

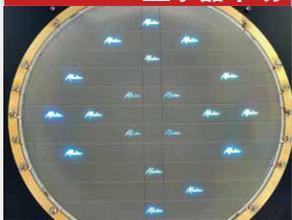
化合物半导体

CS **COMPOUND**
SEMICONDUCTOR
Connecting the Compound Semiconductor Community

• CHINA

2021年 6/7月

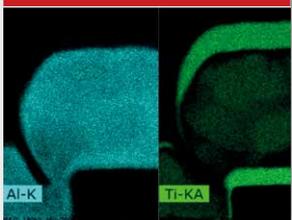
Aledia进军
microLED显示器市场



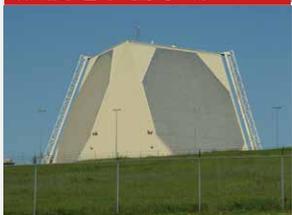
数字信号处理技术
助力光通信能力



为5G提供更好的GaN



用高压氮化镓HEMTs
颠覆电子管市场



自对准生长产生 混合光子器件

ACT



聚焦光电技术在 半导体加工中的应用

展品范围

激光切割/打标/钻孔/焊接/清洗等加工设备、激光器、光学镜头及摄像模组、自动化及高端智能设备、机器视觉系统及应用、光学镀膜技术及设备、光电传感器、太赫兹光谱技术等；

同期展会



第23届中国国际光电博览会

160,000M² 展出面积 | 95,000+ 专业观众 | 3,000+ 参展企业



扫码登记免费参观



国际授权翻译
国内发行高新科技杂志

8本杂志免费送一年
(6期/印刷版)

包揽全年行业资讯



www.actintl.com



免费
订阅

扫一扫添加
ACT读者服务号免费订阅

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

封面故事 Cover Story

09 自对准生长产生混合光子器件 Self-aligned growth spawns hybrid photonic devices

硅微电子取得了惊人的进步。最新的组件面积仅为几十平方纳米，消耗的功率很小，并且将数十亿个封装在一块芯片上。今天的技术是几十年来硅CMOS工艺开发的顶峰，也催生了使硅光子学受益的技术进步。晶圆厂现在可以生产低损耗的硅波导和无源结构，将光信号传送到芯片上。但是，这项技术并不完美。可以说它最大的弱点是缺乏光学增益，这源于硅的间接带隙。

- SVENJA MAUTHE, NOELIA VICOTRIVIÑO, MARILYNE SOUSA, HEINZ SCHMID和 KIRSTEN MOSELUND, IBM 欧洲研究中心

编者话 Editor's Note

04 宽禁带半导体技术标准化概况 General Situation of Wide Bandgap Semiconductor Technology Standardization

- 陆敏

业界动态 Industry

05 2021CSC化合物半导体先进应用大会（苏州）成功举办 2021CSC Compound Semiconductor Advanced Application Conference (Suzhou) was successfully held

05 10000V! 氮化镓功率器件击穿电压新纪录 10000V! New record for breakdown voltage of GaN power devices

06 Novel Crystal Technology全球首次量产4英寸“氧化镓”晶圆 Novel Crystal Technology's first mass production of 4-inch "gallium oxide" wafers in the world

06 安森美半导体推出全碳化硅MOSFET模块解决方案！用于电动汽车充电 ON Semiconductor launches all silicon carbide MOSFET module solutions! For charging electric vehicles

07 中国第三代半导体传来最强音 The strongest sound from China's third-generation semiconductor

08 科锐携手高斯宝，为服务器电源市场带来SiC解决方案 Cree joins hands with Gospel to bring SiC solutions to the server power market

13 半绝缘SiC衬底全球第三，山东天岳科创板IPO获受理 SICC Innovation Board was accepted for IPO, and the semi-insulating SiC substrate market accounted for the third largest share in the world.

关于《化合物半导体》

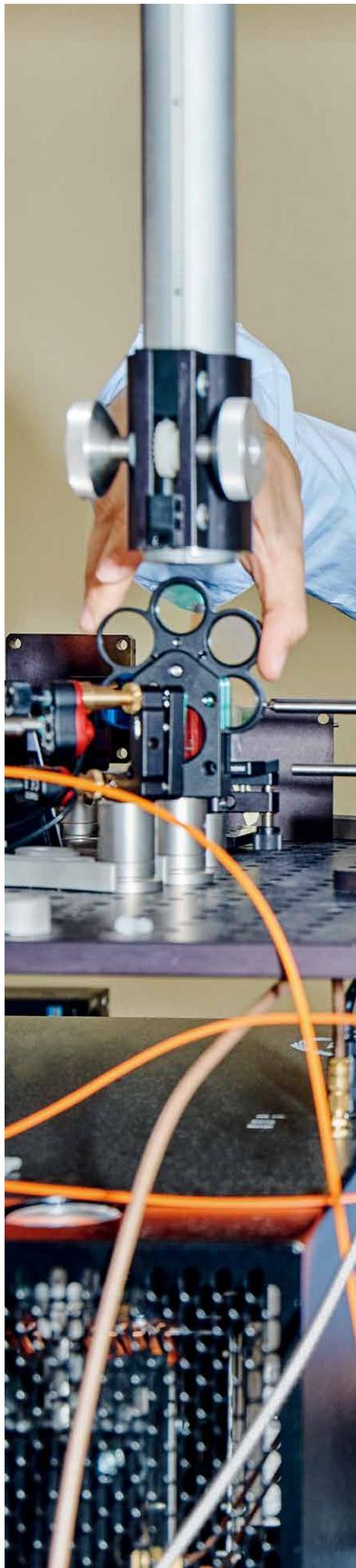
《化合物半导体》中国版(CSC)是全球最重要和最权威的杂志Compound Semiconductor的“姐妹”杂志，亦是国内唯一专注于化合物半导体产业的权威杂志，重点介绍国外先进技术和产业化经验，促进国内产业发展，为国内读者提供化合物半导体行业的专业知识。内容涵盖晶体的特性研究，器件结构的设计，生产中用到的材料、设备、软件、测量、厂房设施，以及有关市场分析和动态。

About Compound Semiconductor China

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



扫一扫
免费下载电子书



高端访谈 Top interview

- 14 安森美半导体助力汽车电动化和智能化发展
ON Semiconductor contributes to the development of automotive electrification and intelligence

技术 Technology

- 16 Aledia进军microLED显示器市场
Aledia closes in on microLED displays market
- Rebecca Pool
- 17 数字信号处理技术助力光通信能力
Turbo-charging transmission with digital signal processing
- GEOFF BENNETT, YUEJIAN WU和HAN SUN, INFINERA
- 22 为5G提供更好的GaN
Giving 5G better GaN
- 理查德·史蒂文森(Richard Stevenson)
- 27 用高压氮化镓HEMTs颠覆电子管市场
- Disrupting the tubes market with high-voltage GaN HEMTs
- GABRIELE FORMICONE, JEFF BURGER, JAMES CUSTER AND JOHN WALKER, INTEGRA TECHNOLOGIES

市场分析 Market analysis

- 30 GaN射频器件: GaN-on-SiC, 还是 GaN-on-Si?
GaN for RF electronics: GaN-onSiC vs GaN-on-Si?

科技前沿 Research Review

- 33 氮化镓场效应晶体管沟道性能提升
Turbo-charging the channel of the GaN MOSFET
- 34 消除SiC MOSFET中的界面态
Quashing interface states in SiC MOSFETs
- 35 揭示绿光LED的退化机制
Uncovering degradation mechanisms in green LEDs

36 广告索引 Advertisement Index

关于雅时国际商讯 (ACT International)

ACT 雅时国际商讯 (ACT International) 成立于1998年, 为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品 -- 包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动 -- 为跨国公司和中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站, 以及各种技术会议, 服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体、半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约二十多万专业读者及与会者。ACT亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT总部在香港, 在北京、上海、深圳和武汉设有联络处。www.actintl.com.hk

About ACT International Media Group

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



用心做设备 助力中国芯

减薄·抛光·CMP



扫码关注我們

010-64778430

www.tsd-semicon.com

北京市顺义区顺强路1号

北京特思迪半导体设备有限公司

宽禁带半导体技术标准化概况

标准是通过标准化活动，按照规定的程序经协商一致制定，为各种活动或其结果提供规则、指南或特性，供共同使用和重复使用的文件。标准化是为了在既定范围内获得最佳秩序，促进共同效益，对现实问题或潜在问题制订、发布和实施标准的活动。通俗讲，标准就是规则文件，是标准化活动的结果。标准具有民主性、权威性、系统性和科学性。标准包括管理标准和技术标准，技术标准包括产品标准和方法标准。目前业内流行一种说法：“三流企业卖苦力，二流企业卖产品，一流企业卖技术，超一流企业卖标准”，正体现了标准对产业的关键支撑作用。另外技术专利化、专利标准化、标准品牌化也是标准在产业生态中的发展路径，可以说高质量发展的根基就是高标准。

目前国内宽禁带标准化组织有全国半导体设备与材料标准化技术委员会 (TC203, 包括 2 个分委员会, SC01 是设备, SC02 是材料) 和全国半导体器件标准化技术委员会 (TC78, 包括 2 个分委员会, SC01 是分立器件, SC02 是集成电路), 可以制定国家标准和行业标准, 至今大概发布了近 30 件宽禁带半导体技术国、行标, 如 GB/T 30656 碳化硅单晶抛光片、SJ/T 11501 碳化硅单晶晶型的测试方法、GB/T 37053 氮化镓外延片及衬底片通用规范、GB/T 32282 氮化镓单晶位错密度的测量 阴极荧光显微镜法。中关村天合宽禁带半导体技术创新联盟及第三代半导体产业技术创新战略联盟, 可以制定团体标准, 至今大概发布了近 25 件宽禁带半导体技术团标, 如 T/IAWBS 001 碳化硅单晶、T/CASAS 001 碳化硅肖特基势垒二极管通用技术规范、T/IAWBS 010 碳化硅单晶抛光片表面质量和微管密度检测方法 - 激光散射检测法、T/CASAS 009 半绝缘碳化硅材料中痕量杂质浓度及分布的二次离子质谱检测方法。

目前国际宽禁带标准化组织有 SEMI, 在欧洲和中国都设立了化合物半导体技术标委会, 可以制定 SEMI 国际标准 (宽禁带半导体材料), 其中 SEMI 中国化合物半导体技术标委会现有碳化硅衬底及碳化硅外延两个工作组, 至今 SEMI 大概发布了近 5 件宽禁带半导体技术 SEMI 标准, 如 SEMI M55-0817 碳化硅单晶抛光片规范 (4H 和 6H)、SEMI M86-0915 c- 面氮化镓单晶抛光片规范, 目前有 6 件在研标准 (包括 1 件修订标准)。IEC/TC 47:SC 47E, 主要制定宽禁带半导体器件及相关标准, 至今大概发布了 2 件宽禁带半导体技术标准, 如 IEC 63068-1 碳化硅功率器件用外延片缺陷分类、IEC 63068-2 碳化硅功率器件用外延片缺陷光学检测方法, 目前有 2 件在研标准。JEDEC/JC70, 主要制定宽禁带半导体器件工业级标准, 至今大概发布了 2 件宽禁带半导体技术标准, 如 JEP180: 氮化镓功率转换装置的开关可靠性评估程序指南、JEP173: 基于 GaN HEMT 的功率转换器件的动态导通电阻测试方法指南, 版本 1.0。AEC, 主要制定半导体器件车规级标准, AEC-Q101 基于分立半导体器件应力测试认证是最为知名的标准, 不过是基于硅基器件的规则, 现在正在修订策划中, 增加相应宽禁带器件的内容。欧洲功率电子中心 ECPE, AQG-324 车规工作组和火车牵引可靠性工作组, 现在实施的 AQG-324 是针对硅基功率车规模块的标准, 也正在修订策划中, 增加相应宽禁带器件的内容。

总之, 宽禁带半导体技术标准化工作在国内外都已开始布局并已有一定基础, 不过与宽禁带半导体产业发展态势相比, 还是有一定滞后和不足, 尤其是在车规级标准方面, 急盼相应标准及认证出台, 因为车规应用毕竟是宽禁带半导体的最大细分市场, 并且正在快速增长之中。



社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak

adonism@actintl.com.hk

主编 Editor in Chief

陆敏 Min Lu

MinL@actintl.com.hk

出版社 Publishing House

雅时国际资讯 ACT International

香港九龙 B,13/F, Por Yen Bldg,

长沙湾青山道478号 478 Castle Peak Road,

百欣大厦 Cheung Sha Wan,

13楼B室 Kowloon, Hong Kong

Tel: (852) 2838 6298

Fax: (852) 2838 2766

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200

Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 25988573

Fax: 86 755 25988567

武汉 Wuhan

Tel: 86 27 59233884

UK Office

Angel Business

Communications Ltd.

6 Bow Court,

Fletchworth Gate,

Burnsall Road, Coventry,

CV56SP, UK

Tel: +44 (0)1923 690200

Chief Operating Officer

Stephen Whitehurst

stephen.whitehurst@angelbc.com

Tel: +44 (0)2476 718970



2021CSC 化合物半导体先进应用大会（苏州）成功举办



全球万物化合看中国，中国先进应用看苏州。2021年6月10日，雅时国际商讯旗下智慧技术暨应用大会之化合物半导体先进应用大会走进苏州，与苏州及长三角地区的500余名听众朋友相聚在金鸡湖国际会议中心，共享电动汽车、5G、功率器件和化合物半导体的应用新技术，共图发展新未来。今年十四五规划明确指出要大力发展化合物半

导体能力，随着市场需求迎来井喷式增长，化合物半导体市场有望在今年驶入发展快车道。长三角地区半导体产业发展高地，苏州积蓄了世界领先地位的半导体产业实力，其中，和舰芯片股份公司是中国十大半导体制造企业，苏州敏芯微电子技术、苏州纳芯微电子技术公司、苏州感芯微系统技术等五家公司全部进入中国半导体EMES十强企业。纳维科技、苏州晶湛、苏州能讯和英诺赛科等宽禁带半导体知名公司正引领着苏州化合物半导体产业的集聚。本次化合物半导体先进应用大会活动有幸得到中科院纳米所，姑苏实验室，中韩研究院等当地企业大力支持，吸引了Cree、英飞凌、安森美、Navitas、GaN System、英诺赛科、Imec、晶湛、纳维、欧波同、牛津仪器、MRSI、能讯、氮矽科技、量芯微等化合物半导体领军企业高层齐聚一堂，同时诚邀蔚来，大陆汽车，博世等不少新能源汽车领域相关技术专家倾情参与。重磅嘉宾坐镇，全天会场座无虚席，后排临时加凳后仍有观众不断涌入，活动人气持续火爆，研讨交流气氛浓烈。CS

10000V！氮化镓功率器件击穿电压新纪录

近日，美国弗吉尼亚理工大学电力电子技术中心（CPES）和苏州晶湛半导体团队合作攻关，通过采用苏州晶湛新型多沟道AlGaIn/GaN异质结构外延片，以及运用p-GaN降低表面场技术（p-GaN reduced surface field (RESURF)）制备的肖特基势垒二极管（SBD），成功实现了超过10kV的超高击穿电压。这是迄今为止氮化镓功率器件报道实现的最高击穿电压值。相关研究成果已于2021年6月发表于IEEE Electron Device Letters期刊。实现这一新型器件所采用的氮化镓外延材料结构包括20nm p-GaN/350nm p-GaN帽层以及23nm Al_{0.25}Ga_{0.75}N/100nm GaN本征层的5个沟道。该外延结构由苏州晶湛团队通过MOCVD方法在4英寸蓝宝石衬底上单次连续外延实现，无需二次外延。基于此外延结构开发的氮化镓器件结构如图所示，在刻蚀工艺中，通过仅保留2微米的p-GaN场板结构（或称为降低表面场（RESURF）结构），能够显著降低峰值电场。在此基础上制备的多沟道氮化镓肖特基势垒二极管（SBD），在实现10kV的超高击穿电压的同时，巴利加优值（Baliga's figure of merit, FOM）高达2.8GW/cm²，而39m·cm²的低导通电阻率，也远低于同样10kV耐压的SiC结型肖特基势垒二极管。多沟道氮化镓器件由于采用廉价的蓝宝石衬底以及水平器件结构，其制备成

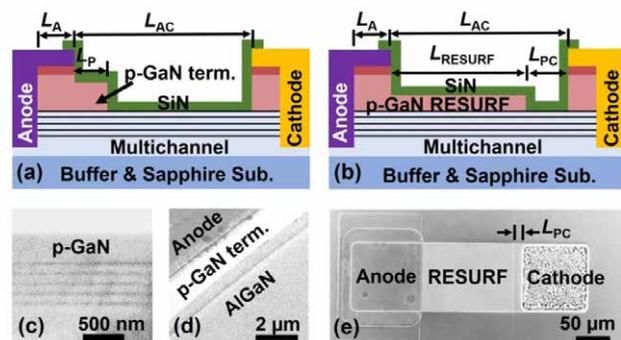


Fig. 1. Schematics of the multi-channel AlGaIn/GaN SBD with (a) p-GaN edge termination and (b) p-GaN RESURF. (b) Cross-sectional SEM images of the p-GaN/multi-channel region. (c) SEM image of the p-GaN edge termination region. (d) Top-view SEM image of the multi-channel SBD with p-GaN RESURF ($L_{AC} = 123 \mu\text{m}$) before SiN_x passivation.

图1：多沟道AlGaIn/GaN SBD器件结构图

（引用自IEEE ELECTRON DEVICE LETTERS, VOL. 42, NO. 6, JUNE 2021）

本也远低于采用昂贵SiC衬底制备的SiC二极管。创新性的多沟道设计可以突破单沟道氮化镓器件的理论极限，进一步降低开态电阻和系统损耗，并能实现超高击穿电压，大大拓展GaN器件在高压电力电子应用中的前景。在“碳达峰+碳中和”的历史性能源变革背景下，氮化镓电力电子器件在电动汽车、充电桩，可再生能源发电，工业电机驱动器，电网和轨道交通等高压应用领域具有广阔的潜力。CS

Novel Crystal Technology 全球首次量产 4 英寸“氧化镓”晶圆

日前 Novel Crystal Technology 全球首次量产了 100mm (4 英寸) 的“氧化镓”晶圆。据日本媒体报道, Novel Crystal Technology 公司由日本电子零部件企业田村制作所和 AGC 等出资成立, 主要研发、生产新一代半导体技术。该公司日前量产了以新一代功率半导体材料“氧化镓”制成的 100mm 晶圆, 这还是全球首次。这次量产的新一代晶圆可以使用原有 100mm 晶圆的设备制造新一代产品, 有效保护了企业的投资, 预计 2021 年内开始供应晶圆。氧化镓的

别名是三氧化二镓, 氧化镓 (Ga_2O_3) 是一种宽禁带半导体, 也是一种透明的氧化物半导体材料, 在光电子器件方面有广阔的应用前景, 被用作于 Ga 基半导体材料的绝缘层, 以及紫外线滤光片。据市场调查公司富士经济于 2019 年 6 月 5 日公布的 Wide Gap 功率半导体元件的全球市场预测来看, 2030 年氧化镓功率元件的市场规模将会达到 1542 亿日元(约人民币 92.76 亿元), 这个市场规模要比氮化镓功率元件的规模 (1085 亿日元, 约人民币 65.1 亿元) 还要大。CS

安森美半导体推出全碳化硅 MOSFET 模块解决方案! 用于电动汽车充电

6月7日, 安森美半导体 (ON Semiconductor) 宣布推出一对 1200 V 全碳化硅 (SiC) MOSFET 2-PACK 模块, 进一步增强其产品系列, 从而适应充满挑战的电动汽车 (EV) 市场。随着电动汽车销量持续增长, 基础设施需要不断完善以满足驾驶员需求, 如提供快速充电网络, 从而使汽车可以快速完成行程, 且不会有“里程焦虑”。随着这种需求不断发展, 对于充电功率超过 350 kW, 效率超过 95% 的要求也成为“常态”。由于部署充电桩的环境和地点多样, 设计人员面临着多种挑战, 包括紧凑型、稳健性和增强的可靠性。

全新 1200V M1 全碳化硅 MOSFET 2-PACK 模块基于平面技术打造, 适用的驱动电压为 18-20 V, 且易于使用栅极负压进行驱动。与沟槽型 MOSFET 相比, 较大的裸芯片可降低热阻, 从而在相同工作温度下降低裸芯片温度。

NXH010P120MNF1 配置为 2-PACK 半桥架构, 是采用 F1 封装的 10 mohm 器件, 而 NXH006P120MNF2 是采用 F2 封装的 6 mohm 器件。这些封装采用压接式引脚, 非常适合工业应用, 此外还采用嵌入式负温度系数 (NTC) 热敏电阻, 有助于温度监控。

作为安森美半导体电动汽车充电生态系统的一部

分, 全新碳化硅 MOSFET 模块旨在与驱动器解决方案 (如 NCD5700x 器件) 一起使用。最近推出的 NCD57252 双通道隔离式 IGBT/MOSFET 栅极驱动器提供 5 kV 的电流隔离, 可配置为双下桥、双上桥或半桥工作。

NCD57252 采用小型 SOIC-16 宽体封装, 接受逻辑电平输入 (3.3 V、5 V 和 15 V)。由于典型传播延迟为 60ns, 该高电流器件 (在米勒平台电压下, 源电流为 4.0 A/ 灌电流为 6.0 A) 适合高速工作。

安森美半导体的碳化硅 MOSFET 与全新模块和栅极驱动器形成互补。与类似的硅器件相比, 该碳化硅 MOSFET 可提供卓越的开关性能和增强的散热性能, 从而以提高效率和功率密度、改善电磁干扰 (EMI)、并减小系统尺寸和减少重量。

最近发布的 650 V 碳化硅 MOSFET 采用新颖的有源单元设计, 结合先进的薄晶圆技术, 可为 $(RDS(on) \cdot area)$ 提供一流的品质因数 (FoM)。NVBG015N065SC1、NTBG015N065SC1、NVH4L015N065SC1 和 NTH4L015N065SC 等系列器件可为 D2PAK7L / TO247 封装的 MOSFET 提供市场上最低的 $RDS(on)$ 。

1200 V 和 900 V N 通道碳化硅 MOSFET 芯片尺寸较小, 可降低器件电容和栅极电荷 (Q_g - 低至 220 nC), 从而降低电动车充电桩所需高频工作的开关损耗。CS



中国第三代半导体传来最强音

据媒体报道，为了进一步提升我国半导体发展水平，中国副总理刘鹤将主持第三代半导体发展的推进工作，并负责制定相关的政策。5月14日，刘鹤主持召开了国家科技体制改革和创新体系建设领导小组第十八次会议，讨论了面向后摩尔时代的集成电路潜在颠覆性技术。

第三代半导体主要是以碳化硅（SiC）、氮化镓（GaN）、氧化锌（ZnO）、金刚石、氮化铝（AlN）为代表的宽禁带半导体材料。

从 GaAs、GaN 和 SiC 市场竞争格局来看，目前化合物半导体产业链各环节以欧美、日韩和中国台湾企业为主，中国大陆企业在技术实力、产能规模 and 市场份额方面与领先企业均具有不小差距，市场话语权较弱。

以 GaN 为例，GaN 器件产业链包括上游衬底及外延片、中游器件设计与制造和下游产品应用等环节，目前行业模式以 IDM 为主，但设计与制造环节已开始出现分工。其中，住友电工在 GaN 衬底领域一家独大，市场份额超过 90%，外延片龙头包括 IQE、COMAT 等；GaN 制造环节代表性企

业包括稳懋、富士通和台积电，大陆方面以三安光电为代表。

国产替代和半导体技术发展进入后摩尔时代是未来十年半导体行业投资的两条主线。在 5G 基建、5G 终端射频和新能源车等多重推动，以及化合物半导体的国产替代趋势下，未来成长空间广阔，相关厂商有望迎来较好的发展机遇。

今天，半导体股全面爆发，其中，第三代半导体指数领涨。截至收盘，聚灿光电、三安光电、斯达半导、北方华创、士兰微等多股涨停。

近期发布的《第三代半导体产业发展报告 2020》显示，2020 年我国第三代半导体产业总产值超过 7098.6 亿元。受益于国内疫情防控得力，经济全面回暖，政策市场双重利好，以及国际贸易摩擦带来的替代机遇，电力电子和射频电子维持增长趋势，但半导体照明受国内外环境影响，整体略有下滑。

我国拥有第三代半导体材料最大的应用市场。受益于新能源汽车、5G、消费电子领域需求强劲，未来几年，国



Game-set-match,
磁控溅射技术在
Micro-LED
的大满贯?

LAYERS 6 - 了解更多
现在就免费阅读一本吧





溅射已经是传统LED技术的市场主流，但是现在在先进Micro LED的TCO，金属接触层和DBR技术方面，磁控溅射将继续成为主流的技术么？

在最新的LAYERS杂志中了解更多Evatec生产机台的实现最佳的均匀性，重复性和最低的颗粒数等性能，请联系我们的当地办公室。<https://evatecnet.com/about-us/contact-us>，免费订阅，阅读所有先进封装，半导体，光电以及光学领域的最新薄膜科技新闻。

先进封装 · 半导体 · 光电 · 光学 · THE THIN FILM POWERHOUSE
www.evatecnet.com

内 SiC 和 GaN 功率半导体市场将迎来高速增长。在政策和市场的双重驱动下，国内第三代半导体电力电子和射频方向行情呈明显上升态势。

国内主流企业积极扩产布局，产业进入扩张期。经过几年发展，第三代半导体器件已经迅速进入了新能源汽车、光伏逆变、5G 基站、PD 快充等应用领域，市场迅猛增长，行业竞争日趋激烈。

为了迎合市场需求，争夺未来几年的关键竞争位置，国内主流企业在产业、产品和市场等多方面加强布局。其

中尤以产能扩充为主要特征，天科合达、同光晶体、纳维科技、泰科天润、中电科 55 所、三安光电、世纪金光、基本半导体、英诺赛科等纷纷扩产，预示着国内第三代半导体产业开始进入扩张期。

与此同时，传统半导体企业依托资金、技术、渠道以及商业模式的优势，积极布局第三代半导体，谋求更多的利润增长点，代表企业有华润微、闻泰科技、斯达半导体、比亚迪、赛微电子、露笑科技、新洁能等。☞

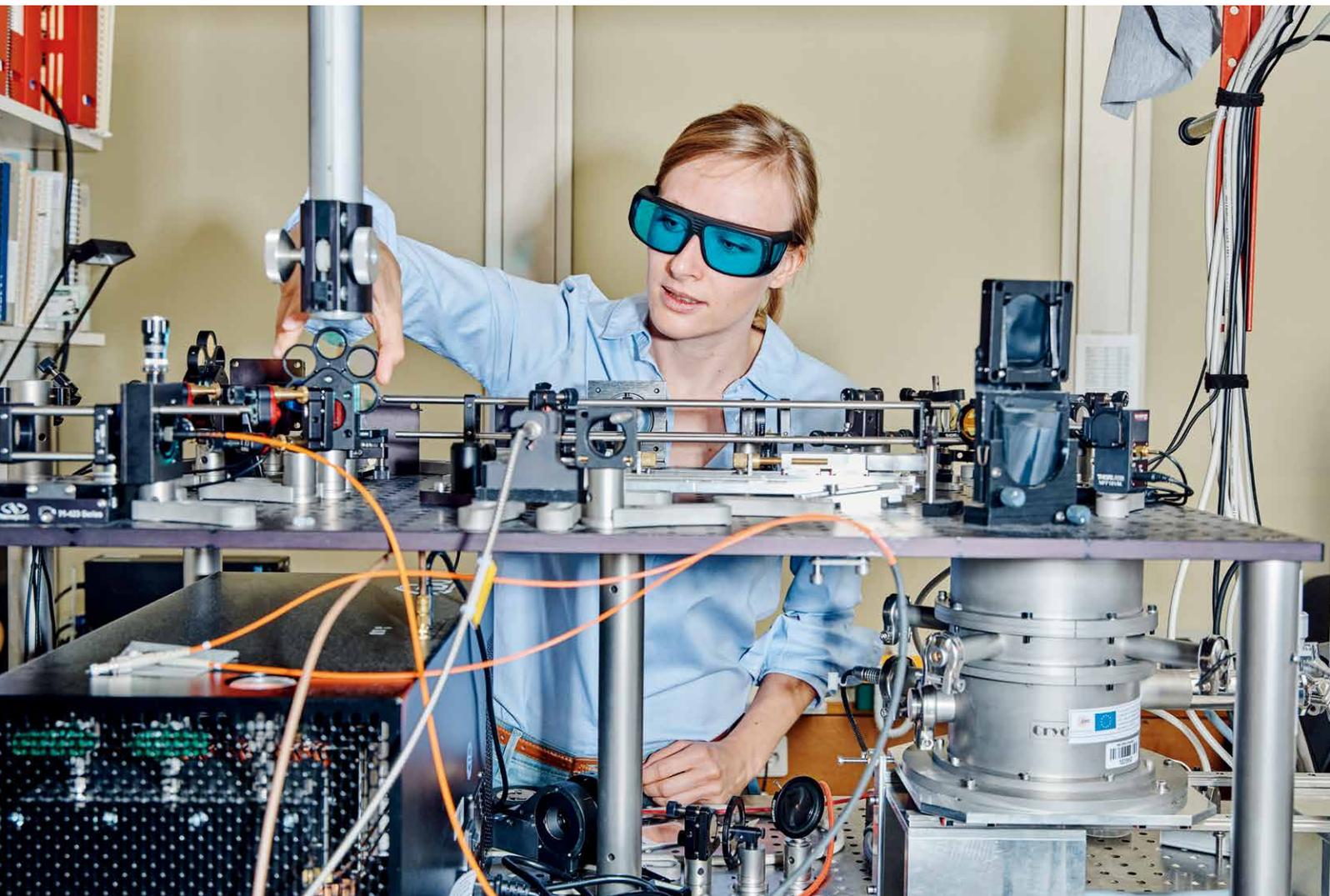
科锐携手高斯宝，为服务器电源市场带来 SiC 解决方案

科锐 (Cree, Inc., 美国纳斯达克上市代码 : CREE) 凭借旗下 Wolfspeed 业务，在全球碳化硅 (SiC) 技术领域居于领先地位。公司于近日宣布了与深圳市高斯宝电气技术有限公司 (品牌 : Gospower) 的成功合作。高斯宝电气是一家专业从事电力电子变换产品的领先公司，属国家级高新技术企业。高斯宝电气将在其下一代 CRPS (Common Redundant Power Supply, 通用冗余电源) 解决方案中采用科锐 Wolfspeed® 650V SiC MOSFET。伴随着云存储的需求持续快速扩大，高斯宝电气技术将采用 Wolfspeed SiC 技术来实现更为优异的电源效率，这将有助于提升中国的整体服务器电源市场，并且为中国市场的数字存储需求提供更有力的支持。得益于云、AI 人工智能、分布式存储、5G 等行业的快速发展，对于服务器电源和算力电源的需求大幅增长。Wolfspeed 650V SiC MOSFET 通过低开关损耗和低导通损耗带来高效率，并提供高功率密度，其优异特性包括了更小尺寸、更轻量化和更少数量的元件。客户能够更高效地使用电源、降低散热要求、获得业界领先的可靠性，从而通过更低的总体成本而受益，这将帮助业界领先的服务器电源解决方案能够更为快速地推出。高斯宝电气 CEO 阮世良先生表示：“为了满足对于具有更高效率、更小体积、高功率密度的电源解决方案日益增长的需求，我们与科锐开展合作，采



用其 Wolfspeed® 650V SiC MOSFET 来开发出有助于改变中国服务器市场的应用。我们的下一代 CPRS 解决方案将使高斯宝电气成为该领域的引领者，并能有效地支持中国市场的数据存储需求。”高斯宝电气开发的 2400W / 2600W 185mm CRPS 解决方案在图腾柱无桥 PFC 设计中采用了 Wolfspeed SiC MOSFET。该器件助力开发出了高效、可靠且优异成本效益的解决方案，可在更高的温度下工作，并且能在更小的尺寸内实现更低的开关损耗、零反向恢复和高功率密度等特性。科锐 CEO Gregg Lowe 表示：“作为一家专精且强大的全球性半导体企业，科锐正处于有利位置，引领着从 Si 到 SiC 的转型。在全球各地，我们的 Wolfspeed® SiC 器件正在通过效率和性能的提升，推动着技术解决方案的不断进步，并实现更小型、更具可扩展性的电源系统。该解决方案将有助于推进电源领域的提升，同时也证明了我们与高斯宝电气等业界领先企业的合作将助推 SiC 带来重要创新。”高斯宝电气在先进技术创新方面的优异成就，与科锐 Wolfspeed SiC 技术的重要结合，将赋能实现同类更优的服务器设备。☞





自对准生长产生混合光子器件

通过在氧化管中自对准生长，可以在硅衬底上形成微型，高性能的光链路

SVENJA MAUTHE, NOELIA VICOTRIVIÑO, MARILYNE SOUSA, HEINZ SCHMID 和 KIRSTEN MOSELUND, IBM 欧洲研究中心

硅微电子取得了惊人的进步。最新的组件面积仅为几十平方纳米，消耗的功率很小，并且将数十亿个封装在一块芯片上。

今天的技术是几十年来硅 CMOS 工艺开发的顶峰，也催生了使硅光子学受益的技术进步。晶圆厂现在可以生产低损耗的硅波导和无源结构，将光信号传送到芯片上。但是，这项技术并不完美。可以说它最大的弱点是缺乏光学增益，这源于硅

的间接带隙。

不受此限制的是 III-V 族化合物半导体产品组合，其直接带隙跨越了从可见光（使用 III 族氮化物）到近红外的整个光谱范围（见图 1）。后者对于光通信很感兴趣，其波长在 1350 nm 和 1550 nm 附近 – 它们被称为 O 波段和 C 波段 – 分别为数据通信和电信的首选。之所以采用这些频段，是因为它们对应于光纤中的最小传输损耗，并且

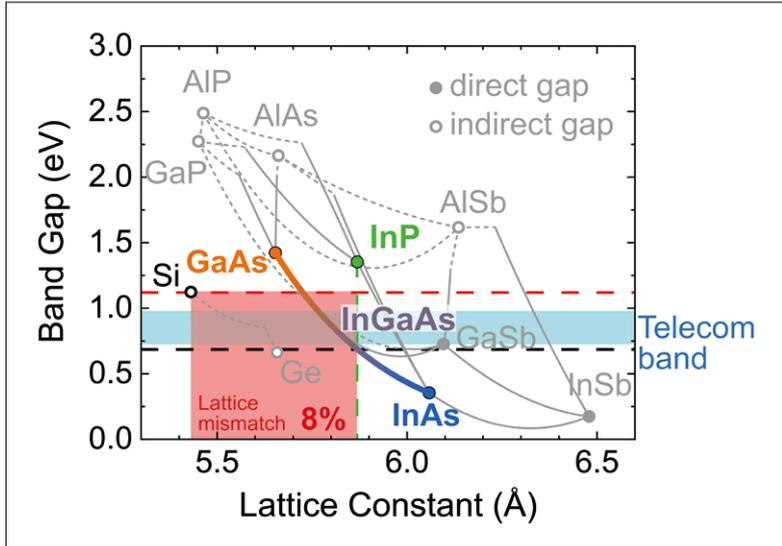


图1. 各种直接(实心圆)和间接(空心圆)半导体的带隙-晶格常数。突出显示了硅和 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 之间8%的晶格失配。蓝色阴影区域对应于电信频段。

与有效源和掺铒光纤放大器 (EDFAs) 的可用性相吻合。由于硅在超过 $1.1\mu m$ 的波长下具有透明性，因此这些光谱域也非常适合于片上应用。由于该属性，SOI 波导可以用作低损耗传输介质。

三元或四元 III-Vs 的另一个特性是，通过调整它们的组分，带隙会发生变化，从而能够生长量子阱和量子点。例如，考虑 InP 和 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 的组合，它们具有相同的晶格常数，可以实现无缺陷生长。 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 的带隙仅为 0.74 eV，远小于 InP 的 1.35 eV，因此在 InP 势垒之间插入 $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 层可形成深势阱，该势阱擅长限制受激电子和空穴并将其局域化复合。形成量子阱和量子点的机会对当今高效的 III-V 激光器的发展至关重要。

集成 III-Vs 和硅

半导体行业的一项研究工作就是光子学与电子学的无缝集成，因此工程师可以充分利用两者的优势。如今，最先进的方法是将具有 III-V 有源叠层的晶片直接键合到预处理的硅晶片上（请参阅表 1，该表将这种方法与在硅片上集成 III-Vs 的其他技术进行了比较）。晶圆键合允许光从下面的硅波导逐渐耦合到上面的有源 III-V 区。工程师们已经用这种方法演示了高度先进的器件，集成了探测器和激光器。

键合也可以在芯片级进行。在这种情况下，可以将单个 III-V 裸片或经过预处理的 III-V 器件与硅平台结合。尽管从 III-V 的角度来看，这些芯片看起来很小，尺寸只有几百微米，但它们远比电子组件大得多。由于晶体管的尺寸通常在几十纳米以内，因此尺寸失配约为三个数量级。

越来越受欢迎的单片集成增长为将 III-Vs 与硅结合提供了另一种选择。这种方法通过仅在需要的地方局部沉积 III-V 材料来提高集成密度。尽管该方法具有很大的吸引力，但其执行却很有挑战性，部分原因是各个晶格的原子间距存在显著差异（见图 1）。例如，硅与 InP / $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 之间的晶格失配约为 8%。这种差异可能导致大量位错和反相边界，从而妨碍了光学器件的性能。除了整体生长的挑战外，不同的材料可能具有不同的热膨胀系数，当将晶片从其生长温度（通常为 $550^{\circ}C$ 到 $700^{\circ}C$ ）冷却至室温时，会导致出现裂纹和缺陷。

克服这两个问题的一种众所周知的方法是从

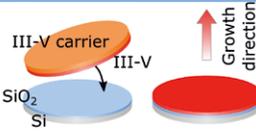
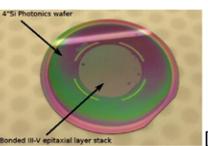
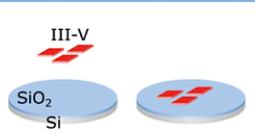
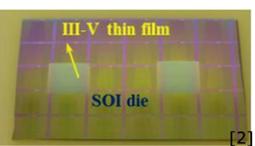
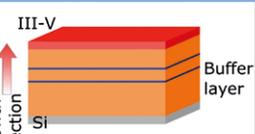
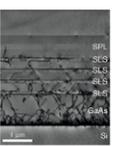
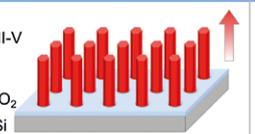
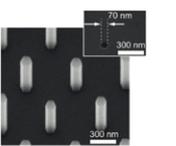
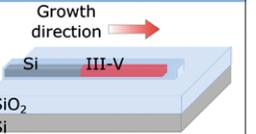
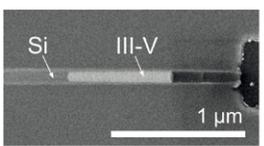
| Wafer bonding | Die-to-wafer bonding | Buffer layer growth | Nanowire growth | TASE |
|---|---|---|---|--|
|   <p>[1]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Very high material quality • Complex III-V stacks possible • Growth proceeds in vertical direction • III-V wafer size is limiting |   <p>[2]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Very high material quality • Complex III-V stacks possible • Allows scaling to full Si wafer scale (12") |   <p>[3]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Thick buffer layers required to reduce defect density • Coupling to underlying Si challenging due to the thick buffer layer |   <p>[4]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Good material quality • Direct growth on Si • Growth mostly proceeds in vertical or radial direction |   <p>[4]</p> <ul style="list-style-type: none"> • Good material quality • Growth proceeds in horizontal direction • Possibility to couple directly to Si passives |

表1: 用于在硅上集成III-V材料的现有技术的概述。经以下许可转载:

[1] M. Seifried et al. IEEE JSTQE 24 8200709 (2018), doi: 10.1109/JSTQE.2018.2832654, licensed under CC BY 4.0; [2] S. Keyvaninia et al. Opt. Mater. Express 3 35 (2013), doi: 10.1364/OME.3.000035, ©2012 Optical Society of America; [3] I. Luxmoore et al. Sci Rep 3 1239 (2013), doi: 10.1038/srep01239, licensed under CC BY-NC-ND 3.0; [4] T. Katsuhiko et al. J. Phys. D: Appl. Phys. 47 394001 (2014), doi: 10.1088/0022-3727/47/39/394001, ©2014 IOP Publishing Ltd, CC BY 3.0.

生长一层堆叠转变为生长纳米线。III-Vs 纳米线的生长可以从金属催化剂开始（通常是气-液固生长），或者从在硅晶片表面上预先构图的硬掩模中定义的开口开始，这种方法称为选择性区域外延。

我们在 IBM Europe 的团队开拓了将 III-Vs 与硅结合的另一种技术。我们称为模板辅助选择性外延 (TASE) 的方法涉及在硅衬底上形成的氧化管内 III-Vs 的生长（有关工艺流程的概述，请参见图 2）。

在我们的案例中，III-V 的生长始于在空心模板内一个末端暴露的小硅表面上的成核作用。就像纳米线的形成一样，生长是单晶的，异质外延的典型缺陷受到抑制。我们可以通过调整模板的大小来生成更大或更奇特的形状 - 但是，对于我们在此处讨论的工作，我们仅制造简单的条或纳米线。与传统的纳米线不同，我们的结构沿着硅的表面生长，从而能够与光子硅结构集成。

有趣的是，我们并没有开发用于光子学的 TASE。最初，我们以电子应用为目标，利用这项技术提供了一个互补的隧道场效应晶体管平台，在 2017 年 1 月 / 2 月的《化合物半导体》杂志第 38 至 42 页中对此进行了介绍。

TASE 技术具有两个基本属性，这些属性使我们能够形成本文其余部分所述的器件。首先，因为我们的方法依赖于用 III-V 代替现有的硅特征，所以它是自对准的 - 我们添加的化合物半导体材料的形状和位置是在与硅特征相同的光刻步骤中定义的。因此，我们可以完美地调整与波导的耦合，并且可以在硅光子晶体晶格中插入按比例缩放的 III-V 特征。结果是我们设计了真正的混合结构，实现了无缝集成。其次，我们可以在生长过程中原位引入掺杂分布和成分梯度。我们的工艺产生的几何形状的优点之一是，它能与硅波导的耦合变得简单。

单片探测器

随着光信号从服务器机架扩展到板载方案再到片上方案，对探测器的需求将增长到数千个，甚至数百万个。尽管非常希望使用片上光源，但并不是必须使用片上光源，但密集集成的光电探测器是光收发器中的重要组成部分，需要处理传入的光信号。

为了成功地替换有损电子互连，至关重要的是，功耗至少要与同类电子互连相似，并且理想

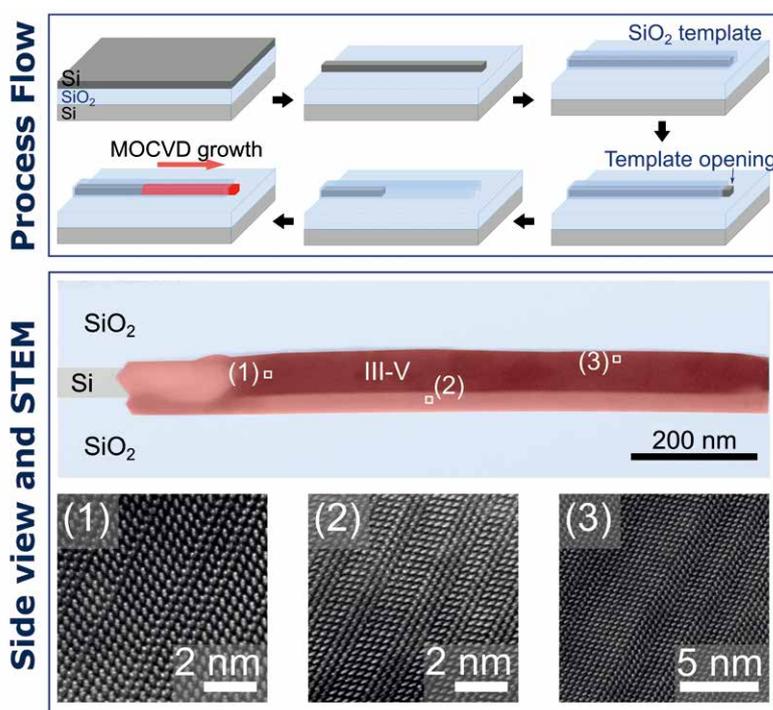


图2. 模板辅助选择性外延 (TASE) 工艺流程和使用扫描透射电子显微镜 (STEM) 对材料的研究。在 SOI 晶圆上执行 TASE。顶层硅表面被图案化并被 SiO₂ 覆盖。随后，将开口蚀刻到一侧的氧化物壳中，并部分蚀刻底层硅。使用 MOCVD，III-V 材料从剩余的硅生长到空的 SiO₂ 管中。图片经 S. Mauthe 等人许可转载。Nat. Commun. 11 4565 (2020)。

情况下更低。必须将精力集中在限制 RC 常数上，这一要求可以通过具有小电容的小尺寸器件来实现。满足这些约束的关键是要摆脱当今大型、高性能的器件，而这正是 III-Vs 发挥重要作用的地方。

当今最先进的集成探测器基于 CMOS 技术中的常见合金 SiGe。由于该二元材料具有间接带隙，因此吸收率比相应的直接带隙材料低。尽管硅 CMOS 图像传感器的广泛采用充分证明了用 SiGe 制成出色的探测器是完全可能的，但具有直接带隙的检测器可能会更加高效。引入 III-Vs 不仅可以提高效率，而且还为缩小有源区以及缩小器件电容打开了方便之门。

采用 III-Vs 的另一个原因是 SiGe 化合物没有跨越理想的吸收范围。它们在可见光波段有很好的探测效果，并且通过增加镉浓度可以在 1350 nm 左右到达 O 波段，但在重要的 1550 nm 波长非常接近探测极限。

最近，我们展示了第一个 InGaAs 光电探测器，该探测器以单片平面方式集成在硅上，从而使器件由硅鳍制成。从光子学的角度来看，这可能被视为对接耦合方法。我们专注于通过缩放来提高速度和功率效率。为此，我们保持小的几何结构，将高度限制为仅 60 nm。由于这不足以维持近红外中的传播模式，因此我们转向自由空间光纤耦

我们的混合光子器件可在整个电信频段产生可调节的光发射。它们具有许多有价值的特性：它们具有高产量和稳健性，具有超过 1000 的类似实验 Q 因子。尽管存在一些制造上的缺陷，但可控制腔体发射波长。我们将其优势归因于混合概念，其核心是将 III-Vs 放置在光子晶体硅结构内的所需位置。

我们展示的单个 III-V 光电探测器和光泵浦光子晶体光源为我们实现完全集成光链路的长期目标提供了很好的垫脚石。现在，我们的工作重点是开发一种更大的波导耦合型探测器，这种探测器将允许直接在芯片上耦合到集成激光器。如果我们的光链路要产生影响，它还必须具有电驱动而不是光泵浦的光源。对于微型器件（所谓的纳米激光器或纳米 LED）而言，这是一个极具挑战性的要求，因为在光学模式附近存在金属必然会导致损耗，并且这不可避免地会增加阈值。

我们相信，我们的原位平面掺杂工艺是生产

微型电泵浦发射体的关键。我们已经在 III-V 棒中嵌入了适当的成分和掺杂分布，下一步是在这些棒的末端添加触点，以实现电驱动。然而，尽管下一步很明确，但实施将具有挑战性。我们可以期待在不破坏光学模式的情况下进行大量工程优化设计并准确集成低电阻电触点。

在某些方面，TASE 的使用是纳米光子器件设计的一种范式转变。像任何新技术一样，也存在挑战 - 但也存在着全新的机遇，等待着探索。

这项工作获得了欧洲研究理事会 ERC StG PLASMIC 根据第 678567 号拨款协议和瑞士国家科学基金会 SNF Spark 根据 CRSK-2_190806 资助协议的资助。OSc

扩展阅读

H. Schmid et al. Appl. Phys. Lett. 106 233101 (2015)

S. Mauthe et al. Nat. Commun. 11 4565 (2020)

S. Mauthe et al. Nano Lett. 20 8768 (2020)

S. Matsuo et al., Nat. Photonics 4 648 (2010) doi:10.1038/nphoton.2010.177

半绝缘 SiC 衬底全球第三，山东天岳科创板 IPO 获受理！

5月31日，山东天岳先进科技股份有限公司科创板 IPO 正式受理！其本次公开发行人不超过约 4297 万股，且发行完成后公开发行股份数占发行后总股数的比例不低于 10%。

一、拟募资 20 亿元，用于上海临港 SiC 衬底项目

根据招股书显示，山东天岳本次拟募资 20 亿元在上海临港新片区建设 SiC 衬底生产基地，满足不断扩大的碳化硅半导体衬底材料的需求。该项目建设期为 6 年，自 2020 年 10 月开始前期准备，计划于 2022 年试生产，预计 2026 年 100% 达产。

二、公司营收、主营业务毛利率持续增长，但尚未盈利

据招股书显示，报告期内山东天岳营收持续增长，2020 年达到约 4.25 亿元，同比增长超过 58%，其中半绝缘型 SiC 衬底营收约 3.47 亿元，占总营收 81.62%，同比增长超过 89%。而随着公司业务的发展及募集资金投资项目的实施，其收入规模将会持续扩张。

净利润方面，报告期各年度公司归属于母公司股东的净利润分别为 -4213.96 万元、-20068.36 万元、-64161.32 万元。公司收入逐年增长，净利润却逐年下降，主要系 2019 年和 2020 年实施股权激励所致，另外则是由于 SiC 材料的持续研发需要大量资金投入。

毛利率方面，报告期内公司综合毛利率分别为 25.57%、37.68% 和 35.28%，其中主营业务 SiC 衬底毛利率分别为 8.45%、26.62% 和 34.94%，呈上升趋势，主要系产品单价提高的同时单位成本降低。另外，与同行业上市公司相比，山东天岳 2020 年度主营业务毛利率已经和境外可比公司相当。

三、2020 年 SiC 衬底总产量约 4.75 万片

报告期内，山东天岳的 SiC 衬底总产量（半绝缘型 + 导电型，各尺寸产量简单相加数）分别为 1.1463 万片、2.0159 万片和 4.7538 万片。

四、半绝缘型 SiC 衬底市占率全球第三，批量供应给领先通信企业；导电型 SiC 衬底已中标国家电网的采购计划

半绝缘型 SiC 衬底领域，山东天岳产品电阻率已实现 $10^8 \Omega \cdot \text{cm}$ 以上，电学性能达到较高水平，已批量且稳定地供应给通信行业领先企业，用于其新一代信息通信射频器件的制造。据 Yole 统计，2019/2020 年山东天岳已跻身半绝缘型 SiC 衬底市场世界前三。

导电型 SiC 衬底领域，山东天岳的 6 英寸导电型产品已送样至多家国内外知名客户，并中标国家电网的采购计划。产品的规模化销售，代表着其科技成果已与产业实现深度融合。OSc



安森美半导体助力汽车电动化和智能化发展

新冠肺炎疫情整体上拖慢了世界经济发展的步伐，但是化合物半导体行业某些领域的销售却飙升，如电动汽车和 5G 等产业的飞速发展正是背后推手，特斯拉、比亚迪、蔚来等造车新势力迅猛发展，苹果、小米、华为等“手机派”高调入局车市，谷歌、百度等互联网巨头也向车市摩拳擦掌。主要汽车大国纷纷加强战略谋划、强化政策支持，跨国汽车企业相继加大研发投入、完善产业布局，电动汽车成为全球汽车产业转型发展的主旋律。电动汽车的兴起将促进宽禁带半导体迅速发展。SiC SBD、SiC MOSFET 及全 SiC 模块在主逆变器、OBC、DC-DC、充电桩等领域大显身手，硅基 GaN 电力电子器件及 GaN 激光雷达也将在快充应用及自动驾驶上各显神通。安森美半导体是应用于高效能电子产品的首要高性能硅及化合物半导体方案供应商，在汽车电子领域 也有亮眼的佳绩。就此，我们 CS 中国专访了安森美半导体工业及云电源公司营销及战略高级经理 Ali Husain。



陆敏博士：在当前半导体及芯片行业如此深受重视及资本追捧的大背景下，请谈谈宽禁带半导体行业（如碳化硅、或氮化镓等）的机遇及挑战？



Ali Husain：碳化硅 (SiC) 有非常大的发展空间，也是推动新能源系统发展的重要赋能者，应用领域非常广泛，包括但不限于电动汽车、逆变器、充电器、可再生能源、光伏、云计算、专业音频、专业照明、医疗、电动工具、电器、电机等等，且在中国政府推进十四五规划的背景下，SiC 将在可再生能源、新能源汽车及充电桩等新基建设计中发挥重要作用。对于高电压和高功率水平，SiC 比传统的硅方案降低了功率损耗。而且，由于 SiC 具有更快的开关速度，因此对于某些拓扑结构，可缩减无源元器件如电感器的尺寸以降低系统尺寸和成本。太阳能发电和大规模储能变得越来越重要，最终将取代所有的污染性能源。由于可再生能源目前仅占全球总发电量的一小部分，因此 SiC 将有长远的发展路向。随着电动汽车采用率的增加，充电桩将大规模部署，另外，SiC 最终还将成为电动汽车牵引逆变器的首选材料，因为它可减少车辆的整体尺寸和重量，且能效更高，可延长电池使用寿命。

行业面临的挑战是如何降低采用 SiC 的门槛并满足各应用领域日增的需求。



陆敏博士：贵司在该行业深耕多年且较有影响力，请谈谈贵司的大致发展历程、主要成果业绩及将来规划，尤其在宽禁带半导体产业的规划布局？



Ali Husain：安森美半导体于 1999 年从摩托罗拉分拆出来，20 多年来，已成长为一个多元化的半导体元器件制造商，提供的产品从 SiC MOSFET 到 CMOS 图像传感器、专用集成电路 (ASIC)、Wi-Fi 和蓝牙芯片等。

在过去的几年里，安森美半导体完成了收购 Fairchild 半导体、Quantenna 通信系统和格芯 (Global Foundries) 的 12 英寸晶圆厂，致力于做电力电子和感知领域的半导体领袖，赋能下一代的创新、自动化和清洁技术。

预期 SiC 将在未来两到三年获更多的采用而逐渐扩大渗透，并和硅方案同时用于各种设计中，安森美半导体将为配合市场和客户所需，提供更多方案，以推动工艺的技术发展，并把领先行业的方案用于各产品系列中。安森美半导体也意识到宽禁带对电力电子的未来至关重要，将充分利用在电力电子领域的专知和对客户的了解，持续发布新的宽禁带技术和扩展产品阵容，与各应用领域的客户保持紧密联系，使他们能够采用 SiC 技术。



陆敏博士：宽禁带半导体行业的最大杀手级应用是在新能源汽车应用，请问贵司如何应对这一最大应用场景的爆发？



Ali Husain：安森美半导体多年来一直是重要的汽车电子供应商，持续发挥与合作伙伴的关系和汽车行业的信任，为汽车功能电子化和智能驾驶安全系统提供恰当的方案。我们的牵引逆变器模块为汽车动力总成提供紧凑的方案，而我们的图像传感器提供同类最佳的动态范围，确保车辆在各种照明条件下都能看清道路。无论是现在还是将来，一辆汽车中的每个电气系统都会有安森美半导体的元器件。

安森美半导体和世界各地的汽车整车厂商 (OEM) 有合作项目，同时也为客户提供各种电动汽车参考设计。安森美半导体的 SiC 方案不仅用于电动汽车及汽车功能电子化，也用于车载充电器及电动汽车充电桩等基础设施，让电动车从在路上行走乃至充电，都有相关的 SiC 方案。



陆敏博士：纵观国内外，请问贵司在行业内的整体地位情况如何？请具体分享一下贵司在技术、产业、团队、运营等方面的优势或特色是什么？



Ali Husain：安森美半导体身为电力电子及感知的领袖之一，拥有多年经验。我们的全球应用及现场支援团队，为客户提供支持。我们广泛的产品阵容组合使我们能覆盖大多数应用中的几乎整个半导体物料单 (BOM)。我们有基于物理的模型平台，可以在工程师测试器件前提供其在整个温度范围内的性能。安森美半导体的供应及物流运营每年付运超过 600 亿个器件，其中大部分是在我们自己广泛的晶圆厂及封装厂制造的。安森美半导体通过构建生态系统，帮助客户加快开发。



陆敏博士：《化合物半导体》杂志使命是传播化合物半导体技术与产业最新资讯，构建产学研用、资本和政府顺畅沟通平台，促进化合物半导体产业健康快速发展。请给我们提一点建议和对我们的读者一些祝福？谢谢



Ali Husain：期待贵刊持续推广该技术，并向业界传授推动新材料和器件的应用。安森美半导体很荣幸能参与其中，成为推进化合物半导体走向未来的共同体之一。CS

Aledia 进军 microLED 显示器市场

随着纳米线芯片在 300 毫米硅片上的展示，CEA-Leti 分拆公司 Aledia 计划明年交付首批产品。Rebecca Pool 与首席执行官 Giorgio Anania 进行了会谈，以了解更多信息。



去年底，总部位于法国的 microLED 显示屏初创公司 Aledia 在 CEA-Leti 试点生产线上制造了 300 毫米晶圆上的纳米线芯片，这是全球第一家。在过去的八年中，该公司一直在进行 200 毫米晶圆的研究和开发，但在更大尺寸的晶圆上展示了这项技术，这标志着大规模生产和进入市场的雄心壮志。

正如 Aledia 董事长，首席执行官兼联合创始人 Giorgia Anania 告诉《化合物半导体》杂志：“这全都与成本有关 - 我们一直在进行 200 毫米晶圆尺寸的研发，因为它更便宜，但对我们来说，向更大晶圆尺寸的过渡很容易。”

他补充说：“我们将在 2022 年发布 200 毫米晶圆的首批产品，第二年开始量产后，我们将转向 300 毫米晶圆。”

Aledia 的宣布是在所有人的目光都集中在 microLED 上的时候发出的。业内分析师预测，随着消费者要求用于智能设备和增强 / 虚拟现实头盔的更亮，更节能的显示面板，全球 microLED 市场将以 90% 的复合年增长率增长，到 2026 年将达到近 200 亿美元。

这些强大的数字正在吸引越来越多的企业进入市场。关键参与者包括苹果，三星，索尼，Oculus 和 LG Display 等行业重量级企业，以及规模较小的公司和初创企业，包括 Glo、Plessey、Play Nitride，当然还有 Aledia。

但是，CEA-Leti 分拆公司的独特之处在于其技术。虽然大多数 microLED 开发人员都致力于在 100mm 和 150mm 蓝宝石衬底上制造二维平面 GaN 层，但 Aledia 一直在将 GaN 纳米线直接生长到大尺寸的硅晶片上。这在技术和商业上都是有意义的。

首先，在硅上生长垂直纳米线可防止在 GaN 和 InGaN 层沉积在硅或蓝宝石上时发生晶片应力累积。正如 Anania 强调的那样：“我们不需要缓冲层，也没有晶圆弯曲 - 这使我们可以过渡到任何尺寸的晶圆。”

而且，Aledia 最终将能够实现只有硅代工厂才能带来的规模经济。Anania 很兴奋。

他着重强调了预计整个显示器市场每年将实现 1200 亿美元左右的增长，他打算让他的公司瞄准许多细分市场。这些产品包括电视，笔记本电脑和平板电脑，以及智能手机，智能手表和虚拟 / 增强现实显示器。这些细分市场很大程度上是由现有投资者推动的。

例如，对笔记本电脑，平板电脑和中型显示器感兴趣的英特尔投资公司已经向 Aledia 投入了数百万美元。同时，该公司还与一些无名的智能手机和增强现实播放器公司进行了多次合作。正如 Anania 指出的那样：“这验证了我们的技术，并显示了其在未来有着巨大的潜力。”

但是，阻碍 microLED 显示器发展的许多问题是什么呢？一言以蔽之，显示器制造商一直在努力将 microLED 大规模转移到显示器背板上。

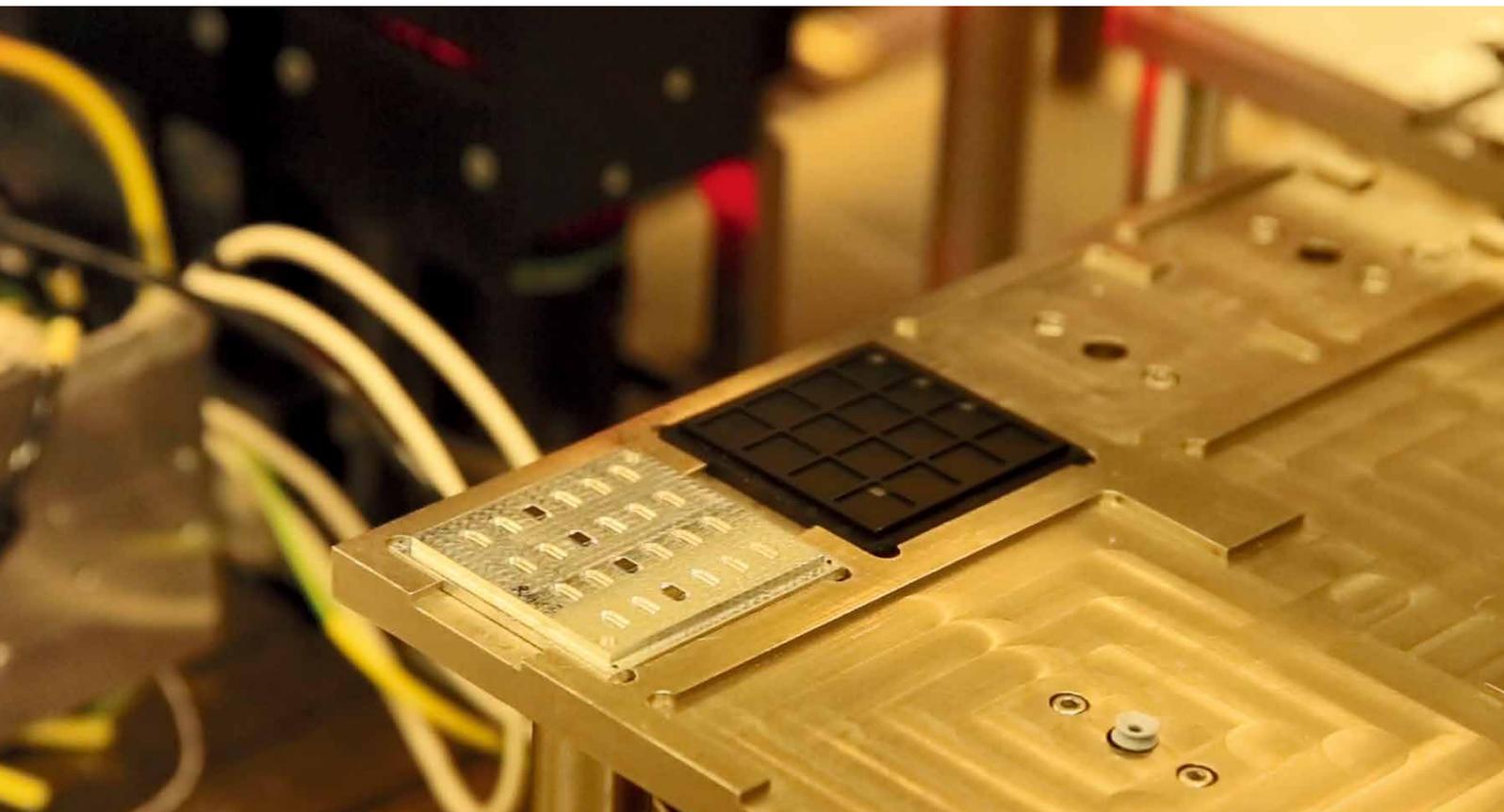
但是，据 Anania 称，Aledia 正在开发一种并行方法，可以快速有效地将数百万条纳米线从晶圆直接转移到显示器背板上。为此，该公司还一直在与芯片转移设备制造商合作，以优化 Aledia 晶圆的转移工艺。

尽管已知传统平面 microLED 的效率会随着像素尺寸的增加而迅速下降，但 Anania 强调指出，在较小的芯片尺寸下，他公司的纳米线的效率是如何保持不变的。实际上，他断言，在小于 10 μm 的子像素尺寸下，纳米线效率实际上超过了平面 microLED 的效率，这对于智能手机，平板电脑和增强现实设备中的显示器至关重要。

他说：“大多数 [中小型] microLED 显示器市场需要 3 至 4 微米的子像素尺寸才能赚钱并以低于 OLED 显示器的成本进行销售。”“因此，我们的纳米线特别适合我们瞄准的众多消费类应用。”

目前，Aledia 正在开发越来越复杂的三个纳米线平台。它最初的技术包括蓝色和经过颜色转换的纳米线，并计划于 2022 年下半年投入量产。同时，最终被 Anania 称为“革命性”平台的平台将包括红色，蓝色和绿色纳米线。计划于 2024 年开始量产，一旦准备就绪，该平台将取代之前的平台。

下转第 26 页



数字信号处理技术助力光通信能力

为了减轻光学基础设施的压力，领先的通信系统正在将高质量 InP 激光器、探测器和调制器与数字信号处理的先进技术结合起来

GEOFF BENNETT、YUEJIAN WU 和 HAN SUN, INFINERA

被称为“Motormouth”的纽约人约翰·莫斯基塔 (John Moschitta Jr.) 每分钟能全速说出 586 个单词，一般被认为是世界上说话速度最快的人。请注意，我们之所以说“一般”，是因为有两个人说话更快 - 但是当您观看他们的慢动作时，您会发现他们犯了错误或难以理解。

光传输也存在这个问题 - 即，随着信息传输速率的提高，可靠接收的难度也随之增加。但是，与人耳不同，光传输系统的设计人员采用了强大的数字信号处理器 (DSP) 技术来清理信号并极大地提高了数据接收的可靠性。在这里，我们在

解释 Infinera 如何使用 DSP 彻底改变光通信之前，先回顾下高速传输的挑战。

让我们开始考虑简化的远距离光传输链路。它可以在两个城市之间甚至在海底下运行。对于图 1 所示的示例，一对 IP 路由器通过蓝色收发器连接。在每一端，终端系统对来自以稍微不同的波长发射的激光发出的光信号进行复用和解复用，并将其引导到单对光纤中。请注意，使用这种众所周知的技术 (即密集波分复用或 DWDM)，一根光纤通常提供发送路径，另一根光纤提供接收路径。

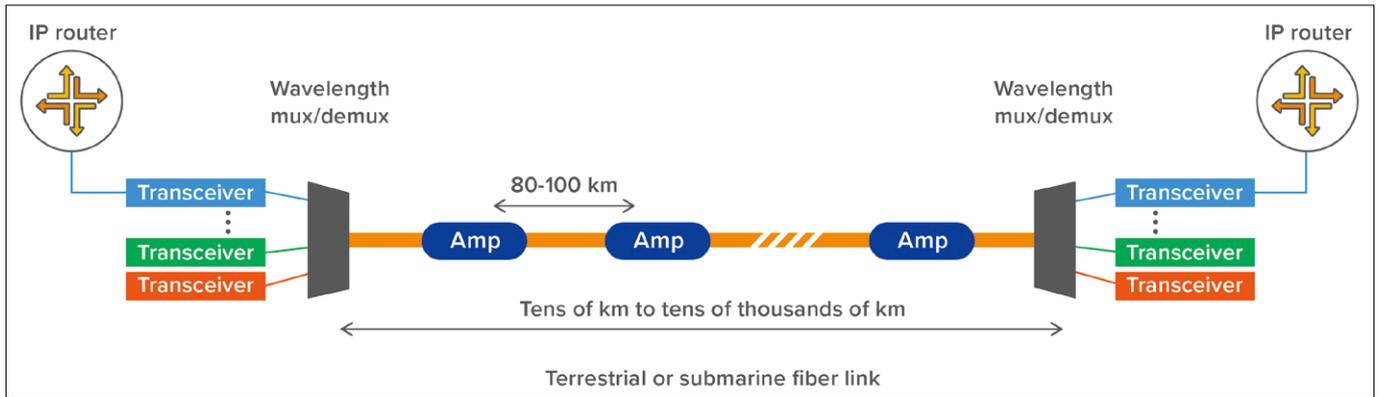


图1. 典型的远程或海底光网络链路的元件。

该通信系统中的关键组件是应答器。它接收来自各种数字服务的数据，包括从 1 Gbit / s 到 400 Gbit / s 的以太网连接，并将这些位映射到合适的数字容器中，然后再将数字电子信号转换为模拟信号，再发送给调制器，该调制器又控制激光。来自这台激光器的光脉冲，以及与它一起使用的光脉冲，每一个都以稍微不同的波长发射，被组合到单个光纤中。

这种并行 DWDM 方法的强大之处在于，它允许增加总光纤容量，而与单个波长数据速率的缩放无关。因此，在过去 20 年中，DWDM 传输行业的总光纤容量增加了 200 倍，这是由于人们对更高速的互联网连接有着永不满足的渴望所致。

在过去 20 年的巨大增长中，2009 年前后出现了两次戏剧性的飞跃：当时的每波长和每光纤容量先是猛增了 4 倍，达到每波长 40G，然后又上升了 10 倍或更多。这一扩张标志着光容量增长的拐点，而支撑这一扩张的是采用先进数字信号处理技术的相干传输。从那时起，每波长数据速

率又稳定地增长了 8 倍，目前的领先产品运行速度为 800 Gbit/s。

在 2009 年之前，远距离传输往往涉及发射机中的简单开 / 关键控。在光纤的另一端，一个直接的光电探测器将这种“二进制外观”的调制转换为电信号。我们称这种形式的传输为直接探测的强度调制。它的一个关键特性是它具有直接检测器，该检测器与接收到的调制符号的强度呈平方律关系。通过这种方法，很难使用数字信号处理来补偿线性光学损伤，这是我们现在要概述的问题。

正如 John Moschitta 的竞争对手在尝试打破“每分钟的文字记录数”的尝试中引入“噪声”（即错误）一样，光纤链路可能会受到来自许多不同来源的噪声的影响。随着生产方法的发展，其中一些方法会随着时间的推移而改进，例如激光器的质量和放大器的噪声水平。

只要我们可以实现线性检测器，就可以使用强大的数学技术来补偿其他信号失真效应。这些包括：色散效应，尤其是色散和偏振模色散；高

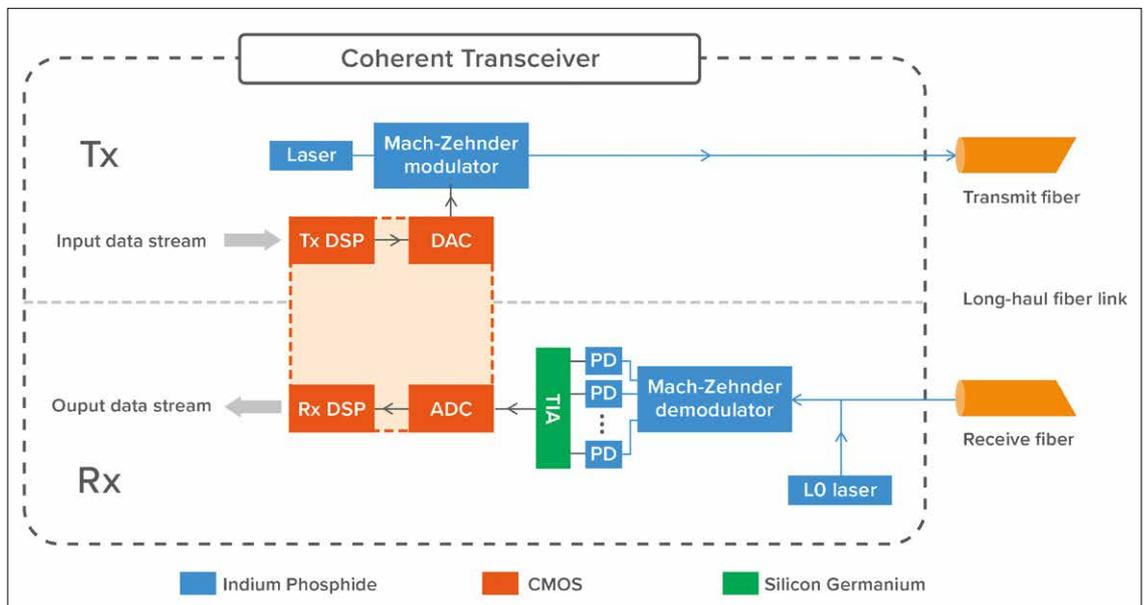


图2. 显示了发送和接收 DSP 的位置的相干收发器的示意图

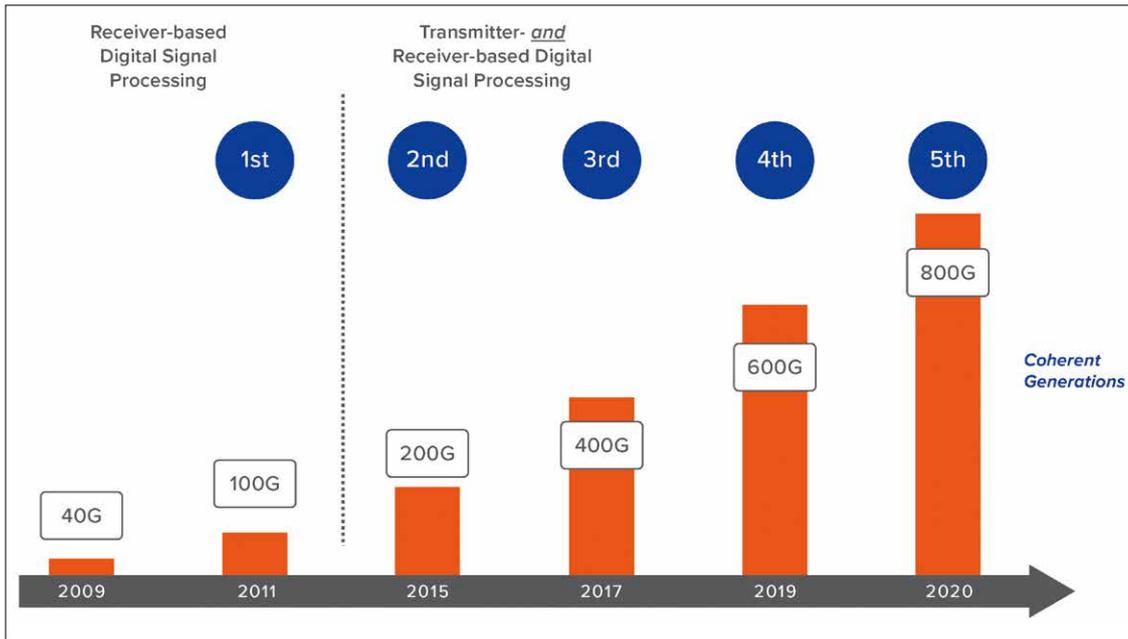


图3. 相干传输的标题数据速率的演变。

阶调制问题，可以使用一种称为概率星座整形的技术来解决；和非线性效应，这是由光纤中的高光功率水平触发的。

第一个是色散，与调制符号沿光纤的传播有关。如果您未能消除这种影响，则顺序符号将互相碰撞，从而使接收器无法正确解释给定符号的值。这类似于 Moschitta 的一个竞争对手说话时含糊不清，所以它们碰撞在一起，这使得人们很难理解一个单词的结尾和另一个单词的开头。色散来自于调制符号的不同频率，而偏振模色散来自于调制符号的垂直和水平极化，它们的传播速度略有不同。

高阶调制涉及到将更多 bits 塞入单个调制符号中。有点像 Moschitta 的竞争对手说话更快，这使得理解他们变得更加困难。查看解决方案的一种方法是概率星座塑造，这就像有一种方法，当一个接一个地说的时，故意选择听起来非常清晰的单词。这显然比意思相同，但在给定的一组词中更难区分的词更可取。

当光纤中的光功率水平超过某个阈值时，就会引入非线性效应，这是我们列出的信号失真的第三种形式。这个问题类似于 Moschitta 的竞争对手大声地对着麦克风说话，以至于听众开始听到失真的声音。

相干光收发器

2010 年，光学行业开始采用一种截然不同的方法来发送和接收信息 - 具有相干检测的相位调

制（有关最新一代相干收发器的简化示意图，请参见图 2）。尽管第一代相干收发器仅在接收器中进行处理，但随后的几代都包括基于发送器和基于接收器的处理。

发射器中的激光持续发光，从而形成一个光学载体。将数字电子信号发送到 DSP 的发送部分进行预处理，然后将处理后的数字信号发送到高速数模转换器 (DAC)，并将得到的模拟信号应用于 Mach-Zehnder 相位调制器，将这个信号施加到光载波上。注意，通过在光的 X 和 Y 偏振上发送单独的调制信号，调制符号的容量增加了一倍。此后，包含高速调制符号流的光信号被传输到光纤中，进行长达数公里的传输。

在接收器内，有一个连续输出的本地振荡器激光器，调谐到要接收的波长。本地激光输出与来自光纤的输入信号混合，然后将混合信号分成 X 和 Y 偏振。并行信号进入由可调 Mach-Zehnder 元件形成的相位解调器阵列。这导致生成了一组非常复杂的干涉图样，这些图样变化如此之快，以至于它们对于人眼来说就像是恒定的光。一组并行的光电检测器捕获干涉图样，将模拟光信号转换为由跨阻放大器增强的模拟电信号。这些更强的信号在模数转换器 (ADC) 中进行采样和数字化，最终的数字化信号将传递到接收器 DSP 并进行处理，以产生干净，可靠的比特流。

与纯电子电路不同，光收发器使用多种半导体材料，每种任务使用最合适的一种（这些材料在图 2 中用颜色编码）。

普通读者会知道 InP 在用于远距离光传输的波长（通常跨 1530 nm 至 1625 nm 的域）中，是创建高性能激光器和光电探测器的理想材料。InP 也是这些数据速率下调制器的最佳选择。由于这种双重作用，可以使用 InP 来实现所有的光学功能，包括发送和接收，从而形成单个光子集成电路（PIC）。SiGe 是用于生产跨阻放大器的材料，该跨阻放大器可在宽带宽和低噪声水平上提供稳定的放大，而硅 CMOS 用来制造用于 DAC，ADC 和 DSP 功能的专用集成电路（ASIC）。在图 2 中，我们展示了发送和接收 DSP 电路是在单个 ASIC 芯片上实现的。使用这种架构，最新的 800 Gbit/s 实施中至少有一个由超过 50 亿个晶体管组成。

除了材料，那些拥有无线电通信背景的人都将熟悉我们现在将描述的方法。在发射机上，我们使用相位调制器将数字信号编码为一组不同的相位状态，而不是发送开/关信号。在接收器上，我们不使用直接处理开/关信号而无需进行任何处理，而是使用相干检测器 - 该检测器由参考激光器（称为本地振荡器）组成，其信号与数据信号混合。当在无线电系统中使用时，本地振荡器可以调谐到特定的无线电台，其中可能有几十个无线电台的信号通过检测器。

在光传输中，情况略有不同，因为我们已经分离出我们希望接收的特定波长。在这种情况下，本机振荡器起着非常低噪声的放大器的作用，而所得到的相位解调器就是线性检测器。拥有线性检测器是一项巨大的资产，这使我们最终可以利用数字信号处理的能力来应对线性通道损伤（例如色散和偏振模色散）的补偿问题。

先进的 DSP

从无线电世界，DSP 到 DAB 无线电爱好者，

相干检测可能都是熟悉的，但处理高速光信号所需的采样率和处理能力却完全不同。从这个角度来看，对于 CD 品质的音频，可接受的采样率为 44.1 kHz，而现代相干转发器在远高于 100 GHz 采样率的情况下运行速度大约快 200 万倍，以正确地从接近 100 Gb 的信号符号率中恢复传输的信息。

20 世纪 70 年代，出现了第一个用于数字信号处理的硬件。它采用了通用处理器和软件实现。处理器的时钟频率约为 2 MHz，每个机器周期有四个时钟脉冲。即使在过去的五十年中，随着处理器性能的巨大进步，专用于 DSP 的专用芯片仍然至关重要。这部分是由于性能要求，但也与降低功耗，尺寸和硬件成本的需求有关。对于相干处理，采样率必须比符号传输率高一些 - 贝尔实验室的研究人员 Harry Nyquist 在 20 世纪 40 年代首先在数字电话的背景下解释了这一要求。

实现高速光传输所需的处理速率的关键是对给定的相干使用最新处理节点大小。进展迅速，从 100 Gbit/s 的转发器（从 2010 年的约 3 亿个门）发展到今天的 800 Gbit/s，使用的门超过 50 亿（有关波长数据速率的演变，请参见图 3）。

相干处理的一个缺点是，它消耗大量的电功率预算。因此，为了维持稳定的操作，必须从芯片上提取热量。从历史上看，摩尔定律是为了感谢它提供了一种减少单位处理功率的电力的途径。尽管这条定律有多种形式，但它们都是指在给定时间段内某些芯片指标会翻倍的趋势。这种进步导致以更低的功率实现更快的处理。在相干 DSP 中使用 ASIC 技术的情况下，由于每一代处理节点的功耗大约降低 0.7 倍，因此需要两代产品才能使 DSP 带宽增加一倍，从而实现相同的功耗。

现在，改进变得更具挑战性。从第四代收发



器的 16 nm 特征尺寸到当前第五代收发器的 7 nm 最新变化，使每单位处理速度的功耗节省了约 51%。相比之下，从 7 nm 移至 5 nm 时，仅能节省 30% 的功率。

在 IEEE 国际器件和系统路线图中，对电子器件和系统的可能发展进行了详细的预测。该路线图的目标之一是确定未来 15 年与器件，系统以及所有相关技术有关的关键趋势，其中包括用于 DSP 的 ASIC 技术。其他目标是确定通用器件和系统的需求，挑战，潜在解决方案以及创新机会；并通过合作活动鼓励全球范围内的相关活动，例如相关的 IEEE 会议和路线图研讨会。

目前，没有明确的解决方案来减缓功率下降的速度。一个不完善的选择是设计一个具有陡峭亚阈值的 MOSFET，尽管这将导致更高效的功耗，但它会以较低的处理速率与通过 DSP 的任何路径中的串行操作并驾齐驱。半导体界普遍认为，需要一种新的 DSP 架构来保持历史进度。

容量挑战

贝尔实验室对 DSP 开发的宝贵贡献不仅限于哈里·奈奎斯特 (Harry Nyquist) 的工作。当代的克劳德·香农 (Claude Shannon) 对信息理论做出了其他贡献，包括开发了一个方程，该方程使我们能够计算给定通信信道的最大容量。早在 20 世纪 40 年代，香农就曾想过使用铜制电话线或无线电报信道，但现在，在光通信时代，考虑的是光纤。

简化形式的香农方程式如图 4 所示。左边是 C，代表信道容量，右边是两个术语：一个代表信道的带宽，另一个与信噪比有关。对于光传输，带宽是在信号沿着光纤传播时用于放大信号的波长范围。这通常是 C 波段，跨度为 1535 nm 至 1565 nm，有时可能还包括 L 波段，这是 1565 nm 至 1625 nm 的区域。在对数项内，有一个基于信噪比 (N) 的函数，通常将其概括为“每个信道的比特利用率”。

图 4 包括在垂直轴上显示的信道容量如何在给定的带宽或 S/N 比的改善速率下如何增加的图示。由于 S/N 在对数函数之内，因此带宽增加会有更好的回报，因此容量的提高会逐渐减弱。这意味着，当致力于改善放大器噪声水平、光纤质量，尤其是相干调制解调器功能时，回报会逐渐减少，因为它们都涉及信噪比。

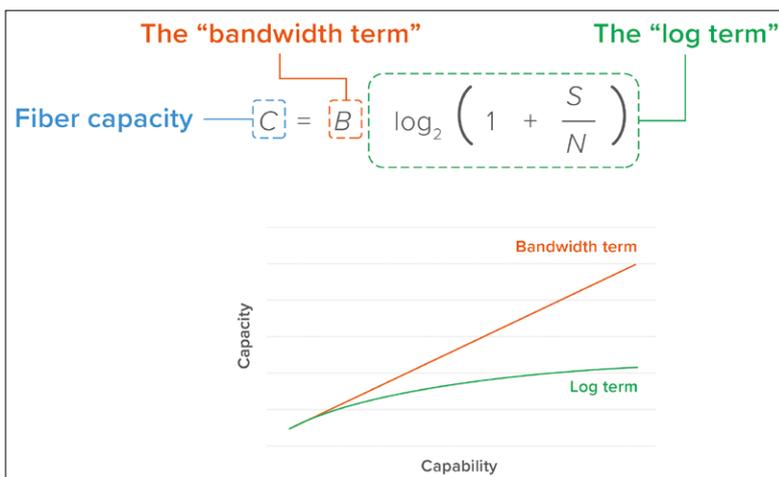


图4. 香农方程和未来相干收发器增强带来的光纤容量收益递减

好消息是，有多种选择可以增加带宽。例如考虑 C 波段。可以通过使用超级 C 波段放大器来增加带宽，这可以将放大的带宽提高 20% 以上；还可以使用 L 波段（请注意，L 波段几乎永远不会单独部署，它总是与 C 波段一起部署）。与传统的 C 波段系统相比，放大超级 C 波段和超级 L 波段的系统提供的带宽几乎是传统 C 波段系统的三倍。

这些选择集中在地面网络上，在地面网络上向放大器链输送电力相对容易。海底电缆不是这种情况，它包含一层厚的导电层，该导电层的两端可提供高达 15 kV 的电压来为放大器供电。在海底电缆中，通常是向放大器链输送功率的能力限制了光纤对的数量。

现在正在一些较新的电缆中部署的另一种海底电缆体系结构是空分复用。由于这会降低放大器的功耗，因此会牺牲每个光纤对的容量，但却用它来换取光纤对数量的增加。这种改变是有益的，增加了电缆的容量。在这个方向上的另一个发展是相干应答器的发展，相干应答器有望限制额外的光学性能，以换取更小的模块尺寸和更低的功耗。此过程将由 5 nm 或更小的 DSP 过程节点驱动。

无论是地面网络还是沿海床运行，短期到中期，都有足够的空间来保持光传输能力。

在过去的十年中，高速光传输一直依赖于先进的数字信号处理能力来提高每个波长的数据速率，并最终提高长距离和海底通信系统的总光纤容量。尽管数字信号处理器 (DSP) 的扩展和光纤传输限制都面临挑战，但仍可采用策略和解决方案来保持容量的增长，同时降低在全球范围内传输信息的成本。CS

为 5G 提供更好的 GaN

为了推动 GaN HEMT 的发展，研究人员正在研制复杂的毫米波电路，从根本上解决衬底的损耗和非线性问题，加快 p 型器件发展的速度

RICHARD STEVENSON

最近，对我们许多人来说，我们的手机不再是一切。正相反，手机只能在家中通过 WiFi 为我们提供连接，让我们在一波又一波的疫情中保持平心静气。

但这一切总会过去。随着疫苗的推出，我们将重返外面的世界，再次依靠基站网络将网页加载到手机中，播放音乐和视频。有时数据会延迟，对此我们最初的沮丧可能会转变为更大范围地推广 5G 网络的愿望，也用来说服自己是时候升级到尖端手机了。

GaN 是 5G 基础设施的关键材料。在制造固态放大器时使用 GaN，而非使用硅和 GaAs 等其他材料，GaN 可以实现更高的功率、效率和功率密度。由于 GaN 器件可以外延在硅上，因此在 300 毫米的晶圆厂进行大批量、低成本的生产是可能的。更重要的是，硅基提供了一个将该技术与硅 CMOS 集成的机会。这一次联合可能有助于复杂电路的开发，例如那些涉及波束成形和相控阵天线的电路，这是 5G 发展路线图的一部分。

尽管 GaN 绝不是完美的，但它的弱点已得到解决。2020 年末，在线举行的国际电子器件会议 (IEDM) 对此报告了重大进展。在这次线上论坛上，一个由 imec 领导的团队详细

介绍了一种 200 毫米工艺，用于制造包含三层铜层的毫米波硅基 GaN HEMT。另一项由 imec 牵头的合作研究报告了衬底射频损耗和非线性问题的研究成果；一个由康奈尔大学 (Cornell University) 工程师领导的团队声称已经消除了 p 型 GaN HEMT 的千兆赫障碍。

毫米波进程

5G 的推出将分为两部分进行。我们已经看到，与 4G 相比，引入 sub-6 GHz 基础架构会使得数据速率略有提高。接下来，毫米波连接将带来的下载和上传速度的提升是令人惊叹的。

在 2019 的 IEDM 会议上，一个来自 imec 的团队报告了采用铝制程的后道工艺生产的射频硅基 GaN HEMT 的结果，该工艺适用于在 200 毫米硅上制造 sub-6 GHz 器件。

“对于 sub-6 GHz 应用，这是一种可选择的技术，” Bertrand Parvais 声称，他在 2020 年 12 月的一场在线演讲和随附论文中透露了最新进展，所创造的第二代技术适用于毫米波电路操作。

“为了实现这一目标，必须使用 193 nm 的光刻技术缩小栅极长



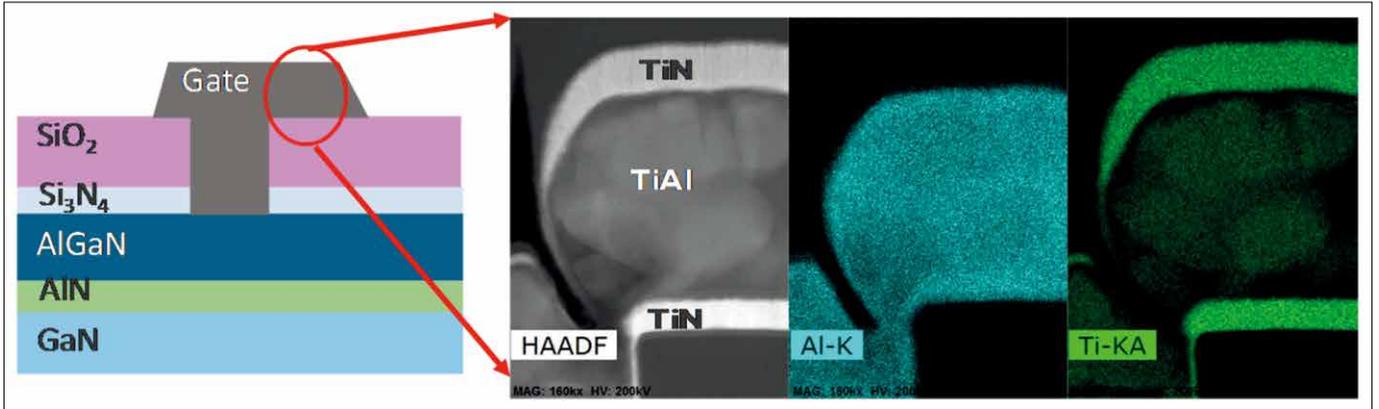


图1.用高角度暗场透射电子显微镜获得的图像显示，金属叠层中的钛层已与AlCu反应形成TiAl。由于TiAl导致薄层电阻增加，钛已从用于制造毫米波HEMT的金属堆中去除。

度，” Parvais 说。“此外，需要启用多指晶体管，通过三层铜后端是可以实现的。”

除了更改器件尺寸并从铝后端工艺转换为涉及三层铜的工艺外，Parvais 和他的同事还大幅削减了 HEMT 中的栅极泄漏电流，并减小了接触电阻和栅极电阻。

对于 2019 年报道的 sub-6 GHz 技术，imec 的工程师通过 PVD 沉积 TiN 形成了肖特基栅。这导致了高漏电流，对于 320nm 及以下的栅极长度，在关断状态偏置下，该电流将超过 1mA mm^{-1} 的击穿标准。

毫米波电路所采用的栅极长度只有 110 nm，为确保其栅极泄露电流是可以接受的，Parvais 和同事改用离子-金属等离子体工艺来沉积 TiN。此举将漏电流降低了两个数量级，这一突破归功于 TiN 的功函数增加了 0.2eV。

缩小 HEMT 尺寸还会导致接触电阻妨碍射频性能。为防止这种情况发生，imec 团队通过改进 AlGaN 势垒刻蚀和刻蚀后清洁的工艺，将接触电阻从 $0.3\Omega\text{mm}$ 左右降低到 $0.15\Omega\text{mm}$ 以下。

低栅极电阻是实现最大高振荡频率的关键，这对于毫米波的放大至关重要。用涉及厚金层的剥离工艺很容易实现这一点，但这不是一个选择，Parvais 解释说：“为了确保 CMOS 的兼容性，禁止剥离，并且采用栅极优先的方法来避免在欧姆接触形成过程中任何可能的退化。”

imec 的团队先沉积了一个金属叠层，随后采用了包括光刻和蚀刻的减法工艺确定接触尺寸。最初，堆栈包括一层夹在钛之间的 AlCu。然而，相互混合产生了 TiAl（见图 1），比 AlCu 具有更高的薄层电阻。因此，Parvais 和他的同事们转而采用无钛工艺，将薄层电阻从 $0.55\Omega/\square$ 减小

到 $0.2\Omega/\square$ 。这种改进还使最大振荡频率提高了 30% 以上。

110 nm 栅长的 HEMT 的制造涉及 193 nm 光刻和标准的基于 CMOS 铜镶嵌的工艺（更多详细信息，请参见图 2）。

在栅长为 110 nm，总宽度为 200 nm 的 8 指器件上进行的测量显示，在 2 V 的栅极偏置下，漏极电流为 1.2 A mm^{-1} ，典型的峰值电导为 430 mS mm^{-1} ，在 4 V 的源漏电压下产生。截止频率和最大振荡频率值分别为 56 GHz 和 135 GHz。

使用栅长为 200 nm 的 HEMT 器件在 28 GHz 处进行大信号表征时，在输出功率为 17.5 dBm 时，功率附加效率达到 42%。

Parvais 承认，imec 的 HEMT 的截止频率低于对栅长为 110 nm 晶体管的预期。他将这一不足归咎于欧姆层图案化的问题。仿真表明，通过解决这个问题，截止频率应提高到 80 GHz，同时最大振荡频率和功率附加效率也随之提高。

射频损耗和线性化

GaN 器件和硅基配对的弱点之一是衬底的有限电阻率限制了晶体管以及无源元件的性能，导致隔离性差。采用高电阻率硅有助于解决这个问题，但是衬底受到损害，研究表明，在 HEMT 晶圆进行 MOCVD 外延之后，损耗会增加。人们关注的是：在硅和 AlN 成核层的界面上形成的反型层；在硅衬底顶部附近形成 S-O-N 复合物；以及外延过程中发生的铝和镓原子向衬底的扩散。

一直以来，同时兼顾外延和制造的，对于硅上 GaN HEMT 的衬底损耗和非线性化的详细研究非常缺乏。但这一问题已经得到解决，这要归功于 imec 领导的团队，该团队考虑了材料生长和关键工艺步骤对与用于制造硅上氮化镓 HEMT 的衬

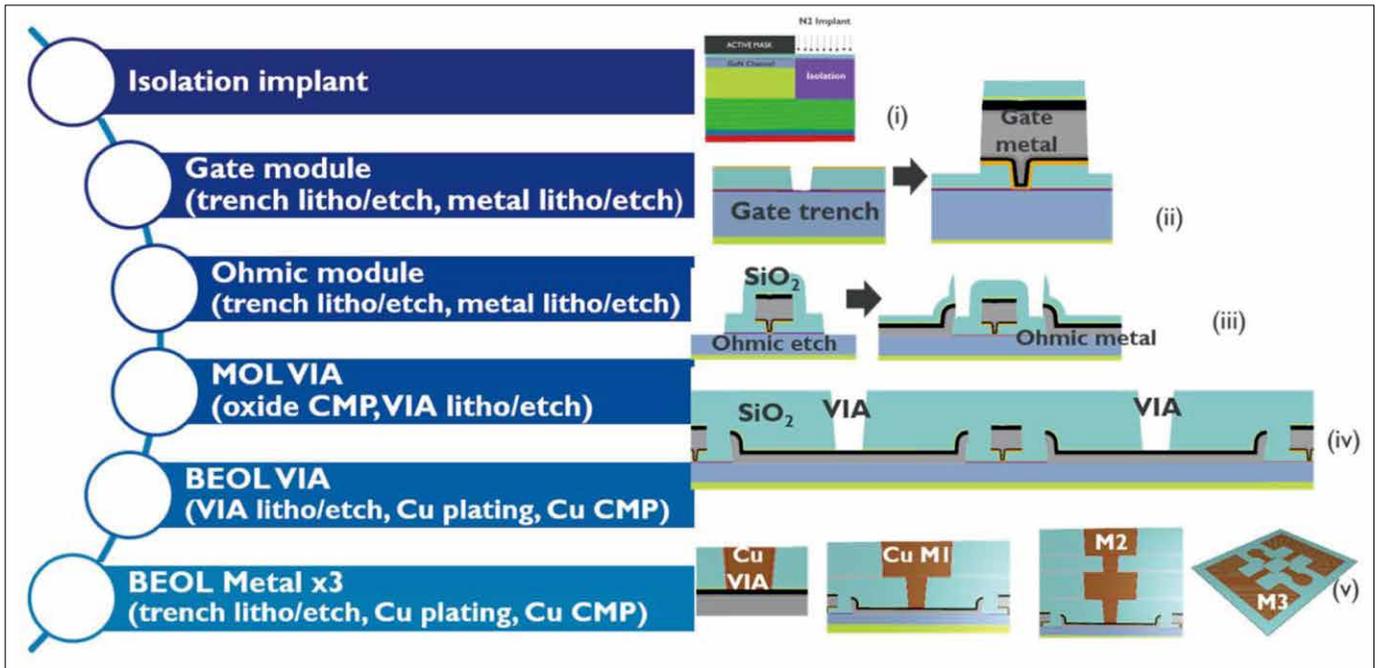


图2. Imec采用三级铜后端工艺生产毫米波器件的方法始于SiO₂层的沉积和氮注入的隔离(i)。在SiO₂中刻蚀沟槽会形成栅极开口(ii)，然后再添加一层SiO₂，接着蚀刻源/漏欧姆区并进行金属化，图形化和退火(iii)。中线(MOL)包括SiO₂(iv)的沉积和平面化。然后，在填充铜并随后进行化学机械抛光之前，通过蚀刻欧姆和栅极金属来添加通孔。在铜填充和化学机械抛光之前，先沉积M1电介质并对其进行图形化。重复两次这种通孔和金属工艺，以形成三层铜结构。

底相关射频损耗和线性化的影响。

团队发言人 Sachin Yadav 解释说，他和同事们使用 Czochralski 硅进行工作，因为这是唯一可用的直径达 300 mm 的衬底。在厚度为 1.15mm 的这些硼掺杂衬底上，他们通过 MOCVD 添加了一层氮化物层，以研究由于铝和镓原子在生长过程中反向扩散而引起的寄生沟道的形成。这种扩散产生了 p 型层。

两个品质数据用于评估不同的生长过程和结构。衬底的有效电阻率提供了一个独立于金属损耗的标尺，而 0.9 GHz 基频确定的二次谐波功率则提供了对非线性的了解。这两个值都是从 1.8 mm 线上的小信号和大信号测量中提取的。

在该小组生长的三种结构中(参见图3)，电

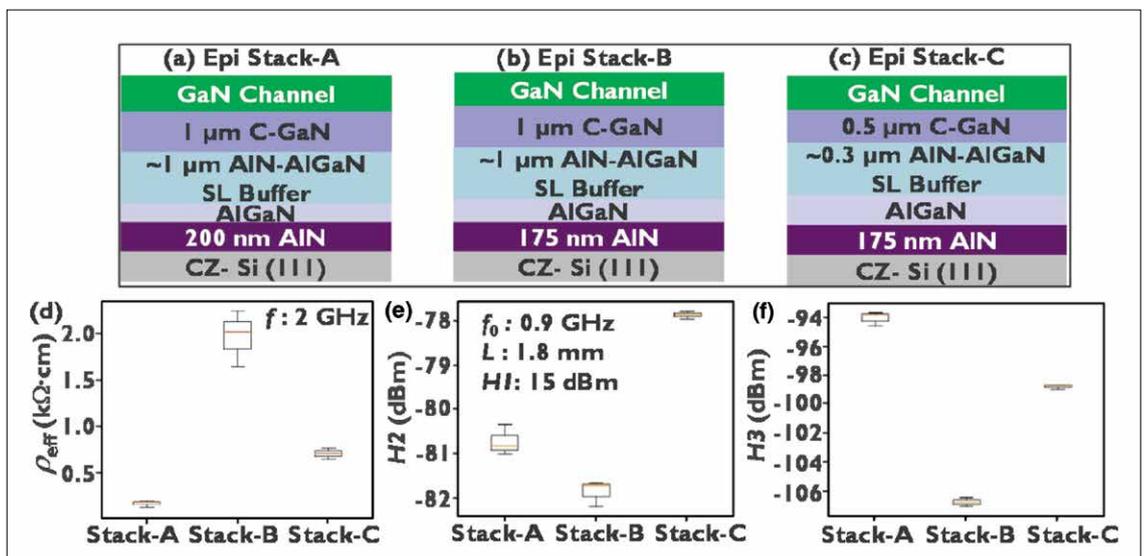
阻率最高、非线性最大的结构表现出最强的铝原子和镓原子的扩散。

提供直流隔离用以制造 CMOS 兼容的 GaN HEMT 的一个选项是氮注入。Yadav 解释说：“根据我们的理解，氮注入会在氮化物层内部形成陷阱，远程调节寄生表面导电层的电导率，从而改变损耗。”

为了评估氮注入的影响，Yadav 和同事研究了能量分别为 75 keV、150 keV 和 375 keV 的氮注入所引起有效电阻率和二次谐波功率的变化。任何注入都会降低有效电阻率，而 75 keV 和 150 keV 注入的组合产生了最佳的线性度。

使用 Czochralski 工艺生长的硅衬底的缺点在于含有间隙氧杂质，这是由于氧化硅坍塌的溶

图3. imec的一个团队考虑了GaN HEMT外延设计的变化(a)到(c)分别如何影响有效电阻率(d)以及二次谐波和三次谐波功率(e)和(f)。有效电阻率由中心导体宽度为75 μm，槽宽为50 μm的共面波导确定。对于1.8mm长的线路，在0.9 GHz的基频和15 dBm的H1下测量二次(H2)和三次(H3)谐波功率的值。



解造成的。如果加工步骤将该衬底的温度提高到 350°C 至 500°C 的范围，则间隙杂质就会形成簇，起到电活性热双施主的作用。这样的温度在 GaN HEMT 的制造中很常见，因为它们发生在 III-V 外延、电介质沉积和欧姆退火过程中。

关于后者，采用与 CMOS 兼容工艺形成低接触电阻需要在 500°C 至 600°C 之间快速进行热退火工艺。Yadav 及其同事考虑了该工艺的影响，发现在 400°C 至 600°C 之间的氮气中退火 90 秒就会降低有效电阻率。对于有效电阻率为 3kΩ cm 至 6 kΩ cm、间隙氧含量不详的高电阻率硅衬底，该电阻率随退火温度表现出单调降低。相反，对于有效电阻率为 7.5kΩ cm 和 4.3kΩ cm 且间隙氧水平分别为 3.8 ppma 和 3 ppma 的衬底，其退化不取决于温度。

Yadav 和同事已经对他们的结果进行了基准测试，并考虑了有效电阻率和二次谐波功率的值。“与许多高分辨率 SOI 衬底技术相比，我们的结果很好但仍落后于最先进的，陷阱丰富的 SOI 样品。需要进一步改进衬底以匹配该性能。”

加速 p 沟道 HEMT

由于与 GaN 的 p 型掺杂相关的挑战，这类 HEMT 的性能已经落后于其更常见的 n 型对应产品。如果能够解决这一弱点，将有助于开发：处理有源负载的宽带放大器；数模转换器的供电；以及数字功率放大器的构造，因为这将简化阻抗匹配和功率合成。

康奈尔大学的 Kazuki Nomoto 及其同事与英特尔的研究人员合作，极大地缩小了这方面的差距。在他们开展工作之前，p 沟道 GaN HEMT 的截止频率和最大振荡频率不过几百兆赫兹，现在可达到约 20 GHz。此外，漏极电流也创下了新高，在室温下实现了达到了 420 mA mm⁻¹ 以上。双方面的成功关键在于器件尺寸的大幅缩小。

GaN / AlN 外延晶片制备 HEMT，方法是采用 Al 面蓝宝石基 AlN 模板，将其装入 MBE 室，并沉积一层 500nm 厚的 AlN，然后沉积 15 nm 厚的未掺杂 GaN 层，以及厚度为 15 nm 的重掺杂 InGaN 层。这种结构在 GaN / AlN 界面形成二维空穴气体，被价带偏移和高极化场束缚在 GaN 层中。通过台面隔离形成栅长仅为 120 nm 的器件，随后依次进行刻蚀和光刻等工艺（工艺细节见图 4）。

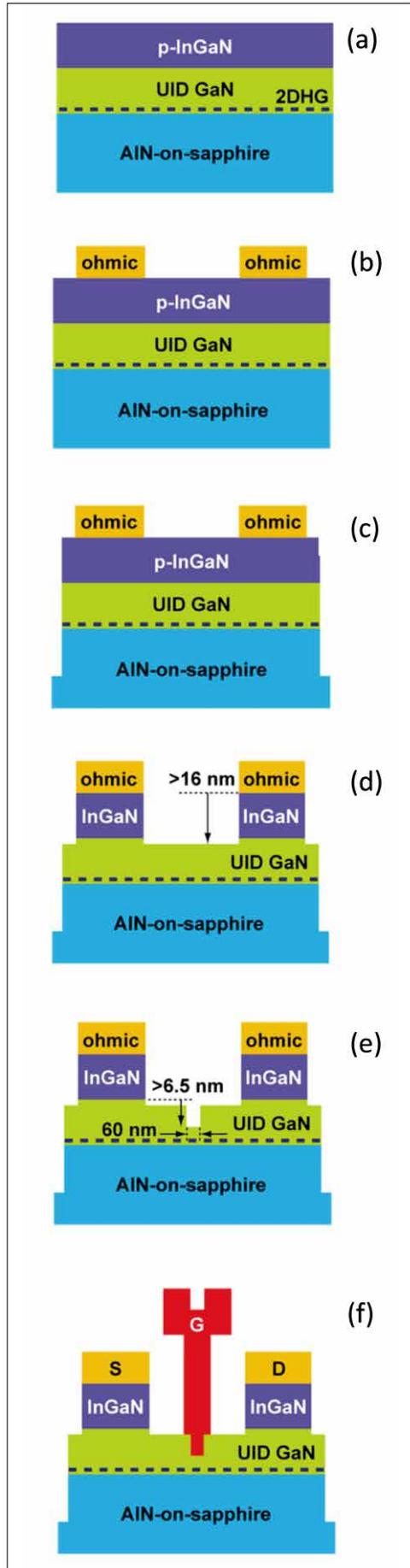


图4.康奈尔大学和英特尔的研究人员使用栅长仅为120 nm的器件，打破了p沟道HEMT的千兆赫兹壁垒。这些晶体管的制备始于MBE生长的具有镁掺杂In_{0.05}Ga_{0.95}N层 (a) 的GaN / AlN异质结构。接下来是添加非合金Pd / Au / Ni欧姆化合物 (b)，然后进行氯基电感耦合等离子体蚀刻以进行台面隔离 (c)，这是去除p型InGaN的第一个凹陷蚀刻步骤 (d)，通过电子束光刻进行第二次凹槽蚀刻，以减小栅极沟道距离 (e)，并添加Mo / Au肖特基T栅极。

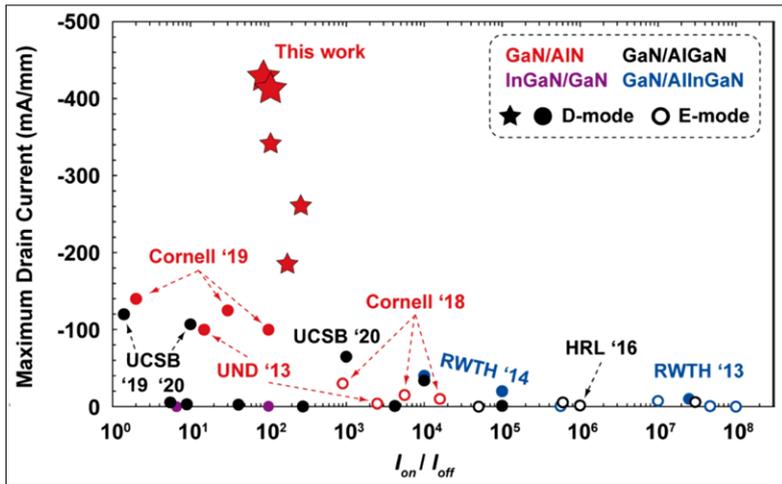


图5.康奈尔大学和英特尔工程师之间的合作将p沟道HEMT的漏极电流推到了一个新的高度。得益于按比例缩小器件尺寸并修整接触电阻。

对接触电阻的测量表明，当电流超过 100 mA mm^{-1} 时，接触电阻从 $9 \Omega \text{ mm}$ 左右骤降至 $1 \Omega \text{ mm}$ 以下。根据该团队的说法，后一个接触电阻值是 p 沟道 HEMT 所报告的最低值之一，并有

助于这些器件的高性能。

对于源漏距离为 680 nm 的 p 沟道 HEMT 而言，室温下的饱和导通电流达到 428 mA/mm 。这个数值为这一类器件开辟了新的天地（见图 5）。

在低温下记录到的数值甚至更高。“在 77K 时，导通电流几乎达到了 1 A/mm ” Nomoto 透露。

高频测量（通过使用与 p 通道 HEMT 相同的芯片上的开放结构消除寄生效应）导致截止频率和最大振荡频率分别为 19.7 GHz 和 23.3 GHz。与传统 HEMT 相比，源电阻和接触电阻均高出一个数量级。调整这些电阻会导致更高的频率。

该团队和由 imec 研究人员领导的团队所取得的突破表明，GaN 晶体管还有更多的发展空间。在今年的 IEDM 上肯定会宣布更多进展，届时希望可以线下举行而非在线公布。☞

上接第 16 页

Aledia 首席执行官不会被公司的第一批产品所吸引。正如他所说：“我很清楚，鉴于我们与英特尔的合作，我们的大批量产品将进入笔记本电脑市场。”

同时，该公司非常注重提高制造能力。正如 Anania 所强调的，在显示器制造期间，Aledia 仅进行必要的纳米线生长和外延，而晶圆和芯片处理，CMOS 集成以及后端测试均在硅代工厂进行。该公司已经在这里透露了一个重要的合作伙伴是总部位于以色列的 Tower Semiconductor。

Aledia 于 2019 年底开始扩大业务规模，将

其位于格勒诺布尔的研发中心搬迁至更大的总部和研发中心，但仍位于格勒诺布尔。继最新一轮 8000 万欧元的融资之后，该公司正在格勒诺布尔建设一座 50,000 平方米的大面积 3D microLED 制造工厂，预计耗资约 4,000 万欧元，该工厂计划于 2022 年下半年完工。

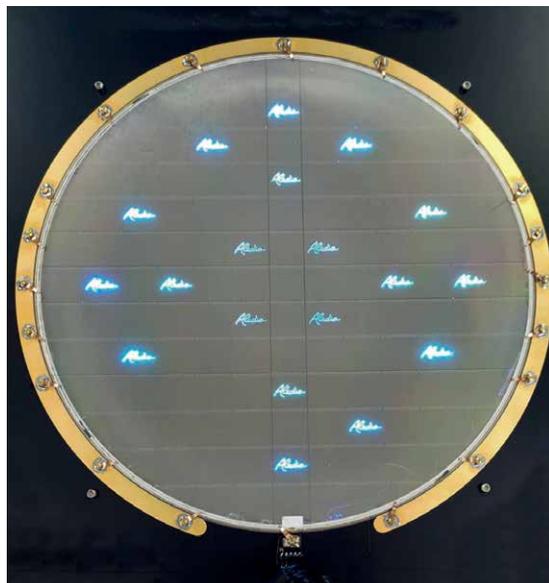
“我们可以在此之前使用我们现有的研发实验室进行销售，但是到 2023 年中期，我们的规模会越来越大，并且需要为此准备好设施，” Anania 说。设备将于 2023 年投入使用，以实现大批量生产。

“与 Plessey 这样的公司不同，我们过去在制造和设备上的投入相对较少，大部分的加工都依赖国家实验室。” Anania 补充道。

“但是我们现在已经接近市场，因此一直在加快研发，扩大协作和购买设备。”

实际上，Aledia 最近为它的外延购买了 Veeco Propel 300 毫米 MOCVD 系统。并计划在未来五年内在设备上投资总计 2 亿欧元（包括最新支出），并将公司发展为拥有约 500 名员工的公司，令人振奋的时代已经来临。

“因为我们是硅材料公司，所以我们是目前唯一一家可以利用 300 毫米晶圆制造以及先进的电子集成带来的成本优势的公司。” Anania 强调说，“这将使我们在竞争中立于不败之地。率先推出不同类型的显示器。” ☞



Aledia的300毫米硅晶圆上的纳米线芯片



用高压氮化镓 HEMTs 颠覆电子管市场

工作电压高达 150 伏的氮化镓高电子迁移率晶体管（GaN HEMTs）将高性能与更高的可靠性、更长的寿命和更低的运行成本结合在一起，其性能优于真空电子管。

GABRIELE FORMICONE, JEFF BURGER, JAMES CUSTER AND JOHN WALKER, INTEGRA TECHNOLOGIES

真空电子器件 (VED) 发明于 20 世纪上半叶，作为卫星通信、雷达系统、高能粒子加速器和其他需要高输出功率、宽工作带宽和高效率应用的关键部件，有着悠久的历史。VED 包括行波管和速调管。

虽然 VED 是一项公认的技术，但它们存在着多个弱点，其中许多弱点可以通过基于半导体的固态放大器来解决，这些放大器已经成为低功

耗、低频率 VED 市场的主流技术。基于半导体的解决方案可提供更长的使用寿命、更强的耐用性和更高的可靠性，并降低整体系统尺寸、重量和成本。然而，尽管取得了所有这些成功，固态源还没有渗透到高功率、数千瓦应用的高端市场。

高功率射频通信和数据传输系统的现代化将推动传统 VED 能够提供的要求。此外，系统架构师要求更高效的电源来满足绿色要求，同时降低

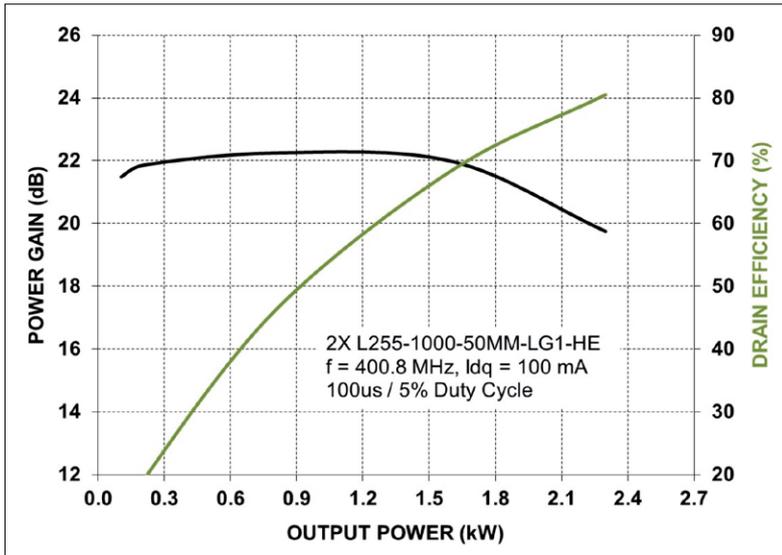


图1.在145伏偏压和400.8兆赫下测量的射频功率增益和漏极效率与输出功率的关系。静态电流为100毫安。6Ω串联栅极电阻有助于稳定晶体管，在2dB压缩和2.3千瓦饱和功率下增益为20dB。漏极效率最高可达80%。在100伏偏压的连续波工作中，饱和功率为1.2千瓦，峰值漏极效率为80%。

整个系统生命周期的运营成本。由于我们在射频和微波高功率器件市场领导者 Integra Technologies Inc. 团队的开拓性工作，我们已经实现了突破，将这类器件的工作电压推向了一个新的高度，提高了高效碳化硅基氮化镓技术的门槛。这些努力延用了我们在 28 V 和 50 V 下硅双极型和氮化镓 / 碳化硅射频高功率专业知识的悠久传统，我们最近的成功代表了自 2013 年以来绿色技术进步的又一个里程碑。我们取得的突破性进展使高压氮化镓 / 碳化硅基高电子迁移率晶体管 (GaN/SiC-based HEMT s) 能够提供引人注目的替代 VED 的商业选择。

我们先进研发活动的基础是我们专有的外延结构组合。它们是专门为大功率射频应用开发的，

得益于数十年来与我们的功率客户的密切合作和不断研发改进下才得以实现。

利用这一经过现场验证的 IP，我们开发了专为高压操作而设计的新型外延结构。除了这一进步，我们还推出了专门用于大功率运行的创新电路和热管理技术，并获得了专利。得益于所有这些进步，我们的器件现在可以在高达 150V 的电压下工作，从而极大地改善了输出特性。

我们最新一代的高压 GaN/SiC 器件可产生高达 20W/mm 以上的脉冲功率密度，可生产输出功率达几千瓦的固态器件。我们的 HEMT 器件可提供足够的增益、效率和可靠性，使这些系统能够实现其目标性能，这对与保证下一代高功率绿色平台的性能有着至关重要的意义。我们的器件是在主流的晶片制造代工厂中制造的，使用的是商业上可获得的、可随时投入生产的材料。

提高功率和动态范围

在去年的国际微波研讨会上，我们公司展示了在 100V 至 150V 的高电压下工作的射频 GaN/SiC 晶体管可以实现令人难以置信的高输出功率。我们报道了 2x50 mm 栅极外围芯片在 100V 连续模式下工作时产生 1.2kW 的功率，在 145V 下使用 100 μs 宽的脉冲和 5% 的占空比驱动时产生 2.3kW 的功率。图 1 显示了这些器件的功率增益和漏极效率与输出功率的关系曲线图，这些器件在两种模式下的漏极效率均为 80%。该放大器设计的两个主要特点是用于实现高效率的谐波调谐，以及获得专利的热增强技术，这些技术有助于降低此类高功率密度晶体管的散热。我们设计的器件和电路工作在 400.8 兆赫兹。这是当今最大的粒子加速器使用的频率，也是远程预警雷达系统感兴趣的频率。

我们的技术使单个晶体管能够以高于 70% 的效率产生 2kW 的连续功率水平和 4kW 的脉冲输出。有了这样的性能水平，可以用更少的组合器和更低的相关损耗来达到兆瓦级功率水平。相比之下，现成的 50V 射频技术需要大量的功率合成器才能实现类似的性能，这不仅降低了系统的效率，同时增加了热提取的复杂性。我们还在 2020 年欧洲微波周上通过将工作电压提高到 150V 展示了这项技术的设计灵活性。在本次论坛中，我们报告了一款 50 mm 栅极外围管芯，在将其工作偏压从 100V 调整到 125V，然后再调整到 145V 时，

我们的技术使单个晶体管能够以高于70%的效率产生2kW的连续功率水平和4kW的脉冲输出。有了这样的性能水平，可以用更少的组合器和更低的相关损耗来实现兆瓦功率水平。

可产生 3dB 的动态范围 (见图 2)。

我们的技术使单个晶体管能够以高于 70% 的效率产生 2kW 的连续功率水平和 4kW 的脉冲输出。有了这样的性能水平, 可以用更少的组合器和更低的相关损耗来实现兆瓦功率水平。

该放大器的器件和电路设计为 325 MHz, 目标是大型粒子加速器。我们的单个半导体管芯在 145V 时提供 1.1kW 的峰值功率, 峰值效率为 80%。在 100V 偏压下, 峰值功率降低了约 3dB。

使用更低的电压可以带来额外的好处。当我们将偏压调回到 50V 时, 峰值功率可以被调制到约 6dB, 同时仍保持 80% 的峰值效率; 通过降低到 28V 或 32V 的工作偏压, 我们可以实现额外的动态范围分贝。我们也获得了类似的结果, 同样也是在欧洲微波周上公布的, 功率放大器设计的工作频率为 650 MHz。

如此大的动态范围是实现高功率射频系统的关键因素。它允许多种用途或功能, 还允许升级较旧的系统, 以将传统性能与其他最先进的功能相结合。对于我们在最近的国际微波研讨会和欧洲微波周上报道的大功率器件, 通道的峰值温度仅为 150°C 左右。这种低温是通过专利技术实现的, 这些技术可以增强有源区域最热区域的热流量, 使散热更快。

我们的研发活动已扩展到考虑与 100 V 和 150 V 更高功率密度和更高负载阻抗相关的带宽。带宽过大是几种应用中的一个“热点”, 其要求可能严格针对特定的应用, 这些要求尚未在公共领域进行讨论。不过, 我们可以说的是, 宽带大功率应用注定会从我们的 100-150V 放大器技术中获得巨大利益。

系统级优势

正如本文前面提到的, 更高电压的氮化镓晶体管可以实现超过 20 瓦每毫米的功率密度, 从而可以在相同的相对功率水平下降低电路复杂性。

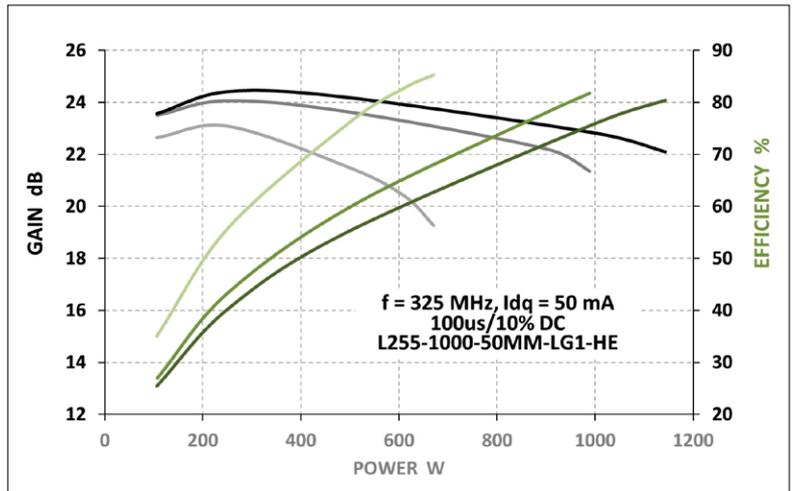


图2.在325MHz频率下, 信号为100MHzs、占空比为10%的50 mm管芯的射频功率增益和漏极效率与输出功率的关系测量结果。该器件的直流偏置电压分别为100V、125V和145V, 动态范围为3dB。通过将工作偏压降低到50V, 实现了6dB的动态范围。

例如, 两个工作在 50 伏的 1 千瓦晶体管可以用一个工作在 100 伏的 2 千瓦晶体管来代替。这消除了一个晶体管和较低电压解决方案所需的组合结构。

在简单的负载线分析中, 较高电压的另一个优点是显而易见的。在仅有 50Ω 的负载下, 50V 的设备能提供 25W 的输出功率, 而 100V 的设备则能提供四倍于此的功率。

对于宽带应用, 考虑到器件阻抗会随着更高电压工作而增加并且每瓦电容减小, 因此更高电压的 GaN HEMT 也是一个优势。较低电压的解决方案需要更大的阻抗变换才能获得带宽, 而较高电压的解决方案可以消除这些变压器或降低变换比及其复杂性。当使用 100V GaN 时, 通过移除 50 V GaN 解决方案中具有相同 RF 输出功率的变压器, 可以将匹配结构的尺寸减小两倍或更多。

毫无疑问, 增加 GaN HEMT 的工作电压会带来很多益处。器件本身具有很多优点, 包括输出功率的增加, 以及电路和系统级的诸多优点。我们公司正在与 VED 的多个用户进行谈判, 以将我们的高压 GaN/SiC 绿色技术商业化。

扩展阅读

- [1] G. Formicone et al. “A 2.3 kW 80% Efficiency Single GaN Transistor Amplifier for 400.8 MHz Particle Accelerators and UHF Radar Systems”, IEEE-MTTs International Microwave Symposium, 2020.
- [2] G. Formicone et al. “A GaN/SiC UHF PA for Particle Accelerators with 100-145V Quasi-Static Drain Modulation,” European Microwave Week, 2020.
- [3] G. Formicone et al. “Targeting radar with 150 V RF GaN HEMTs” Compound Semiconductor magazine, March 2016.

GaN 射频器件：GaN-on-SiC，还是 GaN-on-Si？

到 2026 年，GaN 射频器件市场预计将超过 24 亿美元。GaN-on-SiC 和 GaN-on-Si 之间的竞争已经显现。

大纲

• 市场预测：

2020 年 GaN RF 市场总价值达到 8.91 亿美元。

Yole Développement (Yole) 宣布 2020-2026 年的复合年增长率 (CAGR) 为 18%。

到 2026 年，基于 GaN 的宏 / 微基站将占整个 GaN 电信基础设施市场的 95% 以上。

到 2026 年，GaN 射频器件市场将由 5G 电信基础设施和国防应用主导，分别占整个市场的 41% 和 49%。

• 技术趋势：

GaN-on-SiC 将从 2020 年的 3.42 亿美元增长到 2026 年的 22.22 亿美元，其中 2020-2026 年复合年增长率为 17%。

GaN-on-Si 将从 2020 年的不到 500 万美元增长到 2026 年的 1.73 亿美元，2020-2026 年复合年增长率为 86%。

在 5G 电信和国防领域的推动下，GaN-on-SiC 技术在高功率密度和导热性方面仍然是首选。

向 6"SiC 的过渡正在进行中，预计在未来几

年将加速。

• 供应链：

在 GaN-on-SiC 技术的主导下，垂直集成一直是国防和 5G 电信应用的首选。

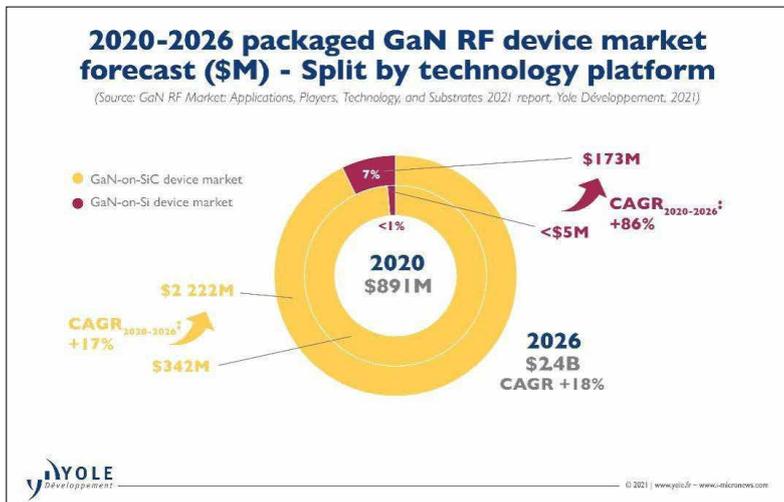
在国防领域，Raytheon、Northrop Grumman 和中国中电科正在引领 GaN 的应用。

值得注意的投资包括 Wolfspeed 的 10 亿美元资本支出，目标是到 2024 年实现产能扩张；NXP 首家 6" 晶圆厂于 2020 年在美国亚利桑那州开业；中国山东天岳在上海投资新建 6" SiC 工厂和 II-VI 在新泽西州新建的 6" GaN 晶圆厂。

“鉴于新兴的 GaN RF 市场，近年来显著的投资一直在塑造未来的供需关系，这一点很重要，值得密切关注。” Yole Développement (Yole) 电源与无线部门化合物半导体与新兴基板团队首席分析师 Ezgi Dogmus 博士断言。她补充道：“GaN-on-SiC 是主要的技术平台。器件级的市场领导者 SEDI 已与领先的 SiC 晶圆供应商 II-VI 合作进行垂直集成”。

在这种动态背景下，Yole 深入调查了技术和相关市场。我们指出了最新的创新，并强调了商机。

今天发布的《2021 年 GaN 射频市场：应用、参与者、技术和基板报告》(GaN RF Market: Applications, Players, Technology, and Substrates 2021 report) 概述了 GaN RF 市场和技术趋势：电信基础设施、手机、国防、卫星通信、射频能量和民用雷达。该报告概述了 NXP、Wolfspeed、山东天岳和 II-VI 等领先供应商的产能扩张和公司概况，并提供了 GaN 在其他竞争技术（如 LDMOS 和 GaAs）中的定位。包括市场趋势和预测、供应链、技术趋势、技术洞察和分析、总结和展望，本研究还指出了 GaN-on-SiC 和 GaN-on-Si 技术平台，包括它们的市场渗透、技术挑战和供应链方



面。RF GaN 行业面临的经济和技术挑战是什么？关键驱动因素和相关应用是什么？ GaN-on-Si 与 Gan-on-SiC：生产现状如何？哪些供应商值得关注，他们正在研究哪些创新技术？ Yole 今天展示了其对 RF GaN 行业的愿景。

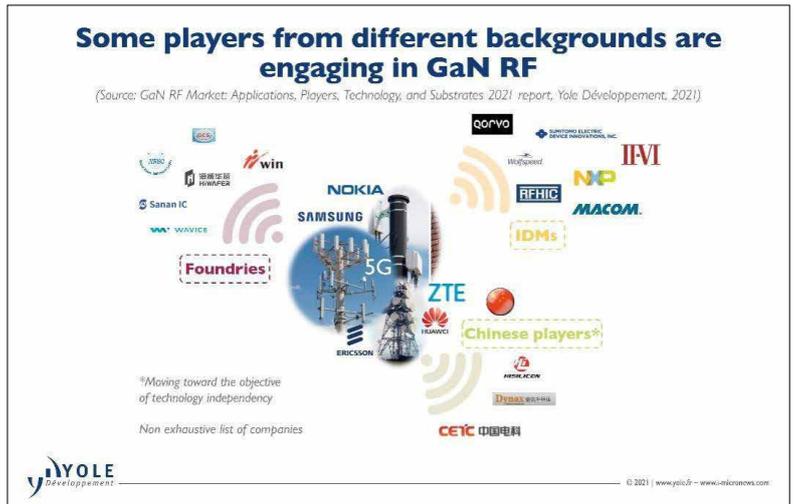
正如 Yole 团队在新的《2021 年 GaN 射频市场：应用、参与者、技术和基板报告》中所分析的那样，2020 年，NXP 在美国亚利桑那州开设了世界上第一家 6 英寸 GaN-on-SiC 晶圆厂。这些活动将进一步加速 GaN-on-SiC 从 4" 到 6" 的演变。在代工厂层面，Win Semiconductor 等主要公司正在扩大产能以满足不断增长的市场需求。此外，中国生态系统中存在着强烈的技术自主趋势，例如在山东天岳、中电科、海威华芯和三安集成。此外，GaN-on-Si 不断吸引新人。

Yole 专门从事的化合物半导体和新兴基板的技术和市场分析师 Selsabil SEJIL 博士说：“同时，Macom 与意法半导体合作的 6" 平台上的开发工作正在进行中，GlobalFoundries 和 Raytheon 最近宣布了一项针对 5G 无线应用、国防及其他领域的合作伙伴关系。为了满足不断增长的需求，新来者纷纷加入了新建能力的行列”

在 RF GaN 行业，一切都始于 GaN-on-SiC 技术。20 多年前推出的 GaN-on-SiC 现在已成为射频功率应用中 LDMOS 和 GaAs 的有力竞争对手。除了在军用雷达领域的深度渗透外，GaN-on-SiC 也一直是华为、诺基亚、三星等电信 OEM 厂商的 5G 大规模 MIMO 基础设施的首选。由于其高带宽和高效率，GaN-on-SiC 器件在 5G 市场中不断占据 LDMOS 的份额，并开始从 6 英寸晶圆平台过渡中受益。在这种情况下，GaN-on-SiC 器件市场预计将在 2026 年达到 22 亿美元以上，2020-2026 年复合年增长率将增长为 17%。

Yole 专门从事化合物半导体和新兴基板的技术和市场分析师 Poshun Chiu 表示：“然而，作为一个关键挑战者，GaN-on-Si 仍在竞争中，有望提供成本效益高和可扩展性的解决方案。尽管截至 2021 年第二季度市场容量仍很小，但 GaN-on-Si PAs 因其大带宽和小尺寸而吸引了智能手机 OEM。随着创新厂商的重大技术进步，它可能很快就会被一些低于 6GHz 的 5G 手机型号采用。这无疑标志着 GaN-on-Si RF 行业的一个里程碑”。

最近的代工厂进入以及与新兴电力电子器件 GaN-on-Si 行业的协同作用，也可以帮助 GaN-on-



Si RF 在长期内获得发展势头。在手机以及国防和 5G 电信基础设施应用的推动下，GaN-on-Si 器件市场预计将在 2026 年达到 1.73 亿美元，2020-2026 年复合年增长率为 86%。

全年，包括 System Plus Consulting 和 Yole Développement 在内的 Yole 集团公司都会发布大量报告和监控。此外，专家们还实现了各种重点演讲，并组织了重点会议。确保了解来自行业的最新消息并了解我们的活动概况，包括对领先公司的采访以及 i-Micronews 上的更多信息。敬请关注！

关于 Yole

Yole Développement (Yole) 成立于 1998 年，现已发展成为一家提供营销、技术和战略咨询、媒体和企业融资服务、逆向工程和逆向成本计算服务以及知识产权和专利分析的公司。凭借对使用硅和 / 或微制造的新兴应用的强烈关注，Yole 公司集团已扩展到包括全球 80 多个合作伙伴。

关于我们的分析师

Ezgi Dogmus 博士，是 Yole Développement (Yole) 电力与无线部门化合物半导体与新兴基板团队的首席分析师。她负责管理公司技术专长和市场知识的扩展。此外，Ezgi 积极协助和支持专门收集市场和技术报告、监控以及定制咨询项目的开发。在加入 Yole 之前，Ezgi 在 IEMN (法国里尔) 担任基于 GaN 的射频和电源解决方案的工艺开发工程师。Ezgi 已撰写或合作撰写了超过 12 篇论文。从奥格斯堡大学 (德国) 和格勒诺布

尔理工学院 (法国) 毕业后, Ezgi 获得了博士学位, IEMN (法国) 的微电子学博士。

Selsabil SEJIL 博士, 是 Yole Développement (Yole) 的一名技术和市场分析师, 专门研究化合物半导体和新兴基板。作为 Power & Wireless 团队的一员, Selsabil 致力于开发专门的化合物半导体市场和技术报告和监控器。此前, 她在 SOITEC (法国格勒诺布尔) 担任 SOI 产品的集成工程师。她还曾在 CEA 担任 5G 应用的工艺开发工程师。Selsabil 获得了博士学位, 在克劳德伯纳大学 (法国里昂) 与 STMicroelectronics (法国图尔) 合作获得材料科学博士学位, 她的工作探索和优化了电力电子器件完整制造的所有方面, 重点是 SiC 外延的优化。在她的职业生涯中, Selsabil SEJIL 在半导体领域撰写 / 合著了超过 8

篇论文。Selsabil 毕业于巴黎南部大学, 获得纳米科学 (法国奥赛) 硕士学位。

Poshun Chiu 是 Yole Développement (Yole) 的一名技术和市场分析师, 专门研究化合物半导体和新兴基板。作为 Yole 电力电子与无线部门的成员, Poshun 专注于电力、射频和光电子领域。他从事技术和市场报告的开发, 也参与定制项目。在加入 Yole 之前, Poshun 在 Epistar (台湾和中国) 拥有 9 年的研发和产品管理经验。他是 10 多项固态照明专利的作者或合著者。Poshun 还从事基于相关半导体材料系统的工艺技术和组件的新应用的开发和评估。Poshun 获得 National Cheng Kung 大学 (台湾) 微电子学硕士学位和 IESEG 商学院 (法国) 的 MBA 学位。

Press contacts

Sandrine Leroy, Director, Public Relations, leroy@yole.fr

Marion Barrier, Assistant, Public Relations, marion.barrier@yole.fr

Le Quartz, 75 Cours Emile Zola – 69100 Villeurbanne – Lyon – France – +33472830189 www.yole.fr - www.i-micronews.com– LinkedIn – Twitter

相关报告

GaN RF Market: Applications, Players, Technology, and Substrates 2021

The GaN RF market is expected to reach over \$2.4B by 2026 as competition in production of GaN-on-SiC and GaN-onSi technologies emerges. – Performed by Yole Développement

引用公司

Adventech, Aethercomm, Aixtron, Akash Systems, A.L.M.T., Altum RF, Ampleon, Analog Devices, Arralis, AT&T, Baylin Technologies, BAE Systems, Celestia Technologies Group, Cisco, CECS, CETC, China Mobile, China Telecom, China Unicom, CPI, Comtech, Cree, Custom MMIC, Dynax, DragonWave-X, Dowa, Empower RF systems, Enkris Semiconductor, EpiGaN, Ericsson, ESA, Freiburg/Univ. Ulm/Fraunhofer IAF, Filtronic, Freescale, Fujitsu, General Dynamics, Gilat, Global Communication Semiconductors, GlobalFoundries, HebeiKing Ceramic Electronic, HJCW, HiWAFER, Huawei, HUGUES, II-VI Inc, Iconic RF, IMEC, IMECAS, Infineon, Inmarsat, Innoscience, Integra Technologies, Intel, IQE, JAXA, JRC, KDDI, KT, Leonardo, Lockheed Martin, MACOM, Microchip, Microsemi, Mission Microwave 等。

相关阅读

- 5G's Impact on RF Front-End for Telecom Infrastructure 2021
- 5G's Impact on RF Front-End and Connectivity for Cellphones 2020
- Status of the Radar Industry: Players, Applications and Technology Trends 2020
- GaAs Wafer and Epiwafer Market: RF, Photonics, LED, Display and PV Applications 2020

氮化镓场效应晶体管沟道性能提升

氮等离子体暴露提高氮化镓垂直沟道场效应晶体管的迁移率

日本名古屋大学 (Nagoya University) 的工程师们声称，他们通过揭示一种改进 GaN trench MOSFET 沟道的简单工艺，开辟了新的领域。他们的工作将有助于提高 GaN trench MOSFET 的性能，使用了垂直沟道后单元间距变得更窄，使得 GaN trench MOSFET 在实现更低的比导通电阻方面比其他类型的氮化镓晶体管更占优势。

名古屋大学的研究小组通过两步工艺提高了 GaN trench MOSFET 的沟道迁移率，该工艺包括在原子层沉积 (ALD) 室中进行原位氮等离子体处理，然后沉积栅绝缘体 GaN 沟道。团队发言人石田隆 (Takashi Ishida) 指出：“不再需要任何特殊设备或繁琐的工艺。”

高沟道迁移率来自于器件中氮空位的补偿--据说这是一项突破性的成就。空位的减少消除了库仑散射，库仑散射是众所周知的抑制通道迁移率的因素。

通过对垂直沟槽 MOSFET 进行电气测量，可以突出氮等离子体工艺的优点，该 MOSFET 对侧壁进行了不同的处理。

MOSFET 的制造首先将 n 型 GaN 衬底加载到 MOCVD 室中，然后沉积 $2\mu\text{m}$ 厚的 p 型层，然后再沉积厚度为 100 nm 的 p 型接触。为了帮助分析通道特性，研究小组省略了漂移层，因为这样可以排除漂移电阻。

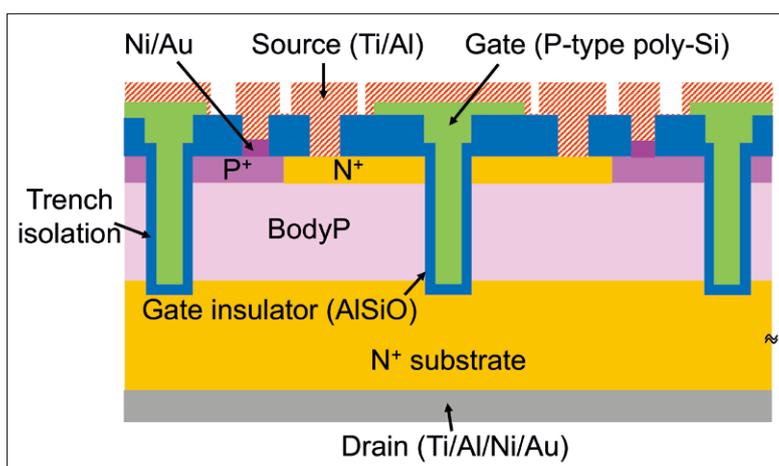
制造过程中的下一步包括通过高温退火激活 p 型层，添加 500nm 厚的 SiO_2 掩模，以及选择性地蚀刻 p 型接触层。在用 TMAH 选择性刻蚀之前，在整个表面上沉积 200nm 厚的 n 型源极层。

石田和他的同事使用溅射，而不是离子注入，在 n 型源层中制造了掺杂剂。他们之所以采用这种方法，是因为溅射不需要在 1000°C 下进行高温退火，而高温退火这一步骤可能会在形成沟道的 p 型层中引入缺陷。注意，这一区域的缺陷也可能是离子注入造成的。

为了形成沟槽结构，该团队采用了多步偏置蚀刻。之后，他们在 ALD 室中对该结构进行了 30 分钟的氮等离子体处理，输出功率为 300W，

氩气和氮气流量分别为 130sccm 和 20sccm。

器件制造的最后步骤包括 ALD 形成 35 纳米厚栅氧化物 $\text{Al}_{0.78}\text{Si}_{0.22}\text{O}$ 层和对其退火，然后添加多晶硅栅电极和金属堆栈以形成源极、漏极和 p 型接触电极。



日本名古屋大学的工程师们通过在原子层沉积室中进行原位氮等离子体处理，提高了垂直 GaN MOSFET 的沟道迁移率。

二次离子质谱仪显示硅没有扩散到 p 型层。镁向 n 型源极的扩散确实发生了，但是其水平比硅掺杂剂低三个数量级以上，所以影响可以忽略不计。电学测量表明，等离子体处理导致场效应迁移率从 $30\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 增加到 $47\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ，这使得该团队得出结论，即等离子体处理在改善垂直沟槽 GaN MOSFET 的沟道特性方面是有效的。

工程师们现在正在制作一种具有漂移层的垂直沟槽 GaN MOSFET。根据石田的说法，由于实现所需击穿电压也很重要，该团队同时正在开发一种边缘终端结构。

参考文献

T. Ishida et al. Appl. Phys. Express 13 124003 (2020)

消除 SiC MOSFET 中的界面态

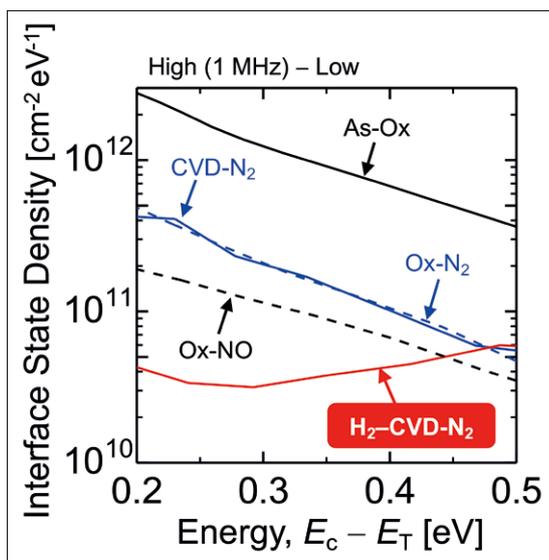
为了减小沟道电阻，SiC MOSFET 的生产应包括氢气刻蚀、CVD 沉积二氧化硅和氮化工艺。

碳化硅金属氧化物半导体场效应晶体管 (SiC MOSFET)，被广泛认为是在高电压下快速开关的最佳商业器件，但由于高密度的界面态而产生的高沟道电阻对其性能造成了影响。

但是这个缺陷是可以被克服的，这要归功于日本京都大学的一个团队最近开发的一个新颖的三步过程。

利用二次离子质谱和深能级瞬态光谱等技术，研究人员发现，在热氧化过程中，SiC-SiO₂ 界面附近会产生缺陷，热氧化是制造 SiC MOSFET 栅氧化物的标准工艺。为了消除这些缺陷，他们开发了一种工艺，即在等离子体增强 CVD 沉积 SiO₂ 薄膜之前，先用氢气腐蚀 SiC，然后再用 N₂ 气体氮化来钝化 SiC-SiO₂ 界面上的缺陷。

该团队的发言人 Tsunenobu Kimoto 指出，他和同事绝不是第一个通过沉积而不是热氧化来创造 SiO₂ 薄膜的人。然而，到目前为止，由于牺牲氧化过程中产生的缺陷位于表面 5 纳米以下，沉积工艺被证明不是令人满意的。“在二氧化硅沉积之前，我们通过适当的氢蚀刻解决了这个问题，” Kimoto 解释说。



MOSFET 的界面缺陷会因 H₂ 气体蚀刻，SiO₂ 沉积和氮化 (“H₂-CVD-N₂”) 的结合而降低。标记为 “As-Ox” 的未退火样品遭受较大的频率色散。降低的色散来自以下过程: “CVD-N₂”, 涉及 SiO₂ 沉积和 N₂ 气体退火; “Ox-N₂”, 干法氧化和 N₂ 气体退火的组合; 和 “OX-NO”, 涉及在 1250°C 下进行干式氧化和 NO 退火。

最近形成高质量 SiC MOS 界面的另一种方法涉及使用超临界 CO₂ (参见化合物半导体, 2020 年 11 月和 12 月, 第 66 页)。然而, 根据 Kimoto 的说法, 这种替代方案未能显著降低缺陷密度, 而他们的这种方法将缺陷密度降低了 30 到 50 倍。

京都大学工程师开发的工艺将有助于 SiC MOSFET 的设计者, 因为它扩大了可用于这类晶体管的尺寸范围。通过降低界面状态来降低电阻, 这样可以在避免短沟道效应的前提下采用更短的沟道, 例如阈值电压降低和导致需要更大开关电压的亚阈值斜率的降低。当采用传统工艺制造 SiC MOSFET 时, 在沟道长度小于 1 μm 时, 短沟效应便开始产生不良影响。

为了研究界面态对添加和处理 SiO₂ 薄膜的不同工艺的影响, Kimoto 和他的同事在 n 型 4H-SiC(0001) 外延层上制备了 MOS 组合电容器。作为这项研究的一部分, 他们研究了氮化过程的好处是得益于采用了高温 (1400°C), 还是由于使用了 N₂ 气体。为了测试后者, 研究小组将结果与氩气的类似过程进行了比较。为了便于比较, 工程师们还通过干氧化法制造了 MOS 电容器。

用不同工艺生产的 MOS 电容器的界面态密度值如图所示 (见左图)。分散程度最低的是 H₂ 气体刻蚀, 其次是 SiO₂ 沉积和氮化 (“H₂-CVD-N₂”)。

Kimoto 和他的同事现在正在使用他们的工艺来生产和评估 SiC MOSFETs。初步结果令人鼓舞, 沟道迁移率从 38 cm²V⁻¹s⁻¹ 增加到 85 cm²V⁻¹s⁻¹。栅氧化层的介电击穿特性和阈值电压稳定性被认为是 “非常好的”。

该团队打算对其流程进行进一步的改进。Kimoto 说: “我们希望在 n 型沟道 4H-SiC(0001) MOSFET 上显示出超过 100 cm²V⁻¹s⁻¹ 的高沟道迁移率。” 

参考文献

K. T achiki et al. Appl. Phys. Express 13 121002 (2020)

揭示绿光 LED 的退化机制

故意退化处理导致量子阱中间隙铟的引入

中国的研究人员声称已经为绿光 GaN LED 在退化过程中发生的变化提供了新的线索。

陕西科技大学和太原理工大学的团队进行了实验和理论研究，得出的结论是，退化导致了 LED 发生红移，同时发光效率也会相应地降低。这些变化归因于三个因素：InGa_N 量子阱弛豫引起的带隙减小；间隙原子的引入导致缺陷密度增加；以及 InGa_N 量子阱厚度的增加。

研究中所使用的 LED 是内部制造的。这些器件是在 2 英寸的 c 面蓝宝石衬底上通过爱思强 (Aixtron) MOCVD 反应器生长制造的，其特征为有 9 个 15.6 nm 厚的 In_{0.28}Ga_{0.72}N 量子阱，这些量子阱由厚度为 3.1nm 的 GaN 量子势垒隔开。通过将 LED 加热到 460K 并保持 3 个小时以使其退化。

原始的和退化的 LED 的高分辨率 X 射线衍射曲线显示，卫星峰峰值高达十的五次方，表明量子阱的晶体质量以及界面质量是“可接受的”。曲线拟合得到的厚度周期为 18.5 nm，与器件设计吻合的较好。退火后的 LED 的第一衍射峰略有加宽，表明高温、退化诱导步骤导致了晶体材料和界面质量的降低。

所有的这些猜想都被扫描隧道电子显微镜高角度环形暗场图像所证实，这些图像识别了 InGa 和 Ga 的原子柱。这些图像显示，退火后，InGa 和 Ga 原子柱变得模糊不清，反映出晶体和界面的质量恶化。

这些图像提供的另一个发现是有源区内各层的厚度的变化。退化导致 InGa_N 量子阱中 11 个原子层在 [0002] 方向上的厚度从 285 nm 增加到 308 nm，在 [10 $\bar{1}$ 0] 方向上的厚度从 2.85 nm 增加到 308 nm。对于 GaN 势垒，其产生的变化则很小，势垒中 28 个原子层在 [0002] 和 [10 $\bar{1}$ 0] 两个方向上的厚度都从 8.17 nm 增加到了 8.19 nm。这些暗场图像的另一个发现是，退火产生了额外的原子柱。基于这一观察结果，以及通过这种成像技术获得的其他结果，研究小组得出结论，间隙原子的引入是 InGa_N 阱厚度增加的原因所在。



绿光二极管的退化会导致波长的微小漂移和效率的降低

根据研究人员的说法，将 LED 的温度提高到 460K 会导致强烈的原子晶格振动，进而导致铟原子从正常的晶格位置迁移到间隙位置。电致发光测量结果表明，460K 退火使样品的峰值发射波长从 519.9 nm 红移到了 521.5 nm，同时积分强度下降了 32.8%。退火后的器件在 650nm 处产生较强的发光，该峰与杂质和缺陷能级有关。当 LED 的缺陷密度较高时，由于缺陷相关的 Shockley Read-Hall 复合和俄歇 (Auger recombination) 复合的增加，导致发光性能会下降。

为了更深入地了解铟间隙原子以及铟和氮空位对量子阱发射特性的影响，研究小组转向了基于第一性原理计算的密度泛函理论。理论研究表明，发光二极管的红移和效率下降的原因是：由于 InGa_N 势阱的弛豫，导致禁带宽度减小；由于在有源区引入间隙铟原子，导致缺陷密度增加。

✎

参考文献

Q. Liu et al. Appl. Phys. Lett 117 212103 (2020)

| Advertiser | 广告商名称 | 网址 | 页码 |
|---------------|--|---------------------|-----|
| CIOE 2021 | | www.cioe.cn | IFC |
| Evatec AG | | www.evatecnet.com | 7 |
| IC China 2021 | 2021 第四届全球 IC 企业家大会暨 第十九届中国国际半导体博览会 | www.ic-china.com.cn | IBC |
| 特思迪半导体 | | www.tsd-semicon.com | 3 |

欢迎投稿

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

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

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

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

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

文章投稿指南

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

图表编号一致;

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

新产品投稿指南

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

优先刊登中文来稿(翻译稿请附英文原稿)。来稿请用电子邮件寄到: sunniez@actintl.com.hk。

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

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

UK Office (英国办公室)
 Angel Business
 Communications Ltd.
 6 Bow Court,
 Fletchworth Gate,
 Burnsall Road, Coventry,
 CV56SP, UK
 Tel: +44 (0)1923 690200

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

销售人员 Sales Offices

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

China (中国)
Shenzhen (深圳)
 Jenny Li (李文娟)
 jennyl@actintl.com.hk
 Gavin Hua (华北平)
 gavin@actintl.com.hk
 Tel: 86-755-2598 8571

Shanghai (上海)
 Hatter Yao (姚丽莹)
 hattery@actintl.com.hk
 Amber Li (李歆)
 amberl@actintl.com.hk

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

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

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

Eva Liu (刘婷)
 eval@actintl.com.hk
 Tel: 86-138-8603 3073

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

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

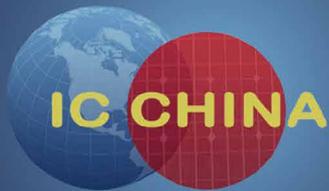
Korea (韩国)
 Lucky Kim
 semieri@semieri.co.kr
 Tel: 82-2-574-2466

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

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

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

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



开放发展 合作共赢
Open for development Cooperate for win-win

第四届全球IC企业家大会 暨第十九届中国国际半导体博览会

The 4th Global IC Entrepreneurs Conference
& The 19th China International Semiconductor Expo



官方微信

2021

📍 上海新国际博览中心
📅 2021年9月27-29日
www.ic-china.com.cn

2021“晶芯”研讨会全年主题

线上

▶ 01.21 第二届

先进封装发展趋势与应用挑战

▶ 05.20 第四届

半导体制程配套供应链的生态与生机

▶ 08.19 第六届

面向5G应用的半导体创新技术

▶ 10.20 第八届

半导体测试专题研讨会

▶ 12.23 第十届

芯片设计/软件工具技术研讨会

▶ 02.24 第三届

IC制造高端光刻机发展趋势和技术挑战

▶ 07.29 第五届

MEMS制造技术发展论坛

▶ 09.23 第七届

LED技术发展及应用研讨会

▶ 11.18 第九届

功率器件技术与应用研讨会

线下

📍 04.15 深圳(线下)

集成电路应用技术创新发展论坛

📍 06.10 苏州(线下)

国际先进半导体封装技术创新论坛

* 以上议题暂定, 请以会议举办实际议题为准