

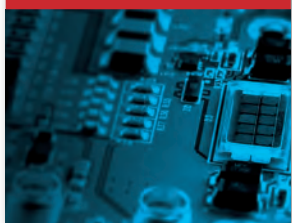
化合物半导体



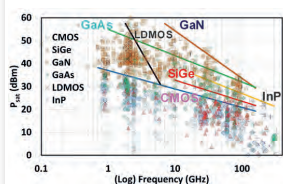
• CHINA

2020年6/7月

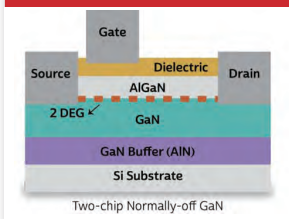
VCSEL



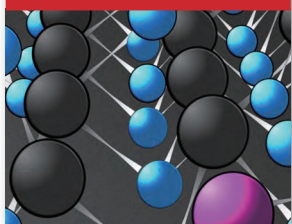
5G前端模块



GaN FET器件应用



二维材料



紫外发光二极管 (UV LED)



注册已经开始了



2020

Electronic Design Innovation Conference

电子设计创新大会

2020年10月13-14日

国家会议中心, 北京, 中国

访问www.mwjjournalchina.com/edicon注册参会

- ▶ 5G/先进通信
- ▶ 毫米波技术
- ▶ 放大器设计
- ▶ 电磁兼容/电磁干扰
- ▶ 低功耗射频和物联网
- ▶ 前端设计

- ▶ 电源完整性
- ▶ 雷达和国防
- ▶ 射频和微波设计
- ▶ 信号完整性
- ▶ 仿真和建模
- ▶ 测试和测量



www.mwjjournalchina.com/edicon

your

EPITAXIAL GROWTH

partner



Enabling advanced technologies



- World leading technology
- Complete materials range
- MOCVD, MBE, CVD
- Advanced semiconductor wafer products
- Advanced R&D capabilities
- Multiple, manufacturing sites (Europe, Asia, USA)



www.iqep.com

封面故事 Cover Story

10 紫外发光二极管 (UV LED) 发光效率的重要进展 A massive boost for UV LED efficiency

目前市场和实验室研究开发的UV LED 的致命弱点是它的电光转换效率较低。与采用InGaN 量子阱的蓝光 LED 相比, UV LED 的性能低得可怜。通过改进材料晶体质量, 设计和外延新型有源区量子阱结构, 并在传统 LED 器件结构中单片集成光电倍增转换器, 将波长为 280nm的半导体深紫外LED (DUV LED) 电光转换效率提升至 20% 以上。

- 孙海定, 中国科学技术大学

龙翰凌、吴峰、戴江南、陈长清, 华中科技大学

编辑话 Editor's Note

04 射频氮化镓 (GaN RF) 市场趋势 GaN RF market trends

- 赵雪芹

业界动态 Industry

05 中电科实现4英寸碳化硅晶片大批量产 CECT reached mass production of 4-inch SiC wafers

05 TCL华星牵手三安光电布局microLED TCL CSOT and Sanan Optoelectrics built a joint-lab on microLEDs

06 SweGaN开发了无缓冲GaN-on-SiC HEMT SweGaN Develops Buffer-Free GaN-on-SiC HEMT

08 ROHM开发出第4代低导通电阻SiC MOSFET ROHM developed the 4th generation SiC MOSFETs with low on resistance

09 乾照光电开工VCSEL和高端LED芯片等项目 Changelight started VCSEL and high-end LED chip projects

关于《化合物半导体》

《化合物半导体》中国版(CSC)是全球最重要和最权威的杂志Compound Semiconductor的“姐妹”杂志, 亦是中國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

技术 Technology

- 18 背面发射 VCSEL 改善了 3D 传感**
Back-emitting VCSELs enhance 3D sensing
- James Foresi, Luke Smithwick, TRILUMINA 公司
- 25 III-V族与硅结合用于后5G时代的前端模块**
Uniting III-Vs with silicon for beyond-5G front-end modules
- Abhitosh Vais, IMEC
- 29 电力电子中采用GaN技术有哪些挑战**
What are the challenges of using GaN technology in power electronics
- Philip Zuk, Transphorm全球技术营销及北美销售副总裁
- 32 混合生长有望实现性能更高的激光二极管**
Hybrid growth promises better performing laser diodes
- Josh Brown, Brad Siskavich, Ian Mann; BLUGLASS

科技前沿 Research Review

- 38 使用寿命更长的 UVC LED**
Longer lasting UVC LEDs
- 39 解密二维材料中的混乱无序**
Deciphering 2D Disorder
- 40 广告索引 Advertisement Index**

关于雅时国际资讯 (ACT International)

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

About ACT International Media Group

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

射频氮化镓 (GaN RF) 市场趋势

过去几年里,受军事应用和电信基础设施发展的推动,GaN RF 市场持续增长。根据市场研究和战略咨询公司 Yole 的 GaN RF 技术和市场年度报告,到 2025 年,GaN RF 市场总额将从 2019 年的 7.4 亿美元增长到 20 多亿美元,复合年增长率为 12%。

GaN 技术对射频应用的发展起到重要的推动作用。从电信基础设施应用方面来说,自美国对华采取制裁措施后,2019 年基于 GaN 的射频拉远头 (RRH) 市场增长放缓,迫使 OEM 厂商在未来几年内对供应链进行重组。尽管如此,长期来看,采用 GaN 技术的趋势不会改变。在有源天线系统 (AAS) 中,增加带宽的需求将有利于 GaN 技术的渗透。同样,在未来几年里,GaN 将大量用于小基站 (small cell) 和回程连接 (backhaul connection) 应用。

国防应用仍将是 GaN RF 市场的主要推动力之一。雷达是采用 GaN 技术的主要军事应用,其采用新型 GaN 基有源电子扫描阵列 (AESA) 系统的收发模块数量增加,机载系统对器件重量的要求越发严格。到 2025 年,GaN RF 的军事细分市场规将超过 11 亿美元,复合年增长率为 22%。

对于智能手机而言,GaN 的高性能和小尺寸等优点吸引着 OEM 厂商。GaN 功率放大器是否被采用,将取决于未来几年 GaN 技术的成熟度、供应链、成本及 OEM 发展策略。

据麦姆斯咨询介绍,在射频功率应用中,GaN 技术以更低的成本展示了持续改善的性能和可靠性,已成为硅横扩扩散金属氧化物半导体 (LDMOS) 和砷化镓 (GaAs) 技术的重要竞争对手。预计碳化硅上氮化镓 (GaN-on-SiC) 将在 5G sub-6GHz RRH 实施中保持强大的地位。

在 5G sub-6GHz AAS 细分市场和大规模 MIMO 部署中,GaN 与 LDMOS 的竞争仍在继续。尽管具有成本效益的 LDMOS 技术在 sub-6GHz 以下的高频性能方面取得了显著进步,但 GaN-on-SiC 器件的带宽、导热、功效和功率输出等方面性能更加出色。5G 网络需要更大的带宽,GaN 已成为 AAS 选定的技术之一。5G 电信基础设施市场是动态变化的,需要 OEM 厂商做出重大战略决策,这可能会为 GaN 技术平台创造新机遇。

此外,硅上氮化镓 (GaN-on-Si) 技术有望提供经济高效的集成解决方案,成为潜在的挑战者。尽管目前 GaN-on-Si 市场规模很小,但电信设备供应商仍密切关注并评估其在 sub-6GHz 和毫米波技术中应用的进展。

基于碳化硅、硅和金刚石衬底的 GaN 商业产品和原型,显示出不同的技术成熟度,因此价值链的成熟度也各不相同。在相对成熟的 GaN-on-SiC 技术的参与厂商中,采用的业务模式各不相同。2020-2021 年期间各种战略合作伙伴关系和投资将如何发展,值得关注。

关于 GaN-on-Si 业务,MACOM-ST 联盟的 6 英寸生产线正处于研发阶段,而法国代工厂 OMMIC 正为毫米波市场提供 GaN-on-Si MMIC 技术。此外,2019 年 Soitec 在收购 EpiGaN 之后,正努力通过其创新的 GaN-on-Si 技术打开 5G 基础设施和手机市场。在 RF 组件层面,市场领导厂商住友电工 (SEDI) 和贰陆 (II-VI) 计划量产其垂直整合的 6 英寸 GaN-on-Si 晶圆代工平台,可满足 5G 日益增长的需求。此外,领先的化合物半导体代工厂稳懋 (Win Semiconductors) 预计在 2020-2021 年期间实现 GaN RF 产能翻番。

5G 手机无疑是 GaN-on-Si 市场最令人兴奋的应用,我们已经看到一些厂商正投入于这项技术的开发。让我们一起期待 GaN 技术在手机应用中大显身手!

赵雪芹

社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak
adonism@actintl.com.hk

主编 Editor in Chief

赵雪芹 Sunnie Zhao
sunniez@actintl.com.hk

出版社 Publishing House

雅时国际商讯 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 25988571
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



中电科实现 4 英寸碳化硅晶片大批量产

中国电子科技集团公司（山西）碳化硅材料产业基地是目前中国最大生产规模的碳化硅生产基地。近年来，我国在碳化硅晶片领域奋力追赶，从基本原理研究和基础实验做起，逐渐掌握了碳化硅晶片技术，从实验室走向产业化。2018 年，中电科二所历经 11 年艰苦攻关，在国内率先完成 4 英寸高纯半绝缘碳化硅单晶衬底材料的工程化和 6 英寸高纯半绝缘碳化硅单晶衬底的研发，突破国外对我国碳化硅晶体生长技术的长期封锁。

2020 年 3 月，中电科（山西）碳化硅材料产业基地在山西转型综合改革示范区正式投产，第一批设备正式启动。基地一期项目可容纳 600 台碳化硅单晶生长炉，项目建成后具备年产 10 万片 4-6 英寸 N 型碳化硅单晶晶片、5 万片 4-6 英寸高纯半绝缘型碳化硅单晶晶片的生产能力。这一基地的启动，将实现我国碳化硅的完全自主供应。

生产碳化硅晶片的两大关键技术是晶体生长和晶片的切割抛光。中电科总经理李斌介绍了碳化硅晶片的复杂生产过程，“把高纯度的碳化硅粉料放到长晶炉里加热到 2000 多摄氏度，让颗粒直接汽化，再控制它重新结晶，长成一个直径为 4 英寸或 6 英寸的圆柱状晶锭。之后，我们用很多根直径仅 0.18 微米的金刚石线，同时切下去，把晶锭切成一片一片的圆片。每一片圆片再放到研磨设备里，把两边磨平，最后进行抛光，得到透明玻璃片一样的晶片。”

在基地的碳化硅生产车间，白色的长晶炉一字排开，碳化硅晶片正在里面安静生长。李斌介绍：现在，咱们所使用



中电科（山西）碳化硅晶体生长车间

的粉料合成设备、长晶炉，都是自己研发、自己生产的全国产化的设备。设备的配套产品 and 功能元器件能满足长期、稳定、可靠使用的要求，同时节能效果好，具有连续工作高稳定性和良好精度保持性。

产业化规模效应，不仅降低了碳化硅晶片的成本，也使碳化硅晶片质量不断提升。目前，基地已经实现 4 英寸晶片的大批量产，6 英寸高纯半绝缘碳化硅单晶衬底也开始工程化验证，为客户提供小批量的产品试用，预计 2020 年底达到产业化应用，与国际水平相当。在实现迅速研发的同时，中电科也进一步开展量产，三年内整个项目要达到 18 万片每年的产能。另外，中电科也在进行 8 英寸晶片的研究，希望三年之后，能有 8 英寸的样片出来。

TCL 华星牵手三安光电布局 microLED

近日，TCL 华星与三安半导体在深圳正式签约，宣布共同投资成立具有独立法人资格的联合实验室。注册资本人民币 3 亿元，TCL 华星出资占注册资本的 55%，三安半导体出资占注册资本的 45%。

作为新一代显示技术，布局 microLED 就是布局未来。在 microLED 领域，TCL 华星与三安半导体具有很强的互补性。此次牵手组建联合实验室，发力 microLED 技术，可实现“1+1>2”的结果。

优势互补发力 microLED 技术

TCL 华星作为显示行业的龙头企业，具有人才和技术优势。当前，TCL 华星主要集中在背板技术和基础研究，与

转移相关的 microLED 芯片技术是空缺。

三安光电是全球领先的 LED 外延 / 芯片生产厂家，在 microLED 技术领域耕耘多年，具有外延、microLED 芯片等方面的技术优势。三安半导体是三安光电旗下以集成电路、LED 外延和芯片的研发与产业化制造为主业的科技公司，拥有 LED 芯片生产技术和研发能力，稳定的产能供应和品控能力。三安光电建成了 microLED 研发线，已开展 microLED 芯片、转移技术开发，但缺乏后端面板的配合。

该联合实验室将利用 TCL 华星与三安半导体各自的显示及 LED 技术及资源优势，重点攻克 microLED 显示工程化技术中的关键技术难题，包括 microLED 芯片技术、转移、键合、彩色化、检测、修复等，形成自有的材料、工艺、设

备、产线方案等技术，达到技术领先的工程化制造能力，并实现 microLED 显示的商业化规模生产。该联合实验室，将加快速度推进 microLED 显示技术商业化规模生产进程。

microLED 技术距离实现量产仍有距离，还需要克服 microLED 芯片、巨量转移、巨量 bonding、检测与修复、背板与驱动等问题才能大规模商用。巨量转移过程中的良率控制也非常重要，这方面有大量的技术和工艺问题需要解决。

为了开发可量产的 microLED 显示技术，TCL 华星和三安半导体已制定时间表，利用三年时间，通过联合实验室开展 microLED 显示端到端技术开发，重点解决其工程化技术中的关键难题，加速 microLED 的试产与应用，实现从新型显示材料、工艺、设备、产线方案到自主知识产权的全面生态布局。OSc

SweGaN 开发了无缓冲 GaN-on-SiC HEMT

SweGaN 公司与查尔默斯理工大学 (Chalmers University of Technology) 联合研究高频 HEMT，有望为电信、航天和军事市场带来商业利益。

SweGaN AB 是一家定制 GaN-on-SiC 外延片制造商，拥有制造射频和功率器件需要的独特外延生长技术，它宣布了基于 SweGaN QuanFINE 材料的 GaN 高频器件的新基准。该公司的量子精细 (QuanFINE) 材料技术有望为整个 GaN 射频价值链带来商业利益，包括电信、航天和军事市场。

在与查尔默斯理工大学微技术和纳米科学系的一项新的联合研究中，在瑞典哥德堡，SweGaN 基于 GaN HEMT 技术探索了量子精细外延晶圆性能。

SweGaN 与查尔默斯理工大学的科学家合作，完成了一项新的基准测试，将传统的厚度 1.8 微米的掺铁 GaN 缓冲外延结构与 SweGaN 的“无缓冲”量子精细 GaN HEMT 异质结构（用于微波应用）进行了比较。研究表明，采用总厚度 250nm 的 GaN 层的新方法不会影响材料质量和器件性能。此外，器件结果表明，从长远来看，“无缓冲”量子精细材料在器件水平上优于传统材料。

对于 SweGaN 的客户和制造商来说，新的“无缓冲”概念带来的最终好处包括更低的陷波、更好的载流子限制和更低的热阻，这可能导致 GaN 高频器件具有更高的功率效率和更好的可靠性。

查尔默斯理工大学的研究教授尼古拉斯·罗斯曼 (Niklas Rorsman) 表示：“新的量子精细概念具有许多有趣的特性，对高频电子和电力电子都非常有吸引力。作为一个例子，纯 AlN 背势垒的可能性将有利于良好的电子约束和热阻。我们很高兴能参与 GaN HEMT 技术的发展。”

SweGaN AB 的首席技术官 Jr Tai Chen 说：“目前，用于 Ka 波段应用的 GaN-on-SiC 外延片要么还不成熟，要么面临严重的权衡取舍。我们的 QuanFINE 外延片是一个非常可行的解决方案，可以解决客户在高频器件中遇到的短沟道效应问题。”

QuanFINE 外延片的四个主要目标群体包括：世界领先



的代工厂、IDM、无晶圆厂公司和欧洲、亚洲和美国的最终用户。

SweGaN 认为，量子精细概念的优点是在 AlGaN 势垒层和低 TBR AlN 成核层之间形成一层薄的非掺杂 GaN 沟道层，该沟道层充当三明治状的双异质结构，提供了足够的二维电子气 (2DEG) 限制，与传统的 Fe 和 C 掺杂外延结构相比，陷阱效应要低得多。此外，与传统的 AlGaN 背势垒外延结构相比，GaN 沟道厚度的进一步减小，将为小栅长器件 ($L_g < 150\text{nm}$) 开辟一条新的途径。

对碳杂质和 GaN 层厚度的进一步研究，有望进一步完善无缓冲区的量子精细概念。

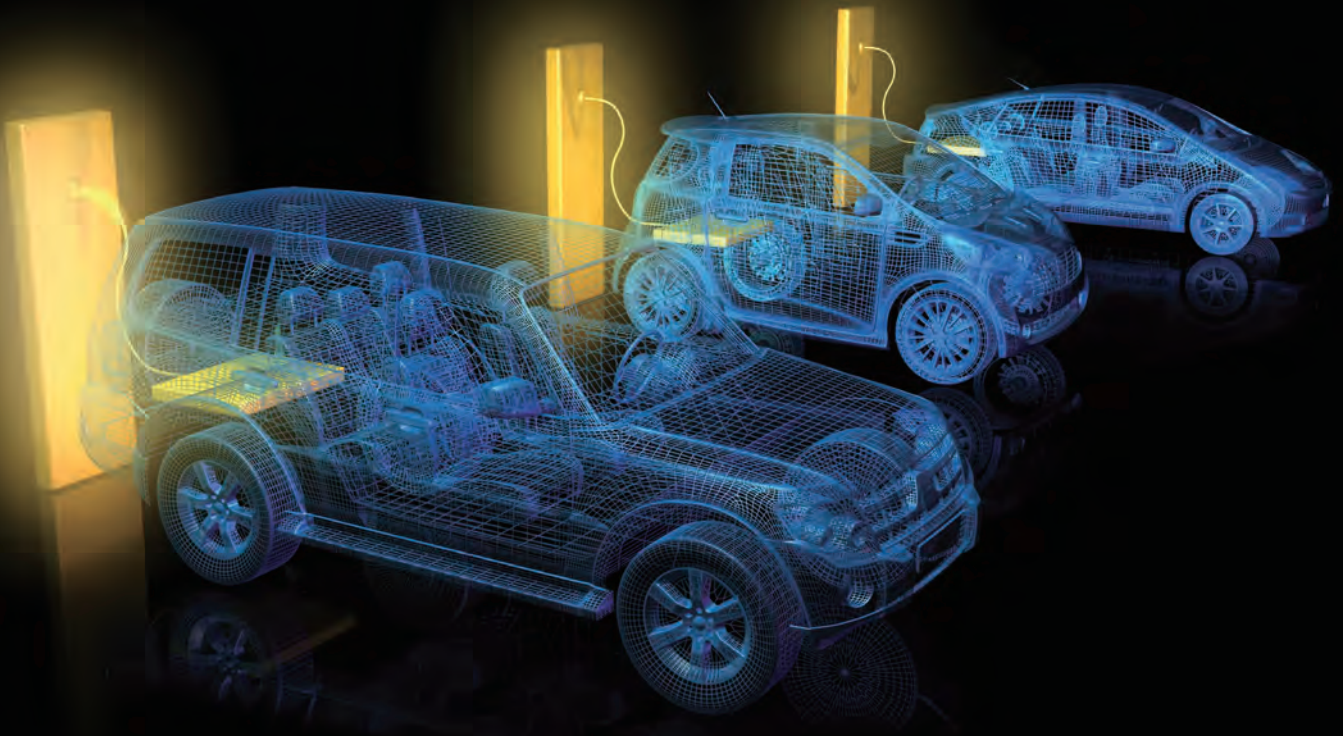
联合研究的关键结论

- 物理模拟 (TCAD) 表明，量子精细对改善电子约束非常有利。

- 脉冲 IV 测量显示了使用 QuanFINE 概念的独特优势，与传统的厚铁掺杂缓冲相比，显示出较低的缓冲诱导色散。

- 大信号测量表明，QuanFINE 概念能够提供极具竞争力的输出功率水平和效率，对产品公司和最终用户极为有利。

研究合作的结果发表在 IEEE Electron Device Letters (Early Access) 上，题目是 'Microwave Performance of 'Buffer-Free' GaN-on-SiC High Electron Mobility Transistors'。OSc



实现下一代碳化硅功率器件最佳的性能
为全球大趋势提供新的解决方案

AIX G5 WW C

- 电动汽车：车载充电器，逆变器
- 基础设施：充电桩
- 再生能源：太阳能和风能
- 工业应用：马达驱动器，电源
- 配电管理：HVDC

发现全新碳化硅外延量产工具
实现单片机的性能和多片机的成本



Made
in
Germany



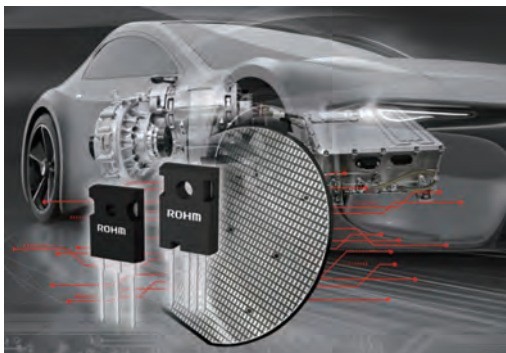
AIXTRON

info@aixtron.com
www.aixtron.com

ROHM 开发出第 4 代 低导通电阻 SiC MOSFET

ROHM 宣布开发出“1200V 第 4 代 SiC MOSFET”，非常适用于包括主机逆变器在内的车载动力总成系统和工业设备的电源。

对于功率半导体来说，当导通电阻降低时短路耐受时间就会缩短，两者之间存在着矛盾权衡关系，因此在降低 SiC MOSFET 的导通电阻时，如何兼顾短路耐受时间一直是一个挑战。



此次开发的新产品，通过进一步改进 ROHM 独有的双沟槽结构，改善了二者之间的矛盾权衡关系，与以往产品相比，在不牺牲短路耐受时间的前提下成功地将单位面积的导通电阻降低了约 40%。

而且，通过大幅减少寄生电容（开关过程中的课题），与以往产品相比，成功地将开关损耗降低了约 50%。

因此，采用低导通电阻和高速开关性能兼具的第 4 代 SiC MOSFET，将非常有助于显著缩小车载逆变器和各种开关电源等众多应用的体积并进一步降低其功耗。本产品已于 2020 年 6 月份开始以裸芯片的形式依次提供样品，未来计划以分立封装的形式提供样品。

近年来，新一代电动汽车（xEV）的进一步普及，促进了更高效、更小型、更轻量的电动系统的开发。特别是在驱动中发挥核心作用的主机逆变器系统，其小型高效化已成为重要课题之一，这就要求进一步改进功率元器件。

另外，在电动汽车（EV）领域，为延长续航里程，车载电池的容量呈日益增加趋势。与此同时，要求缩短充电时间，并且电池的电压也越来越高（800V）。为了解决这些课题，能够实现高耐压和低损耗的 SiC 功率元器件

被寄予厚望。

在这种背景下，ROHM 于 2010 年在全球率先开始了 SiC MOSFET 的量产。ROHM 很早就开始加强符合汽车电子产品可靠性标准 AEC-Q101 的产品阵容，并在车载充电器（On Board Charger : OBC）等领域拥有很高的市场份额。此次，导通电阻和短路耐受时间之间取得更好权衡的第 4 代 SiC MOSFET 的推出，除现有市场之外，还将加速在以主机逆变器为主的市场中的应用。

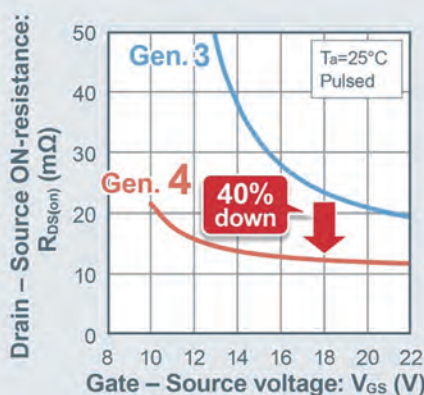
未来，ROHM 将会不断壮大 SiC 功率元器件的产品阵容，并结合充分发挥元器件性能的控制 IC 等外围元器件和模块化技术优势，继续为下一代汽车技术创新贡献力量。另外，ROHM 还会继续为客户提供包括削减应用开发工时和有助于预防评估问题的在线仿真工具在内的多样化解决方案，帮助客户解决问题。

通过改善沟槽结构，实现业界极低的导通电阻

ROHM 通过采用独有结构，于 2015 年全球首家成功实现沟槽结构 SiC MOSFET 的量产。其后，一直致力于进一步提高元器件的性能，但在降低低导通电阻方面，如何兼顾

存在矛盾权衡关系的短路耐受时间一直是一个挑战。

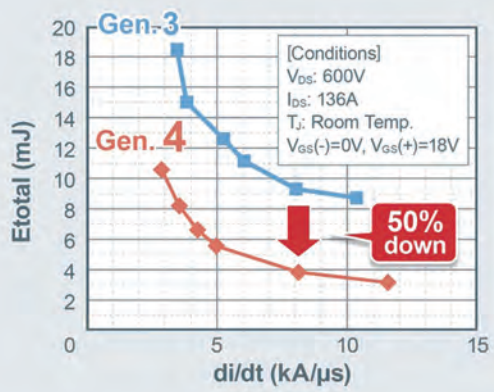
此次，通过进一步改善 ROHM 独有的双沟槽结构，在不牺牲短路耐受时间的前提下，成功地使导通电阻比以往产品降低约 40%。



通过大幅降低寄生电容，实现更低开关损耗

通常，MOSFET 的各种寄生电容具有随着导通电阻的降低和电流的提高而增加的趋势，因而存在无法充分发挥 SiC 原有的高速开关特性的课题。

此次，通过大幅降低栅漏电容（Cgd），成功地使开关损耗比以往产品降低约 50%。



乾照光电开工 VCSEL 和高端 LED 芯片项目

2020年6月12日，乾照光电在厦门翔安区举行了项目开工奠基仪式，宣布公司近16亿元的VCSEL、高端LED芯片等半导体研发生产项目正式开工。

乾照光电于2018年11月宣布拟出资15.97亿元建设VCSEL、高端LED芯片等半导体研发生产项目，由公司全资子公司厦门乾照半导体科技有限公司负责承办。

项目投产后，预测达产后年销售收入96,628万元，达产年利润总额23,690万元，达产年投资利润率17.71%，投资利税率18.63%，全部投资所得税后财务内部收益率为21.72%；投资回收期6.01年。

乾照光电表示，砷化镓/氮化镓半导体器件主要依附于MOCVD进行外延生产，技术含量高；在无线通信、光电子、大功率器件和高频微波器件应用等领域需求旺盛，而相关国内厂商稀缺，国家正大力支持该行业的迅速发展。

现阶段，乾照光电主要有全色系LED外延片及芯片和三结砷化镓太阳能电池外延片及芯片两大类产品。

2019年，乾照光电在高端化合物半导体领域通过投资、孵化、内部研发等多种方式并举，积极拓展激光芯片、VCSEL芯片、光通讯芯片等半导体产业机会。现VCSEL芯

片产品已经实现小批量出货，并具备大规模量产和出货相关产品的能力，有望抢占3D感测的先机。

在红黄光LED外延片及芯片领域，乾照光电现有MOCVD共42个腔；在蓝绿光LED外延片及芯片领域，公司拥有MOCVD共155个腔（折K465I机型）。目前均已导入4寸片生产工艺，产能在原有基础上有所提升，且外延片良率均不低于98%。

MiniLED部分，乾照光电在红光MiniLED的良率和可靠性上投入了大量研发，目前MiniLED已实现规模化量产，公司MiniLED产品已承接订单，预计下半年需求量将有增长，目前相关产品备货充足。

至于MicroLED领域，乾照光电主要配合终端显示客户进行量产方案开发，开发了尺寸20~30μm的芯片并可实现小批量生产，工艺优化与性能提升持续推进中。

未来，乾照光电将在巩固红黄光领域市场地位的同时，不断提升蓝绿光领域的核心竞争力。聚焦Mini/Micro LED显示技术和红外、植物照明等细分市场，并将积极跨入二三代半导体领域。

以半导体规格用于光电器件和 MICRO DISPLAY的超级薄膜方案



从Micro LED显示器到Micro OLED显示器: Evatec为透明导电膜、金属膜和DBR提供量产验证的设备和工艺。如果你需要薄膜均匀性<1%。请联系我们了解Evatec在薄膜沉积和蚀刻领域50年的专业知识如何帮助您制造下一代光电器件。

www.evatecnet.com/markets/optoelectronics

E-mail: infochina@evatecnet.com

意发薄膜科技(上海)有限公司 上海市长宁区红宝石路500号东银中心B栋2002A

ADVANCED PACKAGING • SEMICONDUCTOR • OPTOELECTRONICS • PHOTONICS • THE THIN FILM POWERHOUSE

www.evatecnet.com

紫外发光二极管 (UV LED) 发光效率的重要进展

通过改进材料晶体质量，设计和外延新型有源区量子阱结构，并在传统 LED 器件结构中单片集成光电倍增转换器，将波长为 280nm 的半导体深紫外 LED (DUV LED) 电光转换效率提升至 20% 以上。

孙海定，中国科学技术大学

龙翰凌、吴峰、戴江南、陈长清，华中科技大学

近几十年来，市场上最常用的紫外 (UV) 光源一直是汞灯。由于其在空气 / 水净化、杀菌消毒、光疗、光刻和 UV 光固化等领域具有广泛的应用，因而取得了十分可观的销量。然而，它远远不是理想的清洁环保 UV 光源，它的缺点包括：能量消耗大；使用寿命不长；含有有毒的汞元素。其中后者是一个大问题，因为人们的环境保护意识及对自身健康的关注不断提升。此外，一项名为《关于汞的水俣公约》的国际条约要求，到今年年底逐步禁止使用含汞产品。

对于汞灯来说，UV LED 是一种环保、节能型替代产品。这种器件同样以其小尺寸和长寿命

而著称，通过改变一种宽禁带半导体材料铝镓氮 (AlGaIn) 量子阱中的铝含量，用其制备的 UV LED 可以覆盖从 210 nm 至 360 nm 的光谱范围。除了在上述应用中替代汞灯之外，UV LED 由于体积小，效率高，波长连续可调，所以它们还可用于其他应用场合 (见图 1)，使其更具市场前景。据市场调查分析公司 Yole Développement 估计，UV LED 的市场规模将从 2019 年的 5 亿美元增长至 2023 年的 10 亿美元，甚至更高。

但是，目前市场和实验室研究开发的 UV LED 的致命弱点是它的电光转换效率 (wall plug efficiency) 较低。与采用 InGaN 量子阱、可产生极高外量子效率、并具有超过 80% 电光转换效率的蓝光 LED 相比，UV LED 的性能低得可怜。当发光波长小于 360 nm 时，其效率直线下滑。当发光波长为 280 nm 时，电光转换效率通常小于 10%。

研究发现，我们可以采取多种创新方法提升效率，主要包括：减少外延层中的缺陷和位错；改进 n 型和 p 型掺杂效率，以形成用于改善电流注入效率的导电薄膜；设计器件结构提高光提取效率和转化效率；以及在有源发光区使用一种新颖的 AlGaIn 基量子阱和势垒。

我们的团队由来自中国科学技术大学和华中

工作中的 UV LED





在蓝宝石衬底上制备出打破电光转换效率记录的 UV LED

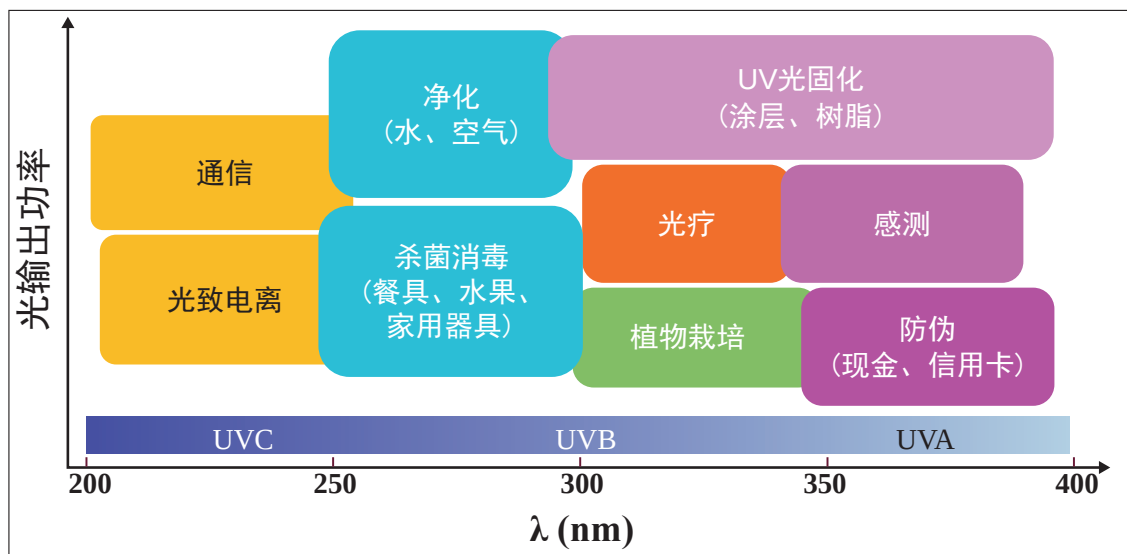


图1. UV LED 有很多应用。

科技大学的研究人员组成，多年来一直持续研究攻关，在多个维度上对 UV LED 进行了改进，取得了很大的进展，制成了效率更高的 UV LED，包括我们提出新颖架构，通过与单片集成技术（该架构实现了传统 LED 结构与光电转换器的集成）

相结合，使 UV LED 的性能跃上新的台阶。本文将从材料、器件、工艺等维度做一一介绍。

经典研究策略和方法

通常，我们在蓝宝石（一种低成本的透明衬

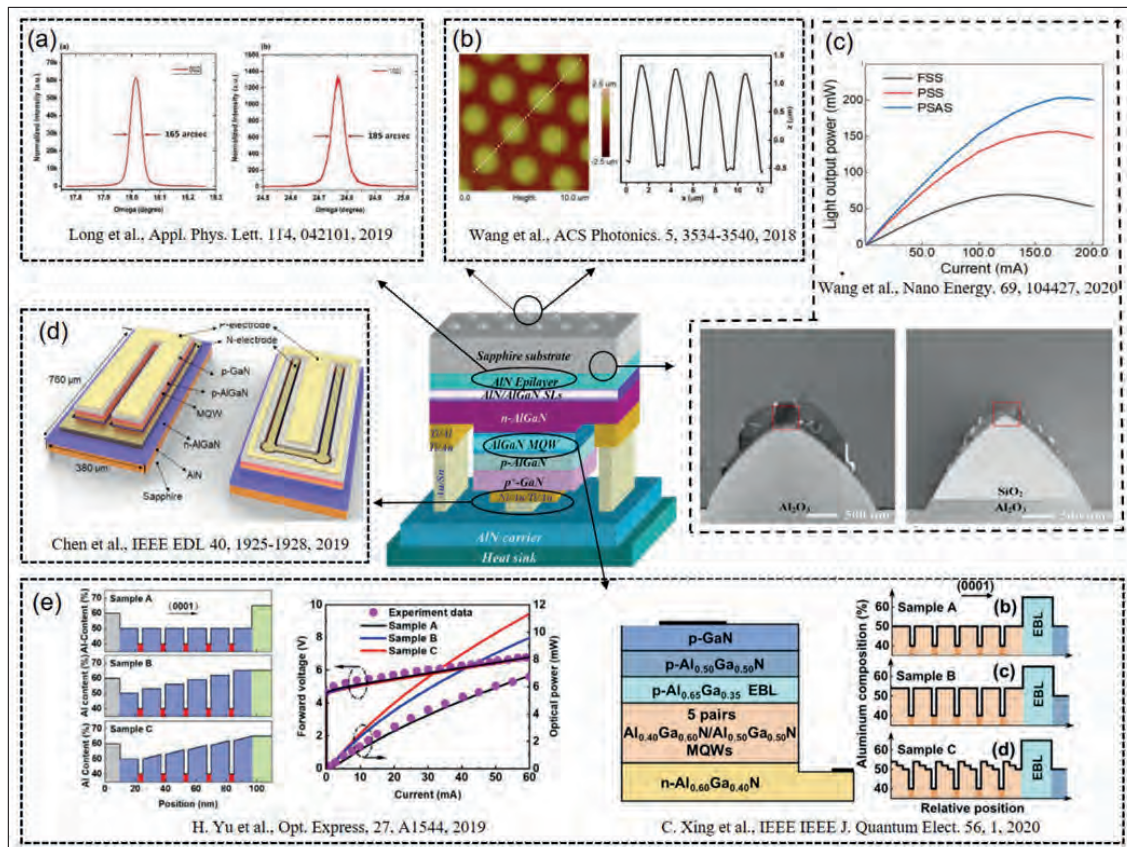


图2. 旨在提升 UV LED 性能的不同策略。(a) 图形化蓝宝石衬底改善了外延 AlN 的晶体质量。H. Long 等 Appl. Phys. Lett. 114 042101 (2019); (b) 在倒装式芯片 UV LED 蓝宝石底面上制作蛾眼膜微结构扩大了取光角度。S. Wang 等 ACS Photonics 5 3534 (2018); (c) 转向使用具有二氧化硅阵列的图形化蓝宝石 (PSSA) 衬底降低了穿透性位错密度，并提高了取光效率，这是因为在外延层和 PSSA 之间存在很大的折射率差异。S. Wang 等 Nano Energy 69 104427 (2020); (d) 新颖的电极图案能够优化 UV LED 芯片中的电流扩散。Q. Chen 等 IEEE Electron Device Lett. 40 1925 (2019); (e) 设计有源发光区中 AlGaIn 量子阱异质结构的电子能带结构可改善辐射复合。H. Yu 等 Opt. Express 27 A1544 (2019); Ren 等 J. Phys. D Appl. Phys. 53 073002 (2020)。

底)上生长 UV LED 的异质结构。我们避免使用单晶 AlN 衬底, 因为它的成本太过昂贵。蓝宝石的缺点是其与氮化物之间存在晶格和热膨胀失配, 因而导致晶体质量较差, 不利于有源区载流子的辐射复合。为了解决该问题, 我们转向使用表面拥有金字塔型结构的图形化蓝宝石衬底, 并利用横向生长方法 (lateral overgrowth) 外延出高质量 AlN 薄膜。根据 X 射线衍射摇摆曲线的半高宽, 推算出薄膜位错密度小于 $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ (见图 2(a))。另外, 我们还进行了倒易空间测试, 结果显示外延层应力得到完全释放。基于这些发现, 我们知道: 降低位错可以抑制 UV LED 有源区中的非辐射复合, 并最终提升这些器件的辐射复合效率。

衬底图形化的好处并不局限在由于位错的消除而带来的材料质量改善。除此之外, 表面纹理化还有利于芯片中光子的提取和输出。这一点在深紫外波长范围内尤其重要, 由于高铝组分 AlGaIn 中独特的价带结构, 引起出射的光偏振发生变化。在蓝光 LED 中居主导地位的是 TE 模式, 而在深紫外 LED 中被 TM 模式所取代, 严重影响了光提取效率。

我们团队先前的研究工作展示了在倒装式芯片 UV LED 蓝宝石背面上采用蛾眼膜微观结构, 可以提高取光效率 (见图 2(b))。该周期性的微观结构提高了取光角度。需要注意的是, 这种特殊的微观结构增强了 TE 模式, 因而更易于取光。另外, 我们借助于对 AlGaIn 量子阱中的应力进行调制, 从而改变了光的偏振, 也可以实现光提取效率的增加。通过确保量子阱薄膜的应力状态, 更好的促成了 TE 模式光的出射, 这使得 UV LED 的取光效率大幅提高。

最近, 武汉大学周圣军领导的团队, 通过将图形化蓝宝石与二氧化硅阵列相组合 (见图 2(c)), 进一步提高了光提取效率。由于 AlGaIn 外延层和具有二氧化硅图形化阵列的蓝宝石之间存在很大的折射率差异, 在降低位错的同时还可以提高出光效率。另外, 对 UV LED 性能起重要作用的另一个因素是能够将更多的载流子注入到有源区中。由于蓝宝石是绝缘的, 所以采用垂直 LED 架构是不切实际的。正因如此, 用于改善电流注入和光提取的最常见器件结构是基于倒装芯片键合技术。可遗憾的是, 这种方案会导致电流拥挤, 因而使得器件发热严重, 性能下降。为了

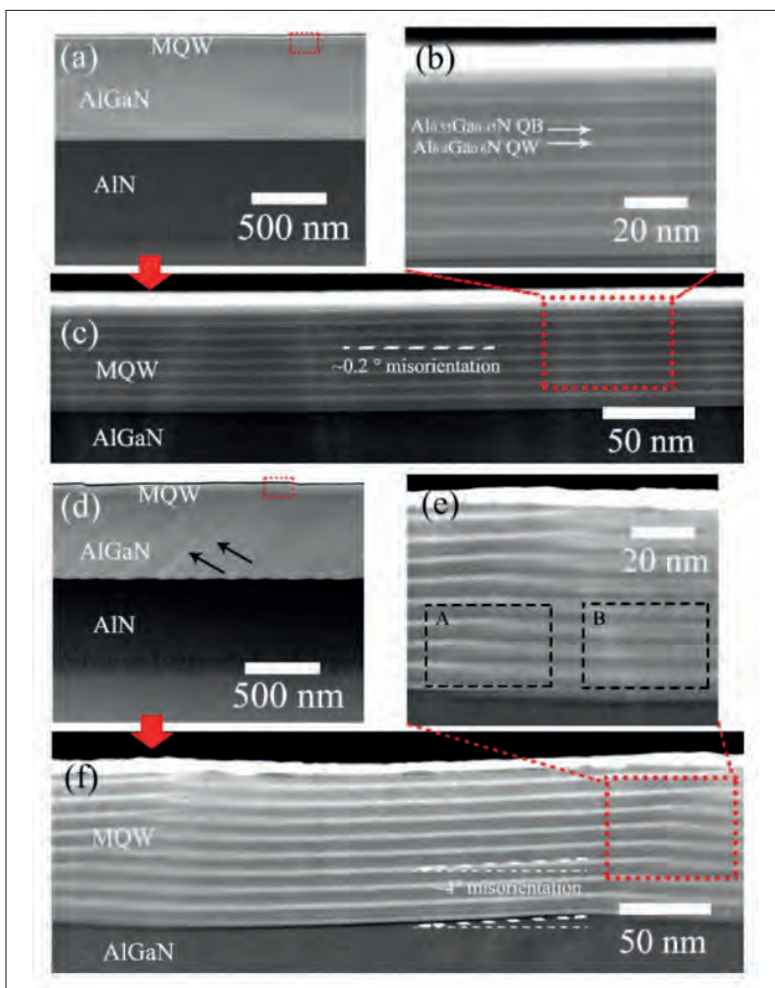


图3. 在斜切角为 (a-c) 0.2° 和 (d-f) 4° 的蓝宝石衬底上生长的 AlGaIn 多量子阱的横断面扫描透射电子显微镜图像。H. Sun 等 Adv. Funct. Mater. 29 1905445 (2019)

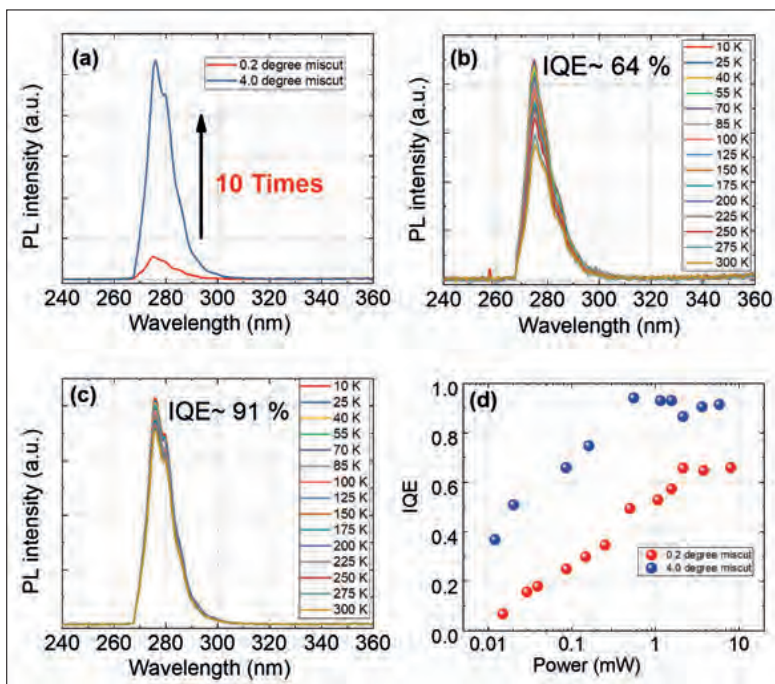


图4. (a) 在斜切角为 0.2° 和 4° 的蓝宝石衬底上生长的 AlGaIn 多量子阱 (MQW) 的室温光致发光 (PL) 光谱。在斜切角为 (b) 0.2° 和 (c) 4° 的衬底上生长的 AlGaIn MQW 的温度相关 PL 光谱。 (d) 对于在斜切角为 0.2° (红点) 和 4° (蓝点) 的衬底上生长的两种 MQW, 内量子效率 (IQE) 与抽运功率之间的函数关系。H. Sun 等 Adv. Funct. Mater. 29 1905445 (2019)。

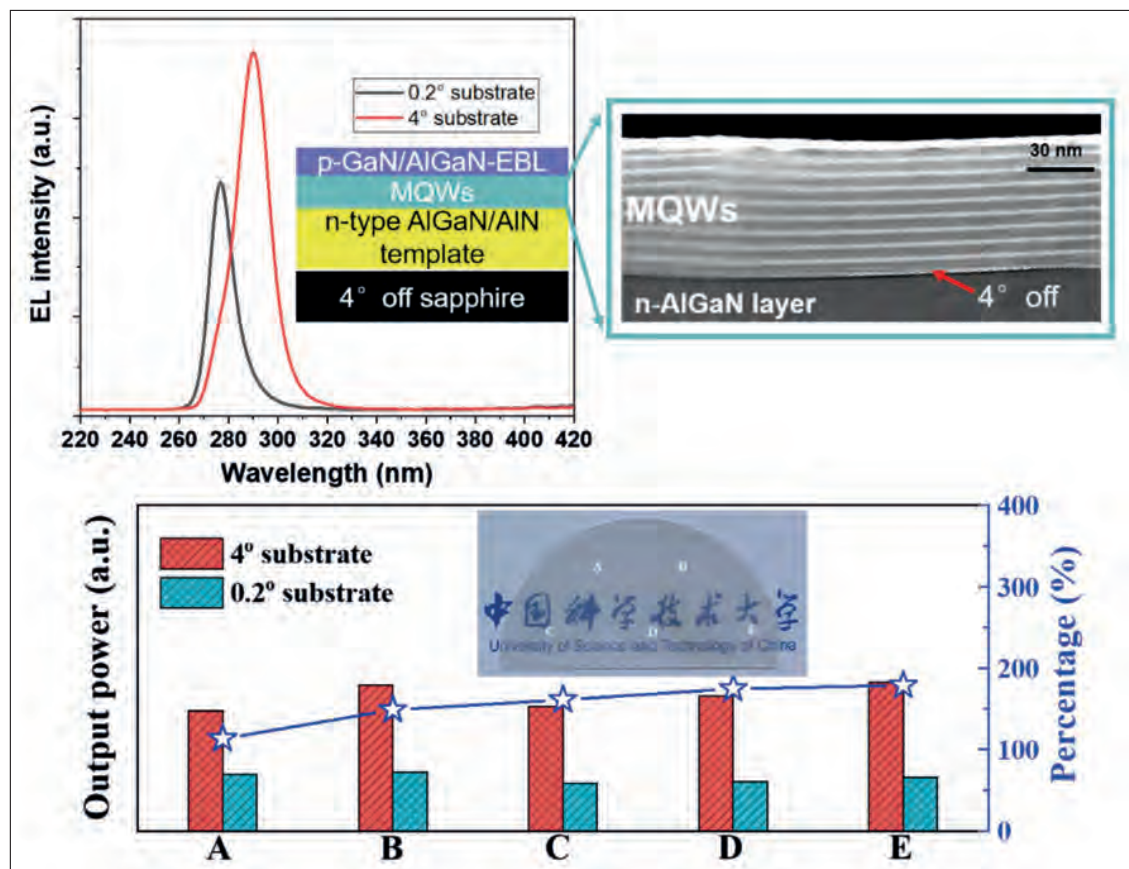


图5. 电致发光 (EL) 光谱和输出功率比较。H. Sun 等 *Adv. Funct. Mater.* 29 1905445 (2019)

提高 UV LED 芯片中电流扩散的均匀性，我们开发了一种可选方案，即引入新颖的电极图案（见图 2(d)）。采用这种设计后，n 型电极将围绕 p 型电极，以为载流子输运提供足够的电流通路。

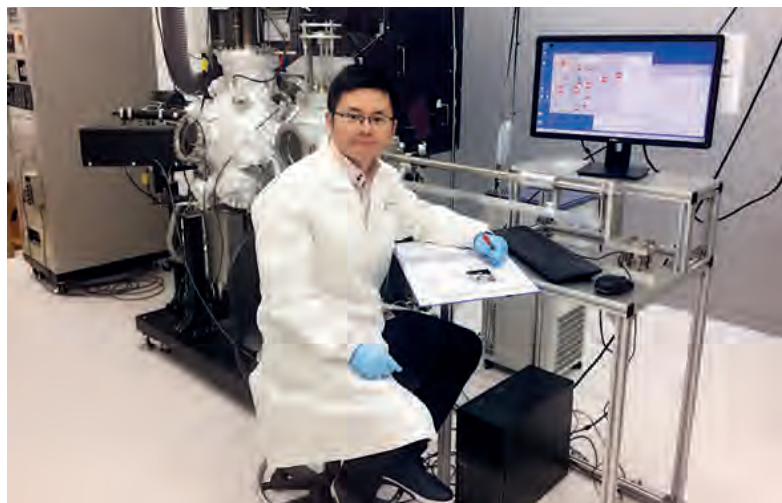
另外，AlGaIn 材料系统中存在较强的自发极化和压电极化场，UV LED 的性能严重受到量子限制斯塔克效应的影响，电子和空穴的波函数重叠率低，抑制了有效的辐射复合。为解决这一问题，研究者们采取了各种形式的能带工程，以提高内量子效率、阻止电流泄漏、以及减少高电流

注入时的输出功率下降（见图 2(e)）。

众所周知，蓝光 LED 具有高量子效率的部分原因是 InGaIn 量子阱中的能分离，造成相分离状态。这种分离导致载流子局域化效应，因而增加了辐射复合的可能性。对于 UV LED 所需的 AlGaIn 量子阱而言，分离远没有那么明显，这是因为铝原子的迁移性比镓原子低得多，且由于铝原子和镓原子的大小相似，因此引入铝和镓的相分离颇具挑战性，造成量子效率不高。

好消息是，我们研制出一种新型量子阱结构（我们称之为“波浪型量子阱 或者 波纹状量子阱结构”），在 UV LED 中“重现”了蓝光 LED 中的载流子局域化效应，我们人为地创建了“相分离”，从而导致了 AlGaIn 薄膜合金中的组分不均匀性。具体方法是，我们通过在斜切角很大（大至 4°，见图 3）的倾斜蓝宝石衬底上生长富铝深紫外 LED 来制备具有此类波纹状量子阱的 LED。采用这种工艺生产的 280 nm LED 除增加了载流子局域化效应之外，它还降低了量子阱中的极化场强度，这是因为高斜切角类似于半极性基板，能够有效抑制极化场。

与采用平坦蓝宝石衬底所制备的 UV LED 对比，我们发现在这些具备斜切角的衬底上制备的



用于器件制造的材料沉积

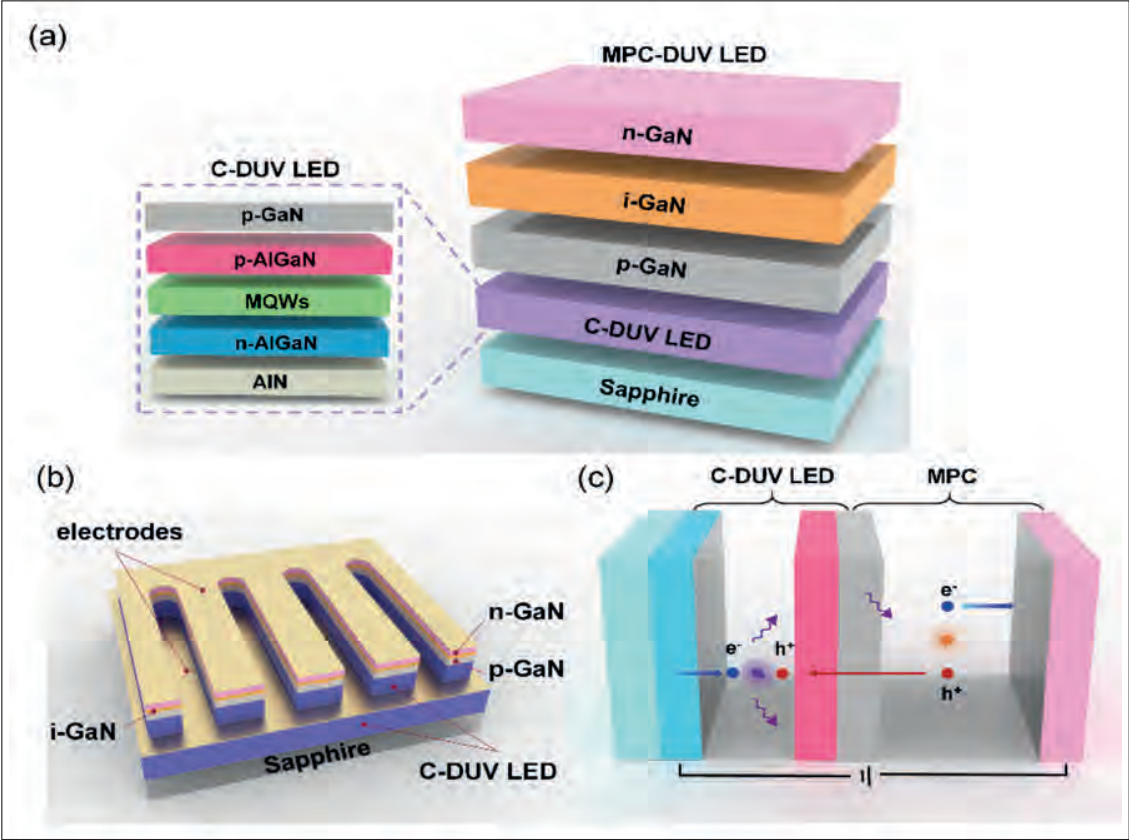


图6. (a) 传统深紫外 LED (C-DUV LED) 和光电转换器深紫外 LED (MPC-DUV LED) 的设计。(b) MPC-DUV LED 的器件结构。(c) MPC-DUV LED 的载流子复合及光子循环过程示意图。更多详情请见: S. Wang 等 Nano Energy. 66 104181 (2019)。

UV LED 器件性能要明显好很多: (1) 光致发光强度至少高出 10 倍; (2) 在低激发功率的泵浦下, 内量子效率提高了 6 倍 (创记录地超过了 90%); (3) 载流子寿命大幅延长, 在斜切角为 4° 的蓝宝石衬底上达到了 1.60 ns, 而在 0.2° 斜切角的蓝宝石衬底上则仅为 0.06 ns; (4) UV LED 的输出功率升高了 2 ~ 3 倍 (见图 4 和图 5)。

即使在 UV LED 的内量子效率得到这种改善的情况下, 对于发光波长低于 300 nm 的器件而言, 电光转换效率通常在 5% 以下。要达到远高于此的效率值, 则必需对器件结构做出彻底的改

变。我们将深紫外 LED 与光电转换器相结合, 实现单片集成, 获得了创记录的 21.6% 的电光转换效率。单片集成技术, 是将两个或两个以上器件或功能结构集成在单颗芯片中, 并利用它们之间的相互作用提高设备的性能。本质上, 这种系统级的创新能构建一个新的器件环境, 实现“片上系统”。华中科技大学陈长清、戴江南等科研团队提出了引入单片集成技术的新思路, 将 p-i-n 氮化镓探测结构 (也叫光电倍增转换器) 原位生长在深紫外 LED 外延结构上 (MPC-DUV LED: Monolithic integration of deep ultraviolet LED), 实

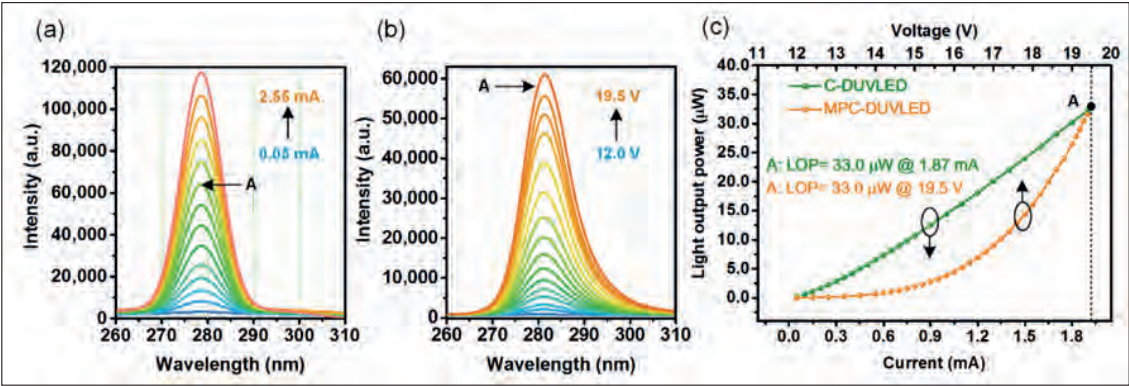


图7. (a) 传统深紫外 LED (C-DUV LED) 和 (b) 光电转换器深紫外 LED (MPC-DUV LED) 的电致发光 (EL)。(c) MPC-DUV LED 和 C-DUV LED 的光输出功率。更多详情请见: S. Wang 等 Nano Energy. 66 104181 (2019)。

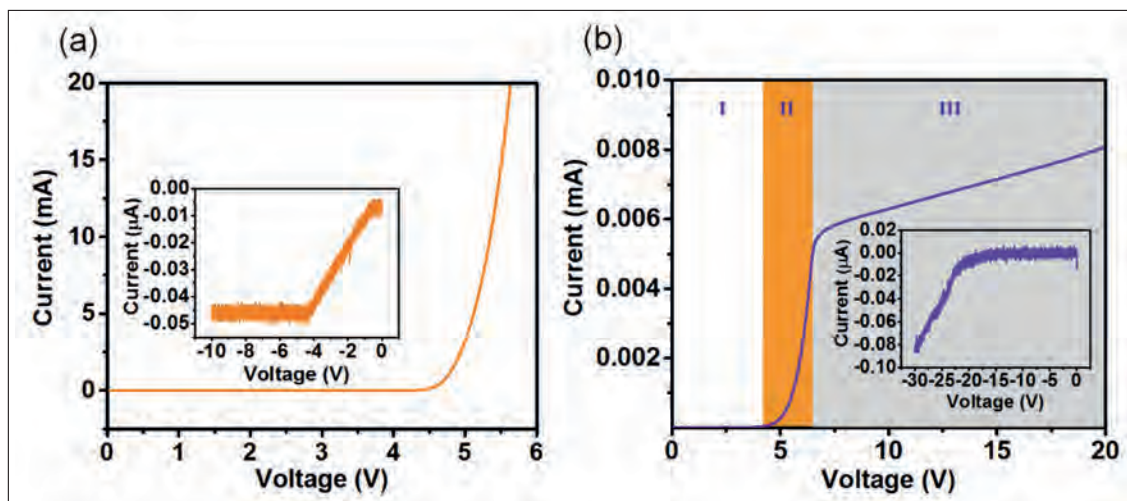


图8. (a) 传统深紫外 LED (C-DUV LED) 和 (b) 光电转换器深紫外 LED (MPC-DUV LED) 的电流-电压特性。插图显示了反向偏压条件。对于 I 区和 II 区，曲线与 C-DUV LED 的相似，然而，电流水平几乎低了三个数量级。对于起点为 6.6 V 的 III 区，电流走势突然改变，表明少数载流子被 p-i-n 型 GaN 结构中的空间电荷区有效地抑制，而且总电流有可能因反向漂移电流而受到限制。这也许是由于 p-i-n 型 GaN 结构的串联电阻有所增加（相比于 II 区）而造成的。更多详情请见：S. Wang 等 Nano Energy. 66 104181 (2019)。

现具有载流子循环注入、光倍增大功能的芯片器件。下面我们将介绍该结构。

一种“激进”的 LED 结构

我们的新颖器件解决了传统深紫外 LED 电流注入效率极低（这是造成深紫外 LED 效率差强人意而饱受诟病的原因所在）的问题。在我们激进的设计中，p-i-n 型 GaN 结构同时起到了电光转换器和空穴倍增器 (hole-multiplier) 的作用，通过吸收从有源区逃逸的深紫外光子并生成电子-空穴对。这些新的载流子在极高的电场驱动下，空穴通过碰撞电离实现倍增，然后被重新注入有源区，它们在这里参与辐射复合（见图 6）。

为了研究我们新器件的光电特性，我们将

其电致发光谱与传统 UV LED 的做了比较（见图 7(a) 和 (b)）。需要注意的是，我们的新器件具有电压依赖特性，这源于反向偏压下光电转换器的工作模式。光输出图显示：当传统器件在 4.88 V 电压和 1.87 mA 电流下运行时，产生的输出功率与新器件在 19.5 V 电压和 7.85 μA 电流条件下驱动时是相同的。从这些数字我们可以得出结论：传统器件的电光转换效率为 0.36%，而集成了光电转换器的新器件则为 21.6%，足足高出了 60 倍之多。

在我们的新器件中，电流-电压特性与传统 LED 电流-电压曲线有着明显的不同（见图 8）。对于传统 UV LED，导通电压为 4.5 V，而漏电流非常低，表明它是可靠的。相比之下，我们破记

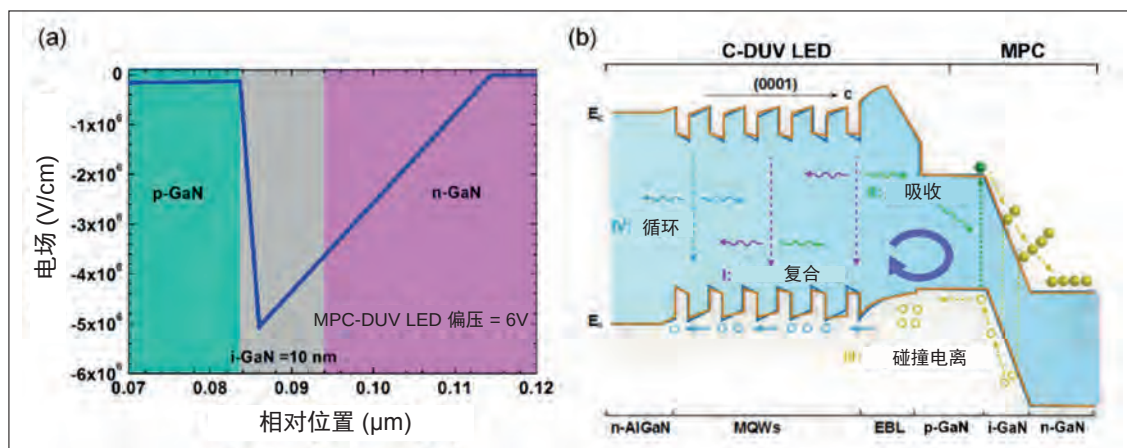


图9. (a) 在 6 V 偏压条件下，MPC 深紫外 LED 中的光电转换器 (MPC) 结构两端的电场分布。(b) MPC-DUV LED 的光子循环、增益和输出过程。在初始复合过程 I 中，一半的 DUV 光子传播到 n 型 AlGaIn 层并成功逃离，如紫色箭头所示。另一半 DUV 光子向 MPC 结构传播，而且几乎全部被 MPC 结构的 i 型 GaN 层吸收，由绿色箭头指示。DUV 光子被吸收，并生成新的电子-空穴对，如过程 II 中所示。在过程 III 中，载流子在盖革模式下倍增，并与其他原子碰撞，使之电离，形成更多的载流子。倍增的空穴被重新注入多量子阱 (MQW)，有助于新的辐射复合，如过程 IV 中所示。需注意的是，对于传统的 DUV LED，只进行步骤 I 和 II。更多详情请见：S. Wang 等 Nano Energy. 66 104181 (2019)。

录的 UVLED 则具有三个跨不同工作电压范围的特定区域（详情见图 8）。

我们模拟了 6 V 偏压下 p-i-n 结构 GaN 区的电场分布（见图 9(a)）。计算结果显示：电场延伸到了 n 型 GaN 层之中，而 i 型 GaN 层完全耗尽。此外，这些模拟还表明：内部电场强度超过 5 MV/cm，从而足以使其在 GaN 材料中实现盖革模式（Geiger mode）倍增。

另外，我们器件模拟结果还有助于深入了解我们这一特殊 UVLED 的工作机理。当深紫外光子在器件内被吸收时，它们将生成电子空穴对，由于光电转换器中反向偏压的原因，电子漂向阳极，空穴漂向阴极。因为碰撞电离之故，每个载流子在光电转换器中倍增几十次，然后被重新注入有源区，显著地提高了空穴注入效率。在该器件中，还可以进行光子循环（详情见图 9(b)）。我们开发的新器件有望实现的远不止仅仅在实验室里获得让人兴奋的实验结果。这种器件的大批量生产并不是那么困难，因为光电转换器可采用传统的 MOCVD 工艺生长，但是最主要需要攻克或者面临的挑战是如何进一步提高这种单片集成的 UV LED 的光输出功率。虽然低功率深紫外 LED 可满足一些应用的需要，比如 micro LED，但是，市场上急需高功率紫外光源，我们正通过优化外延结构和制造工艺来进一步实现这一目标。

虽然 20% 的电光转换效率是非常令人振奋的结果，但是仍然有很多研究工作要做。我们希望，通过改善材料质量、掺杂效率和光提取效率，可以进一步提高外量子效率和电光转换效率，从



封装型 UV LED

而进一步推动从基于汞的紫外线灯向基于半导体 AlGaIn 的清洁环保节能的 UV LED 全面过渡，并将有助于提高清洁可靠 UV 光源的普及率。基于 InGaIn 的可见光 LED 发展如此迅猛，鉴于此，我们对在不久的将来实现高效率、高功率深紫外 LED 持乐观态度。☞

扩展阅读

- H. Sun et al. Adv. Funct. Mater. 29 1905445 (2019)
- Ren et al. J. Phys. D Appl. Phys. 53 073002 (2020)
- H. Yu et al. Opt. Express 27 A1544 (2019)
- S. Wang et al. Nano Energy 69 104427 (2020)
- S. Wang et al. Nano Energy 66 104181 (2019)
- H. Long et al. Appl. Phys. Lett. 114 042101 (2019)
- Q. Chen et al. IEEE Elect. Dev. Lett. 40 1925 (2019)
- S. Wang et al. ACS Photonics 5 3534 (2018)

碳化硅生产线、高可靠 IC 封装生产线等落地郑州

近日，郑州航空港实验区管委会、中国航天科技集团第九研究院第七七一研究所、达维多企业管理有限公司签订战略合作协议。根据协议，三方拟合作建设半导体生产制造及封装基地项目。郑州航空港区发布微信号指出，该项目将在航空港实验区建设第三代化合物半导体 SiC 生产线、高可靠集成电路封装生产线、工业模块电源生产线，打造集 IC 设计、芯片制造、先进封装为一体的产业生态体系。

这是航空港实验区在集成电路领域继单晶硅片、先进靶

材、晶圆先进切割设备等项目的基础上的又一重大突破，标志着实验区集成电路产业实现全产业链布局，产业生态逐步形成。

中国航天科技集团公司第九研究院第七七一研究所，始建于 1965 年 10 月，主要从事计算机、半导体集成电路、混合集成三大专业的研制开发、批产配套、检测经营，是集计算机、半导体集成电路和混合集成科研生产为一体的大型专业研究所。

背面发射 VCSEL 改善了 3D 传感

背面发射的 VCSEL 阵列即将实现诸多 3D 传感应用，从短距离面部识别到长距离汽车激光雷达 LiDAR 均在其列。

James Foresi, Luke Smithwick, TRILUMINA 公司

3D 传感已经悄然得到普遍的使用。iPhone X 面部识别系统的出现使数百万人每天都能与 3D 传感系统展开互动。

这些面部识别系统的核心是一种被称为 VCSEL（垂直腔面发射激光器）的激光器。VCSEL 实现了图像的结构化光深度传感分析。不仅如此，VCSEL 的特性也使其成为其他形式 3D 传感颇为青睐的一种选择，比如它在汽车市场用来提供飞行时间传感，在 LiDAR 领域中应用于自动驾驶。

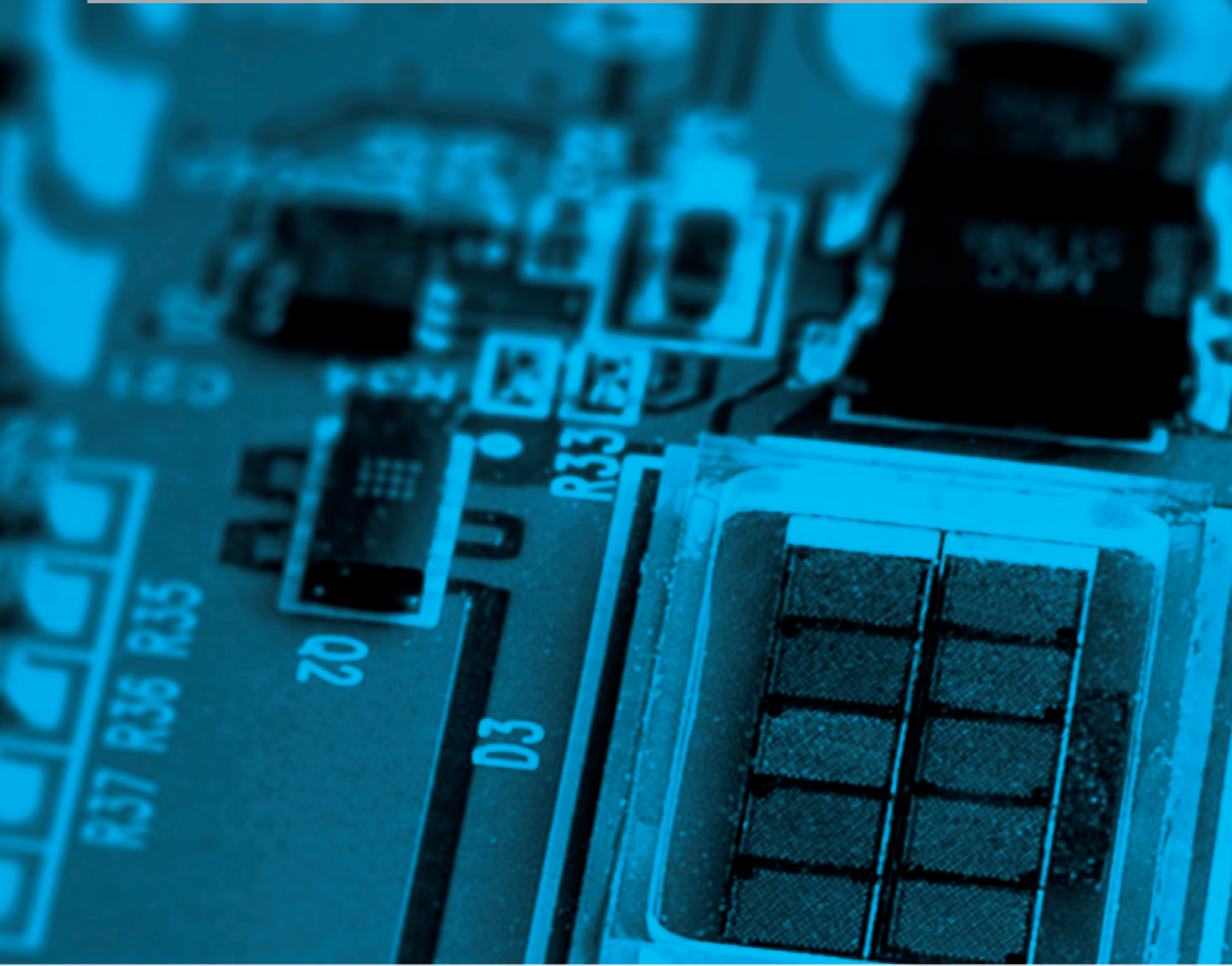
这些应用将确保传感市场具有美好的前景。根据市场分析人士提供的数字，3D 传感市场的全球营销收入将从 2017 年的 21 亿美元大幅攀升至 2023 年的 185 亿美元。这是 44% 的复合总增长率，将有助于刺激 VCSEL 的销售。到 2023 年，

仅 VCSEL 照明和相关光学器件的市场就将超过 60 亿美元。

在可预见的未来，VCSEL 销售将出现增长的领域涵盖了移动、消费、工业和汽车行业。在这些领域中，对于照明光源均有着不同的要求。不过，尽管存在这些差异，但是却具有 5 个共同的考虑因素：波长选择、随温度变化的性能稳定性、可靠性、工作范围和成本。

VCSEL 的优点

由于其所具备的优越性能，VCSEL 的销售增长速度因而远远高于其更常见的同类产品——边缘发射激光器。VCSEL 的优点包括其垂直架构（见图 1 (a)），该架构因为免除切割晶圆和涂层端面（coating facets）的需要，简化了生产。在加工之后，



所需做的全部工作就只有切割晶圆了。VCSEL 的另一个特点是其腔体相对较短，从而实现了高数据速率。这些优势，再加上由孔径确定的圆形发射轮廓，使得 VCSEL 成为适合数据通信的非常有竞争力、同时也是很成功的产品，并将推动其在 3D 传感领域取得成功。对于后者而言，需要较高的输出功率，这是通过在单颗晶片上组装孔径阵列来实现的。

传统的 VCSEL 是一种“顶面发射器”(top-emitter)，即：光是通过半导体晶圆片的顶面发射的。不过，这并不是唯一可行的配置。在美国新墨西哥州阿尔伯克基 (Albuquerque, NM) 的 TriLumina 公司，我们的团队倡导采用“背面发射器”(back-emitter)，这是一种可在 VCSEL 阵列设计中提供更大灵活性的架构。为了制作我们的器件，我们以

倒置（相对于顶面发射器）的方式生长异质结构，并在激光器结构的内部使用特殊的层，以实现至阳极和阴极的电连接（见图 1 (b)）。

我们的背面发射 VCSEL 配置相比于传统的同类产品拥有一些显著的优势。它不需要采用键合线来实现至阵列的电连接，作为替代方法，简单地将 VCSEL 晶片倒装焊接至一个次黏着基台 (sub-mount)，该次黏着基台具有定义的所有必需的电连接。由于没有键合线，所以可将背面发射 VCSEL 晶片彼此紧贴在一起，以形成可为长距离传感应用提供足够电能的大型照明模块。此外，免除键合线还降低了封装的寄生阻抗，而这反过来又加快了上升和下降时间，从而改善了针对脉冲深度传感应用的性能。

背面发射的另一个优点是其允许将微透镜直

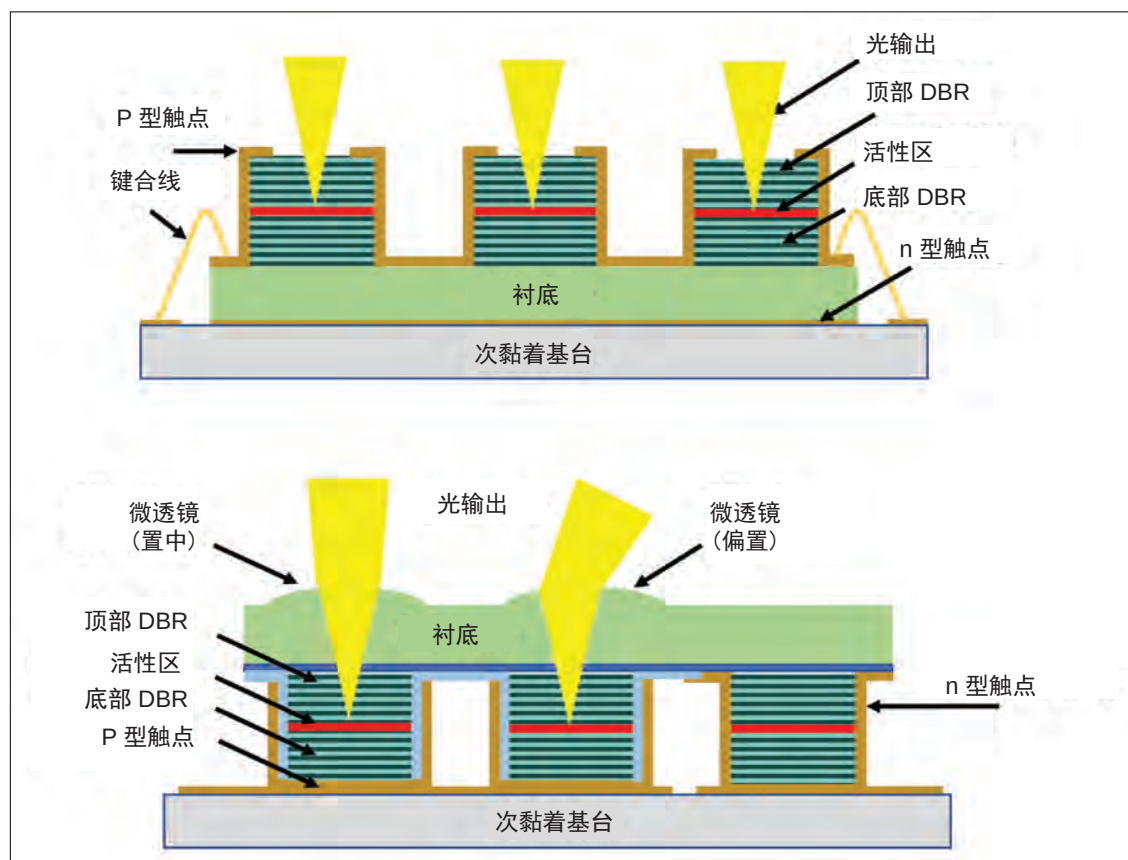


图1. VCSEL 设计采用了一对分布式布拉格反射器 (DBR)。这些反射器为一个包含发射层的谐振腔提供了反射镜，具有多量子阱结构。在顶面发射 VCSEL (a) 中，光从晶圆的顶面发射。这种设计需要使用键合线来实现电连接。在 TriLumina 新颖的背面发射 VCSEL (b) 中，光从晶圆的背面发射。在此配置中，无需键合线，并且能够在发射器的上方对透镜进行单片蚀刻，以减少光束发散（置中微透镜）或改变光束的输出角（偏置微透镜）。请注意，这些特性未按比例显示。

接单片蚀刻至发射表面之中。有了这种特性，光束整形就成为可能：要么降低每个发射器的发散，要么扩散光输出。另外，透镜可从发射器孔径偏移，以使光束偏离轴。通过将光束指向与 VCSEL 孔径区域的个别可寻址能力相结合，这实现了全固态光束控制。由于坐拥这些特性，因而可通过免除光学元件或光束控制组件降低 3D 传感的总系统成本。

选择什么波长？

对于设计 3D 传感系统的工程师来说，他们所做的最大决定之一是选择工作波长。常见的激光波长包括 850nm、905nm、940nm 和 1550nm。

工程师所选的波长将影响：眼睛安全；可见度，因为满足眼睛安全要求的光源仍然会分散注意力；来自环境光的干扰；和用于探测的传感器的可用性。需要注意的是，所有这些考虑因素都会对系统设计的其他方面产生影响。

为了满足眼睛安全要求，工程师必须遵守最大允许照射量。这随波长和脉冲的持续时间而变化（见图 2）。持续时间较短的脉冲具有较低的最大允许照射量（这是图 2 所示曲线图的构建方式产生的结果，因为在短脉冲和长脉冲里传递的能量是相同的），这与波长无关。对于 3D 传感系统，脉冲宽度最短可至 10ns（在某些场合中甚至更小）。这增加了眼睛安全考虑方面的负担。

改为使用较长的波长能够缓解该负担，因为工作在 1550nm 波长的光源可针对眼睛安全限值提供最大的脉冲功率。

VCSEL 阵列通常工作在 850 nm 至 980 nm 的波长范围。依据图 2，这可能意味着眼睛安全要求将限制输出功率（相比于工作在较长波长的光源）。然而，事情不是那么简单的。这是因为眼睛

另一个影响系统性能和成本的考虑因素是：位于或靠近光源波长的背景照明水平。当背景光照度很高时，必须利用额外的滤光对其加以抑制。

安全考虑顾及了一个低功率光源阵列和单个高亮度发射器（比如，边缘发射激光器）之间的差异。在远离光源的地方，VCSEL 阵列仿佛是单个圆形输出光束，而且在这些距离上，它们发挥的作用类似于点光源。但是当你靠近 VCSEL 阵列时，它们就变成了扩展光源，而且眼睛安全考虑发生变化，此时由个别发射器的输出决定。这一点是受欢迎的，因其能够大幅降低总功率因数达 4 个数量级，并使 940 nm VCSEL 阵列光源在眼睛安全方面近乎等同于 1550 nm 波长的点光源。

另一个影响系统性能和成本的考虑因素是：位于或靠近光源波长的背景照明水平。当背景光照射度很高时，必须利用额外的滤光对其加以抑制。如欲估计所需的滤光级别，可考虑空气质量为 1.5 时的太阳辐射。美国国家可再生能源实验室 (NREL) 提供的数据（见图 3）显示了在 850nm、940nm 和 1550nm 波长的背景辐射水平。在 850 nm，太阳辐射相对较高，对于工作在该波长的系统，需要提供额外的滤光。940nm（并非巧合的是，iPhone X VCSEL 就工作在此波长）和 1550nm 波长均具有相当低的背景辐射。

最后一个与波长有关的考虑因素涉及合适传感器的可用性。用于 3D 传感系统的常见探测器有三种不同的类型：硅雪崩二极管；多光谱 CMOS 成像器；以及化合物半导体探测器和阵列，

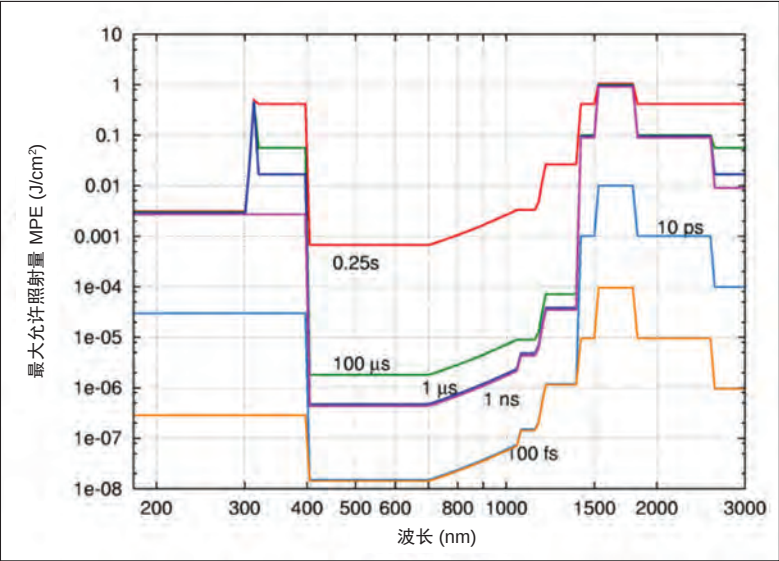


图2. 眼睛安全的最大允许照射量，其作为波长和脉冲宽度的函数来计算（针对每个脉冲的某一固定能量）。对于高功率点光源，眼睛安全配置推动系统采用较长的波长。对于 VCSEL 阵列，单独的发射器输出会相当低，因而实现了视力无害操作，即使当总阵列输出很高的时候也不例外。

如 InGaAs 雪崩光电二极管。前两种类型可兼容 850nm 和 940nm 光源，而后一种类型则是工作在 1550nm 波长的系统所需要的（见图 4）。如果注重成本，则优先选择硅传感器。具有成像器的硅传感器品种繁多，可支持许多不同的 3D 传感方法。

应对热量

3D 传感系统的所有主要市场（消费、工业和汽车）都需要光源，以在扩展的温度范围内保持

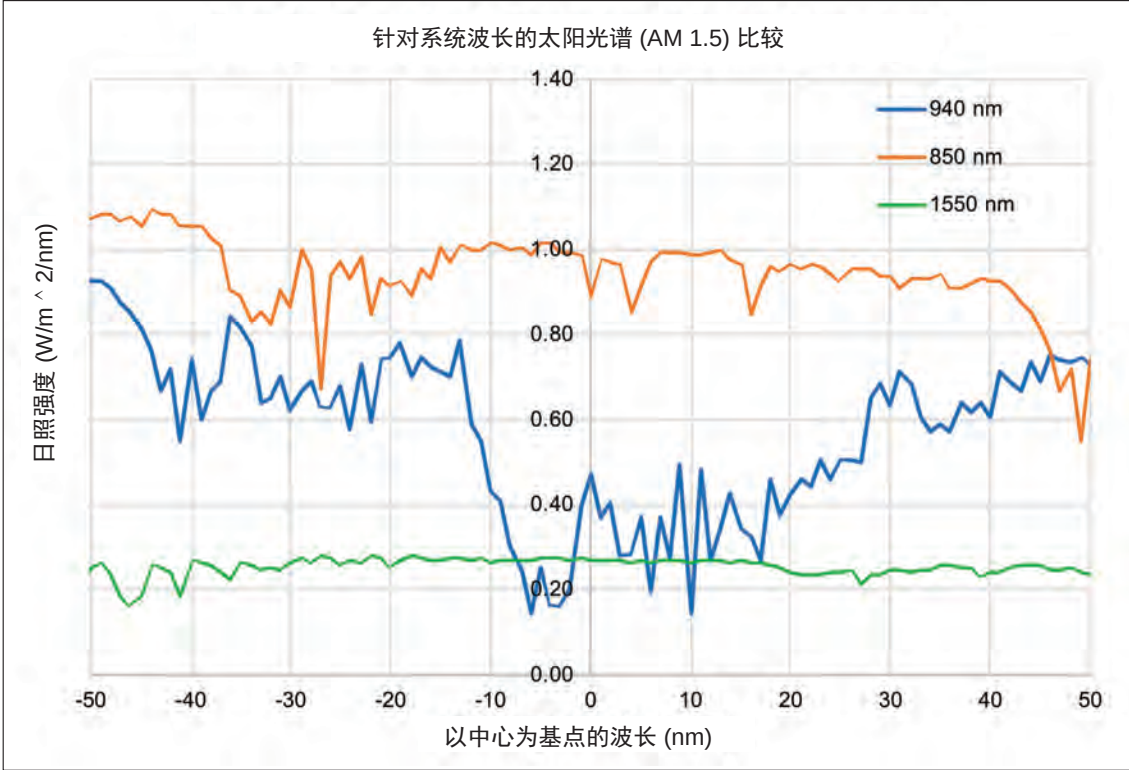
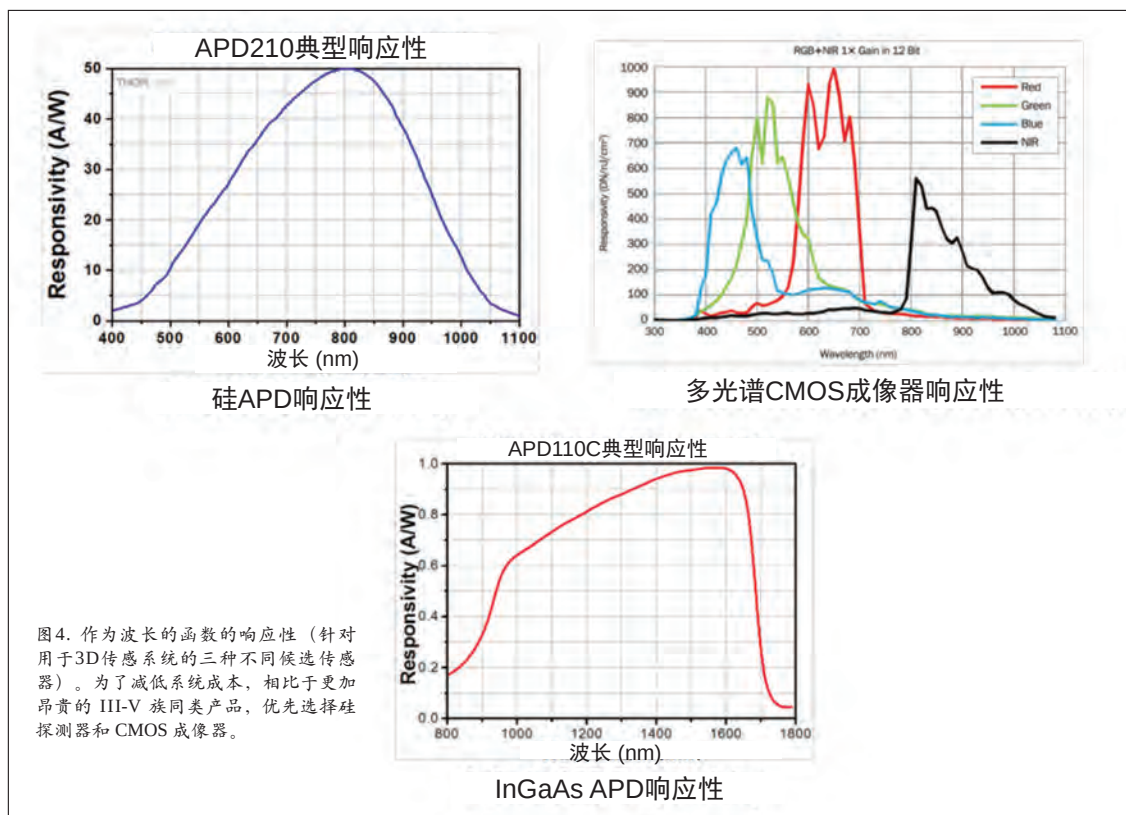


图3. 来自 NREL 的 AM 1.5 参考光谱以三种不同的波长（850 nm、940nm 和 1550nm）为中心。在 3D 传感系统中，环境太阳光会变成背景噪声。为了限制这种背景噪声，可在 940nm 或 1550 nm（而不是 850nm）波长形成系统。



性能。最严苛的要求出现在汽车领域，这里的工作温度范围可能必需从 -40°C 扩展到 $+125^{\circ}\text{C}$ 。这种挑战特别棘手，原因在于：为了避免系统成本上升，照明光源必须在没有温度控制的情况下理想地运行。遗憾的是，激光器的特性会随温度而改变，包括其波长和输出功率。

采用 VCSEL 时，特性随温度发生变化的幅度远远小于边缘发射器，因而对于设计合理的 3D 传感系统而言，无需配备温度控制功能。波长的变化幅度下降了 5 倍，从通常的 0.4 nm/K 降至 0.07 nm/K 。波长稳定性的优势源自使用了短得多的腔体，这使得 VCSEL 内部的谐振腔模式在波

长上是疏散的。当 VCSEL 升温时，谐振腔波长和增益轮廓 (gain profile) 移至较长的波长。然而，仅有一种谐振腔模式与增益轮廓重叠，而这决定了波长。与此相反，在边缘发射器中，谐振腔模式在波长上是密集的，因此，当增益轮廓移动时，在增益峰值处出现一种新的激光模式，因而产生一种新的激光波长。

半导体激光器的输出功率随温度而改变，这往往与谐振腔模式和增益轮廓移位以及非辐射复合速率相关联。功率的变化幅度在很大程度上取决于设计，但是，在典型的边缘发射器中，它在 85°C 温度下会骤降至接近于零。相比之下，我们的 VCSEL 阵列在高达 125°C 温度条件下工作时的输出功率接近 25°C 时额定功率的 70%（见图 5），因而可满足极为苛刻的汽车环境要求，并不需要采用温度控制系统。

确保可靠性 可靠性是一个关键的问题，在用户安全至关重要的汽车应用中尤其如此。在判断该特性的测试中，我们的 VCSEL 的表现胜人一筹，这是因为背面发射架构针对于可靠性评估的典型应力具备固有的坚固性。n 型和 p 型触点位于 VCSEL 阵列的同一面，并且均完全包裹在金属或氮化硅中。由于采用了这种设计，因此就不存在湿气侵入器件活性区域的进入通路。

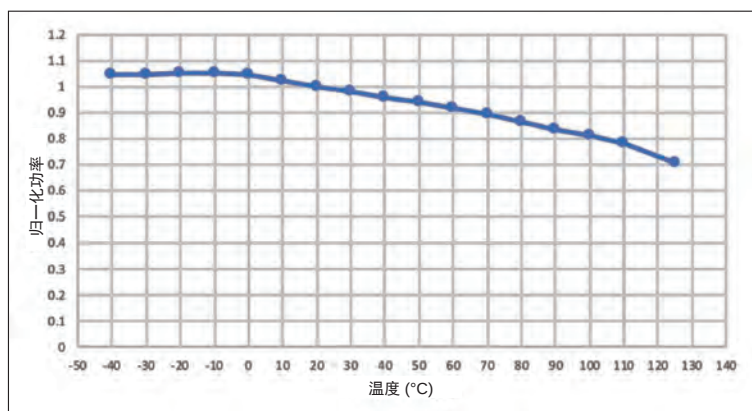


图5. 以0.1%占空比工作的一款 TriLumina 照明模块（10ns 脉冲，100kHz 重复频率）的输出功率与温度的函数关系。输出功率被归一化至 25°C 时的输出功率。在 125°C 温度下，该照明模块仍然产生了高于其额定功率的70%的输出功率。

对于顶面发射 VCSEL 情况就不是这样了，其在 p 型触点中必需具有一个出口，以使光能够离开器件。不得不诚实地说，这些顶面发射 VCSEL 已被证明是高度可靠的，但是我们的背面发射配置为长期运行提供了更大的信心，对于这一点我们是毫无疑问的。当在加速条件下驱动我们的阵列达 9,000 小时以上时，我们并未发现任何性能劣化的迹象。目前，我们正在依照汽车质量标准 AEC-Q102 对我们的 8W 照明模块进行全面评估，并期望在本篇文章发表之前完成标准认证。

扩大工作范围

深度感应系统采用各种不同的方法来确定距离。对于短距离系统，要么采纳结构光方法（比如在 iPhone X 中），要么运用基于立体视觉的方法。而对于中远距离系统（包括 LiDAR），则更常用的方法是基于飞行时间。它们既可以是直接的（使用闪光灯）；也可以是间接的（见图 6）。

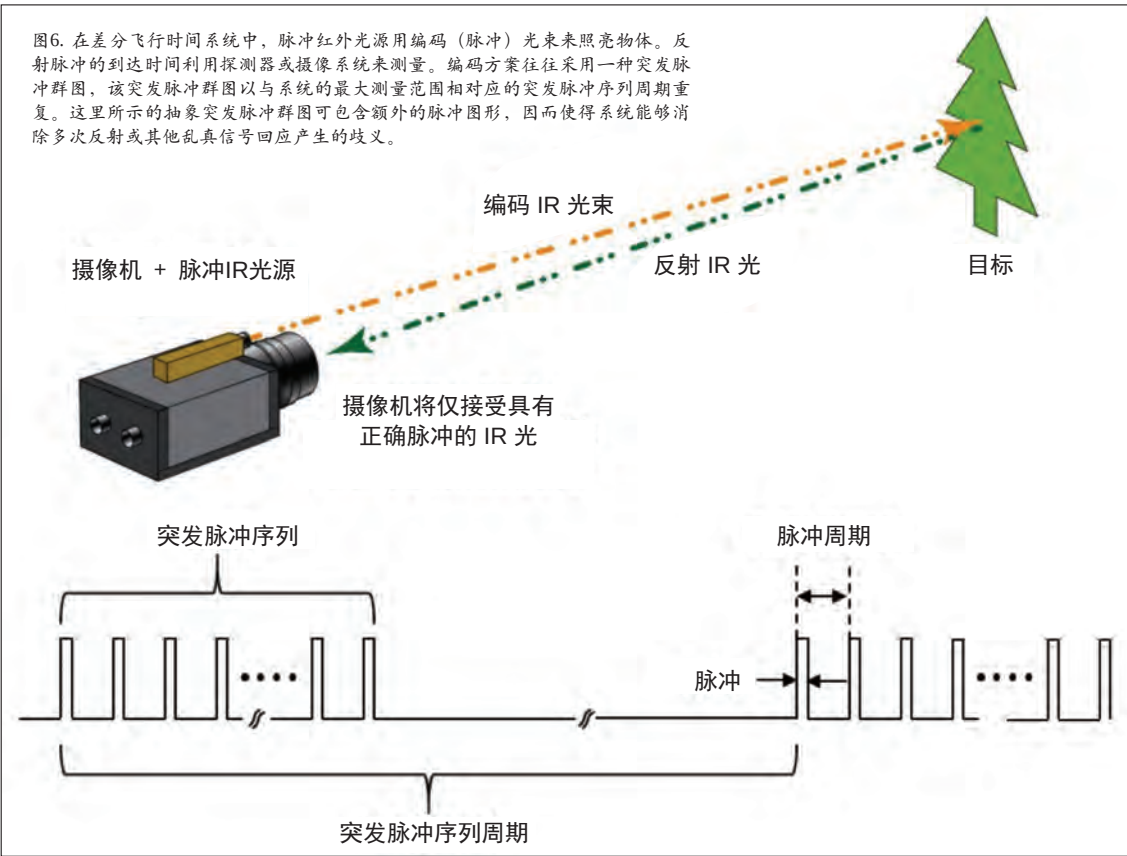
我们设计并向客户提供了覆盖每种范围的背面发射 VCSEL 阵列模块，从需要在几米的距离上进行深度传感的消费类应用，到工作距离为 250 米或更远的前置汽车 LiDAR 无所不包（我们的产品实例请见图 7，照明模块的主要指标可参见表 1）。

半导体激光器的输出功率随温度而改变，这往往与谐振腔模式和增益轮廓移位以及非辐射复合速率相关联。功率的变化幅度在很大程度上取决于设计。

我们的激光器将进入短距离系统，从而在“放眼”世界、面向移动应用的摄像机中提供了一个关键要素。用我们的 VCSEL 构成的照明模块的独特优势是其能够像任何其他电子组件一样直接焊接到印刷电路板上。这使它们成为用 VCSEL 光源取代 LED 的一种低成本选项。这些照明模块以低占空比（平均占空比通常为 1% 至 3%）运行，而且它们可以产生约 4W 的输出功率。

可提供稍多一点功率的是我们面向汽车安全应用（如乘坐者监控）的照明模块。产品实例包括两个串接、安装在陶瓷黏着基台上的 1mm×2mm 晶片，它们可在 3% 的占空比条件下产生约 8W 的输出。

对于 50 米至 100 米的范围，我们的照明模块被部署在多模式飞行时间摄像机中。这些模块在间接飞行时间系统中使用，具有获得高分辨率



器件	应用	功率	工作范围	孔径	占空比
4 W CoB	移动	4 W	5 m	150	1%
8 W SMT	汽车安全, AR/VR	8 W	5 m – 10 m	300	3%
100 W SMT	短距离 LiDAR	100 W	50 m – 100 m	6,440	2%
615 SMT	长距离 LiDAR	600 W	200 – 300 m	3,000	0.1%

表1. TriLumina 照明模块（按工作范围和应用划分）。

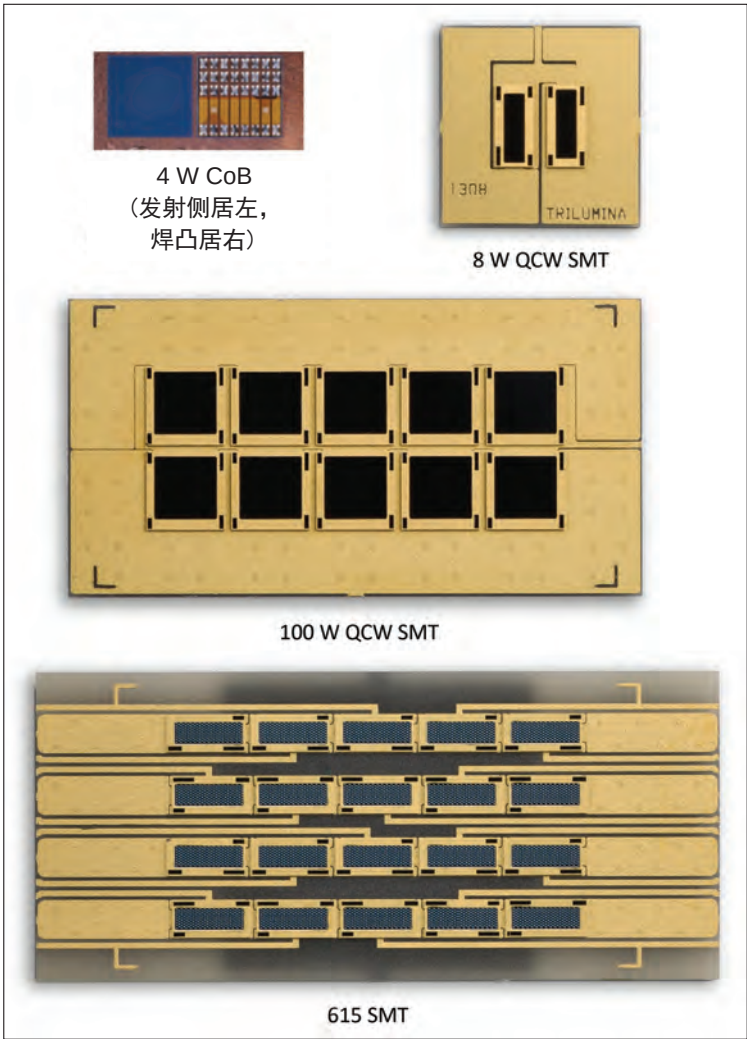


图7. TriLumina 照明模块实例（用于 5 米至 300 米的工作范围）。

深度图以及黑白和红外图像的多光谱 CMOS 成像器。摄像机安装在汽车上四个灯的位置，使驾驶员能受益于意识和安全信息量的增加。对于该应

用，我们生产了 100W 照明模块，此类模块由 10 个 2 mm × 2 mm VCSEL 阵列在陶瓷次黏着基台上形成，以 2% 的占空比运行。

我们为最长距离提供了 600W 照明模块。它们采用 20 颗 1mm × 2mm 晶片进行组装，并封装在陶瓷次黏着基台上，适合直接飞行时间和闪光前置 LiDAR 系统。为了实现窄发散角（它大约为 12°，用其半最大值全宽度来表示），将微透镜蚀刻到芯片之中。采用最短 10 纳秒左右的脉冲，以 100kHz 的重复频率传递，LiDAR 实现了规定的工作距离。需要注意的是，仅 0.1% 的低占空比就使照明模块达到了它很高的峰值功率。

我们所有照明模块均具备有竞争力的性能，做到这一点的关键是我们独特的背面发射 VCSEL 阵列设计。通常，如需开发一款新型模块，我们所需做的全部工作就是打造新的陶瓷次黏着基台设计。通过将我们的 VCSEL 阵列晶片平铺在适当的串联或并联网路（或者有时是这两者的某种组合）中，我们能够满足期望的电气和光学规范。

展望未来

VCSEL 技术正在持续不断地进入新的应用领域。3D 传感系统的出现使 VCSEL 阵列成为红外照明的有力竞争者。有了我们具集成型微透镜的背面发射激光器，我们能够提供一种引人注目的产品，该产品有助于降低先进 3D 传感系统的总系统成本。背面发射配置为提高集成度铺平了道路，人们将在 3D 传感领域的最前沿看到 VCSEL 技术被创新设计所采用。OSc

VCSEL 技术正在持续不断地进入新的应用领域。3D 传感系统的出现使 VCSEL 阵列成为红外照明的有力竞争者。通过具有集成型微透镜的背面发射激光器，我们能够提供一种引人注目的产品，该产品有助于降低先进 3D 传感系统的总系统成本。

III-V 族与硅结合用于后 5G 时代的前端模块

整合深宽比捕获与纳米脊工程技术，可以实现 300mm 基板上的 GaAs/InGaP HBT 制造平台，用于放大毫米波产能。

Abhitosh Vais, IMEC

对于首个第四代的移动通信技术，传输频率的变化是逐步进化，而不是完全改变。工作频率已从低于 1GHz 升高至数 GHz，带宽也从几十千赫兹扩展到数十兆赫兹。

从这些角度来看，5G 与以往相比是一个根本性的偏离(见图 1)。它仍将涉及几 GHz 频段(称为 6GHz 以下频段)的传输，但除此之外，它将使用毫米波频率，这是解决当前频段带宽限制所必需的措施。

使用毫米波频段(例如以 28GHz 和 39GHz 为中心的频段)的缺点之一，是它们的衰减要大得多。为了解决这个问题，需要引入小型蜂窝网络，以及新设计的手机，从而导致前端设计的复杂性增加。

当今手机的关键部件是 GaAs/InGaP HBT，这是在昂贵的 GaAs 衬底上制造的。这类晶体管用于制造功率放大器，功率放大器具有单独的模块，每个模块覆盖不同的频带。

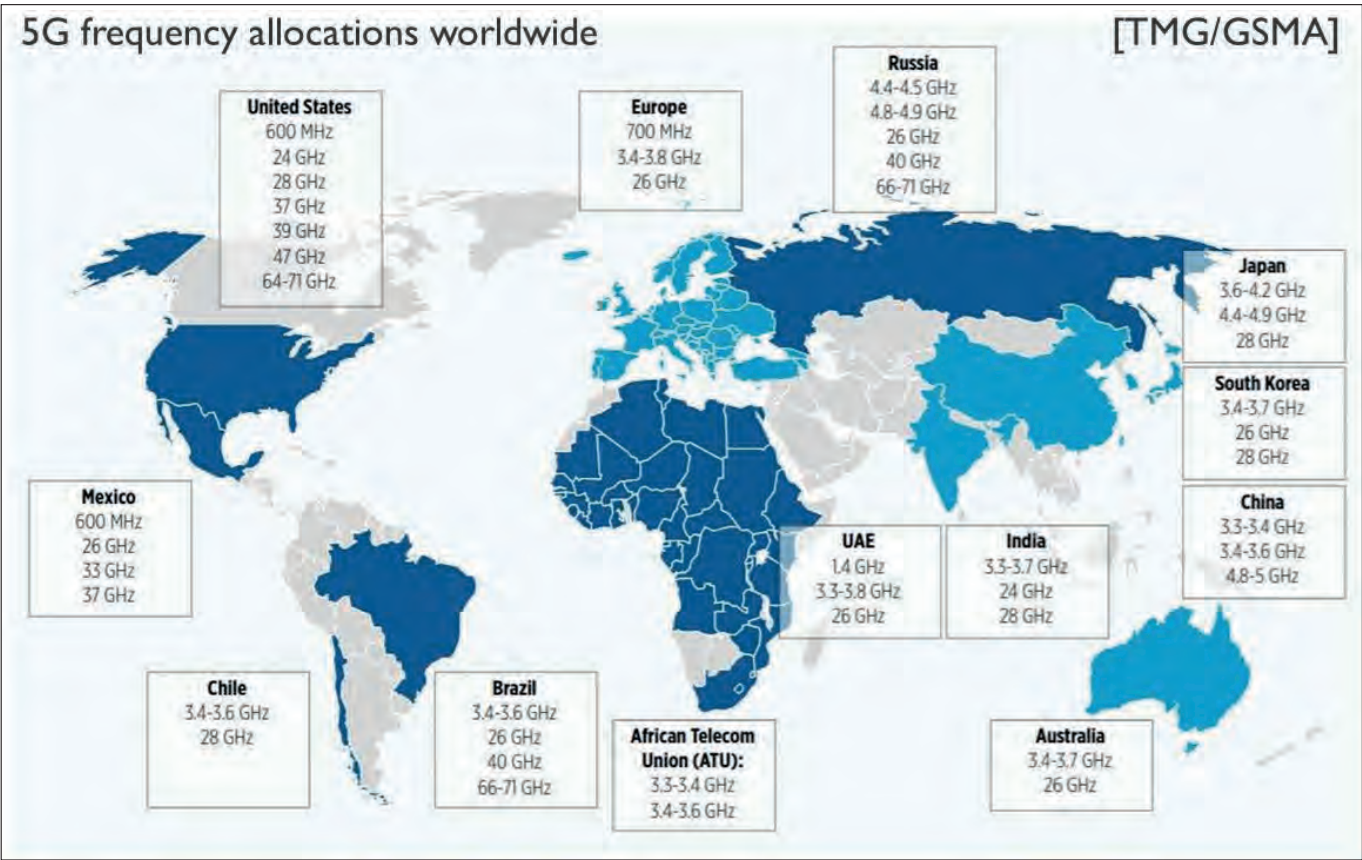


图1. 全球5G部署的频段分配。[TMG/GSMA], <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2019/10/mmWave-5G-benefits.pdf>

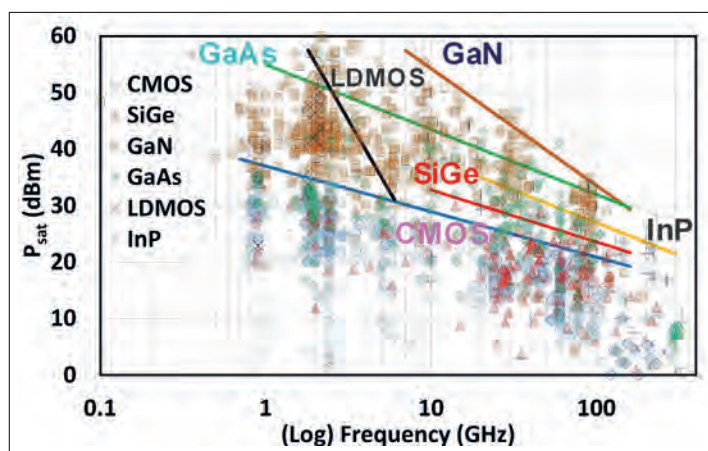


图2. 不同技术相对于工作频率的输出功率 P_{sat} 的技术趋势。[[H. Wang, et al., "Power Amplifiers Performance Survey 2000-Present," [online]. https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html]

随着在毫米波域中运行的 5G 的推出，这些晶体管的 RF 性能必须保持，或者说甚至需要得到改善，同时还要降低成本，增加电路设计的灵活性，并降低功耗和减小芯片尺寸。不幸的是，现有的商业技术很难满足所有这些要求，从而来实现良好的 RF 前端模块，因此需要转向创新的材料和器件架构。

在 imec，我们已经开发了 III-V/CMOS 混合技术，有望提供毫米波 RF 应用所需的小尺寸和低成本。它利用与 III-V 系统相关的功率处理和高频下的线性度（见图 2），同时利用先进的 CMOS 后端处理工艺来实现复杂的控制电路。更重要的是，由于采用了共集成技术，因此有可能提高整个电路的能源效率，从而实现可以大规模生产的高能效、低成本毫米波技术。

将诸如 GaAs 之类的 III-V 族材料与硅结合起来的最大挑战之一，是较大的晶格失配。在晶格不匹配的衬底上外延生长会导致缺陷的产生，主要是穿透位错（threading dislocation）。这些缺陷

会引起不希望的泄漏电流，从而降低器件性能。

一些研究小组试图通过在衬底和器件之间插入弛豫应变（strain-relaxed）的缓冲层，从而来降低这些缺陷的密度。然而，增加 SiGe、锗或 III-V 族赝配（metamorphic stack）堆叠层会带来显著的额外成本增加，因为需要生长大于 $10\ \mu\text{m}$ 厚度的这些材料，才能将缺陷密度减小到可接受的值。

无论采用哪种方法来创建 CMOS/III-V 技术，它都必须包括标准的硅衬底，以控制复杂性和成本。

深宽比捕获

我们的方法结合了深宽比捕获（Aspect ratio trapping, ART——可以将缺陷限制在狭窄沟槽的底部）和纳米脊工程技术（nano-ridge engineering, 这可以实现可用于制造器件的无缺陷 III-V 族材料体积的增加）（请参见图 3）。使用完全兼容 CMOS 的流程对纳米脊进行进一步工艺处理，实现最后的器件（请参见图 4），并最终实现与硅 CMOS 器件的共集成。

这种方法的优势之一是，它无需集成非常厚的缓冲层或者使用昂贵的衬底，就可以实现硅衬底和 III-V 族材料的集成。此外，我们可以利用我们在 CMOS 缩小尺寸和硅 CMOS 背景下开发的 300mm 硅上 III-V 族材料的专业知识。

我们通过在具有双氧化物结构的 300 毫米硅（001）晶圆上生长 III-V 族材料来生产纳米脊（见图 4）。第一 SiO_2 层是 400nm 厚的浅沟槽隔离（STI）模板。

这具有 80nm 宽的窄沟槽图案，底部为具有硅 {111} 面的 V 形沟槽。间距是 800nm。在此之上，我们添加了第二氧化物层，其厚度为 1000nm。工艺处理之后，将在下面的窄沟槽中心形成 600nm 宽的沟槽。

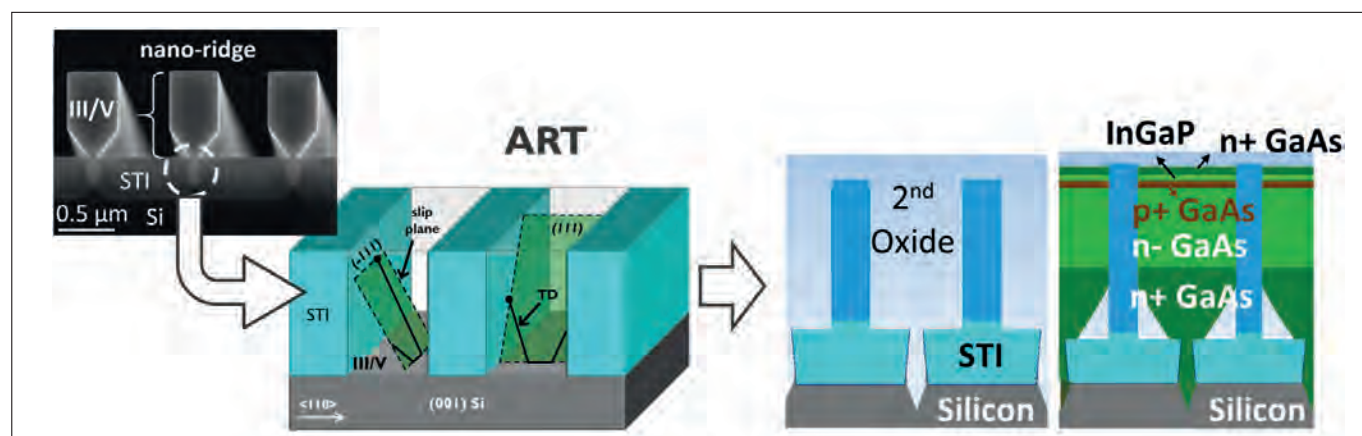


图3. 深宽比捕获（ART）和用于生长纳米脊的纳米脊工程示意性说明。注意，由于ART，穿透位错得以在狭窄的沟槽内被捕获，而在第二氧化物内部生长了相对无缺陷的纳米脊。

使用选择性区域生长，我们将 III-V 族材料沉积在窄沟槽之中。硅与 III-V 族材料之间的大晶格失配会导致缺陷的产生，但由于其高的深宽比，它们被限制在该沟槽的底部。这确保了从窄沟槽中生长出来的材料是没有穿透位错的。

我们的下一步是转向纳米脊工程技术，从而实现纳米脊加宽，以便可以保持 (001) 生长面，从而实现平坦的界面。如果允许纳米脊工程生长自支撑结构，则会导致大的盒状形貌。我们通过添加第二氧化物模板来避免这种情况。一旦纳米脊到达第二氧化物，在器件有源区中的侧壁沉积就会降低。

在工艺完成的 300mm 硅晶圆上生长 III-V 族材料是在低压 MOCVD 反应室中进行的，该反应室使用了用于 III 和 V 族源的标准液体前驱体。通过加入四溴化碳和硅烷来实现掺杂。

注意，除了能够在硅上产生传统的盒状 III-V 族材料生长外，纳米脊工程还可以通过细致调整生长条件来产生不同的形状。这允许在纳米尺度上良好地控制纳米脊的轮廓。

缺陷表征

我们通过分析纳米脊中的缺陷密度来评估了我们方法的有效性。用于检查材料的最常见技术之一是透射电子显微镜。我们使用了称为高角度环形暗场扫描的形式。这种可以揭示沟槽缺陷的技术表明，III-V 族器件堆栈中没有失配位错（见图 5 和图 6）。尽管标准形式的透射电子显微镜在发现缺陷方面提供了更高的精度，但其扫描面积非常小，因此这种形式对于可靠地确定缺陷密度会非常麻烦。

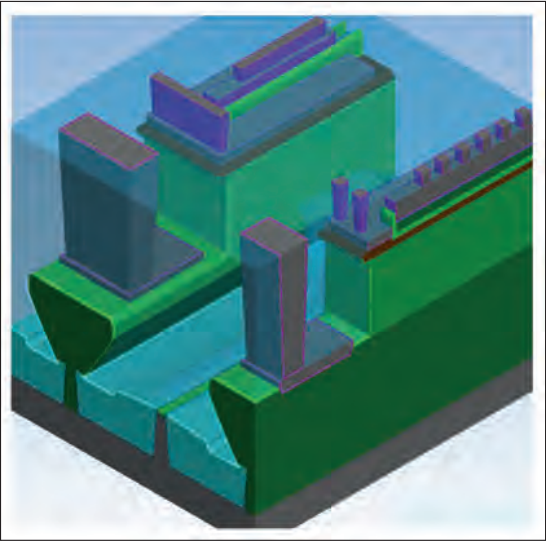


图4. 使用imec开发的CMOS兼容工艺流程，可以将III-V HBT集成在300毫米的硅晶圆上。

检查材料的另一种常用技术是电子通道对比度成像。这是用于生成统计相关数据集的相对较快的选项。使用该技术，我们发现 GaAs 纳米脊

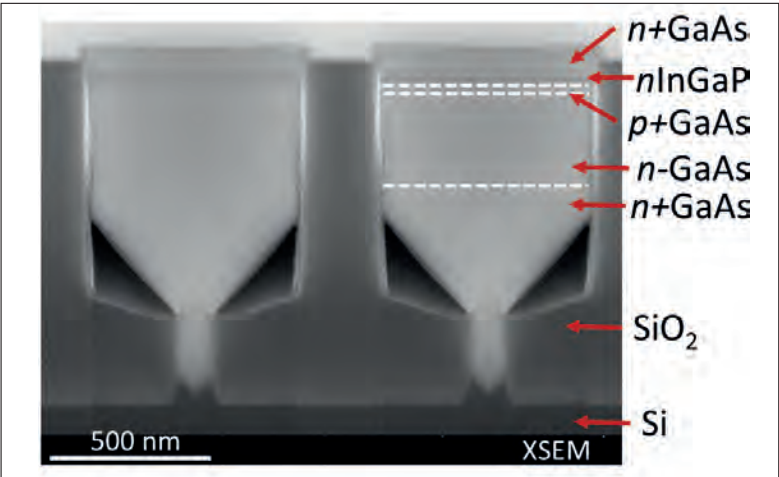


图5. 使用纳米脊技术在300mm硅衬底上生长的GaAs/InGaP纳米脊的截面扫描电子显微镜（XSEM）。请注意，有源器件堆垛内部是没有缺陷的。

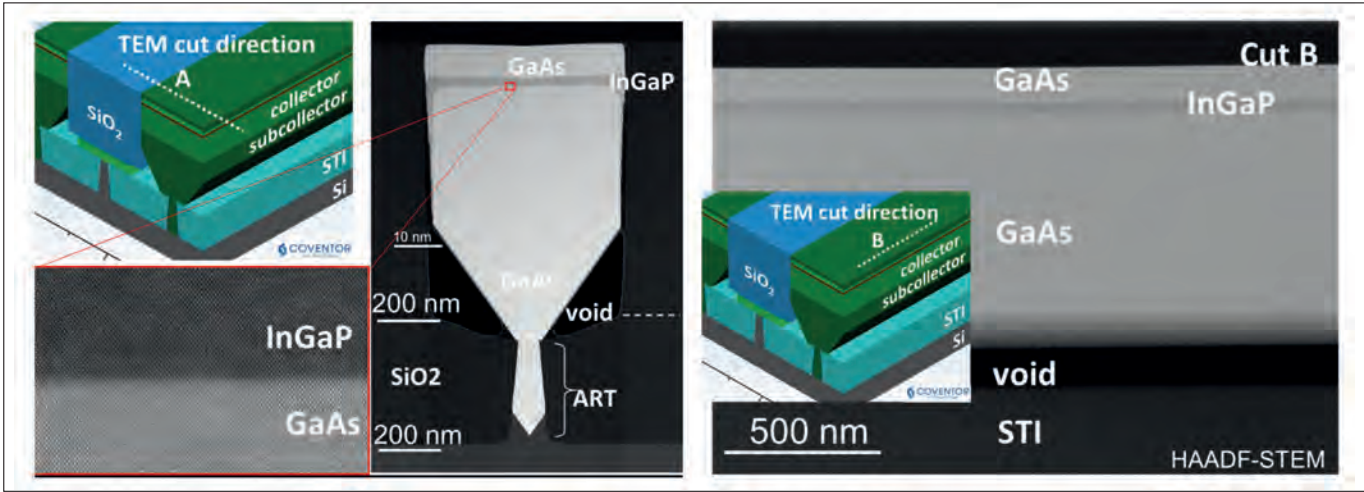


图6. 纳米脊整个宽度上（左）和纳米脊整个长度上（右）的高角度环形暗场扫描透射电子显微镜图像。

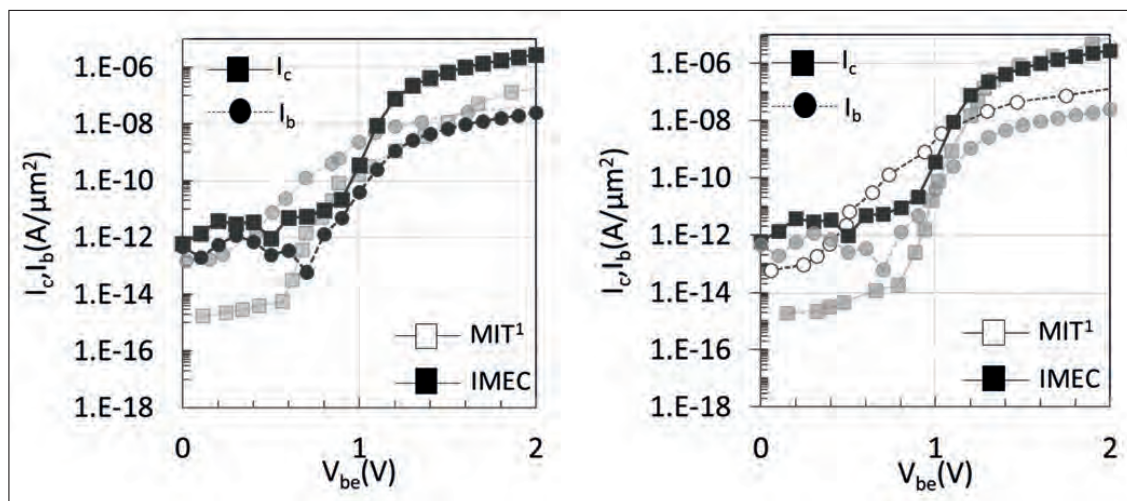


图7. 本项工作中所制造器件与具有应变弛豫缓冲层的参考器件[1] (IEDM2019中展示) 的电学特性 (Gummel图) 的比较。[1]C. Heidelberg et al. Journal of Applied Physics 123 161532 (2018)。

表面的穿透位错密度低于 $3 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ 。由于缺陷密度的值受检查面积的限制, 我们设想 GaAs 纳米脊中的实际穿透位错密度甚至可能低于此值。

基于这一发现, 我们知道了我们的纳米脊中的穿透位错密度足够低, 可以防止其对我们的器件产生重大的影响。

具有不匹配晶格常数的外延系统也可能会有很多面缺陷。我们的方法将这种形式的缺陷捕获在平行于侧壁的 {111} 平面中, 但是当面缺陷垂直于侧壁分布时, 它们有可能最终在器件堆垛中终止。在此, 其密度可能在 $0.14 \mu\text{m}^{-1}$ 至 $0.45 \mu\text{m}^{-1}$ 之间。不过, 好消息是, 由于面缺陷不涉及开放的晶体键或明显的应变场, 因此与位错缺陷相比, 它们对器件性能的影响较小。

300mm 硅上的 HBT

利用我们在硅上生长无缺陷 III-V 族材料层的能力, 我们最近展示了在标准 300mm 硅衬底上的单片集成 GaAs/InGaP HBT。这一成功为制造超越 5G 应用的 InGaAs 基器件奠定了坚实的基础。

我们的突破是基于具有 HBT 特性的 $n\text{-InGaP}/p\text{-GaAs}/n\text{-GaAs}$ 层的堆叠。发射极 - 基极和基极 - 集电极二极管分别显示出约 1.2 和 1.4 的理想因子, 突显了这些结及其形成材料的优异质量。这种结构具有高质量材料的其他证据是直流电流增益超过 110, 集电极和基极之间的击穿电压为 10V。

为了对我们的器件进行基准测试, 我们将其传输特性与在 2 英寸 GaAs 衬底上形成的 HBT 和具有相似缺陷密度的厚应变弛豫缓冲层上形成的相似设计进行了比较 (见图 7)。令人鼓舞的是,

我们的器件优于在厚缓冲器上制造的器件, 其关键特性与在高质量 2 英寸 GaAs 衬底上制造的器件非常相似 (见图 8)。这一发现支持了我们的主张, 即通过 300mm 硅上的纳米脊技术生产的材料, 其质量已经足够使用了, 我们不需要厚应变弛豫缓冲层或昂贵的衬底。

由于我们已有的成功, 我们对我们的技术寄予厚望。它的优势之一在于它展示了 III-V 族材料和硅 CMOS 如何能够结合起来, 从而为 5G 和毫米波应用服务。这可以通过在 300mm 硅衬底上使用 InGaAs HBT 来实现, 这种组合可以在超越 5G 的 RF 应用中得到应用。

我们从混合 III-V/CMOS 技术的初期性能中获得了巨大的信心, 该技术使该器件性能与在高质量 GaAs 衬底上制造的器件可以相媲美, 并且我们希望在纳米脊技术方面做进一步的探索, 以便能够发掘其全部的潜力。

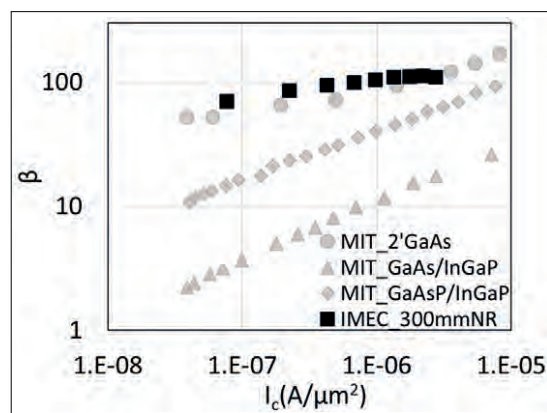


图8. 基于纳米脊工程的GaAs/InGaP堆叠上制造的HBT器件与具有应变弛豫缓冲层的参考器件[1] (在IEDM2019上展示) 的直流电流增益比较。[1]C. Heidelberg et al. Journal of Applied Physics 123 161532 (2018)。

电力电子中采用 GaN 技术有哪些挑战

从硅器件过渡到 GaN 器件，是否具有太多设计挑战的限制？GaN FET 器件太贵了吗？怎样评价 GaN 的性价比、权衡整体系统成本优势？

Philip Zuk, Transphorm 全球技术营销及北美销售副总裁

2012 年，人们期待已久的 600V 以上氮化镓 (GaN) 晶体管终于问世。当时，宽禁带半导体材料已经开始在低压应用中崭露头角，人们期待 GaN 同样可以为高压 (HV) 电力系统贡献其全部的固有优势：

- 更快的开关速度
- 更高的功率密度
- 更好的热性能
- 较低的整体系统成本实现更高功耗效率

但是，时隔七年多，业界关于高压 GaN 技术在市场上终端产品中的可行性仍然存在一些争议。不过，考虑到电力电子市场在采用一项处于成熟早期阶段的技术时，总是持有适当的保守态度，这种谨慎也是可以理解的。

以下是终端产品制造商经常提及的一些常见疑虑。而实际上所有这些疑虑都可以归结为能否

解答一个基本问题：GaN 是否适合他们的设计？

成见 #1 缺少质量和可靠性数据，或者数据不够好

客户对产品和技术的信心源自 GaN 平台的质量和可靠性数据 [Q+R]。鉴于高压 GaN 仍然处于被采用的早期阶段，因此，大部分可用数据都来自于半导体制造商自己生成的产品固有生命周期数据和损耗衰退期数据，这是可以理解的。

而且，诸如 JEDEC[半导体行业] 和 AEC-Q101[汽车行业] 等行业资格标准中，专门针对 GaN 的测试标准尚未完全正式生效，当前可用的资格测试方法是为硅而设计的。因此，尽管 JEDEC 和 AEC-Q101 合格标准可以作为评判某个 GaN 平台 Q+R 数据的重要指标，那些正在评估 GaN 技术的客户依然期望 JEDEC 能够扩展其测

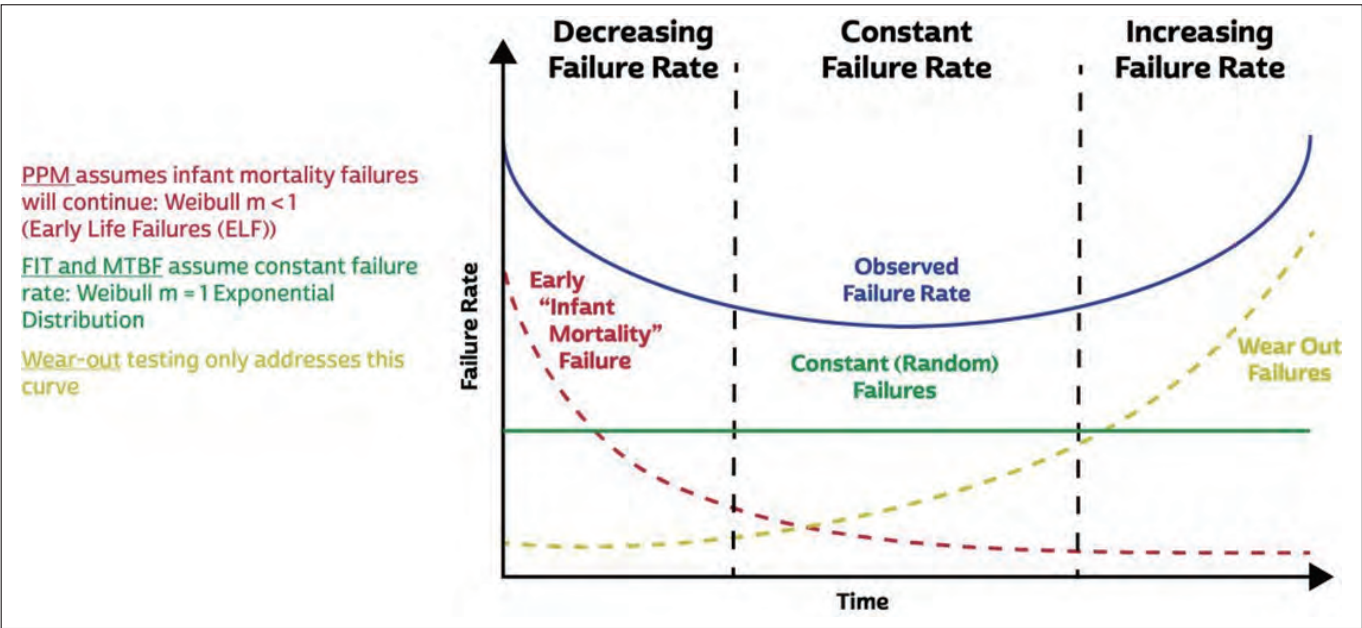
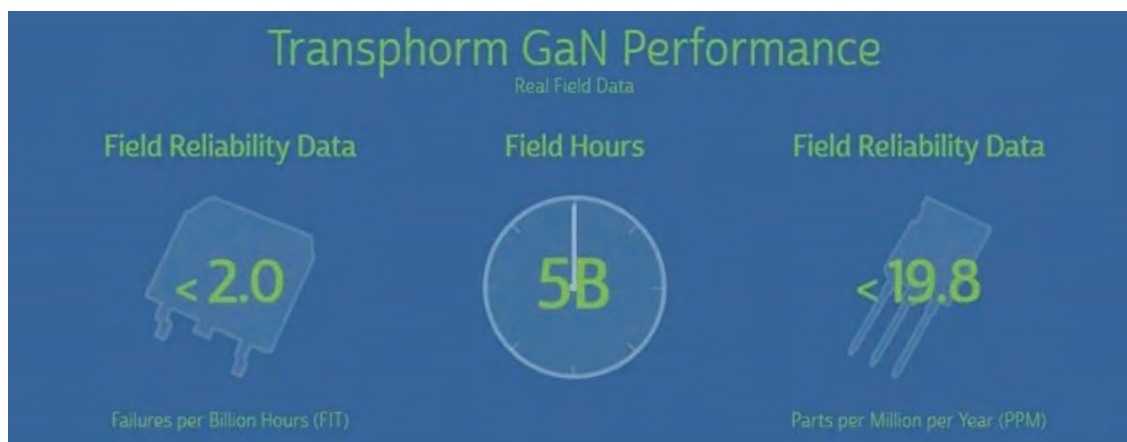


图1. 可靠性浴盆曲线。



Transphorm当前的Q+R数据非常正面

试集,为 GaN 平台建立超出硅的限制设置的阈值。

是的,我们同意上述这些看法——确实,目前还没有完善的 GaN 标准来评判 Q+R 数据,还需要更多的 GaN 验证测试来佐证。不过,与一般看法不同的是,目前是有这些额外的验证测试数据的。

目前,650V 氮化镓器件已经投入生产,并被客户应用到销售的各种产品中。因此,Transphorm 等制造商可以获得非固有的产品生命周期或早期失效 [ELF] 数据以及现场失效率等数据。客户公司可以使用这些数据来了解产品的早期失效率(这些数据通常以单位时间故障率 / FIT、百万分率 /ppm 和缺陷百万分率 /dppm 形式报告),并计算终端产品的保修风险和成本。

总的来说,对客户而言,重要的是了解可靠性浴盆曲线(图 1)中的三个分区,并确保其 GaN 产品供应商能够为所有区域提供所需数据和背景信息,以帮助他们针对其应用设计做出正确的决定。

Transphorm 当前的 Q+R 数据非常正面,根据超过 50 亿小时的现场数据,其产品的现场失效率低于 2 个 FIT,缺陷百万分率 <4dppm。值得注意的是,当前 GaN 技术的现场失效率已经优于更为成熟的碳化硅(SiC)技术报道中低于 5 个 FIT 的现场失效率。[备注:FIT 值越低,说明该技术可靠性越高。]

成见 #2

增强型器件优于双芯片式常关型 GaN FET

当今的高压 GaN 功率转换行业正在推销两种器件:增强型和双芯片式常关型 GaN FET,如图 2 所示。

人们有一种误解,认为在设计中只有增强型器件可行、实用(随着市场上的电力整合,这种看法现在也开始慢慢改变),从而导致人们对哪种器件才适合某个特定的产品感到困惑。在这一点上,终端产品制造商需要花点时间评估一下 GaN 技术的价值观点,并在考虑这些不同的晶体管类型的情况下,重新对它们进行评估。

氮化镓一个已知的优点是开关速度比传统硅器件快,同时,它还可以帮助消除一个产生损耗的组件,特别是在一种无桥式图腾柱功率因数校正配置的桥式整流器,这种优势更为明显。这通常会带来更高的效率,从而实现更小的系统尺寸,并降低总体系统成本。

是的,增强型 GaN 是一种单芯片式常关型器件。但是,为了让增强型 GaN 晶体管在所有工作模式下都正常工作,需要很多无源组件的支持,有时还需要有源器件(如 MOSFET)。驱动增强型器件需要额外的栅极电路、保护和启动电路,将增加出现故障的机会,这与它被公认的简单性背道而驰。

相较之下,双芯片式常关型 GaN FET 则没有同样的要求。它需要的外部组件数量很少,并且可以配合现成的驱动器使用,从而将复杂性和相关成本降到最低。

还有一点需要注意的是,现在的很多增强型器件只有表面贴装这一种类型的封装。当然,这些封装都可以找到相应的应用场合。但是,随着功率等级的提高,这将带来新的设计和散热问题,因为大功率应用中需要并联使用多个增强型器件,从而增加器件和印刷电路板(PCB)实体的成本。在评定供电设备的大批量可制造性时,增强型器件的封装问题有时会造成一些麻烦,这一点在决

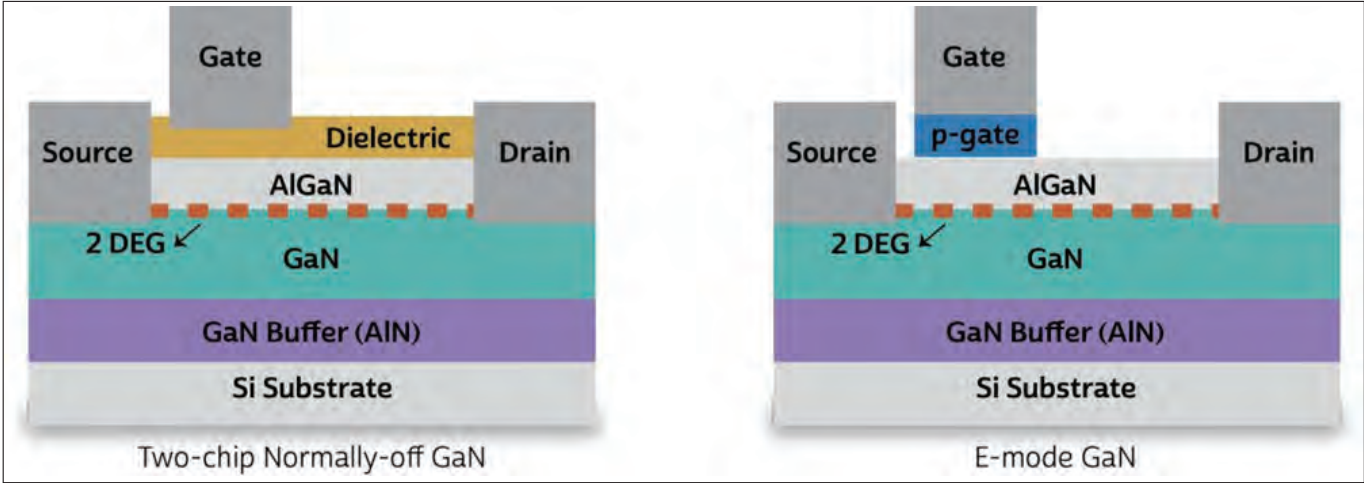


图2. 双芯片式常关型GaN FET与增强型GaN器件的物理结构。

定要使用的 GaN 器件的类型时应该予以考虑。另外，双芯片式常关型 GaN FET 器件还可以设计成标准 3 引脚形式的 TO-XXX 封装或表面贴装封装形式（用于低功率和高板级组装密度应用）。TO-XXX 封装在元器件市场众所周知，已经使用了数十年之久。它易于安装，散热方便，而且单个器件便可以应用在高达数千瓦等级的应用中。

成见 #3
太多设计挑战的限制

在物理结构上，高压 GaN FET 与硅晶体管不同。硅 FET 是垂直结构，而 GaN FET 为横向结构。在开关速度上，GaN 器件比硅器件更快，能在 MHz 频率运行（已经使用在 RF 器件上）。而且，对于许多终端产品制造商而言，数字控制的 AC-DC 拓扑，例如无桥图腾柱 PFC，正是 GaN 可以发挥其最大价值的地方。所以，没错，刚开始从硅器件过渡到 GaN 器件时可能会有学习曲线。但是，请你将以下几点牢记在心。第一，高压氮化镓器件制造商不断发布参考设计、应用注释、白皮书、培训视频等资源填补知识缺口。其次，像 Transphorm（一家目前正在生产第四代 GaN FET 的公司）这样的制造商，正在根据客户设计和现场应用经验稳步地改进 GaN 平台，以降低设计复杂性。简而言之，GaN 技术仍在不断进步，我们已踏上技术创新的征程，未来必将走得更远。第二，人们存在一种误解，认为电磁干扰（EMI）和斜率控制等设计考量不再非常重要。高压 GaN 器件确实具有更高的电子迁移率（大约是硅的 1.5 倍，SiC 的 2 倍），所以其开关速度更快，上升时间更短。因此，更要特别注意 PCB 布局以管理噪

声干扰。不过，现在有经证明行之有效的 PCB 设计指南，为快速启动开发打下了坚实的基础（参见图 3）。

相应地，斜率控制可以使开关器件的性能达到所需的 EMI 抑制要求。尽管大多数人存在刻板的成见，但是，所有 GaN 技术版本都可以实现斜率控制。举例来说，事实证明双芯片式常关型 GaN FET 在 di/dt (A/ns) 和 dv/dt (V/ns) 等参数亦可向下实现近似于高压硅 MOSFET 的速度。

第三，人们还存在一个误解，认为 GaN 产品开发的安全裕量无法超过 1.7V 的阈值，栅极驱动电压的稳定性水平也仅有 1V-3V 的空间。可是，经实际验证，双芯片式常关型 GaN FET 的阈值电压最大可到 4V，栅极驱动电压稳定性空间的最大裕量可达到 ± 20 V，能够像已有数十年历史 Q+R 数据的低压 MOSFET 那样实现所有控制功能——降低系统的整体灵敏度，给设计工程师提供了可在其中进行操作的更大安全空间。

下转第37页

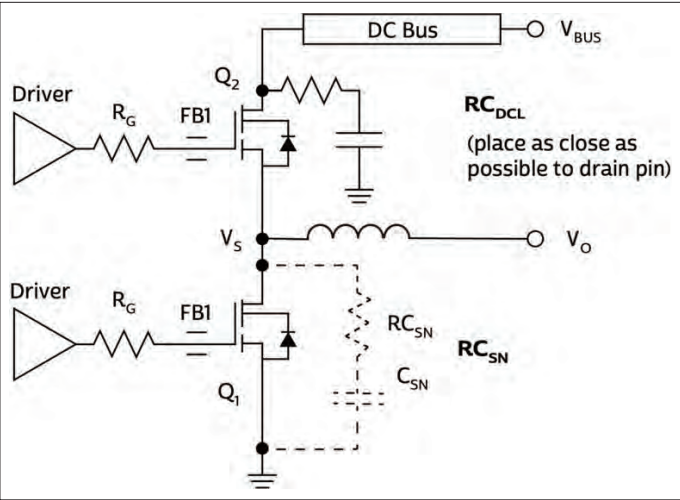


图3.使用GaN FET的半桥开关电路，展示了一种最小化EMI的方法。



混合生长有望实现性能更高的激光二极管

通过远程等离子体 CVD 加入隧道结，将实现更高功率，更高效率的 GaN 激光器。

Josh Brown, Brad Siskavich, Ian Mann; BLUGLASS

高亮度 GaN 基激光器的发展打开了令人兴奋的全新应用的大门。这类激光器已开始用于工业焊接，生物技术流式细胞仪，显示器，以及普通和汽车照明。预期未来几年内在这些领域的销售将大幅增长。

为了将巨大商业的成功从希望变为现实，这些激光器的光学性能和能量转换必须加以改善。需要努力的方向包括：扩展其光谱范围，增加其功率，并提高其效率和亮度。

位于澳大利亚 Silverwater 的 BluGlass 有限公司，我们拥有一项应对前述这许多挑战的新颖技术——低温、无氨的 GaN 沉积。它是一种基于远程等离子体 CVD 的补充生长方法，与传统的仅使用 MOCVD 的工艺相比，它为激光二极管制造商提供了性能和成本优势。为了确保该技术具有商业影响力，2019 年 10 月，我们启动了激光二极管业务，利用我们独特的远程等离子体 CVD 生长平台来制造高亮度的 GaN 激光器。

在激光二极管的生长过程中，远程等离子体 CVD 提供了一种“生长即激活”(active-as-grown)的埋入式 p-GaN 技术。它可以实现高性能隧道结的生产，而无需进行生长后的退火来激活镁受主。

最初，我们开发了用于 LED 的“生长即激活”隧道结，但现在它们已应用到了独特的激光二极管设计中。我们希望，这项技术将有助于弥合这两种光电器件在转换效率上的巨大差距——在最先进的 GaN 基激光二极管中，转换效率仅为 40% 左右，相比之下，GaN 基 LED 的转换效率则达到将近 90%。

p 掺杂的问题

激光二极管转换效率低的原因很多。相当一部分涉及到 GaN 和 AlGaIn 中 p 型镁掺杂层中镁受主的高激活能。由于约 170meV 的激活能，通常只有 1% 的镁原子对于自由空

Layer	Thickness (nm)	Doping (cm ⁻³)	Composition	Absorption Coefficient (cm ⁻¹)	Optical Loss (cm ⁻¹)
p++ contact	20	1.5E20	GaN	375	0
p-AlGaIn cladding	500	1.0E20	Al _{0.08} Ga _{0.92} In	250	18.8
p-WG	100	2.0E19	GaN	50	11.9
EBL	12	1.5E20	Al _{0.2} Ga _{0.8} In	375	14.7
2x InGaIn/GaN MQW	2.7 / 9.0	-5.0E16	In _{0.11} Ga _{0.89} In/GaN	12	1.4
n-WG	100	-2.0E17	GaN	12	4.0
n-AlGaIn cladding	1000	-3.0E18	Al _{0.067} Ga _{0.933} In	12	2.2

穴浓度有贡献。因此，为了制造可行的器件，必须提高 *p* 型层中的镁掺杂水平——它们通常比 *n* 型层中的硅掺杂高 100 倍。

在外延层中加入这么多的镁并不是最理想的。这会导致空穴迁移率低，电阻率高和光损耗高——而这些会最终降低激光二极管的转换效率。光学损耗发生在 *p* 侧，在 *p*-AlGaIn 包覆层中最为严重。为了确保将光学模式限制在有源区和波导层内，该包覆层必须具有相对较低的折射率。然而，这仍然不能防止部分光学模式与 *p* 掺杂的 AlGaIn 层重叠。由于该层中的镁含量很高，因此吸收系数非常高，通常超过 100cm⁻¹，而这在此类激光器的总光学损耗中占了很大的比例。

p 型电阻损耗来自 *p*-AlGaIn 包覆层中串联电阻和高的 *p* 侧接触电阻的叠加。当以远高于激光阈值的工作电流密度驱动该器件时，这些加在一起最多可以占到功耗的 50%。这些损失通常表现为焦耳热的形式。

神奇的隧道结

我们能够利用一种技术来解决 GaN 基激光二极管的光学和电阻损耗，该技术可避免与 GaN 的 *p* 掺杂相关的问题。我们利用以前的成功经验，使用远程等离子体 CVD，通过该方法我们生长了级联 LED 的生长即激活的隧道结，有效接解决了 LED 效率下降的问题。现在，我们正在将该技术应用用于激光二极管。在这些器件中，我们将 *p* 型金属欧姆接触替换为低电阻率的 *n* 型欧姆接触，实现了 GaN 基隧道结，从而提供了 *n* 型和 *p* 型区域之间的转换。这种设计消除了困扰着传统激光二极管的高 *p* 侧接触电阻问题。

采用这种方法，*p*-AlGaIn 包覆层中的光学和

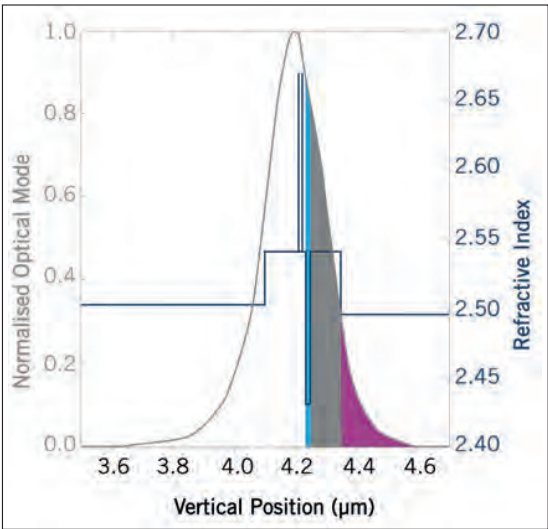


图1. (a) (上部图)无隧道结的标准激光二极管的结构，(b) (下部图)归一化的光学模式和折射率分布。

电阻损耗仍然存在。为了解决这个问题，隧道结必须位于结构内部更深的位置——需要将其移至 *p*-AlGaIn 包覆层之内甚至之下。这样做可以用电阻低得多的 *n*-AlGaIn 代替高电阻的 *p*-AlGaIn 包覆层。由于较低的硅掺杂要求，这会反过来降低光吸收系数。

在设计隧道结和选择其位置时需要格外小心。该层的位置必须是让加入该层产生的额外光损耗，能够使用 *n* 型层替代那些 *p* 型层所产生的显著光损耗降低来弥补。另外，至关重要的是，要确保隧道结中的电阻足够低，能够通过串联和接触电阻的降低来抵消。只有满足这两个标准，隧道结激光二极管才能为提高 GaN 基激光器的转换效率提供可行的解决方案。

我们已经研究了隧道结的结构和位置是如何影响激光二极管中的光损耗。为此，我们模拟了各种激光二极管结构（有关设计和所使用的吸收系数的详细信息，请参见图 1 (a)）。这包括折射率分布和光学模式分布的计算。对于这些模拟，

Layer	Thickness (nm)	Doping (cm ⁻³)	Composition	Absorption Coefficient (cm ⁻¹)
n++ contact	20	1.5E20	GaN	375
n-AlGaIn cladding	500	5.0E18	Al _{0.08} Ga _{0.92} In	125
n++	30	2.5E20	GaN	627.5
p++	10	1.0E20	GaN	250
p-WG	60	2.0E19	GaN	50
EBL	12	1.5E20	Al _{0.2} Ga _{0.8} In	375
2x InGaIn/GaN MQW	2.7 / 9.0	-5.0E16	In _{0.11} Ga _{0.89} In/GaN	12
n-WG	100	-2.0E17	GaN	12
n-AlGaIn cladding	1000	-3.0E18	Al _{0.067} Ga _{0.933} In	12

图2. (a) (上部图) 隧道结激光二极管结构，(b) (下部图) 总的光损耗作为隧道结n++层中厚度和硅掺杂水平的函数。

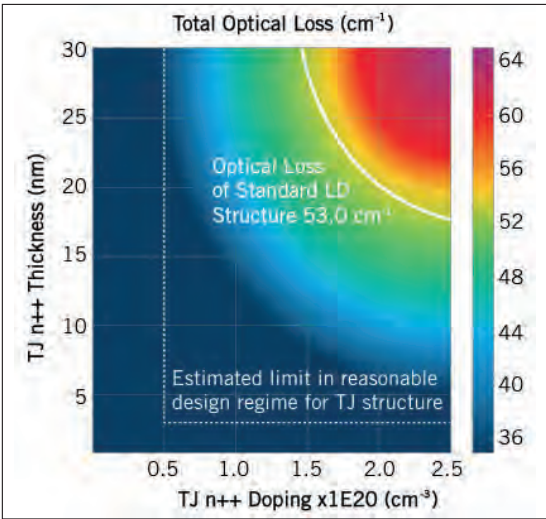


图3. 蓝宝石结构上的标准MOCVD生长的激光二极管。

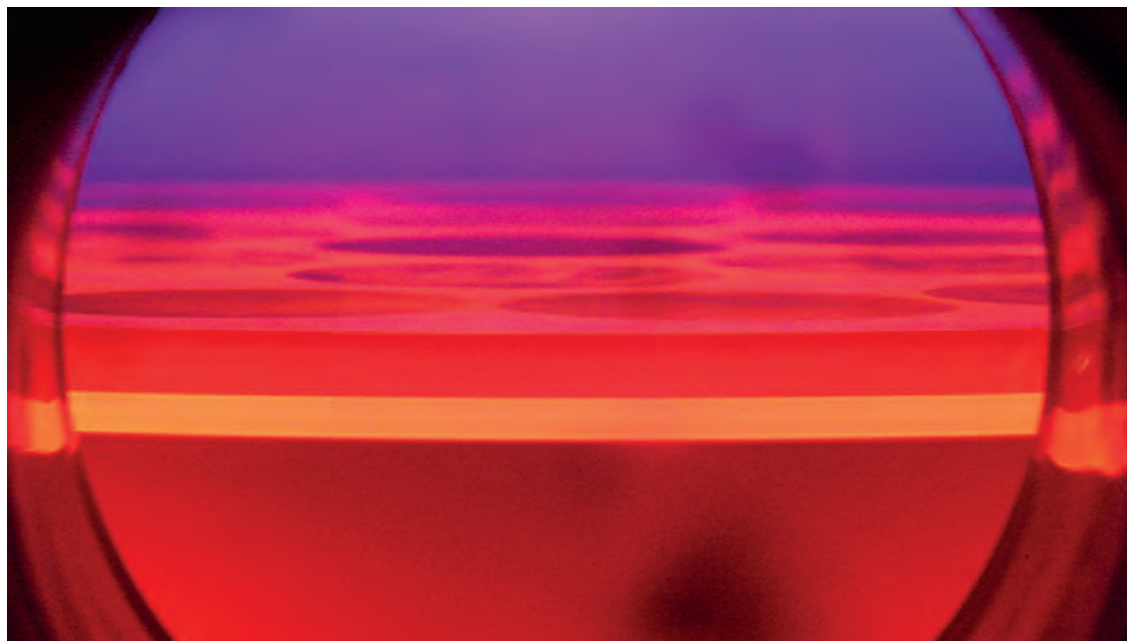
n 型层和 p 型层的吸收系数的值基于基准的掺杂

水平。结果表明，总光损耗的很大一部分（超过 80%）与器件的 p 侧相关（请参见图 1 (b)）。电子阻挡层，p 型波导和 p 包覆层的损耗很高。

有了这个基准以后，我们就对包含隧道结的激光二极管重复了上述模拟（有关设计的详细信息，请参见图 2 (a)）。它具有相同的基本结构，但具有：p 型波导顶部的隧道结；不采用 p 型 AlGaIn 包覆层和重掺杂的 p 型接触层，而是采用 n 型 AlGaIn 包覆层和重掺杂的 n 型接触层。

其中一个模拟我们考虑了总的光损耗作为隧道结的重掺杂 n 型层中层厚度和硅掺杂水平的函数（见图 2 (b)）。不出所料，更大的损耗来自更厚、更重掺杂的隧道结。此图中包括的一条白色轮廓线，它对应于无隧道结的标准激光二极管的总的

Layer	Thickness (nm)	Doping (cm ⁻³)	Composition
p++ contact	20	1.5E20	GaN
p-AlGaIn cladding	500	1.0E20	Al _{0.084} Ga _{0.916} In
p-WG	105	2.0E19	GaN
EBL	12	1.5E20	Al _{0.2} Ga _{0.8} In
3x InGaIn/GaN MQW	3.0 / 6.5	-5.0E16	InGaIn/GaN
n-WG	110	-2.0E17	GaN
n-AlGaIn cladding	1500	-3.0E18	Al _{0.068} Ga _{0.932} In
n-GaN	2800	-1.0E19	GaN
Buffer	3900	-	GaN
Sapphire Substrate			



生长过程中远程等离子体CVD反应室的内部，显示出活性氮的气氛。

光损耗。如果有隧道结的器件想要成功，那么它们的总的光损耗必须低于此值。

该模拟提供了隧道结重掺杂 n 型层中，掺杂上限的估计，以及可以容忍的厚度，以确保此类激光器的光损耗能够净减少。在该图中，白色虚线提供了对重掺杂 n 型层中厚度和掺杂值下限的估计，以实现合理的隧穿行为。

工作器件

为了将这些模拟进行测试，我们在蓝宝石衬底上制造了激光二极管。使用 MOCVD，我们生产的激光器的结构类似于图 1 所示的结构，如图 3 所示。

通过与新墨西哥大学的研究人员合作，我们已经能够将我们的外延晶圆加工成脊形波导激光二极管。脉冲测量揭示了该器件的输出、外加电压和驱动电流之间的关系（见图 4）。这些激光器发出 397nm 的光，从腔面产生高达 155mW 的输出功率。通过进一步优化 p-AlGaIn 包覆层，可以改善运行这些器件所需的电压。

我们下一步要做的就是这些激光二极管中集成通过远程等离子 CVD 生长的隧道结，并观察其是否通过减少光损耗和器件电阻从而提高了器件的性能。我们热切期望了解，如果可以在重掺杂 n 型层中以足够低的掺杂和 / 或厚度来生长隧道结，从而与我们的参考文献相比，是否能够大幅度净减少光损耗。我们还想发现，增加隧道结是否只会导致驱动电压的小幅增加。

为了优化激光二极管的隧道结，我们首先通过远程等离子体 CVD 在商业来源的蓝色 LED 上生长它们。对于电流扩展层，我们使用了顶部的 n 掺杂 GaN 层，而不是铟锡氧化物 ITO（有关该器件的示意图，请参见图 5 (a)）。对具有不同形式隧道结的工艺后和封装后器件组合进行的测量表明，总体而言，掺杂水平较高的隧道结在工作期间产生的压降较小（请参见图 6 (a)）。请注意，所有器件的光输出都是相似的。

我们已经模拟了具有所有这些形式隧道结的激光器的总的光损耗（见图 6(c)）。令人鼓舞的是，具有隧道结且驱动电压增幅最小的激光器的总的光损耗为 47.9cm^{-1} ——刚好在代表无隧道结的标准激光二极管的总的光损耗的轮廓线之下。这是

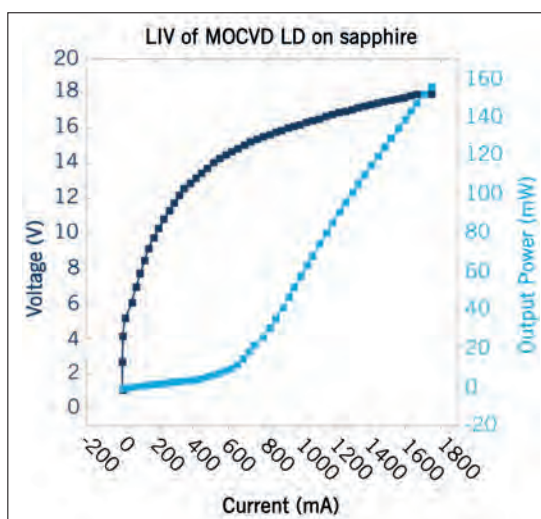


图4. 在蓝宝石衬底上MOCVD生长的激光二极管的光输出-电流-电压的测量结果。

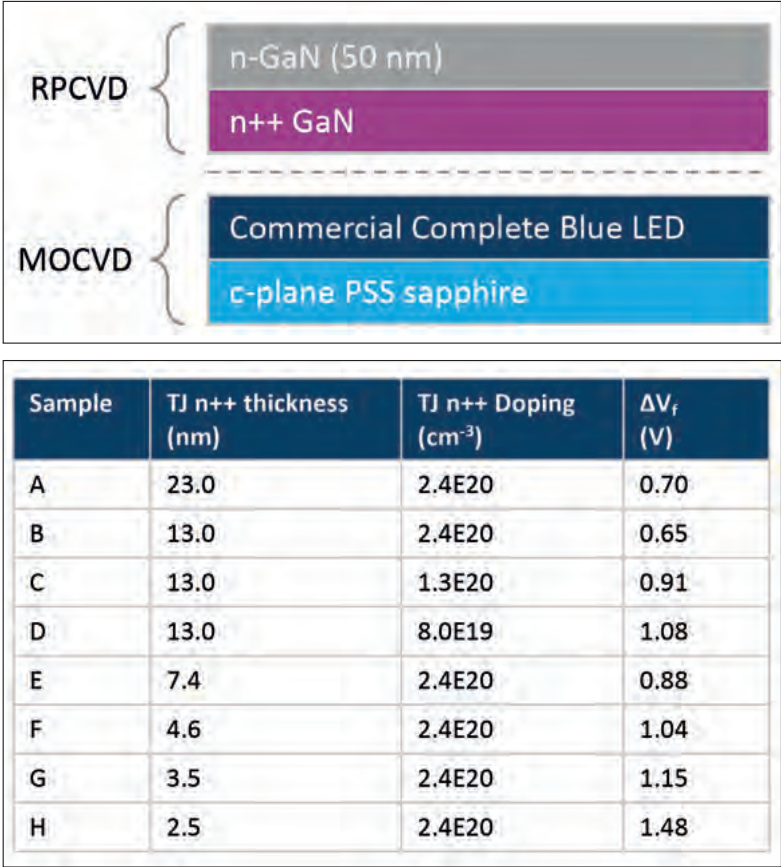


图5. (a) 混合MOCVD/远程等离子体CVD的隧道结结构， (b) 用于优化激光二极管应用的隧道结n++参数表。表中最后一列的 ΔV_f 是指隧道结LED相比使用ITO的参考LED，其正向电压 V_f 的差。

一个至关重要的发现，因为它揭示出具有采用远程等离子体 CVD 生长的隧道结，并且经过优化以使驱动电压的增幅最低的激光二极管，可以实现总的光损耗的净减少。由于用 *n* 型包覆层和 *n* 型接触层代替了 *p* 型包覆层和 *p* 型接触层，这些器件的串联电阻和接触电阻降低了，这为改进器件铺平了道路。

基于这一发现以及我们对无隧道结且通过 MOCVD 形成的激光二极管的激光行为的演示，

我们最近通过结合 MOCVD 和远程等离子体 CVD 生长了具有隧道结的激光器。这些完全在我们工厂内生长的器件，采用了 *c* 平面自支撑 GaN 衬底。在其上，我们先通过 MOCVD 将外延层生长到重 *p* 型隧道结层，然后再通过远程等离子 CVD 添加其余的层 (有关该器件的示意图，请参见图 7 (a))。

新墨西哥大学的合作者已经将我们的结构加工成了脊形波导激光器。这些器件的测试尚处于初期阶段。当以脉冲模式驱动激光器时，我们确实获得了电流 - 电压特性的结果。需要进一步开发以完全表征这些器件的光输出，但是初步结果令人鼓舞，激光器在高达 20.5kAcm⁻² 的条件下，仍表现出正常的二极管性能而无击穿现象 (见图 7b)。

解锁机遇

我们开发隧道结激光二极管技术的工作将继续进行，目标是释放跨多个波长和功率水平的新型 GaN 激光二极管设计的潜力，从而使此类器件可以满足多种应用。我们有一个良好的开端，因为我们的初步结果证明，通过远程等离子 CVD 隧道结实现的无 *p*-AlGa*N* 激光二极管结构，有很好的前景来通过降低光损耗以及降低串联和接触电阻，从而提供改进的器件性能。

请注意，不单单我们在研究利用激光二极管中隧道结的优势。NUSOD 的创始人兼总裁 Joachim Piprek 计算得出，通过增加隧道结，转换效率可以从 30% 提高到 60%。但是，他也报告说，由于与隧道结中高掺杂层相关的额外光学损耗，潜在的改善受到了限制。

如前所示，我们可以克服此限制。通过适当地控制隧道结的 n++ 层中的掺杂和厚度，我们可以生产出低损耗的隧道结激光器结构，与标准激

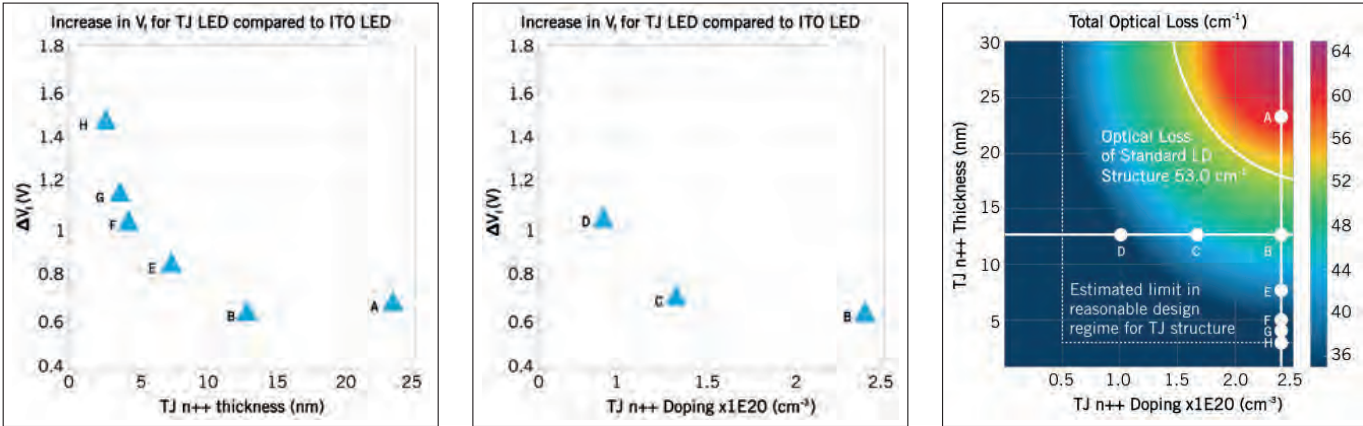


图6. (a) 和采用ITO的参考LED比较，隧道结n++掺杂为 $2.4 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 和不同n++厚度的隧道结LED的 ΔV_f ， (b) n++厚度为13nm和不同掺杂水平的隧道结LED的 ΔV_f 。 (c) 采用与所测试LED上相同隧道结结构的隧道结激光二极管的模拟光损耗的位置。

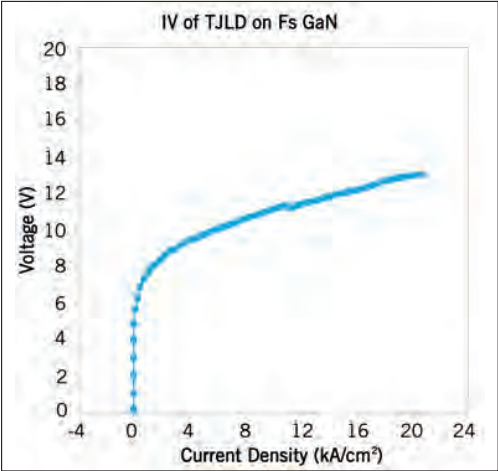
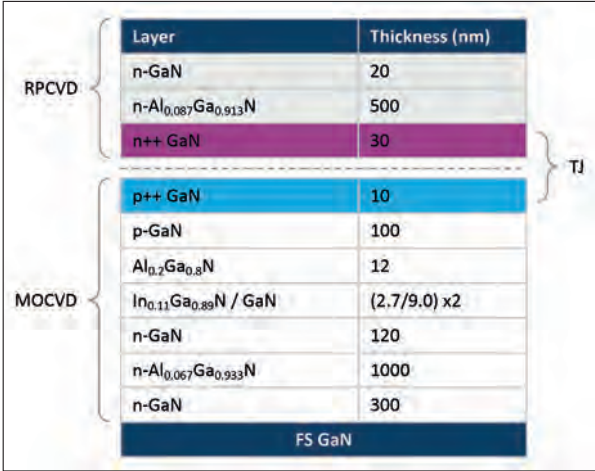


图7. (a) 隧道结激光二极管结构，(b) 工艺后激光二极管的光输出-电流-电压数据。

光器相比，该激光器结构的总光学损耗可以实现净减少。我们有望减少焦耳热损耗和光学损耗，从而提高 GaN 激光二极管的转换效率。这是我们的目标，因此我们将继续为现有客户提供定制解决方案来改善激光二极管的性能，并开始与新的激光二极管开发商合作，以便市场将来能够受益于通过远程等离子体 CVD 所生长隧道结的高亮度器件的可用性。☞

扩展阅读

扩展阅读

S. Barik et al. "Remote plasma chemical vapour deposition of group III-nitride tunnel junctions for LED applications," Light. Devices, Mater.

Appl., M. Strassburg, J. K. Kim, and M. R. Krames, Eds., 44, SPIE (2019). Piprek, J., "What is to blame for the low efficiency of GaN-based lasers?" , Compound Semiconductor, July 2017, pp. 35–38

上接第31页

成见 #4 GaN FET 太贵了

如今，实践已经证明，高压 GaN 可以有效地应用在 1.5 千瓦以上功耗范围内的电源系统中。而且，随着技术的发展和价格的降低，它的应用范围可以下探至 100 瓦以下。市场上的终端产品表明，GaN 的优势在于功耗效率、性能和功率密度显著提升，系统尺寸减小，热管理更出色，等等。

但是，为了在所有潜在的应用市场（尤其是出货量像适配器那样大的市场）与硅展开全面竞争，GaN 解决方案必须具备成本效益。而且，直接进行对比的话，今天的 GaN 器件的成本仍然满足不了硅晶体管的定价要求。但是，Transphorm 的最新第四代 GaN 平台在成本方面取得了重大进展。此外，在评估 GaN 的投资回报 (ROI) 时，需要考虑更广阔的发展前景。

硅器件具有很高的性价比，这一点毫无争议。除非客户期望的价值观点不在性价比上，否则，在较低功率的应用中（比如 1.5 千瓦以下的传统模拟控制系统），用 GaN 替代硅没有吸引力，也不实用。

但是，随着未来几年内 GaN 价格的不断降

低，它在上述较低功率应用中的可行性会不断提高。特别是与更为熟知的拓扑（比如连续导通模式 [CCM] 标准 PFC 升压电路，准谐振反激电路或者其它一般的单端电路）一起使用时更是如此。而且，正如许多已经量产的客户设计所证明的那样，在较高功率应用中，与基于硅器件的类似设计相比，当使用 GaN 器件时，具备系统电路需求的减少、进而降低总体系统成本的优势。

总结

综上所述，高压 GaN 功率转换技术仍然处于其成熟的早期阶段，因此，在未来几年乃至数十年时间内，它仍有很大的创新和优化空间——每一天都在解决设计挑战，今日发售的新产品都胜过上一代。

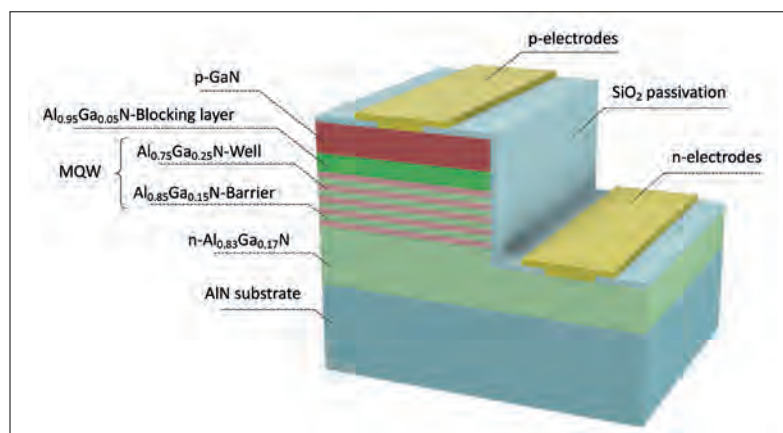
大体量的功率半导体公司都进入了这个市场，完整的验证数据——包括实际现场应用失效率——不仅都能得到，而且数据结果很正向。不要陷入成见之中，以上发生的种种证明了一个简单的事实，即高压 GaN 的时代已经到来，并将拥有一个非常光明的未来。☞

使用寿命更长的 UVC LED

氧杂质含量的降低被认为是促成 UVC LED 寿命大幅增加的幕后原因

日本旭化成 (Asahi Kasei) 公司和美国 Crystal IS 公司的工程师宣称，他们已经为短波紫外线发光二极管 (UVC LED) 的寿命设立了新的标杆。此项合作取得的成果是：对于具有 230nm 至 237nm 发射波长的器件，当以 20mA 电流驱动时，使用寿命可长达 3600 小时。

来自旭化成公司的研究小组发言人 Akira Yoshikawa 认为：“对于氮氧化物气体感测等实际应用来说，这种 [寿命] 是相当重要的。”



阳极有所改善且氧杂质含量低的 LED 兼具前所未有的效率和长寿命。

该研究取得的另一项突破是电光转换效率再创新高，这得益于内量子效率的提升。

Yoshikawa 和同事们推测，他们的 UVC LED 寿命的增加是源自富铝氮化层中氧杂质含量的下降。在高电流密度下，这些杂质会产生移动的能量消耗点缺陷，因而导致器件性能劣化。

从 Emore MOCVD 反应器改换为 Aixtron 紧密耦合喷淋头设计，这是导致外延层中氧杂质含量减低的部分原因。而且，后者还改善了再现性。Yoshikawa 说：“然而，我们发现，至关重要的是，氧杂质浓度还取决于生长条件以及金属有机源材料的纯度。”

该研究还取得一个额外的成功，就是降低了正向电压（在 100mA 电流下，其仅为 6.3 V，远低于此前 9 V 或更高的文献报道值），这有助于提高 UVC LED 的效率。这种进步源于优化快速热退火工艺和调整用于 n 型触点的两种常见金属的

比率。该研究小组发现，铝的厚度应为金的三倍，以制作具有一个 Ti/Al/Ni/Au 叠层的最佳阳极。

这支研究小组开发的器件是针对 UVC LED 的相对传统的设计。这些器件在 Crystal IS 制作的单晶 AlN 衬底上生产，它们具有 5 个量子阱、1 个电子阻挡层和 1 个 p 型 GaN 触点（见图）。

通过使用横截面高角度环形暗场扫描电子显微镜仔细观察器件结构，研究人员发现：在所有的层之间存在突变界面，而且没有位错（即使在 p 型触点中也不例外）。研究小组将无位错归因于在低缺陷 AlN 衬底上进行伪同晶生长。

LED 外量子效率的测量是在厚度减薄至 100μm、并采用倒装式芯片封装技术内置于具有紫外光透明石英盖的表面贴装型器件中的芯片上进行的。

采用 40μs 脉冲来驱动这些封装型器件，以避免出现自发热决定的 0.42%、0.36%、0.28% 和 0.21% 的外量子效率（对于驱动电流为 100mA、发光波长为 237nm、235nm、233nm 和 230nm 的 LED）。对应的输出功率分别为 22mW、1.9mW、1.5mW 和 1.2mW。

对 20 个以 20mA 电流驱动的封装型 LED 进行的研究显示：在工作了 3600 小时之后，输出功率的降幅在 20% 至 40% 之间。需要注意的是，上述数值忽略了最初 46 个小时（这是商用 LED 的典型预烧期）里 10% 的初始功率减幅。

该研究小组的目标是提高取光效率，并了解更短波长的 LED 能否提供有用的辐照度。对于 240nm 或更短波长的 LED 而言，一个重大的挑战是实现高的取光效率，这是因为光的偏振往往导致光子的传播方向与芯片的表面平行。

Yoshikawa 表示：“我们正在用提取来自边缘的 UVC 发射作为一种检验方法，它也许能让我们显著地提高光强度。”

参考文献

A. Yoshikawa et al. Appl. Phys. Express 13 022001(2020)

解密二维材料中的混乱无序

美国的研究人员对二维 (2D) 材料中的混乱无序进行了量化，以打造性能更好的量子、光学和电子器件。

下一波的量子、光学和电子器件将由功能强大的二维材料构建。这些材料可以在室温下承载运行量子比特 (qubit)，从而使固态量子技术在根本上比传统的量子技术更加强大。

但是，它们有一个弱点。与 3D 系统不同，在 3D 系统中，几乎所有的原子都不会受到环境的影响，而 2D 材料则暴露在自然环境中，并且容易受到来自附近材料或空气中化学物质的外部交互影响。这些交互影响实际上能够改变系统的原子排列。

如果研究人员打算用二维材料制造新型器件，他们就必需了解它们的原子在哪里，以及微小的缺陷如何改变其材料和电子特性。

哈佛大学约翰·保尔森工程与应用科学学院 (SEAS)、加利福尼亚大学洛杉矶分校和橡树岭国家实验室的研究人员已经结合实验和理论技术来测量二维过渡金属双硫分子配合物材料中所有原子的原子位置，并计算该排列如何影响系统各个不同区域的电子特性。

此项研究的相关成果发表在《自然材料》(Nature Materials) 杂志上。

研究人员发现材料远非完美，原子不断地错位、丢失或被其他东西所取代。

SEAS 的 NarangLab 研究生、该论文的合著者 Christopher Ciccarino 说：“虽然丢失的原子和被取代的原子会改变局部相互作用和原子组态是有道理的，但是，如果要回答‘改变的幅度是多少？’这个问题则并不容易。”

通过与加州大学洛杉矶分校 (UCLA) 物理与天文学系教授 John Miao 合作，研究人员使用高性能的扫描电子显微镜来测量单个原子的精确位置以及相对于二维薄片的不同角度的图像原子组态。

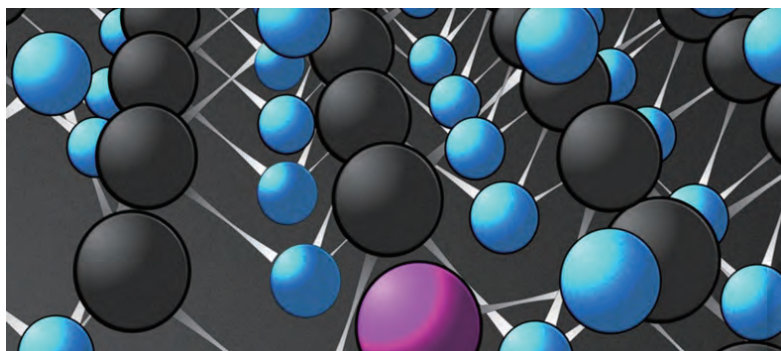
在确定了这些位置之后，研究团队分析了晶格，以了解缺陷是如何在其属性中起作用的。

SEAS 计算材料科学助理教授、该论文的合著者 Prineha Narang 说：“晶格内的缺陷造成了局部混乱无序和不规则性。即使在缩小时，空缺和缺陷的聚集似乎也会对混乱无序起到推波助澜的作用。特别是，二维片材并不是真正的二维，而是在第三

维度上存在着长距离的涟漪。”

Ciccarino 说：“我们看到的是这些想像上的二维片材，它们倾向于使用此第三维度，而不是保持完美的平坦度。然后考虑这将如何影响材料的观察特性是很有趣的。”研究人员发现，局部无序会对二维材料的电子和光学特性产生显著的影响，包括在材料发光效率方面造成的巨大影响。

Narang 说：“理论家通常必须对他们的系统做出一些假设，以便与实验结果进行比较。这里，我们处于一种独特而令人兴奋的情况下，我们可以将



自己的方法与用实验方法计算的坐标直接相交。对原子无序和与环境的交互作用进行直接定量分析，这可能是一种充分了解这些材料的性质和潜力的宝贵技术。”

这项研究得到了美国国防部陆军研究办公室有关从头计算量子材料 (AIQM) 的多学科大学研究创新计划 (MURI) 以及贝蒂与戈登摩尔基金会的资助。PN 是摩尔发明家团体特别会员 (Moore Inventor Fellow)。扫描透射电子显微镜试验在美国纳米相材料科学研究中心进行，该显微镜是一部安放在美国橡树岭国家实验室的美国能源部科学办公室用户装置。¹

参考文献

'Correlating the three-dimensional atomic defects and electronic properties of two-dimensional transition metal dichalcogenides' (将三维原子缺陷与二维过渡金属双硫分子配合物的电子特性关联起来) by Xuezheng Tian et al; Nature Materials (2020)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AIXTRON SE	德国爱思强股份有限公司	www.aixtron.com	7
EDI CON China	电子设计创新大会	www.mwjournlchina.com/edicon	IFC
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	9
IQE		www.iqep.com	1
中关村天合宽禁带半导体技术创新联盟		www.iawbs.com	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: sunniez@actintl.com.hk。

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。



www.compoundsemiconductorchina.net

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

Editor in China (中国版编辑)
Sunnies Zhao (赵雪芹)
sunnies@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)
Mark Mak (麦协和)
markm@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)
gavinhu@actintl.com.hk
Tel: 86-755-2598 8571

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

Linda Li (李承珍)
lindali@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)
Regional Sales Director
Mark Mak (麦协和)
markm@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

中关村天合宽禁带 半导体技术创新联盟

Introduction of Innovation Association of Wide Bandgap
Semiconductor Technology



联盟介绍

2016年4月27日，在国家科技部、北京市科委、新疆生产建设兵团科技局和北京市民政局的大力支持下，由从事宽禁带半导体研发、生产及应用等领域的企（事）业单位、大专院校、科研院所等，按照平等、合作、互助、互惠的原则，本着共创市场、共享成果、共同发展的理念，自愿联合组成的经北京市社会团体登记管理机关核准登记的全国性非营利性社会团体法人——“中关村天合宽禁带半导体技术创新联盟”（以下简称联盟）。

截止2019年6月联盟成员单位共65家，涉及设备（耗材）-衬底-外延-器件-模块-应用全产业链企事业单位、科研院所及大专院校。囊括了北京天科合达、中科院半导体所、浙江大学、中电55所、泰科天润等国内从事宽禁带半导体研发及产业化的主流单位。联盟将通过不断创新体制机制、整合创新资源，探索行业管理和科技服务的新模式，以提高我国半导体产业的国际地位。

联盟将竭尽全力为成员单位创造沟通和交流的平台，促进合作，促进资源共享和互利互惠；联盟将竭尽全力进行联盟团体标准的制定、推进与完善以提升联盟内成员单位的话语权与市场占有率。我们欢迎所有承认“联盟章程”，从事宽禁带半导体产业相关研发、制造和服务的国内外企、事业单位加入联盟！

如有需要请联系我们

地址：北京市大兴区天荣街9号世农大厦3层

邮箱：mishuchu@iawbs.com

联盟网站：www.iawbs.com

微信公众号：iawbs2016



中关村天合宽禁带半导体技术创新联盟成立大会
2016.4.27



化合物半导体



《化合物半导体》中国版（CSC）于 2005 年创刊，是全球最重要和最权威的杂志 Compound Semiconductor 的“姐妹”杂志。

《化合物半导体》中国版旨在通过对于全球化合物半导体工业的深度分析、实时信息报道和评论，扩展中国地区读者的专业焦点和全球视野。《化合物半导体》中国版以简体中文按季度出版。编辑内容由 Compound Semiconductor 的专业记者提供，他们具有研究背景，其技术文章和专栏文章得到来自化合物半导体协会主要成员公司的认可。全球电子业领先的独立市场研究咨询机构 IHS IMS Research 也在杂志开设定期栏目。

除了 10,000 名经过审查认证的合格读者，我们亦会在各个地区重要业界活动中免费派发杂志，对于希望在中国市场加强影响的化合物半导体公司，《化合物半导体》中国版是最有效的平台和目标媒体。

免费索阅

