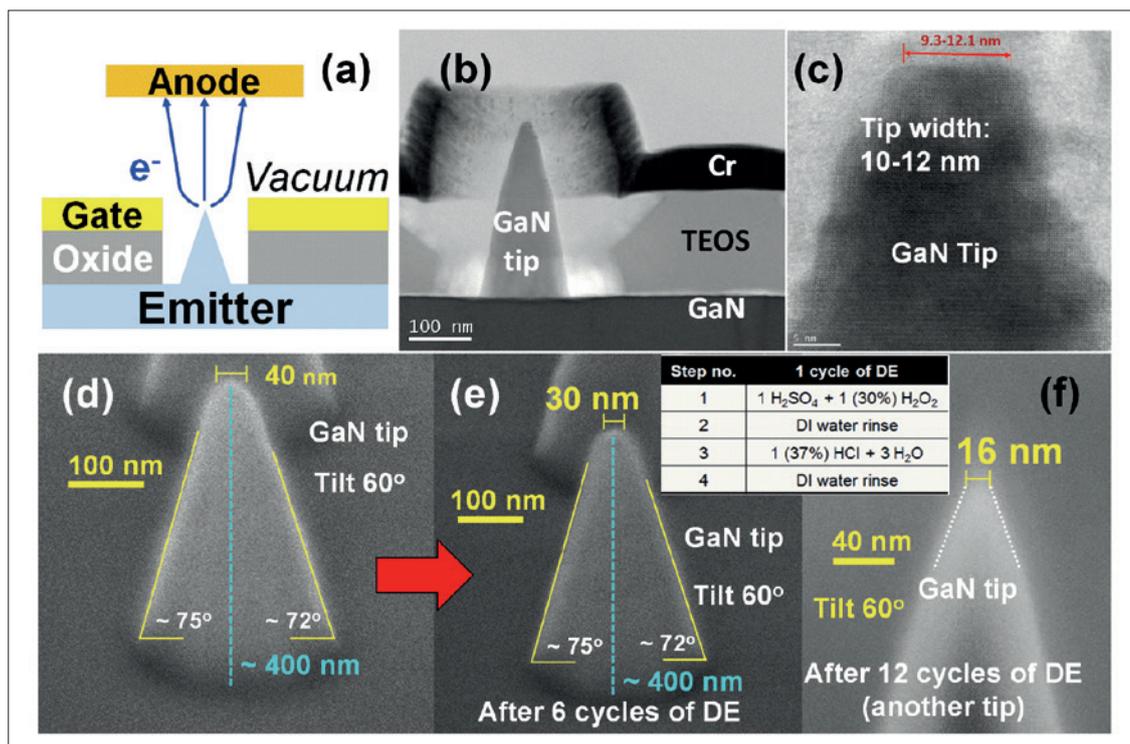
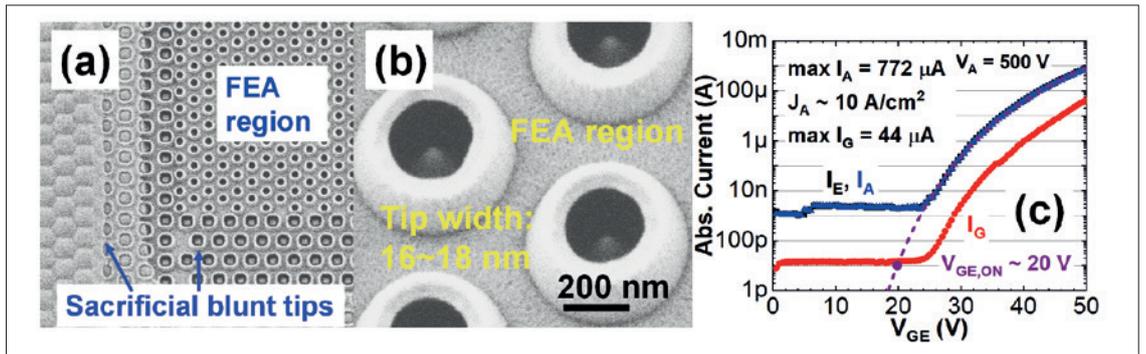


图4: (a)表示测量设置的简化器件图，(b)所制造的具有自对准栅极的GaN发射极尖端的横截面扫描电子显微镜(SEM)图像。(c)GaN尖端的透射电子显微镜(TEM)图像证实了尖端宽度为10-12 nm。数字蚀刻(DE)之前的GaN发射极尖端(d)和数字蚀刻(DE)之后的GaN发射极尖端(e) (f)的SEM图像证实了该DE技术的有效尖端锐化。DE的一个周期由用于氧化的 H_2SO_4 + H_2O_2 和用于去除氧化物的稀HCl组成。该工艺能够在场致发射阵列中制造尖锐且均匀的尖端。(b)横截面SEM和(c)TEM图像，由南理工公会的Bruce Gnade教授团队提供。

图5: (a) (b)扫描电子显微镜图像和(c)具有自对准栅极的最先进GaN场致发射阵列的传输特性。该器件对发射电流(I_E)和阳极电流(I_A)具有良好的栅极控制能力, 开关比高于 10^5 , 并且栅极泄漏(I_G)较低。在导通状态下小于 I_A 的10% ($V_{GE}=50V$)。阳极电流的拟合(紫色虚线)证实电流传导以场致发射为主。



会随着时间的推移而降低。我们发现, 这种湿法数字蚀刻的三个周期可使 Ga 极性 GaN 金字塔尖端锐化 5 nm, 从而能够在场致发射阵列中可靠地制造尖端宽度低于 20 nm 的均匀 GaN 发射尖端。

在形成具有亚 20 nm 发射极尖端的 GaN 场致发射阵列后, 我们分别通过 PECVD 和 ALD 沉积 SiO_2 和 Al_2O_3 (图 3 中的步骤 2)。添加 SiO_2 层可提高栅极焊盘区域下的器件稳定性, 而 Al_2O_3 涂层可保护尖锐的 GaN 发射极尖端免受后续制造步骤的影响, 这是确保高制造良率和良好器件性能的关键。这些后续制造步骤首先使用正硅酸乙酯 (TEOS) 前体通过 PECVD 添加 SiO_2 层。接下来是通过溅射生长保形铬层 (图 3 中的步骤 3)。 SiO_2 和铬层构成了 GaN 场致发射真空晶体管的栅极叠层。

最后, 我们通过 PECVD 用 TEOS 前体沉积一层厚的 SiO_2 层。然后, 我们通过在 TEOS SiO_2 层上进行精心安排的干法蚀刻, 来使器件表面变得光滑 (图 3 中的步骤 4)。然后, 我们使用 TEOS SiO_2 层作为硬掩模, 干法蚀刻发射极尖端的铬栅极金属 (图 3 中的步骤 5)。在 GaN 和栅极金属、铬上形成金属触点后, 通过精心安排的干法蚀刻暴露 GaN 发射极尖端。然后使用缓冲氧化物蚀刻剂进行短时间湿法蚀刻, 去除剩余的 SiO_2 层和保

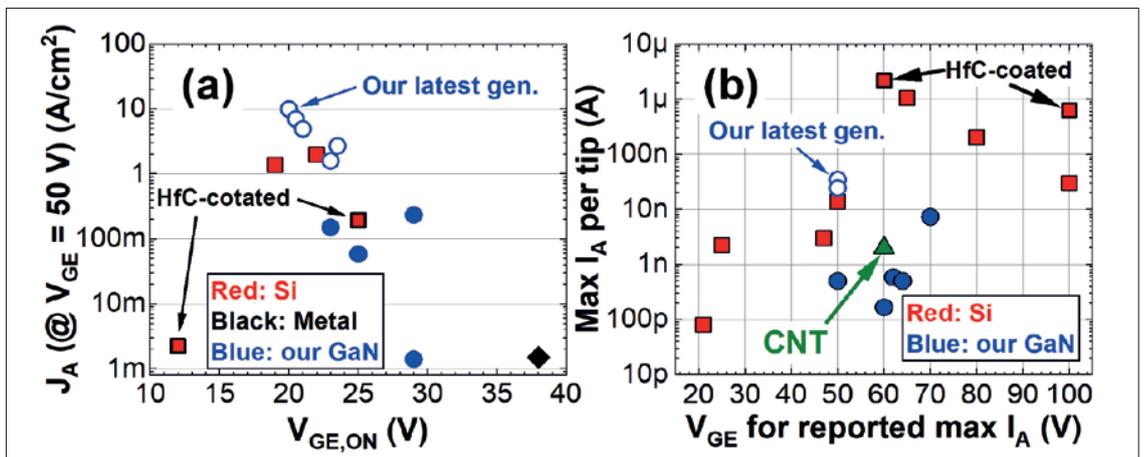
护性 Al_2O_3 层 (图 3 中的步骤 7)。利用这一工艺, 我们可重复制造出三代不同代的具有自对准栅极和亚 20 nm 尖端宽度的 GaN 场致发射阵列。

潜力巨大

我们在基础压力低于 2×10^{-9} Torr 的超高真空室中对场致发射阵列进行了表征。在确定传输特性时, 我们应用栅极发射极偏置电压 (V_{GE}) 从发射极尖端提取电子, 并在悬浮阳极端子上使用 500 V 至 1000 V 之间的高压来收集发射的电子 (如图 4(a) 所示)。虽然我们可以通过上下移动样品台来调整阳极发射极距离, 但在我们所有的测量中, 我们将此距离固定为 1-2 mm。

我们最新一代的 GaN 场致发射阵列具有自对准栅极, 阵列中具有均匀而尖锐的尖端, 周围有牺牲钝锐尖, 有助于管理介电层中的峰值电场, 从而提高器件稳定性 (见图 5 (a) 和 (b))。我们最好的场致发射阵列具有良好的阳极电流开关比、低栅极漏电 (小于导通状态下阳极电流的 10%) 以及 $10 A cm^{-2}$ 的电流密度。栅极发射电压为 50 V——据我们所知, 这是文献报道过的所有场致发射极阵列中电流密度最高的 (见图 6 (a))。请注意, 发射极和阳极电流中相对较高的噪声水平是与高压源测量单元相关的测量假象。电流 -

图6: (a)电流密度(J_A)与开启电压($V_{GE,ON}$)的关系以及(b)每个尖端最大阳极电流与报告过的最大阳极电流的栅极发射极电压(V_{GE})的基准图。这些器件在 $V_{GE}=50 V$ 时具有最高的电流密度($10 A/cm^2$)和每个尖端的参考电流($35 nA/tip$)。报告过的硅场致发射阵列在 $V_{GE}=50 V$ 时每个尖端的最大电流约为 $100 - 500 nA/tip$ 。



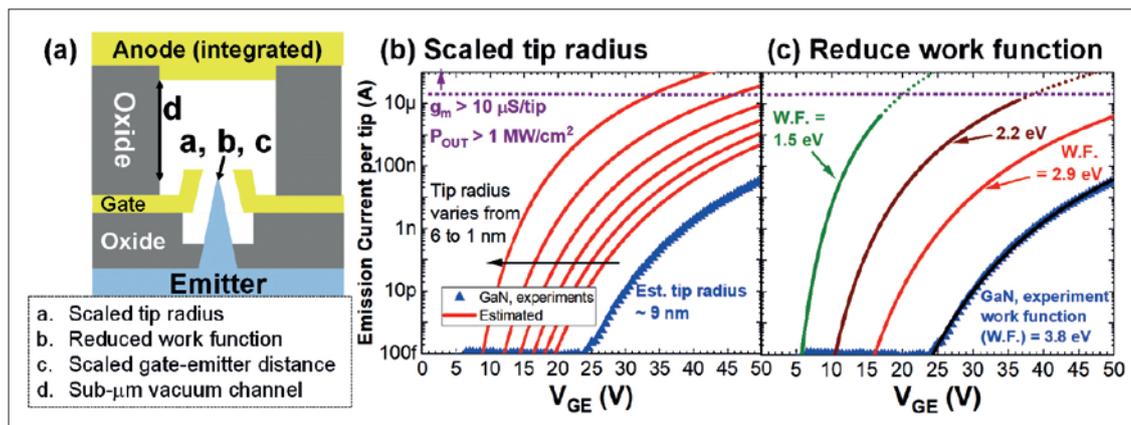


图7: (a)计划的完全集成的基于场致发射的真空晶体管, 经过高级修改来提高性能, 以及每个尖端的预估发射电流。(b)缩放的发射极尖端半径和(c)发射极尖端中减小的功函数。(c)中的虚线表示由于与发射极功函数相对应的高电场而导致预估假设无效的区域。假设栅极发射极具有 $(300 \text{ nm})^2$ 器件面积, 并且假设真空通道中的击穿电压超过200 V, 来预估可能的输出功率密度。

电压曲线可以通过场致发射方程很好地拟合, 例如 Murphy-Good 模型。

由于紧凑的自对准栅极结构和均匀尖锐的 GaN 发射极尖端的结合, 我们的场发射阵列是 III 族氮化物场发射器件中最先进的, 并在栅极 - 发射极电压为 50 V 时, 提供文献中最高场致发射电流密度 (见图 6 (a))。对于这些结构, 电流密度基于具有自对准栅极的场致发射阵列的总器件面积。

除了电流密度之外, 这些场致发射阵列的一个关键指标是每个尖端的发射电流。理想情况下, 阵列在低偏压条件下每个尖端具有较高的平均发射电流, 因为这使得这些器件在集成电路和电源应用中使用时能够提供高水平的效率。我们最好的 GaN 场发射阵列的每个尖端的最大平均发射电流为 35 nA, 而那些基于 HfC 涂层硅场致发射极尖端的阵列已证明每个尖端为 100-500 nA, 同样适用于栅极发射极电压 50V。基于这些结果, 很明显, III 族氮化物器件的电流密度仍有改进的空间。

我们发现了进一步提高器件性能的重大机会。这些途径包括: 缩短栅极 - 发射极距离, 目前约为 150 nm, 以增强栅极对发射极尖端电子发射的控制 (见图 7 (a)); 将尖端宽度锐化至 10 nm 以下, 以增强局部电场 (见图 7 (b)); 并采用低电子亲和势 III 族氮化物半导体或低功函数材料 (见图 7 (c))。

这些方面的初步研究工作包括在先前的研究中制造栅极 - 发射极距离低于 50 nm 和尖端半径低于 5 nm 的硅场致发射阵列。好消息是, 开启电压 (即开启器件的栅极发射极电压) 仅为 10 V 左右。然而, 这些器件会受到与尖端尺寸变化和狭窄器件几何形状相关的性能变化的影响。

由于紧凑的自对准栅极结构和均匀尖锐的 GaN 发射极尖端的结合, 我们的场致发射阵列是

III 族氮化物场致发射器件中最先进的, 并在栅极 - 发射极电压为 50 V 时, 提供文献上最高的场致发射电流密度

我们希望通过利用 III 族氮化物材料的低电子亲和势和表面偶极子的极化工程, 能够生产出具有更低的功函数和减小电子发射势垒的场致发射器 (见图 7 (c))。然而, 我们对 n^+ 富铝 GaN 和 $n+n$ 极性 GaN 的初步实验尚未明显改善器件性能。为了解决这个特殊的缺点, 我们计划对发射极尖端形成的蚀刻工艺进行材料上的优化。

虽然还有更多的研究工作要做, 但我们已经有了坚实的基础。GaN 场致发射阵列具有自对准栅极和均匀、尖锐的发射极尖端, 由此我们能够展示最先进的基于场致发射的真空晶体管, 在栅极发射器电压为 50 V 时具有最高电流密度。一旦我们通过集成阳极结构和应用先进材料工程进一步提高性能, 我们相信, III 族氮化物场致发射真空晶体管将能够在未来的高频、高功率以及严苛环境下的电子产品中发挥重要作用。☞

参考文献

- ▶ Pao-Chuan Shih et al. "Self-Align-Gated GaN Field Emitter Arrays Sharpened by A Digital Etching Process," IEEE Electron Dev. Lett. 43 422 (2021)
- ▶ Pao-Chuan Shih et al. "Wet-based digital etching on GaN and AlGaN," Appl. Phys. Lett. 120 022101 (2022)
- ▶ Pao-Chuan Shih et al. "GaN Field Emitter Arrays with JA of 10 A/cm² at VGE = 50 V for Power Applications," 68th International Electron Devices Meeting (IEDM), December 2022
- ▶ Pao-Chuan Shih, "Vacuum Transistors Based on III-Nitrides Field Emitter Arrays with Self-Aligned Gate," PhD Dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 2023.

在 SOI 上打印高速调制器

微转移印刷承诺为将基于 InP 的电吸收调制器与基于硅的光子集成电路结合提供一个低成本、高吞吐量的过程。

来自爱尔兰 Tyndall 国家研究所的一个团队声称，他们首次展示了微转移印刷电吸收调制器。

他们基于 InP 的调制器安装在硅基绝缘体平台上，据说适用于高速通信和传感应用。

两种领先的调制器形式——基于马赫-曾德尔干涉仪的和基于电吸收的——都结合了高带宽、大消光比、低功耗和低工作电压。然而，电吸收调制器具有非常紧凑的占地面积的关键优势。

对于光子集成电路，就材料而言，硅基绝缘体 (SOI) 是主要平台。其优点包括高折射率对比有助于波导，以及有机会采用成熟、高产量、低成本的生产过程。然而，SOI 的间接带隙导致载流子引起的折射率变化相对较弱，因此最好从 III-V 族材料如 InP 中生产调制器。

其他团队之前的工作采用了晶圆键合技术将基于 InP 的调制器与 SOI 键合。然而，Tyndall 团队声称，用微转移印刷等拾放技术取代晶圆键合，结合基于 InP 的调制器和基于 SOI 的光子集成电路，有几个优势。好处包括潜在的增加吞吐量，通过利用原晶圆上的所有设备实现更低的生产成本，以及通过后端线处理重用 InP 衬底和共集成

材料的机会。

研究人员通过将结构转移到具有 80 微米乘以 500 微米占地面积的光电子电路上，展示了他们的微转移印刷技术的能力，该结构具有从 220 微米到 300 微米的波导，转移到 220 纳米 SOI 波导电路上。

为了使调制器能够转移，他们在 InGaAs 和 AlInAs 释放层的顶部生长了这种结构，特点是薄的 n 型包层，以确保有效地耦合到 SOI 波导。

用于制造电吸收调制器的外延堆叠的额外特性包括：小的结电容，以支持高速操作；p 侧的分级限制以增强空穴传输；以及 n 侧的厚限制层 AlInGaAs，以补偿电子和空穴的传输时间。

通过直接在 SOI 波导上印刷部分制造的调制器，实现了调制器和波导之间的渐变耦合。锥形增加到 1 微米以减轻对准放置公差，将 SOI 电路的基本模式耦合到调制器。

从印刷凭证生产电吸收调制器涉及五个光刻级别，其中脊波导使用电子束光刻定义。

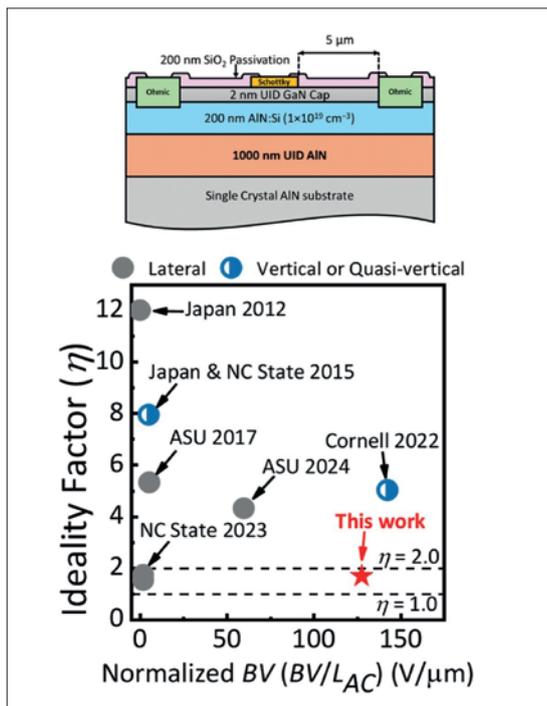
为了评估调制器的性能，团队使用切割的单模光纤和可调谐激光源将光耦合到 SOI 电路中。测量结果显示，在 1550 纳米处的消光比为 30 分贝，电气带宽高达 40 吉赫，使用背对背测量的开眼图高达 50 吉比特 / 秒。

“50 吉比特 / 秒并没有打破任何光调制器的数据传输速率记录，” 通讯作者 Owen Moynihan 承认。然而，他认为，通过引入行波电气接触和转向调制器阵列，可以实现更高的数据速率。他指出，采用这种方法，已经有关于 250 吉比特 / 秒阵列的报道。

采用这种方法是团队的下一个目标之一。“但更重要的是，我们将专注于在同一芯片上集成多个转移印刷设备，如激光器、调制器和探测器，” Moynihan 说。

参考文献

O. Moynihan et al. Appl. Phys. Lett 125 051102 (2024)



电吸收调制器的顶视图，微转移印刷到 SOI 晶圆上。

调整 GaN MOSFET 的导通电阻

氮自由基处理后插入 AlN 中间层，提高了 GaN MOSFET 的沟道迁移率

日本一团队通过引入氮化界面，将 GaN MOSFET 的导通电阻降低了四倍。

丰田中央实验室和可持续发展材料系统研究所的工程师们取得了这一进展，该进展将有助于开发能高效应对高电压和高电流的器件，而这正是高效功率转换系统所必需的。

这类系统的潜在备选器件是一些垂直型器件结构，包括几种形式的 JFET。团队发言人 Kenji Ito 表示，栅过驱动受限会导致 JFET 受到抑制，他指出，由于栅极 p-n 二极管中存在正向电流，栅极电压超过 3V 时，栅极漏电流会上升。为了抑制这一漏电流，需要限制施加的栅极电压，因此要禁止使用栅过驱动。

AlN 中间层和氮自由基预处理提高了 GaN MOSFET 的迁移率

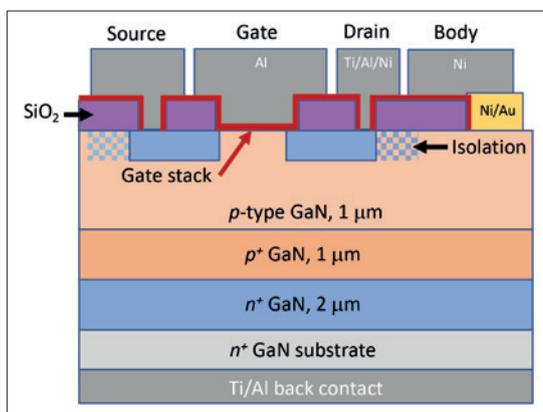
与此形成鲜明对比的是，MOSFET 的栅极漏电流极低，因为其栅极结构由氧化物 / 半导体结构构成。

在电压为 1 kV 或更高电压下，GaN MOSFET 的有一个问题是，当沟道迁移率为 $100 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 时，沟道电阻为 $0.5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ 。另一个缺点是栅极氧化物的可靠性不足。

Kenji Ito 及其同事正在解决这两个问题。早在 2020 年他们就发现，引入栅极氧化物 AlSiO 后，GaN MOSFET 在 150°C 、 5 MV cm^{-1} 的条件下寿命可达 20 年。然而，沟道迁移率却不超过约 $40 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。现在，Kenji Ito 及其同事采用了氮化技术，克服了这一限制，使沟道迁移率达到 $200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

制造 GaN MOSFET 首先要将 n 型 GaN 衬底装入 MOCVD 腔室，然后沉积一叠外延层。生长后在 850°C 下退火，激活了镁受主。硅离子注入和退火形成源极区和漏极区，然后注入氮离子提供隔离，抑制源极和漏极之间的漏电流。然后用 HF 溶液清洁 GaN 表面，除去 GaOx，再用等离子体增强 CVD 添加一层 300 nm 厚的 SiO_2 。之后从沟道上方除去 SiO_2 ，再用等离子体增强 ALD 添加一层 40 nm 厚的 AlSiO（作为栅极氧化物）和一层 3 nm 厚的 SiO_2 盖帽层。

除了这种在 GaN 上直接沉积 AlSiO 而形成的变体外，Kenji Ito 及其同事还制造了两种变体：



AlN 中间层和氮自由基预处理提高了 GaN MOSFET 的迁移率

一种是在 GaN 上的 AlSiO 层之间插入一层 AlN 中间层；另一种结构同上，但沉积中间层前对其进行了氮自由基预处理。

器件在氮气环境下于 950°C 退火 10 分钟，金属得以蒸发，从而形成主体、源极、漏极。

利用次级离子质谱法获得的材料剖面显示，插入 AlN 中间层抑制了镓的扩散。据推测，这一抑制作用源于中间层的插入，中间层可防止 GaN 表面在沉积期间和沉积后退火过程中发生氧化。

测量结果表明，中间层也有利于提高有效迁移率，有效迁移率从 $46 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 升至 $130 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。氮自由基预处理使有效迁移率进一步提高，达到 $229 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

Kenji Ito 表示，虽然研究团队在研究中用到了同质衬底，但这并不是必要的，因为重点是氧化物 -GaN 界面。不过，该团队正在开发垂直型 GaN MOSFET，因此仍需考虑偏压应力下通过 p-n 结的源漏电流。Kenji Ito 认为优质 GaN 衬底在可靠性方面拥有优势，他指出：“目前，由于 GaN-on-silicon 晶圆涉及高密度的穿透位错，反向漏电流是一个关键问题。”

目前，该团队正计划研究如何控制 GaN MOSFET 的阈值电压，同时不影响其迁移特性。界面控制技术的一个缺点是阈值电压会出现负偏移，因而阻碍了常关型器件的制造，而常关型器件是故障安全开关电路所必需的。

参考文献

K. Ito et al. Appl. Phys Express 16 074002 (2023)

垂直范德瓦尔斯集成 p-W_{0.09}Re_{0.91}S₂/GaN 异质结用于超高探测率紫外图像传感

在紫外图像传感技术领域，深圳大学射频异质异构集成全国重点实验室刘新科副教授课题组取得了创新性成果。他们成功开发出一种基于 p-W_{0.09}Re_{0.91}S₂/GaN 的 2D/3D 范德华异质结光电探测器，并将其集成于自由支撑 (FS)-GaN 基底之上 (图 1)，该探测器涵盖了水平、准垂直以及垂直等多种结构，展现出卓越的性能表现。

随着现代科技的不断发展，光电器件在众多领域发挥着愈发重要的作用，其中高性能光电探测器的研发成为研究热点之一。特别是对于紫外光的探测，在诸如环境监测（如检测大气中的紫外线强度以评估臭氧层空洞情况）、生物医学成像（如对细胞或组织进行高分辨率成像）以及工业检测（如检测半导体芯片制造过程中的光刻精度）等诸多关键领域具有不可替代的应用价值。然而，传统光电探测器在发展过程中面临着诸多挑战，如不同材料之间的集成困难，这往往导致界面兼容性差、晶格失配等问题，进而限制了器件性能的进一步提升，难以满足日益增长的实际需求。而范德华(vdW)异质外延技术的持续进步，为突破这些瓶颈提供了全新的途径，它能够实现不同维度和性质材料的原子级精准集成，为异质材料的集成与功能化开辟了广阔的发展空间。

在此次研究中，该课题组充分利用 vdW 异质外延技术的优势，巧妙地结合了多种性能提升策略。在材料选择方面 p-W_{0.09}Re_{0.91}S₂ 二维材料与 GaN 三维材料的组合实现了混合维度堆叠，二者之间独特的相互作用为光电性能的优化奠定了基础。通过 p 型掺杂技术，有效调控了材料的电学

性质，进一步增强了载流子的传输特性。同时，II 型能带对齐的设计使得电子和空穴在异质界面处实现了高效的空间分离，极大地提高了光电转换效率。此外，精心设计的垂直结构优化了光吸收和载流子收集路径，减少了复合损耗。基于这些创新策略，所开发出的垂直结构光电探测器展现出了一系列令人瞩目的性能指标。其响应度高达 497.60 A/W，这意味着该探测器能够对微弱的紫外光信号产生强烈的电学响应，从而实现高灵敏度的探测。特定探测率达到 8.41 × 10¹³ Jones，这一数值反映了探测器在噪声环境下对光信号的分辨能力，高探测率确保了在复杂环境中仍能准确捕捉紫外光信号。而且，该探测器具有快速的响应速度，上升/下降时间仅为 10 ms/20 ms，能够快速地对光信号的变化做出响应，这对于实时监测等应用场景至关重要。

更为重要的是，该研究团队将研发的探测器成功应用于单像素成像领域，有力地验证了其在实际应用中的巨大潜力。在实验过程中，利用该探测器的快速响应特性和卓越的稳定性，结合单像素扫描成像技术，对其在紫外及可见光成像方面的应用进行了深入探索。实验结果表明 (图 2)，在 365 nm 和 660 nm 波长的光照条件下，成功捕获到了具有高分辨率和高对比度的“SZU”字样图案。这一成果不仅证实了 p-W_{0.09}Re_{0.91}S₂/GaN 异质结光电探测器在高分辨率成像技术中的实用性，同时也突显了其在未来成像技术应用中的广阔前景。例如，在生物医学成像领域，有望实现对细胞内部结构更为精细的观察，助力疾病的早期诊

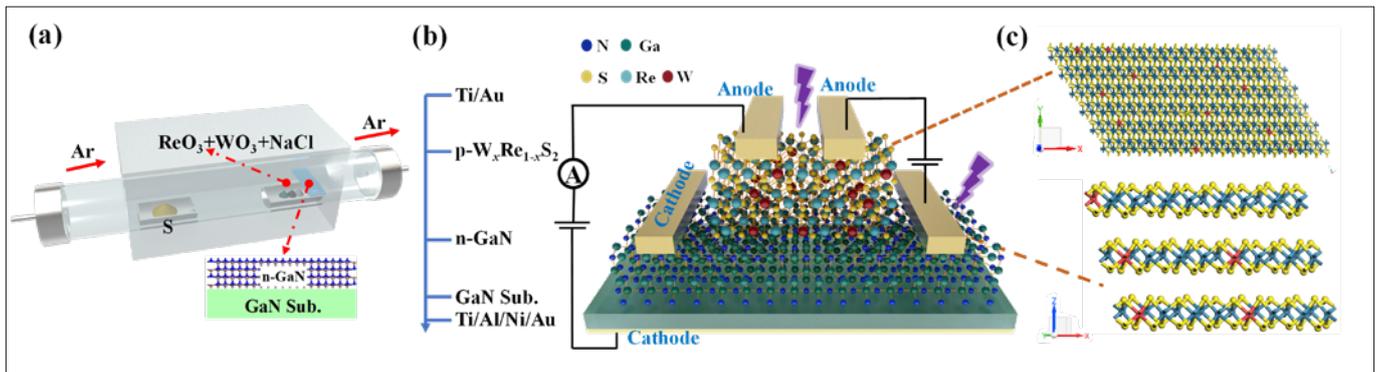


图1: 器件结构示意图及相关表征

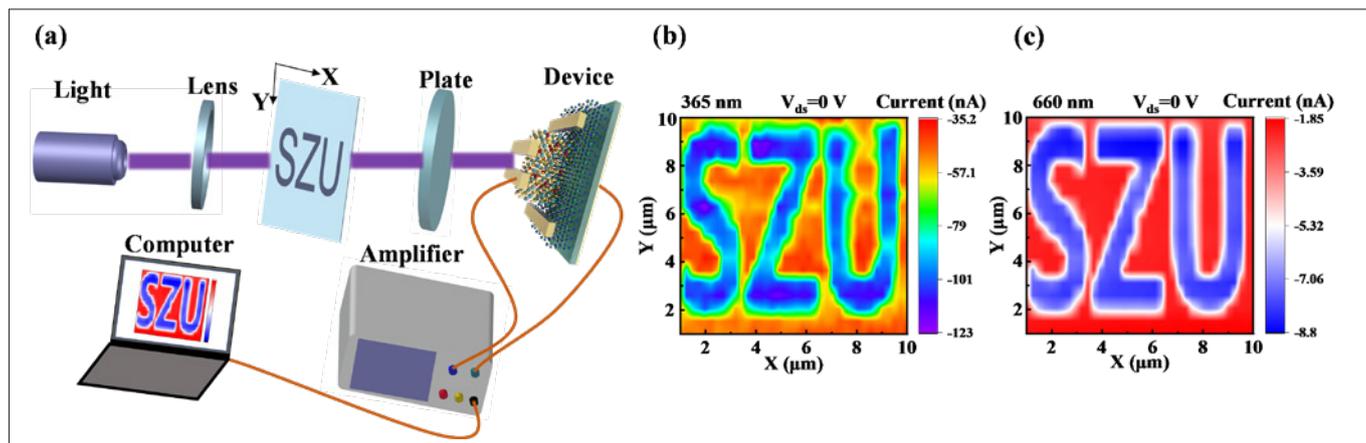


图2: 器件在成像领域应用

断；在环境监测方面，能够更精准地获取大气或水体中污染物的分布信息，为环境保护提供有力的数据支持。

这项研究成果发表在物理与天体领域的顶级期刊《Laser & Photonics Reviews》(中科院一区, TOP 期刊, IF = 9.8) 上, 这一成果不仅标志着光电器件领域在集成和光电性能方面取得了显著的进展, 而且预示着成像技术应用即将迎来新的突

破, 为相关领域的进一步发展提供了重要的理论和技术支撑。OSc

参考文献

Yang, Yongkai, et al. "Vertical van der Waals Integrated p-W0.09Re0.91S2/GaN Heterojunction for Ultra-High Detectivity UV Image Sensing." *Laser & Photonics Reviews*: 2401142.

上接第 26 页

我们在 AlN 方面工作的亮点之一是制造具有 m 平面的 epi-ready 25 mm 衬底 (见图 7(a))。整个衬底区域生长在 $-c$ 面上, 可通过均匀的淡黄色清晰识别。为了生产这种衬底, 我们的制备实验室团队从 c 平面晶圆的切割开始, 包括研磨、机械抛光和化学机械抛光, 开发了一条完整的 AlN 制备线。在碱性条件下使用二氧化硅进行抛光后的结构可确保均方根表面粗糙度低于 0.3 nm (见图 7(b))。好消息是, 当使用 MOCVD 在该衬底上生长假晶同质外延层时, 外延层与其理论上的质量相匹配 (见图 7(c))。我们可以精确地在 0.05

到 0.5 度之间调整衬底切边——这点主要决定台阶宽度 / 宏观台阶的形成。

我们机构现在可销售直径为 10 毫米的外延片。这些衬底分成一系列等级, 其中一些适用于研究目的, 另一些则更适合技术开发。

到明年年底, 我们希望能提供 1 英寸原型衬底和 2 英寸验证片。我们还热衷于研究在衬底上构建的器件性能, 并对 AlN 基光电或高功率器件的项目想法持开放态度。通过这样的合作, 我们将能够提供目前直径达 1 英寸的 AlN 衬底, 该衬底可定制其光学、电学和结构特性。OSc

参考文献

- C. Hartmann et al. "Efficient diameter enlargement of bulk AlN single crystals with high structural quality" *Appl. Phys. Express* 16 075502 (2023)
- C. Hartmann et al. "Favourable growth conditions for the preparation of bulk AlN single crystals by PVT" *Cryst. Eng. Comm.* 22 1762 (2020)
- R. Dalmau et al. X-Ray "Topography Characterization of Large Diameter AlN Single Crystal Substrates" *Mater. Sci. Forum* 1004 63 (2020)
- R. T. Bondokov et al. (Invited) "Development of 3-inch AlN Single Crystal Substrates" *ECS Trans.* 109 13 (2022)
- H. Amano et al. "The 2020 UV emitter roadmap" *J. Phys. D: Appl. Phys.* 53 503001 (2020)
- J. Kotani et al. "24.4 W/mm X-Band GaN HEMTs on AlN Substrates With the LPCVD-Grown HighBreakdown-Field SiNx Layer" *IEEE J. Electron Devices Soc.* 11 101 (2023)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
CGB	北京华林嘉业科技有限公司	www.cgbtek.com	3
RABOUTET S.A.		www.raboutet.fr	17
KLA		www.kla.com/zh-hans	5
Riber		www.riber.com	IFC
SEMICON China 2025		www.semiconchina.org	30
2025 慕尼黑上海光博会		www.world-of-photonics-china.com.cn	IBC

欢迎投稿

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

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

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

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

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

文章投稿指南

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

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

新产品投稿指南

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

优先刊登中文来稿（翻译稿请附英文原稿）。来稿请用电子邮件寄到：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。



www.compoundsemiconductorchina.net

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

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

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

Lynn Wang (王清玲)
lynnw@actintl.com.hk

UK Office (英国办公室)
Angel Business Communications Ltd.
6 Bow Court, Fletchworth Gate,
Burnsall Road, Coventry, CV5 6SP, UK
Tel: +44 (0)2476 718 970

Chief Operating Officer
Stephen Whitehurst
stephen.whitehurst@angelbc.com
Tel: +44 (0)2476 718970

销售人员 Sales Offices

Asia (亚洲)
Floyd Chun (秦泽峰)
floyd@actintl.com.hk
Tel: 852 2838 6298

China (中国)
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

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

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

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

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

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

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

Europe (欧洲)
Shehzad Munshi
sm@angelbcl.co.uk
Tel: +44 (0)1923 690215

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

慕尼黑上海光博会

LASER World of PHOTONICS CHINA



2025年3月11日至13日

📍 上海新国际博览中心-3号入口厅

慕尼黑上海光博会 🔍

20周年盛典 密，追光的你！



扫码即刻注册参观

激光器与
光电子

激光智能
制造

检测与
质量控制

光学元器件
及材料

生物医学
光子学

光学制造

集成
光子学

红外技术
与应用

◆ 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

平行论坛: Compound Semiconductor China

- 化合物半导体材料衬底、外延生长及其相关设备技术
- 超宽禁带器件:最终解决方案?
- 功率电子器件及封装和应用技术
- "AI+先进光显"引领未来
- 面向未来数据中心和6G网络下的射频器件研究进展
- 激光通信、精密加工及量测技术
- 先进半导体材料、器件的可靠性验证和故障分析

平行论坛: CHIP China晶芯研讨会

- 玻璃通孔(TGV)技术创新发展和应用推动
- 面板级封装技术的崛起
- AI驱动的光电合封(CPO)新态势
- 车规级封测的挑战与解决方案
- 2.5D/3D/3.5D封装在AI趋势下大有可为
- 异构集成、芯粒(chiplet)、先进互连、混合键合、背面供电.....技术发展与应用

Compound Semiconductor China

7月·广州 化合物半导体先进技术及应用大会

- 化合物半导体材料衬底、外延生长及其相关设备技术
- 能源变革大时代,功率器件及应用市场格局
- 先进显示与照明取得的进展
- 先进半导体材料、器件的可靠性验证和故障分析
- 超快通信射频器件新应用

10月·常州 化合物半导体先进技术及应用大会

- 化合物半导体材料衬底、外延生长及其相关设备技术
- 面向未来数据中心和6G网络下的射频器件研究进展
- 功率电子器件及封装和应用技术
- 扩大表面发射器的视野
- 激光通信、精密加工及量测技术

CHIP China晶芯研讨会

11月·厦门 第三届-半导体先进封测产业技术创新大会

- 玻璃通孔(TGV)技术创新发展和应用推动
- 面板级封装技术的崛起
- AI驱动的光电合封(CPO)新态势
- 车规级封测的挑战和解决方案
- 2.5D/3D/3.5D封装在AI趋势下大有可为
- 异质集成·先进封装关键材料与创新
- 2.5D/3D封装设计仿真与可靠性
- 先进封装对新型装备技术的需求和挑战
- 异构集成、芯粒(chiplet)、先进互连、混合键合、背面供电.....技术发展与应用

◆ 线上 ◆

Compound Semiconductor China

先进半导体材料的检测/量测关键技术 | 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 | PIC的新应用

面向未来数据中心和6G网络下的射频器件研究进展

CHIP China晶芯研讨会

玻璃通孔(TGV)技术创新发展和应用推动 | 面板级封装技术的崛起

先进封装制造工艺与材料的创新 | 先进半导体键合集成技术

光电合封(CPO)及光电互连技术发展 | 2.5D/3D封装设计仿真与可靠性

◆ 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。



推介目的性强 会议听众垂直
议题内容聚焦 直击产品核心

*以上主题暂定,请以会议举办议题为准

