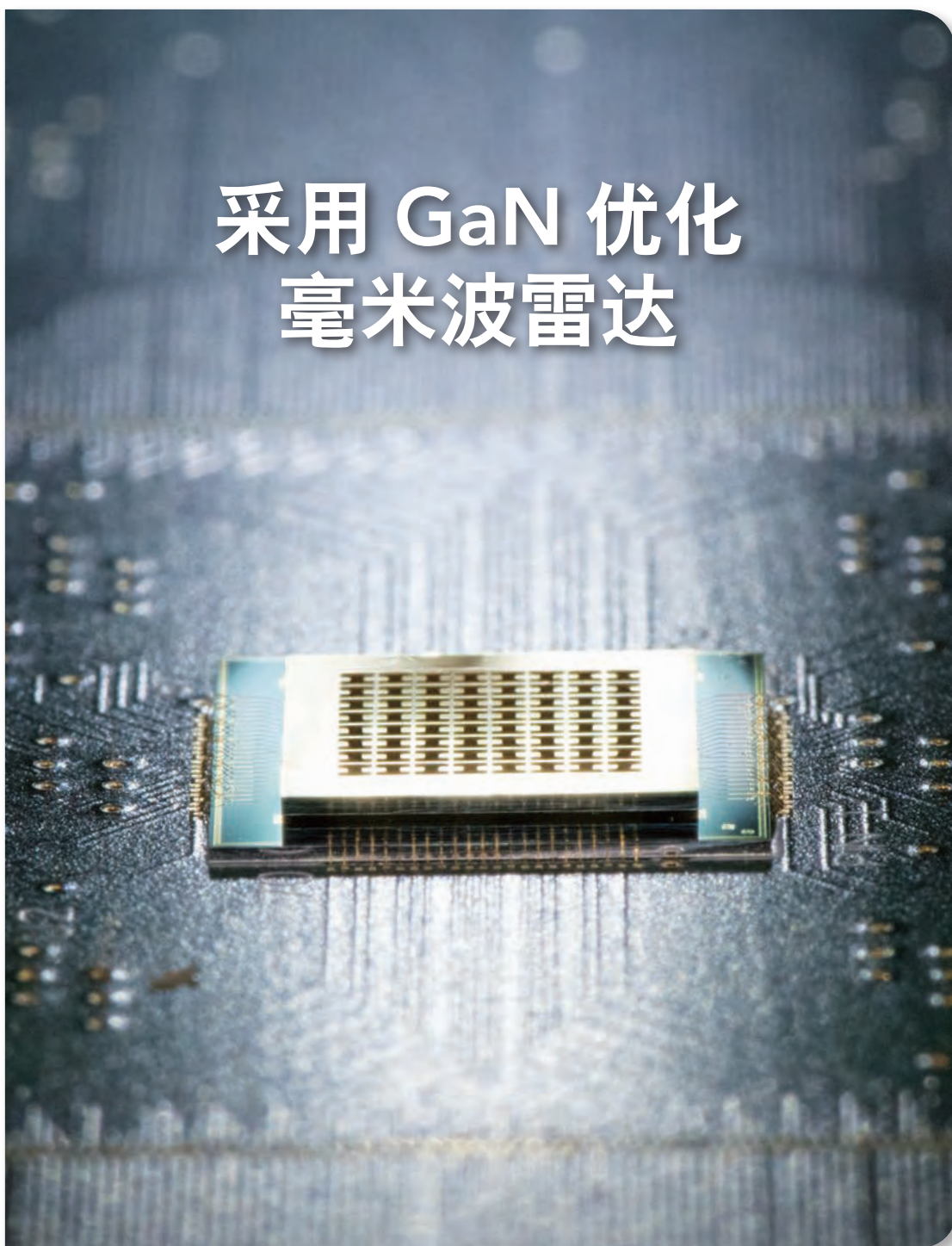
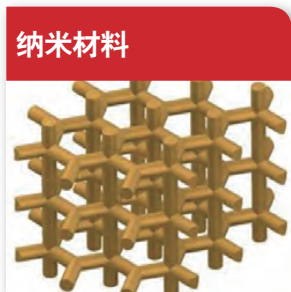
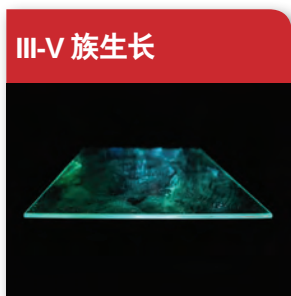
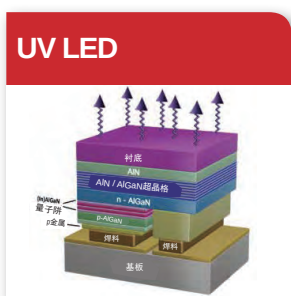
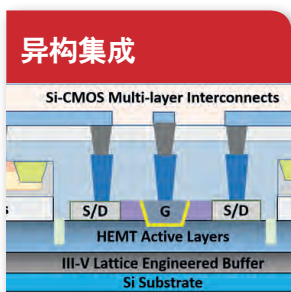


化合物半导体



• CHINA

季刊 2019年 第2期





您的技术信息平台

一系列产品—包括国际专业技术杂志的
中文版、网上出版物、会议、培训和活动

www.actintl.com.hk

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、镭射/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、电磁相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。

香港

852-28386298

深圳

86-755-25988571

上海

86-21-62511200

北京

86-10-84844007

武汉

86-27-59221554





全球大趋势需要 性能最佳的三五族化合物材料 AIX 2800G4-TM

- 三维传感
- 增强现实
- 自动驾驶
- 云计算
- 物联网
- 下一代显示设备

发现 AIX 2800G4-TM
实现砷磷基材料应用的创纪录设备



Made
in
Germany



AIXTRON

info@aixtron.com
www.aixtron.com

封面故事 Cover Story

10 采用GaN优化毫米波雷达 Enhancing millimetre-wave radar with GaN

GaN与硅的三维异构集成实现了极具潜力的235 GHz雷达的阵列，为毫米波雷达提供了广阔的军事和商业应用前景。毫米波雷达穿透遮蔽物的能力和理想的高角度分辨率使其有望成为在退化的视觉环境中避免碰撞的一个很好选择。

- Florian Herrault和Jonathan Lynch, HRL实验室

编辑话 Editor's Note

04 分立功率器件封装, 缓慢发展的大市场 Discrete power device packaging is a slow and big market

- 赵雪芹

业界动态 Industry

05 Jenoptik核心光子技术为未来发展奠定基础 Jenoptik's cored photon technology lays the foundation for future development

06 CISSOID和清华大学电机系携手推动碳化硅功率器件在新能源汽车领域应用 CISSOID and Department of Electrical Engineering of Tsinghua University jointly promote the applications of SiC power devices in new energy vehicles

07 Cree扩大SiC产能, 满足电动汽车和5G市场需求 Cree to Expand Silicon Carbide Capacity to meet EV and 5G market demand

08 SiC器件专用测试实验室 A dedicated lab for the specialized testing of SiC devices

- Aly Mashaly, ROHM Semiconductor GmbH

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

技术Technology

- 16 InGaAs HEMT和硅CMOS集成用于毫米波通信**
Targeting millimetre-wave communications with InGaAs HEMTs and silicon CMOS
- Sachin Yadav, Sang Xuan Nguyen, Fayyaz Singaporewala, Kenneth Lee, Eugene Fitzgerald, Xiao Gong,
新加坡-麻省理工学院低能电子系统研究与技术联盟
- 21 开发高效、可靠的 UV LED**
Developing efficient, reliable UV LEDs
- Neysha Lobo Ploch, UV PHOTONICS和费迪南德-布劳恩研究所
Michael Kneissl, 柏林工业大学和费迪南德-布劳恩研究所
- 25 在玻璃上生长III-V族材料**
Growing III-V on glass
- Ashok Chaudhari, SOLAR-TECTIC公司

科技前沿 Research Review

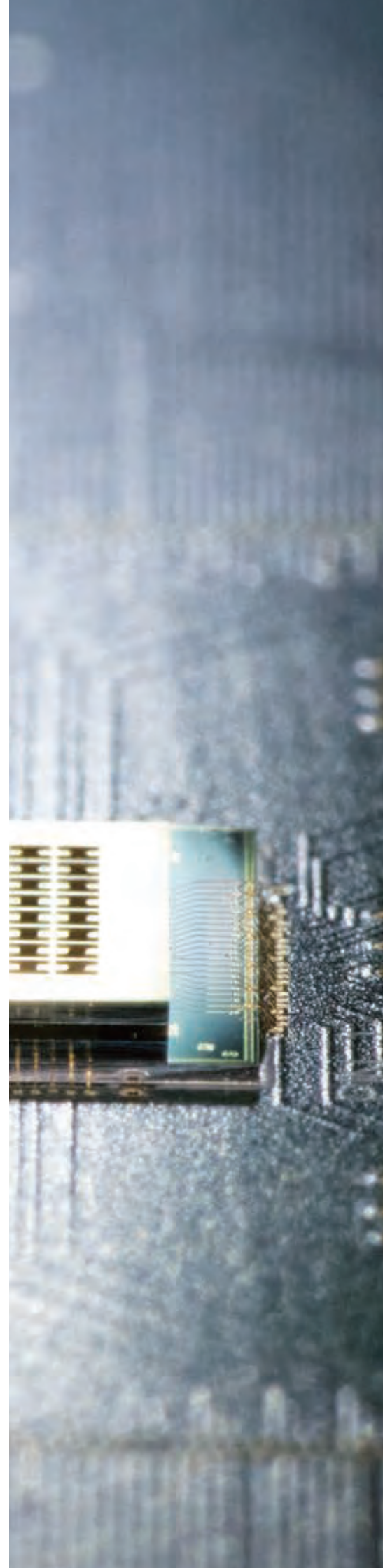
- 29 新型纳米材料有望提升电池效率, 可在诸多可持续领域应用**
The new nanomesh material promises to improve battery efficiency for many sustainable applications
- 30 运用 MOCVD 工艺生长 GaN VCSEL**
Growing GaN VCSELs by MOCVD
- 31 柔性纳米线激光器**
Flexible nanowire lasers
- 32 广告索引 Advertisement Index**

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



分立功率器件封装，缓慢发展的大市场

Yole 企业集团旗下 Yole Développement 和 System Plus Consulting 分别发布了《分立功率器件封装：材料市场与技术趋势》(Yole Développement, 2019) 和《功率分立器件封装对比》(System Plus Consulting, 2018) 专题报告，提出对分立功率器件封装产业的全局分析。

2018 年分立功率器件市场价值近 135 亿美元，2018 - 2024 年间的年均复合增长率为 2.9%。其中，封装部分的市场价值为 37 亿美元，同期年均复合增长率为 1.1%。Yole 认为分立功率器件市场的发展将紧跟全球功率电子产业的上升态势。“分立功率器件封装产业仍存在商业机遇，尤其是对材料供应商和封装企业而言”，Yole 功率电子与电池领域首席分析师 Milan Rosina 博士评述道。

分立功率器件产业的特性是：分立功率器件仅包括单一器件，成本低，产品和供应商选择范围广，使用经过验证的高度标准化产品和技术，包括封装技术。

“实际上，用于分立功率器件的封装技术，包括引线框架、芯片粘接、电性互连和封装，应该具备上述特性”，Yole 功率电子与材料领域技术与市场分析师 Shalu Agarwal 博士解释道：“新型封装技术可能意味着一些额外成本，这就难以满足器件整合商对大规模标准化产品和低成本的要求。”

在这样的形势下，针对不同封装解决方案的市场增长和市场规模将产生许多不同的复杂结果，包括器件需求量变化、芯片尺寸、封装类型和所用的互连方法、顺应微缩趋势的器件尺寸、每一封装器件中的半导体内容等。这些因素中有的有助于市场增长，有的则会促使市场缩水，使得市场态势基本持平。因此，分立功率器件封装市场的走势将十分平缓，但在 2018 - 2024 年间仍将有所增长。

由于业界越来越多地采用铜制弹片来取代传统导线和引线带楔焊键合，封装领域的主要创新将在电性互连层面实现。“在器件层面采用新材料和开拓新市场能促使生产制造商寻求新型封装技术解决方案。这些创新技术来自功率电子以外的领域，如 MEMS 和先进封装，这也能推动旧的供应链进行自我调节”，System Plus 半导体器件部经理 Elena Barbarini 称。

分立器件制造商（如英飞凌、安森美半导体、罗姆半导体和富士电机）可以自主生产功率器件，也可以将封装外包给 OSAT 厂商。器件制造商和 OSAT 都希望为客户提供创新封装解决方案。

由于低成本和高产量这两项因素的重要性，引线框架主要由大量亚洲材料供应商提供。随着应用领域要求的提升（例如电动汽车中的热循环能力）、器件尺寸的缩小和器件封装设计复杂性的增加，器件封装越来越多地寻求能够提供特定解决方案并在大规模量产中确保严密的角度与尺寸容差的制造商。像安靠、日月光、嘉盛和优特半导体这样的先进封装企业在智能手机和微电子应用中各种复杂器件的封装方面经验丰富，对他们而言，将现有的先进封装解决方案转移到功率器件是一个大好机遇，也能借此扩大其产品和客户组合。先进封装向功率器件转型的趋势值得关注，是分立功率器件封装领域中不断增长的商机。

Yole 的报告纵览主要应用领域、市场驱动因素和未来趋势，也对每个封装组件进行了深入分析，并审视了分立功率器件供应链。System Plus Consulting 的报告详尽分析了当前分立功率器件封装解决方案，提供了全面的技术评述，并从物理、生产制造和成本角度做了细致分析。

更多信息请访问 i-micronews.com 网站的功率电子报告专区。

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 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



Jenoptik 核心光子技术为未来发展奠定基础

总部位于德国的技术公司 Jenoptik 在 2019 年 3 月的慕尼黑上海光博会上展示其广泛的产品系列，包括从单一光学组件到适用于生物光子学、工业生产和半导体制造的光学复杂系统。

Jenoptik 利用自身在光学、微光学、激光、数字成像、光电子和传感器等多项技术领域数十载的丰富经验，为客户提供可定制的前沿解决方案。Jenoptik 光与光学部门致力于提供先进的光子解决方案，从提出创意到批量生产客户专用解决方案。

Jenoptik 在慕尼黑上海光博会上介绍其核心光子技术，它们可帮助您成功应对未来在生物成像、激光治疗、工业生产和半导体制造过程中所面临的各种挑战。这些技术包括模块化成像平台 JENOPTIK SYIONS、用于脱毛和皮肤病学应用的紧凑型激光光源，以及用于移动和自动化领域的高性能技术。

除此之外，Jenoptik 还介绍其在激光材料加工方面的创新成果，包括先进的 1060 纳米半导体激光器、新型 275 瓦高功率二极管激光器和 F-Theta 透镜，以及多种高效微光学器件。

用于医疗和工业应用的高效半导体材料

长期以来，在激光半导体材料、高功率半导体激光器、固态激光器和客户专用应用解决方案的完整工艺技术链方面，Jenoptik 一直是公认的行业专家。公司生产基地位于德国柏林安德尔斯霍夫，采取最严格的质量控制标准，生产坚固耐用的高效棒材、半棒材和单发射器。这些产品根据客户的特殊需求量身定制，然后在德国耶拿进一步加工为高功率二极管激光器，最终交付给遍布世界各地的客户。

Jenoptik 拥有先进的 1060 纳米半导体激光器，能够为医疗保健和生命科学领域以及先进制造技术方面的可靠应用提供支持。公司专注于半导体材料的可持续集中发展，确保在不同应用中能够保持高输出功率和长期可靠性。因此，Jenoptik 能够为客户实施其激光解决方案提供最佳支持。

用于激光材料加工的新型 275 瓦输出功率二极管激光器

Jenoptik 介绍其在工业材料加工，特别是直接半导体激光应用上高功率激光光源领域的最新发展。新型二极管激光器

采用被动式冷却，输出功率可高达 275 瓦，在 CW 和强脉冲应用中均可确保较长的使用寿命，超强表现令人印象深刻。与目前市面上的产品相比，这款激光器的输出功率得到了显著增加。Jenoptik 成功将连接技术上的重大进展与热管理方面的创新方法相结合，在提供高输出功率的同时，保证产品在强脉冲条件下依旧具备出色的可靠性。

益处显而易见：对于千瓦级激光系统制造商而言，由于使用的半导体激光器减少，工厂和系统的复杂性和成本也得到了降低。而将高输出功率和出色的光束质量相结合，则提高了工作效率并实现了出色的加工效果，从而使最终用户获益颇多。

用于激光增材制造的新型 F-Theta 透镜

Jenoptik 为 F-Theta-JENar™ Silverline 透镜系列新增了两款适用于高功率应用的透镜。新透镜焦距为 423 毫米，扫描范围高达 254 × 254 毫米，能够满足 3D 烧结等增材制造工艺的要求。

这两款新透镜专为配备 1030 至 1080 纳米的光纤激光器和 900 至 1100 纳米的半导体激光器的应用而设计，可承受功率高达 6 千瓦。高质量材料和低吸收光学镀膜（吸收小于 5 ppm）可长期保证稳定的光束质量和最出色的光斑性能。

在激光功率高达 6 千瓦的高功率应用测试中，检测到瑞利长度片段出现最小焦点偏移。这些卓越性能确保了可靠的生产工艺和超高的重复生产精度。

Jenoptik 的 F-Theta 透镜能够满足微观材料和宏观材料



新型 275 瓦高功率二极管激光器

激光加工中几乎所有标准方法的要求。Jenoptik 的 F-Theta 系列透镜非常坚固耐用，即使在高功率激光下也无需额外冷却。无粘合剂安装技术亦有助于确保高性能光学器件的长期稳定，并可保障长期使用的安全

800 nm 应用脉冲压缩光栅和二极激光束组合器

Jenoptik 正逐步扩展其在光栅领域中适用于各种波长和应用的产品组合。公司为包括光谱测定、激光泵浦、光刻和检测应用中的科学装置在内的 800 纳米应用引入了新型密封脉冲压缩光栅。光栅在透射率和波前畸变方面进行了优化，效率高达 99% 以上，即使在高功率下也能保持热稳定性。由于光栅进行了密封，因而能够轻松清除污染。Jenoptik 将针对半导体激光器应用引入全新效率增强型光束。除飞秒激光器和激光材料加工应用中的传统脉冲压缩之外，e²（效率

增强型）光栅还专为用于通讯行业而设计。

多焦点衍射元件

Jenoptik 为客户提供定制化的多焦点元件，如 3、5、7 或 9 焦点元件。利用不同焦点之间位置和能量分布的精确控制，这些元件能够同时基本的不同层进行快速高效的激光切割。多焦点元件的光学设计能够用于包括 3D 材料加工在内的广泛应用。

大孔径角衍射扩散器

Jenoptik 扩散器具有超过 80 度的大孔径角，可以确保整个扫描场具有均匀射束，因此特别适用于具有 LiDAR 或 VR/AR 应用的传感器应用。这可以通过 X 和 Y 方向上的不同角度以及非常高的纵横比来实现。☞

CISSOID 和清华大学电机系携手推动碳化硅功率器件在新能源汽车领域应用

高温与长寿命半导体解决方案领先供应商 CISSOID 日前宣布：公司已与清华大学电机工程与应用电子技术系达成技术合作意向，双方将携手研发基于碳化硅（SiC）功率模块的系统，期望共同攻克技术难题以求实现其潜在的高效率和高功率密度等优势，并将大力支持在新能源汽车领域开展广泛应用。

CISSOID 公司来自比利时，是高温半导体解决方案的领导者，专为极端温度和恶劣环境下的电源管理、功率转换与信号调节提供标准产品和定制解决方案。

“当前新能源汽车的设计越来越精细，对功率密度和效率的要求越来越高。碳化硅器件具有开关速度快、导通电阻小等优点，可充分提高能源变换效率。但在实际应用中，由于碳化硅器件开关频率的大幅提高，则要求驱动器件要尽可能地靠近功率模块，再加上车载变换器密闭环境的影响，这样就造成了驱动器件温度升高，所以我们需要耐高温的驱动电路来配合开发。”清华大学电机系陆海峰副教授表示。“很高兴可以与 CISSOID 公司进行合作，他们的高温器件和高温封装技术可以很好地配合碳化硅器件的应用，以使整体设计上实现耐高温及高功率密度，并将碳化硅器件潜在的高效率发挥出来。特别是他们久经验证、享誉业界的耐高温驱动器产品具有优异的性能，可以助力我们快速实现碳化硅功率模块在新能源汽车中的应用。”

CISSOID 首席执行官 Dave Hutton 先生表示：“CISSOID 非常注重与中国半导体产业的融合发展，我们已经融入了来

自中国的投资，并已在芯片制造、封装测试等方面开始与中国公司进行广泛的合作。此次我们与中国顶级科研单位共同开发则进一步体现了 CISSOID 力求广泛融入中国半导体产业链的战略。”

近年来，新能源汽车在全球各地快速发展，促使碳化硅器件的市场规模迅速扩大，目前国际领先的特斯拉和丰田等已开启了碳化硅功率器件在新能源汽车领域的早期应用。然而，要使碳化硅器件充分发挥其耐高温、耐高压、高功率密度、高效率等优势，也有诸多技术难题需要解决。例如，在汽车、航空航天、石油等应用中，碳化硅器件就需要驱动器在耐高温以及异常严苛的保护机制等方面提供充分支持。CISSOID 拥有在多个高端领域验证过的，应用超过 10 年的耐高温、高可靠性、高鲁棒性驱动器产品，可以使碳化硅功率模块在系统中充分发挥性能，进而帮助提升新能源汽车的电力运转水平和续航里程。

根据中国汽车工业协会发布的数据，2018 年中国新能源汽车产销量同比增长 59.9% 和 61.7%，分别为 127 万台和 125.6 万台——双双突破 125 万台。新能源汽车对高效率、小体积、耐高温的碳化硅器件及其辅助器件有很高的需求，而优质的驱动器产品可以在这些特性方面为碳化硅器件提供良好的支持，可极大地提高整体电控系统的可靠性。CISSOID 公司和清华大学电机系将通过合作形成强大合力，共同研发高质量的基于碳化硅功率模块的系统，助力中国新能源汽车领域实现更快、更好发展。☞

Cree 扩大 SiC 产能，满足电动汽车和 5G 市场需求

Cree, Inc. 近日宣布，作为公司长期增长战略的一部分，将投资 10 亿美元用于扩大 SiC（碳化硅）产能，在公司美国总部北卡罗来纳州达勒姆市建造一座采用最先进技术的自动化 200mm SiC 生产工厂和一座材料超级工厂。这项标志着公司迄今为止最大的投资，将为 Wolfspeed SiC 和 GaN-on-SiC（碳化硅基氮化镓）业务提供动能。在 2024 年全部完工之后，这些工厂将极大增强公司 SiC 材料性能和晶圆制造产能，使得宽禁带半导体材料解决方案为汽车、通讯设施和工业市场带来巨大技术转变。

Cree 首席执行官 Gregg Lowe 先生表示：我们不断地看到在汽车和通讯设施领域采用 SiC 的优势来驱动创新所产生的巨大效益。但是，现有的供应却远远不能够满足我们对于碳化硅的需求。今天，我们宣布了公司迄今在生产制造的最大投资，将大幅度提升供应，帮助客户为市场提供变革性的产品和服务。这项在设备、基础设施、公司人力方面的巨大投入，将为我们显著扩大产能。与 2017 财年第一季度（也就是我们开始扩大产能的第一阶段）相比较，能够带来 SiC 晶圆制造产能的 30 倍增长和材料生产的 30 倍增长。我们相信这将使得我们能够满足 Wolfspeed SiC 材料和器件在未来 5 年乃至更长期的预期增长。

这项计划将为业界领先的 Wolfspeed SiC 业务提供附加产能。通过增建现有的建筑设施，作为面积 253,000 平方英尺的 200mm 功率和射频晶圆制造工厂，迈出满足预期市场需求的第一步。新的 North Fab 将被设计成能够全面满足汽车认证的工厂，其生产提供的晶圆表面积将会是今天现有的 18 倍，刚开始阶段将进行 150mm 晶圆的生产。公司将把现有在达勒姆的生产和材料工厂转变为一座材料超级工厂。

Cree 首席执行官 Gregg Lowe 先生同时还表示：“这些 SiC 制造超级工厂，将加速当今最快增长市场的创新。通过提供解决方案，帮助提高 EV 电动汽车的行驶里程并减少充电时间，同时支持 5G 网络在全世界的部署。我们相信这代表着 SiC 和 GaN 技术和制造有史以来最大的资本投资，也是一种在财政上负责任的方式。通过采用现有工厂和安装绝



大部分的整新工具，相信我们可以实现提供最先进技术的 200mm fab，并且成本大约仅为一座新 fab 的 1/3。”

扩大的园区将创造高科技就业机会，并提供先进制造人才发展计划。Cree 计划与州、当地和四年制院校开展培训项目，为新工厂所带来的长期、高端就业和成长机遇提供人才储备。

随后不久，Cree 又宣布其成为大众汽车集团 (Volkswagen Group) FAST (Future Automotive Supply Tracks，未来汽车供应链) 项目 SiC 独家合作伙伴。FAST 的目标旨在推进共同合作，比以往更为快速地实施技术创新，并且更有效率地、更有效果地实现全球汽车项目。

这项合作将两场同时进行的产业变革联结在了一起：汽车产业正在经历从内燃机向 EV 电动汽车的转型；而在半导体产业，SiC 的采用正在不断增长。这项合作同时也将推动双方的创新，有助于大众汽车集团更好地服务他们的客户。

SiC 的采用将加速汽车产业向 EV 电动汽车的转型，帮助实现更高的系统效率，从而为 EV 电动汽车带来更长的行驶里程、更快的充电，同时降低成本、降低重量和节约空间。

大众汽车集团和 Cree 将构建一级 (tier one) 紧密合作，通过功率模块供应，为未来的大众汽车集团汽车提供 SiC 基解决方案。OSc

SiC 器件专用测试实验室

最近，罗姆在其欧洲分公司附近打造了一个全新“电力电子实验室”。该实验室的主要设计目的是进行 SiC 器件测试。

Aly Mashaly, ROHM Semiconductor GmbH

当今世界，新生代产品的蓬勃发展——比如电动汽车及充电站基础设施、太阳能和风力发电厂、工业机械产品等——使得功率半导体的需求激增。功率半导体器件需要满足能源效率要求，而这些要求必须在开发的早期阶段进行测试和验证。同时，器件的开关速率和应用电压也在持续增加。

由于其技术特点，宽禁带功率器件（比如 SiC）脱颖而出。但是 SiC 的高速开关速度也意味着需要专门的测试。只有专用测试装置才能为开发人员提供将 SiC 器件集成到其产品中所需的精确结果。

作为 SiC 技术的市场领导者，罗姆始终致力于为客户提供最佳的应用支持。为此，罗姆近期在其位于德国杜塞尔多夫附近的欧洲分公司打造了一个全新“电力电子实验室”，专门用于分析电力电子器件和系统。该实验室占地 300m²，其主要目的是提高产品的可用性，让产品和系统更易于使用，并紧密匹配客户的需求和要求。

系统工程师在所有开发阶段都会面临诸多挑战：电力电子技术目前的趋势是更高的功率密度和更高的可靠性，同时实现比以往更高的效率，这为热管理等设计阶段带来了新的挑战。同时，系统要求的复杂性不断增加，而资源和项目时间有限。毫无疑问，今天的系统工程师倾向于选择最简单的方法来设计电路。因此，工程师需要数据向他们展示如何以最佳方式在其应用中使用宽禁带功率器件。换句话说，为了实现最可靠、最简单、成本最低的解决方案，他们需要参考数据。



罗姆全新“电力电子实验室”旨在为客户提供有关宽禁带功率器件的最佳应用级技术支持

宽禁带功率器件开发的挑战

宽禁带功率器件开发人员同样面临多种挑战。举个例子，每个宽禁带功率器件都有一个数据表，每块功率板都有系统要求。但是，数据表有时并没有覆盖最终应用所需的工作点。

这是因为功率半导体可能会用于不同的应用领域，因此关键参数不同。不同的应用场景负载（直流电机、交流电机、电池等）不同，电源（电池、电网等）也不同。如果最终产品用于世界各地，还需要考虑不同的环境条件以及不同的电网性能等重要因素。

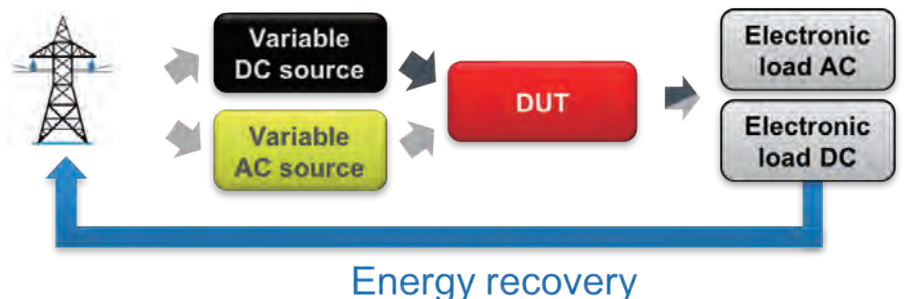
为了应对所有这些挑战，工程师需要应用级的本地技术支持。这正是罗姆全新电力电子实验室（Power Lab）的目的所在：通过分析功率器件和电力电子系统，为客户提供应用级的最

佳技术支持。该实验室既可以测试分立 SiC 器件也可以测试完整的电力电子系统。

在电力电子实验室（Power Lab）项目的初期规划阶段，我们首先执行了详尽的用例分析。整个项目始终把目标应用场景和客户放在首位。同时，我们还考虑了欧洲安全标准。电力电子实验室（Power Lab）的团队在电力电子应用和实验室方面拥有数年的丰富经验。结合现代测量技术和设备，我们能够确保几乎每个项目都能成功。

创建电力电子实验室（Power Lab）

开始规划该实验室时，罗姆必须考虑很多因素：确定配备最先进技术的测试台，首要考虑设备质量和安全性。同时，使用灵活性也非常重要。为了向客



功率测试台将能量反向馈送到电网中，从而最大程度地减少能量消耗。

户提供快速和高质量的支持，我们需要灵活的模块化设计测试装置。这也让电力电子实验室（Power Lab）能够适用于未来产品并符合市场发展趋势。

于是，我们很快意识到该电力电子实验室（Power Lab）无法通过现成产品实现，必须从头打造。确定测试台之后，罗姆必须决定是委托经验丰富的设计公司进行设计，还是由罗姆工程师自行设计该电力电子实验室。经过精确分析，罗姆选择了后者。通过这种方式，确保测试台的高质量和高可靠性更加容易；同时由于公司内部掌握这些技术，将来改造也更加简单。

经过几个月的辛苦建设，电力电子实验室（Power Lab）于2017年底投入使用。现在，罗姆可以表征其所有半导体元件的电气性能，比如 SiC MOSFET、SiC 二极管、IGBT、Si 功率 MOSFET 和栅极驱动器，测试电压

高达 8000V DC。为此及其他目的，实验室配备了多个带有独立高压区域的测试台。

从电气特性到热特性测试

电气特性测试台旨在表征 MOSFET 和 IGBT。这些试验台能够在 1500 V 高压下测量器件的开关时间和损耗、传导损耗和短路特性。模块化概念确保了高灵活性，因此我们可以测试不同的封装（THD、SMD、模块、客户板）。高压测试台可以在高达 8000V DC 的电压下对器件进行表征。高压台位于单独的房间内，以便在运行过程中保护测试仪。

凭借功率测试台，转换器（AC/DC、DC/DC、DC/AC 和 AC/AC）可在高达 15 kVA 的实际应用条件下进行测试。此外，该测试台还可以使用功率分析仪对效率和损耗进行高精度测量。

测试台配备了交流电源（电网仿真器）和各种电子负载（交流和直流）。最大测试电压为 1500VDC 和 400VAC。另外，测试台配备了再生功能，允许将部分使用过的能量反馈到电网中，从而在测试期间实现较低的总能量消耗。

热特性测试台用于分析功率器件的热性能。待测器件（DUT）可以是模块或分立器件、电子板，也可以是完整的电力电子系统。该测试台搭载了高电流连续供电电源。实验室还配备环境试验箱，允许在特殊条件下测试器件：其测试温度范围为 -40℃ ~ +180℃，测试湿度范围为 10% ~ 98%。

对于内部开发的电路、PCB 或参考设计的绝缘测试，我们还为工程师提供了另外一个测试台。该测试台的电源可缓增到 6 kV 和 10 mA。举个例子，此设备可用来测试隔离式栅极驱动板的间隙和爬电距离。



获取镀膜技术尖端讯息



POWER DEVICES

- Industry trends by Yole Développement
- Nexperia – A vision for 2020
- Wide Band Gap technologies by Yole Développement

MEMS

- Industry trends by Yole Développement
- Vaisala – Technology to keep our airports safe
- PragmatlC – Reinventing electronics for mass market applications
- Thin-film integrated passive devices (IPD)
- AlScN update

WIRELESS

- Industry trends by Yole Développement
- Magnetron sputter epitaxy of AlScN
- Stress improvement for FBAR electrodes



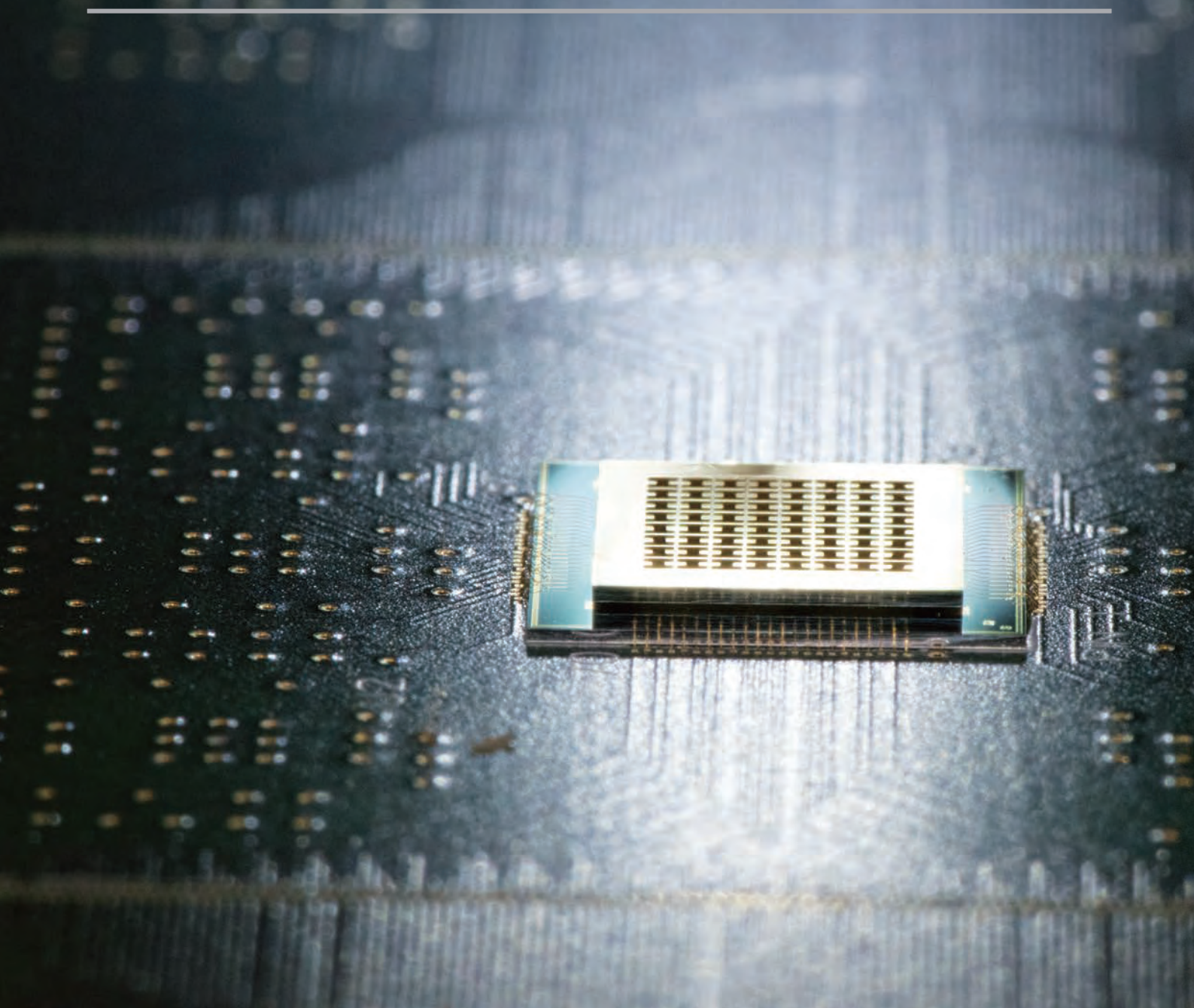
在线浏览或联系当地办公室获取杂志

www.evatecnet.com/markets/power-devices/layers-power-devices

T: +86 21 8019 7660, E: infochina@evatecnet.com

欢迎光临半导体中国展，3月20日-22日，展位号3251

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



采用 GaN 优化毫米波雷达

GaN 和硅的三维异构集成实现了 235GHz 雷达的极具潜力的阵列

Florian Herrault 和 Jonathan Lynch, HRL 实验室

毫米波雷达是一种很有吸引力的用于众多军事和商业应用的技术。其穿透障碍物的能力使其成为在恶劣的视觉环境中避免碰撞，安全检查和局部区域武力保护方面很有前途的选择。

对于许多这些方面的任务，毫米波雷达可以

很理想地提供高的角度分辨率。然而，在提供具有紧凑且低成本的成像系统的能力方面，对于毫米波雷达很有挑战性。

为了应对这一挑战，DARPA（美国国防高级研究计划局）开展了一项计划，即用于成像雷达

的高级扫描技术 (Advanced Scanning Technologies for Imaging Radars, ASTIR), 旨在削减在固定平台上提供高分辨率成像的相控阵雷达的尺寸和成本。在此项目中, 开发的技术针对 70GHz 和 700GHz 之间的毫米波和亚毫米波频带, 因为该频域在给定角分辨率下具有最小的孔径尺寸。为了在维持合理成本的同时实现具有数千个像素的图像, 该项目使用有助于尺寸缩小的光束控制方法。

我们加利福尼亚州马里布的 HRL 实验室, 在 ASTIR 计划中的任务是开发一种在 235GHz 下工作的相控阵列。我们将其称为 CASA (Coded Aperture Subreflector Array), 也就是编码孔径子反射器阵列的缩写。“子反射器”一词意味着相控阵列可以与提供大孔径用于实现高分辨率的无源主反射器和可实现电子波束成形的子反射器组合。

我们选择了 235GHz 的频率, 因为这与其他项目正在开发的雷达收发器兼容。但请注意, 我们的技术可扩展到更高的频率。

我们开发 CASA 的基础是我们的编码孔径雷达。该技术采用了平板方法, 可最大限度地减小尺寸和复杂性。通过结合晶圆级制造和集成, 我们以低成本生产包含数千个组件的平板。

我们的编码孔径雷达的核心是单比特移相器, 它们位于每个天线组件的后面, 并调制组件信号 (见图 1 (c))。当接收和反射雷达信号时, 移相器快速切换到规定的一组状态, 从而产生一系列伪随机天线模式。我们可以从与孔径代码相关联的复杂电磁场估计散射体的角度位置。这些电磁场可以通过模拟或测量来确定。

该技术的优点之一是, 与传统的数字波束形

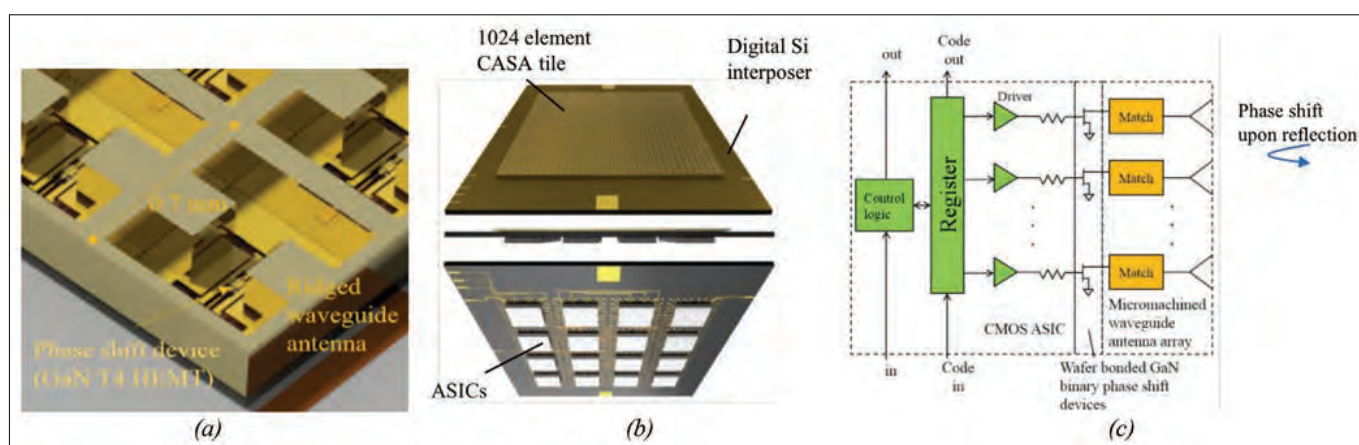
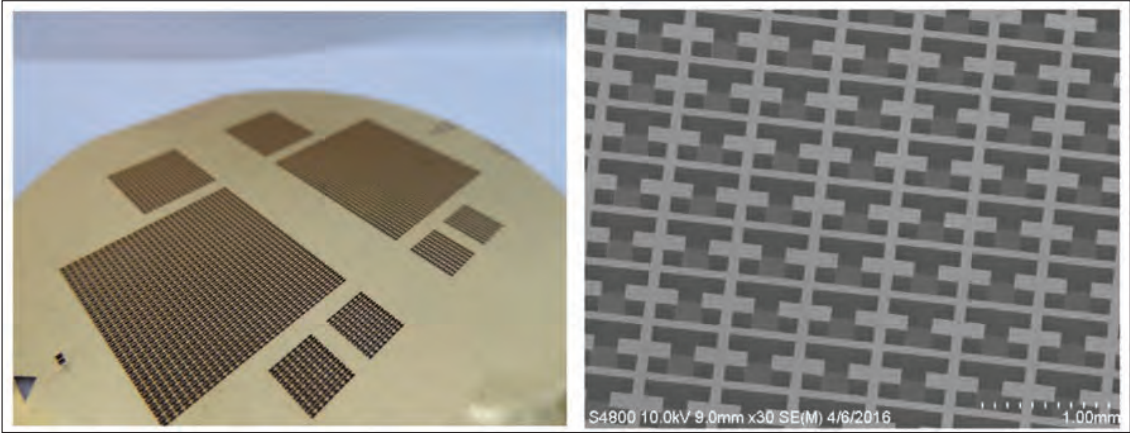


图1. 编码孔径子反射器阵列 (CASA) 结构。(a) 波导天线耦合到单个电子器件用于 $0/180^\circ$ 相移。(b) CASA 平板接口到 ASIC, 后者通过双面内插器控制移相器状态。(c) ASTIR (成像雷达高级扫描技术) 计划期间开发的 HRL 编码孔径雷达方法的方框图。具有与 GaN HEMT 键合的微机械加工天线阵列在反射时提供 $0/180^\circ$ 相移。移相器状态由移位寄存器和输出驱动器控制。

图2.脊形波导天线效率高，与晶圆级微机械加工和3D芯片堆叠技术兼容。金的金属化和硅蚀刻的天线具有数千个组件的高的尺寸精度和低的缺陷数量。



成方法相比，它的计算强度要低得多。此外，通过利用计算能力，可以极大地简化 RF 前端的电子组件。

我们的 CASA 的架构（见图 1）基于 700 μm 的组件间距，这对应于 235GHz 的工作频率相关联波长的约一半左右。通过微机械制造的脊形波导天线和我们的 RF GaN HEMT 组成的 RF 端口完全位于 CASA 平板内。这些平板上的移相器控制焊盘通过背面的硅通孔互连和焊料凸点连接到硅的内插器。控制线馈通到内插器的后侧，在那里它们连接到移相器的控制 ASIC。可扩展性是有可能的，因为控制 64 个移相器的每个 ASIC 在物理尺寸上都小于相应的 64 个 CASA 组件。

我们使用开放终端脊形波导天线，因为它们具有很多优点。这些优点包括效率超过 95%，小尺寸与 700 μm 间距兼容，与晶圆级制造兼容，以及使用金 - 金热压键合进行简单 MMIC 集成的机会。

为了形成天线阵列，我们使用硅微机械加工工

的硅芯片进行深反应离子蚀刻之后是 1.5 μm 的金溅射，形成脊形状波导阵列结构（见图 2（a））。通过优化各种工艺参数，可以生产出具有光滑侧壁的高质量结构。

我们加工特征的尺寸公差和重复性都极佳。脊形间隙距离的测量，这是一个关键的 220 μm 特征尺寸，显示出一侧的平均值为 224.2 μm ，标准偏差为 0.2 μm ，另一侧为 243 μm ，标准偏差为 0.7 μm 。请注意，所有这些值都来自数千个原件的测量数据。两侧之间的差异是由于刻蚀期间产生的可重复侧壁锥度。我们在设计中考虑到了这一点。

硅微加工工艺的一个好处是它可以保证缺陷水平很低。在我们的 1024 单元的阵列中，平均来说缺陷少于两个。刻蚀后，我们对阵列晶圆进行金镀膜，然后将它们切割成各种尺寸的阵列。

与 GaN MMIC 集成

我们的二元移相器采用我们特征尺度大幅缩小的 GaN T4 HEMT 技术构建，该技术具有 40 nm 的栅极长度，能够制备出截止频率为

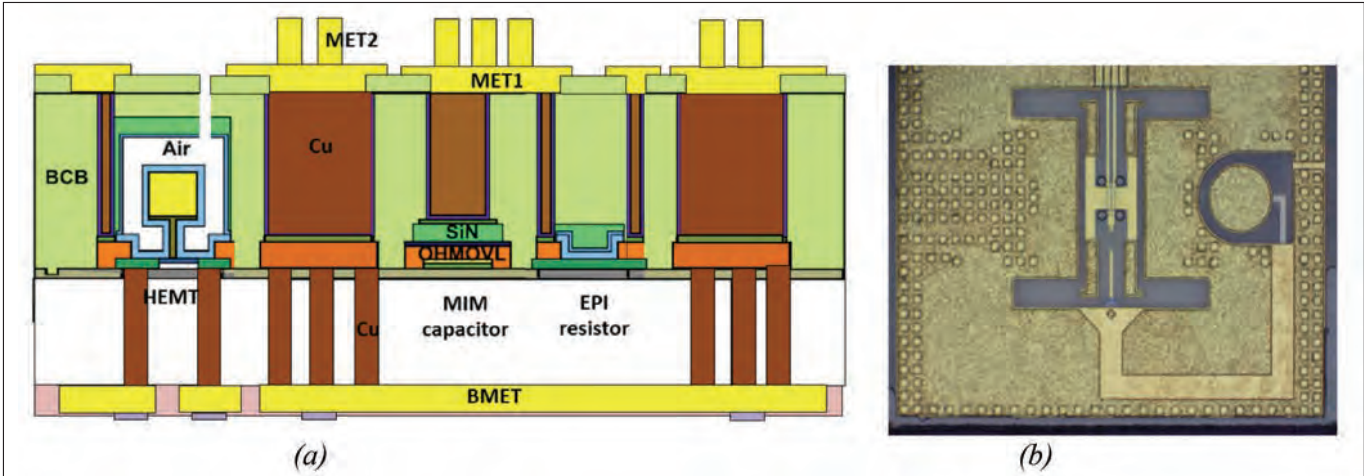


图3. (a) HRL的T4 GaN HEMT结构的图示，该结构是采用BCB的铜镶嵌工艺和器件栅极周围的空气腔。工艺改进包括用于天线键合的MET2，通过100 μm 厚的SiC衬底的实心铜通孔，精细的背面图案化，焊接掩模电介质和用于焊接的镍焊盘。(b) 单个MMIC组件的照片。

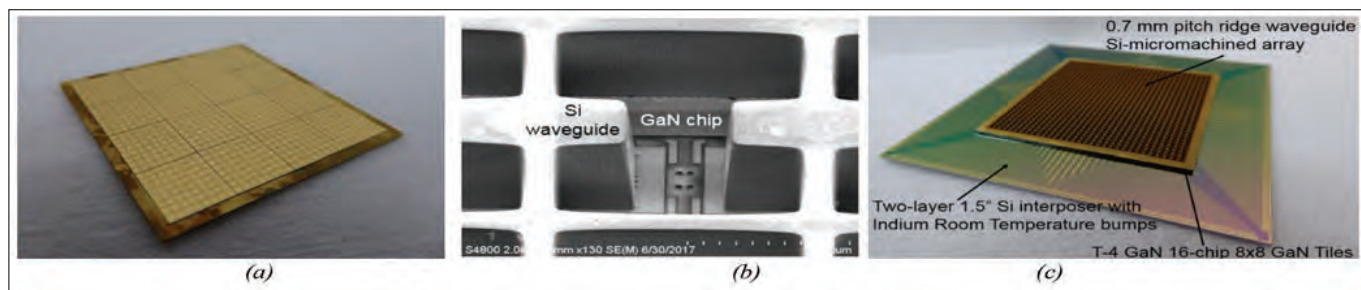


图4. (a) 通过将16个MMIC (每个包含 8×8 的移相器阵列) 连接到 32×32 阵列天线, 形成了 32×32 组件的阵列。上面的照片显示了组件的MMIC侧, 然后将其翻转并焊料键合到内插器上(图4(c))。 (b) 从天线侧的扫描电子显微镜图像中可以看出脊形波导和GaN移相器。 (c) 单面内插器上的1024个组件CASA阵列的照片。CASA平板在室温下使用钎凸块进行键合(相同尺寸的评估测试结构通过带电测试后显示出100%的钎键合良率)。移相器控制板使用商用模拟开关IC进行测试。内插器/平板组件随后使用导线键合集成到了相移控制板上。

400GHz, 最大振荡频率为 600GHz 的晶体管。对于这项特定的工作, MMIC 必须提供 235GHz 的工作, 并与 CASA 平板的芯片堆叠工艺兼容。我们通过使用我们的 T4 HEMT 的修改版本实现了这一点(参见图 3)。采用 $100\mu\text{m}$ 厚的 SiC 衬底, 我们生产出栅极长度为 40nm 的晶体管, 这些晶体管采用镶嵌工艺制造, 采用 BCB 电介质覆盖, 并通过实心铜通孔连接到其他组件。

为了降低寄生电容, 我们在 HEMT 器件的栅极周围创建了一个空气腔。对工艺的修改包括插入通过 SiC 衬底的实心铜通孔, 然后对背面进行化学机械抛光, 以形成支持背面互连所需精细特征的表面光洁度。在顶侧添加 MET2 层有利于天线阵列的键合, 而在背面上添加介电层和镍焊盘则分别提供了焊料掩模和焊料键合的区域。得到的每个芯片包含一个用于 235GHz 工作的 8×8 阵列 MMIC, 允许在顶侧进行金-金键合, 并支持背面的焊料互连。

CASA 平板是通过金-金热压键合工艺将这些 MMIC 连接到金属化天线阵列而形成。两个结合的表面之间的任何非理想平面度都通过位于 MMIC 顶面的 $10\mu\text{m}$ 的金 MET2 方块来补偿(见图 3(b))。

我们制备了具有 1024 个组件的 CASA 平板, 每个组件由 4×4 个芯片组成, 每个芯片包含 8×8 的 MMIC 阵列(见图 3(a))。当我们制备这些边长约 23mm 的 CASA 平板时, 每个 MMIC 的贴装精度超过 $5\mu\text{m}$, 相邻 MMIC 之间的间隙小于 $20\mu\text{m}$ 。

CASA 平板粘到插入物上。我们的早期演示之一涉及与单侧扇出中介层的连接, 其中相移器控制信号路由到其外围(图 4(c))。这是朝着具有背面 ASIC 芯片的高度紧凑的双面版本迈出的重要一步(见图 1(b))。

为了评估我们的 CASA 平板的性能, 我们收集了反射阵列的远场数据, 使用带有扩展头的矢

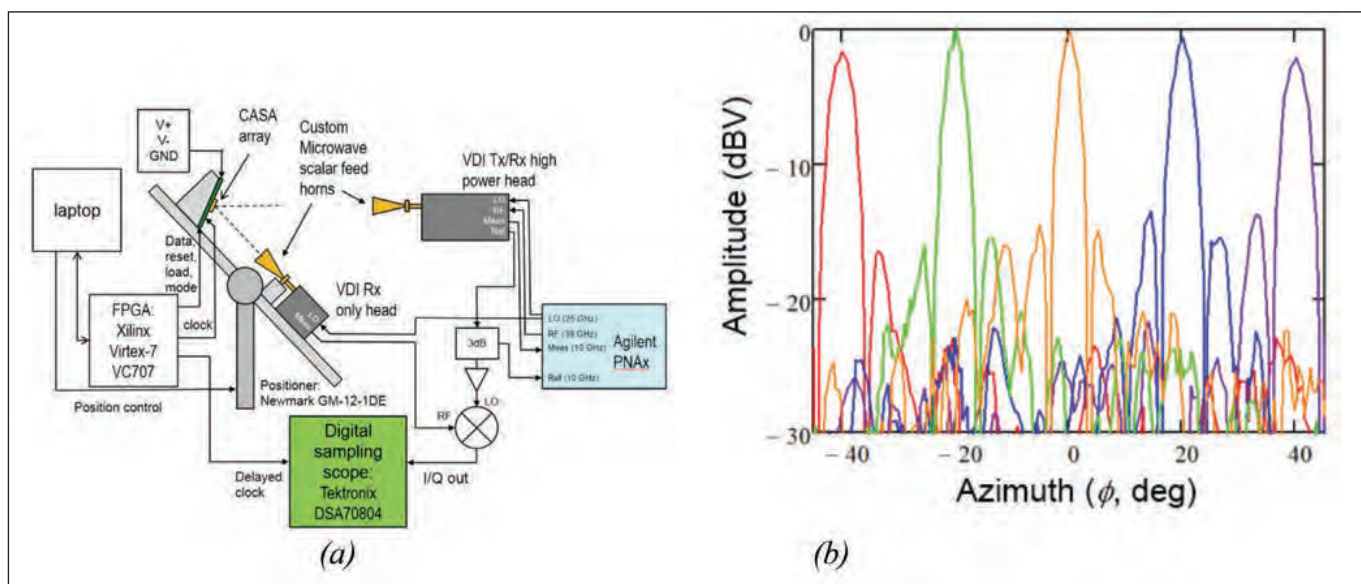


图5. 通过将阵列组件和WR-43扩展头安装在定位器上, 并使用固定在远场中的发射扩展头照亮阵列, 从而获得了远场测量结果。接收头安装具有距离阵列组件约3cm且离轴 22.5° 的标量馈电喇叭上, 其中阵列和接收头位于双轴定位器上。发射头位于固定平台上距阵列约0.9米处, 其天线瞄准定位器的中心轴。使用相位检测器通过发送参考信号解调测量的输出, 随后相位检测器的输出通过数字采样示波器记录。 (b) 对于波束(带零点)的方位角模式, 方位角上 20° 的步进转向表明波束形成。

量网络分析仪来记录消声室中的散射场。这些测量包括将参考信号从发射头分离到相位检测器的 LO 输入,并将来自接收头的信号提供给 RF 输入。实时数字采样示波器记录每个定位器方向的基带输出,同时移相器通过一组状态切换。通过在一组方向上重复这种测量,可以为每个代码提供散射图案数据。这表明, CASA 235GHz 相控阵工作正常(参见图 5 (b) 中来自反射阵列的数字波束形成数据,其中波束在方位面上以 20° 的间隔形成)。

我们的工作展示了 RF GaN, III-V 器件技术的先进后端工艺, 3D 芯片堆叠和平板架构的结合,

是如何帮助成像应用中生产可扩展的毫米波相控阵。结果表明, 我们的 CASA 技术是可负担的高分辨率成像雷达的可行方法。

更一般地说, 下一代毫米波子系统需要利用不同技术针对不同形状因子的芯片的异构集成方面取得进展。我们正在利用这些进步来构建用于毫米波成像和通信的尖端高频模块。

作者注: 这项研究是在国防高级研究计划局 (DARPA) 的资助下开发的。所表达的观点, 意见和 / 或调查结果均为作者的观点, 意见和 / 或调查结果, 不应解释为代表国防部或美国政府的官方观点或政策。 

扩展阅读

F. Herrault et al. CS-Mantech-2018

J.J. Lynch et al. SPIE DCS 2017

J.J. Lynch IEEE Trans. Aero. And Elect. Sys. 52 918 (2016)

K. Shinohara et al. IEEE Trans. Elect. Dev. 60 2982 (2013)

Soitec 收购 EpiGaN, 增强其衬底产品组合优势

2019 年 5 月 16 日, 作为设计和生产创新性半导体材料的全球领军企业, 法国 Soitec 半导体公司宣布, 已与欧洲领先的氮化镓 (GaN) 外延硅片材料供应商 EpiGaN 达成最终协议, 以 3,000 万欧元现金收购 EpiGaN 公司。EpiGaN 成立于 2010 年, 是微电子产学研中心 IMEC 的衍生公司, 是欧洲领先的氮化镓技术解决方案供应商, 其 GaN 产品主要用于射频、5G、电子元器件和传感器应用。预计未来五年内, GaN 技术的市场应用规模将达到每年 50 万至一百万个晶圆。

Soitec 首席执行官 Paul Boudre 表示: “目前, GaN 技术在射频和功率市场中的应用备受瞩目。GaN 外延硅片材料与 Soitec 目前的优化衬底产品系列将形成战略上的天作之合。收购 EpiGaN 进一步扩展并补充了 Soitec 的硅产品组合, 为射频、5G 和功率系统创造了新的工艺解决方案, 为用户增效。”

在移动领域, 实现性能、低功耗和成本的共同优化至关重要。与 4G 相比, 5G 低于 6GHz 频段和毫米波的到来正在推动新一代基站的发展, 它需要更高能效、更高性能、更小、更有经济效益的功率放大器 (PA)。更小、更轻、更高效和

更具成本效益是当今基站设计的趋势, Soitec 将扩展其应用于 PA 的产品组合, 并以 GaN 产品领衔这一趋势。

EpiGaN 联合创始人兼首席执行官 Marianne Germain 博士表示, “多年来, EpiGaN 在 GaN 技术领域备受行业认可, 目前研制出并优化了一种可投入使用的技术, 应用于 5G 宽带网络应用。我们的技术为 Soitec 的客户创造了绝佳的机会, 可以针对新兴高增长市场快速开发产品解决方案, 例如射频设备、高效电源开关设备和传感器设备。”

EpiGaN 总监兼基石投资公司 LRM 代表 Katleen Vandersmissen 则表示: “EpiGaN 开发的 GaN 技术开启了许多未来机遇。我们相信作为 EpiGaN 的卓越合作伙伴, Soitec 将充分挖掘 EpiGaN 的市场发展潜力。”

此外, 鉴于 GaN 在功率晶体管设计中的应用, 收购 EpiGaN 还将为 Soitec 现有的 Power-SOI 产品创造新的增长空间。Power-SOI 和 GaN 均可满足智能化、节能化和高可靠的集成电路设备对于综合高压和模拟功能的要求, 以便广泛应用于消费电子、数据中心、汽车和工业市场。EpiGaN 将被整合成为 Soitec 的一个业务部门。

your

EPITAXIAL GROWTH

partner

GaN InGaN InAlN AlGaIn
GaSb InSb InP InGaP
InAlGaIn GaAs AlGaAs

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



InGaAs HEMT 和硅 CMOS 集成用于毫米波通信

InGaAs HEMT 和硅 CMOS 的晶圆级集成可以实现毫米波电路，占用空间小，成本低，性能高。

Sachin Yadav, Sang Xuan Nguyen, Fayyaz Singaporewala, Kenneth Lee, Eugene Fitzgerald, Xiao Gong, 新加坡 - 麻省理工学院低能电子系统研究与技术联盟



直到最近，这种集成还在电路板或封装级别上来进行。但这并不是最理想的，因为它的电路占用空间大，互连损耗也大，并且成本很高。

一个更好的选择是不同材料体系的晶圆级集成。这种方法为未来的通信器件开辟了许多的新机会。对于纯硅 RF 技术而言，单片异构集成有望降低成本，降低互连功耗，优化电路性能，缩小芯片尺寸，减少板级封装，并为毫米波通信应用，如 5G 移动和无线，提供更多电路创新的空间。

单片集成带来的卓越性能部分源于将硅和 III-V 器件非常紧密地放置一起，它们可以仅分开几微米，有时甚至更少。能够以这种方式实现的系统包括基于硅和 III-V 的混合单片集成的收发器（参见图 1）。该系统可以结合使用高性能 III-V 族材料形成的 RF 前端，或 III-V 和硅 CMOS 器件的组合；同时采用高度集成硅 CMOS 技术的数字基带。这是一种结合了 III-V 族和硅的最佳结合。

III-V 族材料选择

目前有几种 III-V 族技术都可用于生产毫米波频率的功率和低噪声固态放大器，即跨度为 30 GHz 至 300 GHz 的技术。在这些选择中，InGaAs HEMT 和 HBT 为 5G 应用提供最均衡的噪声和功率性能（参见图 2（a）的各种微波，毫米波和亚毫米波功率放大器的片上输出功率）。

鉴于 GaN 在 RF 领域的成功，对 InGaAs 的偏好可能会引起一些人的侧目。然而，虽然 GaN 基 MMIC 在固态器件技术中表现出最佳功率输出，但由于 GaN HEMT 的大的拐点电压，GaN PA 由于高的工作电压而受到不良影响。

如果采用混合 III-V 族和硅的技术来实现具有巨大销售额的器件，则必须针对已经使用硅的规模生产。在无线领域，我们已经在移动设备（例如手机）中实现了这样的体量。然而，手机的工作电压范围使得 GaN 失去了其主要的优势。

自 1959 年推出集成电路以来，硅一直主导着半导体行业。硅以 CMOS 的形式极快速地发展着，提供了无与伦比的器件集成密度。

然而，硅并非万能的。在高频领域，由这种材料制成的器件不如由 GaAs，GaN 和 InP 等材料制成的器件，所有这些替代器件都具有更高的功率，更低的噪声和出色的线性。因此，现代通信器件的趋势是在同一块电路板上集成高速 III-V 器件和高密度硅 CMOS。

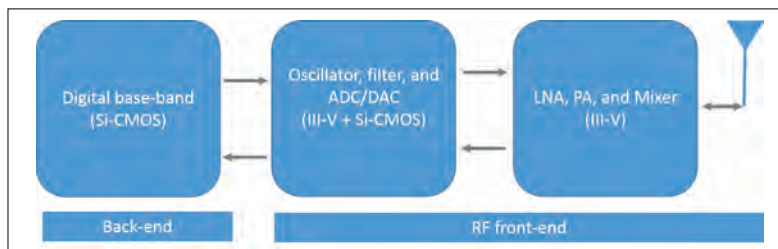


图1. 混合收发器系统可以利用III-V和硅CMOS技术的优势。通过这种方法，使用III-V技术可以设计高性能放大器，滤波器和转换器，而控制和数字电路可以使用硅CMOS设计。此外，可以使用III-V和硅CMOS器件的组合来实现诸如ADC（模数转换器）和DAC（数模转换器）的混合子电路。

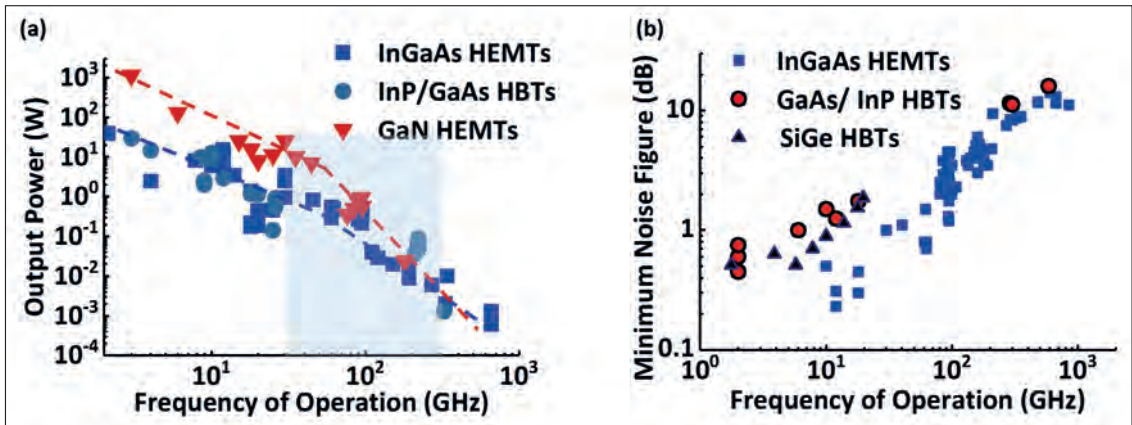


图2. (a) 绘制出的各种片上III-V功率放大器的输出功率与频率的函数关系表明，对于低于100GHz的工作频率，基于GaN的功率放大器与其他固态技术相比具有更高的性能。对于100 GHz以上的频率，InGaAs HEMT和InP HBT可实现最佳的功率性能。(b) 比较各种低频噪声放大器的各种频率的噪声系数，表明基于InGaAs HEMT的器件的噪声系数提供了最佳的噪声性能。

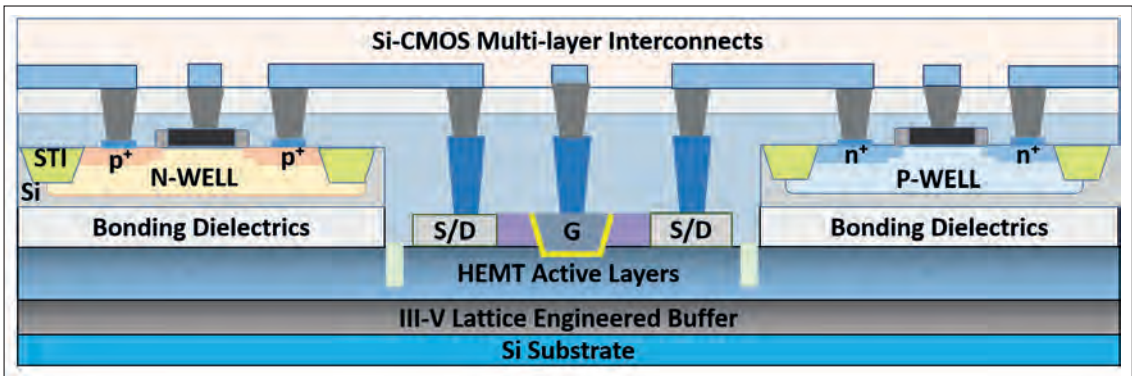


图3. 在SMART-LEES，异构集成使用InGaAs HEMT和硅CMOS。首先，制造好硅CMOS前端并将其转移到硅上InGaAs晶圆上。之后，在蚀刻窗口中制造InGaAs HEMT。最后，在CMOS代工厂，后端工艺在硅CMOS和InGaAs HEMT之间形成互连。

对于超过 100GHz 的频率，最佳 PA 性能来自于 InGaAs HEMT 和 InP HBT。在这两者中，InGaAs HEMT 具有更低的噪声系数，使其成为在此频域工作的低噪声放大器的首选。这个优势源于 InGaAs HEMT 的创纪录的高跨导，电子迁移率和截止频率，能带工程使这些器件能够跨越从几 GHz 到 1THz 的频率范围。因此，因此这些器件具有多种功能，同时它们的中等输出功率和低

噪声系数相结合，使基于 InGaAs HEMT 的放大器成为 5G 移动等应用的最佳选择。

集成 InGaAs 和硅

在新加坡 - 麻省理工学院低能电子系统研究与技术联盟 (the Singapore-MIT Alliance for Research and Technology Low Energy Electronic Systems, SMART-LEES)，我们使用 200mm 硅晶圆将 InGaAs MOS-HEMT 与硅 CMOS 集成在一起 (见图 3)。

这种方法的优点之一是通过使用大直径晶圆，我们可以满足对这些技术不断增长的需求。额外的优点是集成可以采用现有的，成熟的硅多层互连；并且通过将 p 型硅晶体管与 n 型 InGaAs 晶体管组合，可以形成混合电路。这两种不同类型的器件之间的间隔可以小到几微米。

MOS HEMT 相比市售的肖特基栅极 HEMT，是一种鲜为人知的器件。但在我们的电路中，我们认为这是一个更好的选择。近年来，InGaAs MOS 器件和欧姆接触在研究界得到了极大的关

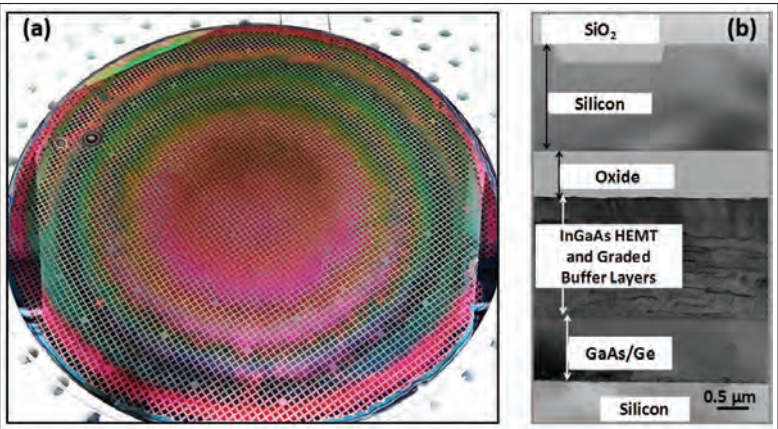


图4. (a) 照片显示了键合的图案化SOI和硅衬底上InGaAs。(b) 键合的SOI (已图案化) 和硅衬底上InGaAs的横截面透射电子显微镜图像。

注，因为其成功实现了所有 III-V FET 中 InGaAs 量子阱 MOSFET 的跨导记录。MOS HEMT 的另一个特征是它可以采用高 κ 栅极氧化物，与肖特基栅极 HEMT 相比，这可以减小栅极的漏电流。这是最受欢迎的性能，因为它能为更激进的器件缩放和更高的器件密度提供条件。

我们按照 CMOS 流程顺序加工硅 CMOS 和 InGaAs 前端器件（参见“整合 CMOS 和 InGaAs 前端器件”）。我们的工艺包括晶圆键合的步骤（见图 4）。

我们方法的一个关键优势是它允许不考虑硅和 InGaAs 的前端工艺相关的热预算。由此，III-V 器件层外延生长所需的 600 °C 或更高的高温可以远离前端工艺处理期间硅晶圆上形成的器件。更重要的是，我们的方法避免了将 InGaAs MOS-HEMT 暴露于由于硅 CMOS 的前端工艺步骤相关温度所引起的退化。

我们 InGaAs HEMT 的生长在 Aixtron Carius

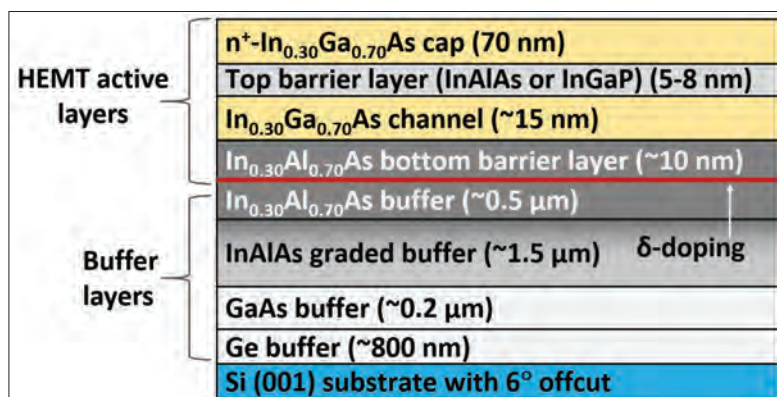


图5. 在SMART-LEES，使用Aixtron Carius MOCVD反应器在200mm硅衬底上生长的InGaAs HEMT结构。

MOCVD 反应器中进行，使用具有 6° 斜切和 200mm 直径的 725 μ m 厚硅 (001) 衬底。为了平衡与电子迁移率相关的器件截止频率和与能带隙相关的击穿电压，我们在沟道中使用的铝组分为 30%。缓冲层解决了 In_{0.30}Ga_{0.70}As 与硅之间为 6.3% 的大晶格失配（有关详细信息，请参见图 5 中我

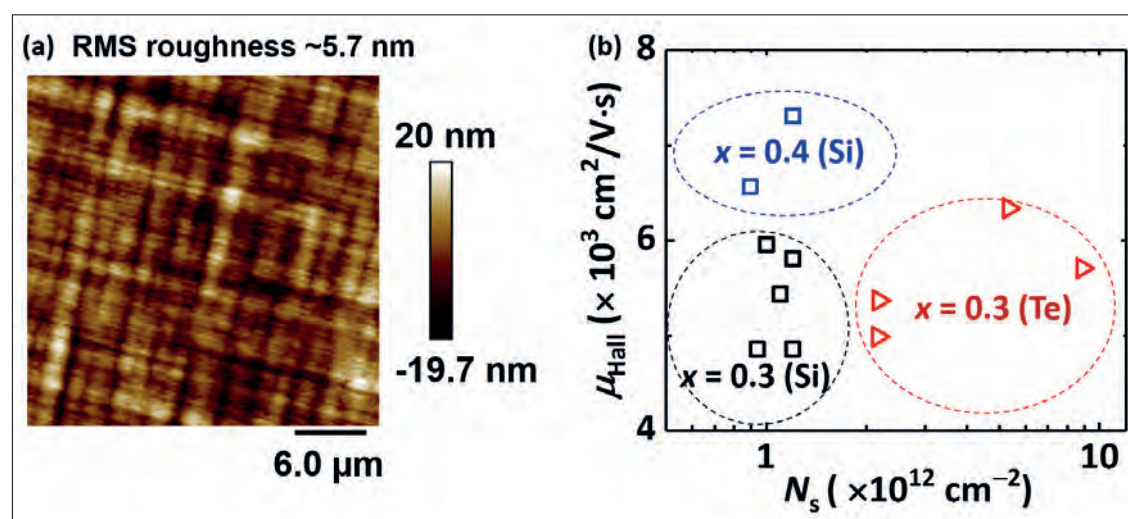


图6. (a) 顶部InGaAs表面扫描区域为30 μ m $\times$ 30 μ m的原子力显微镜扫描。RMS粗糙度约为5.7nm。 (b) InGa_{1-x}As沟道中不同 δ 掺杂种类和组分的数据。通过优化 δ 掺杂，可以在碲和硅掺杂样品中实现超过5000cm²V⁻¹s⁻¹的霍尔迁移率 μ_{Hall} 。

整合CMOS和InGaAs前端器件

使用新加坡低能电子系统部门工程师采用的集成方法，CMOS 和 InGaAs 前端器件按 CMOS 流程顺序进行工艺。制作涉及以下步骤：

- 硅 CMOS 的前端工艺
- 通过 MOCVD 在单独的硅晶圆上生长 InGaAs HEMT 外延层
- 使用多步工艺将前端进行工艺的硅 CMOS 层转移到 InGaAs HEMT 晶圆上，包括：将前端进行工艺的硅 CMOS 晶圆（SOI 上）键合到硅支撑晶圆；从硅 CMOS 晶圆上除去硅衬底；将得到的晶圆键合到硅上 InGaAs 晶圆上；并去除硅支撑晶圆
- 使用硅代工兼容工艺在 III-V 族材料窗口中制备 InGaAs MOS-HEMT。这涉及难熔金属接触和免剥离的工艺
- 采用后端工艺在硅 CMOS 和 III-V 族器件之间形成互连

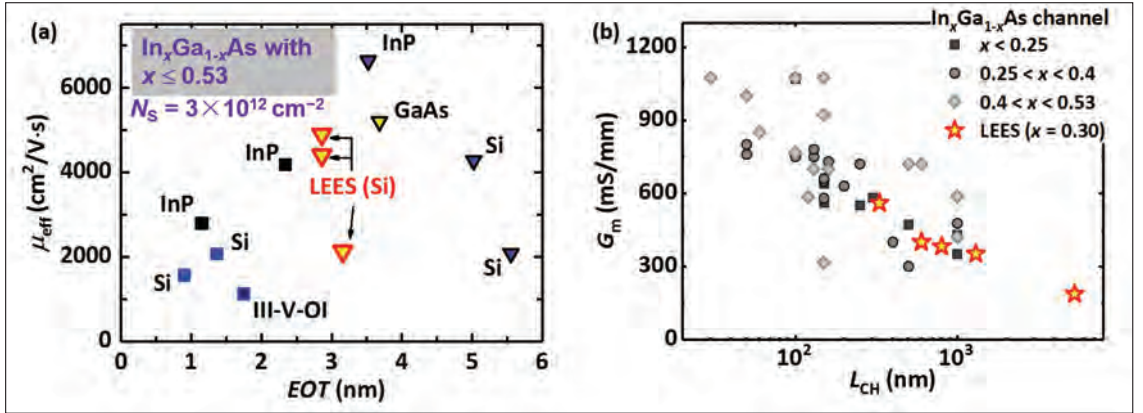


图7. (a) 报告的有效迁移率 (μ_{eff}) 与硅, GaAs和InP衬底上制造的 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x \leq 0.53$) 沟道MOSFET的面电子密度 (N_s) 为 $3 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 时的有效氧化物厚度 (EOT) 的函数关系。LEES制备的MOS-HEMT中的 μ_{eff} 是大面积硅衬底上InGaAs MOSFET的最高报道数值。请注意, 三角形代表掩埋沟道MOSFET, 而正方形代表表面沟道MOSFET。 (b) 对于硅上GaAs mHEMT, pHEMT和LEES的MOS-HEMT, 峰值跨导 (G_m) 作为沟道长度 (L_{CH}) 的函数。由于具有高的III-V材料质量, LEES的硅上MOS-HEMT可以在类似沟道长度上实现接近本征GaAs衬底上GaAs HEMT的跨导。注意, mHEMT和pHEMT分别指质配和应变HEMT。

们的 HEMT 结构)。

为了实现高质量的器件层, 我们改善了外延结构的材料均匀性, 同时降低了穿透位错密度, 晶圆翘曲和表面粗糙度。使用 630°C 的高生长温度和厚度约为 $1.5\mu\text{m}$ 的相对厚 InAlAs 梯度缓冲层, 我们生长材料的螺旋位错密度为 $1 \pm 0.3 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$, 这是通过平面视图投射电子显微镜测量得到的。基于 50 次生长运行的结果, 晶圆略微凹陷, 翘曲仅为 $39 \pm 4\mu\text{m}$ 。由于从晶圆中心到边缘的温度仅相差为 5°C , 同时由于 MOCVD 工具的喷淋头配置所提供均匀气流, 因此整个晶圆上的材料成分变化非常小。

原子力显微镜显示顶部 n+-InGaAs 盖层的均方根表面粗糙度为 5.7nm (参见图 6)。请注意, 由于较高的生长温度, 该值高于 MBE 生长的 HEMT, 这是通过大长度尺度上的交叉阴影粗糙度的轻微增加来实现优异的材料质量。

通过改变 δ 掺杂浓度和物质, 我们根据霍尔测量实现了 $\text{In}_{0.30}\text{Ga}_{0.70}\text{As}$ 沟道的迁移率为 $5000\text{--}6500 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。使用梯度缓冲技术可以使薄

沟道层中的铟浓度变化约 20%, 而不会影响材料质量。这使我们能够生长 $\text{In}_{0.40}\text{Ga}_{0.60}\text{As}$ 沟道的器件, 霍尔迁移率超过 $7000 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。能够调整组分是非常必要的, 因为这个可以使我们能够平衡器件的击穿电压和截止频率。

采用基于优化栅极堆叠模块和钨、钼基欧姆接触之后, 我们的 InGaAs MOS-HEMT 的性能现在可以接近 GaAs pHEMT 和 mHEMT 的性能了。我们的 MOS-HEMT 有效迁移率相对于采用表面和掩埋沟道的 InGaAs MOSFET 有效迁移率的基准测试表明, 由于其优化的能量势垒和栅极堆叠层, 我们的器件具有硅上所形成晶体管的最佳值之一 (见图 7 (a))。这种迁移率与低至 $300\text{W} \times \text{mm}$ 的源极电阻相结合, 可为沟道长度为 0.33mm 的器件提供 560 mS/mm 的高跨导 (见图 7 (b))。我们器件的电流增益截止频率为 60GHz , 这是从 150nm 栅极长度的晶体管中提取得到的。

我们现在正致力于优化器件的毫米级功率和噪声性能, 并为未来的通信系统开发混合电路技术。OS

扩展阅读

<http://smart.mit.edu/research/lees/lees.html>

<http://www.circuit-innovation.org/>

<http://www.compoundsemiconductor.net/article/98881-building-the-ics-of-the-future.html>

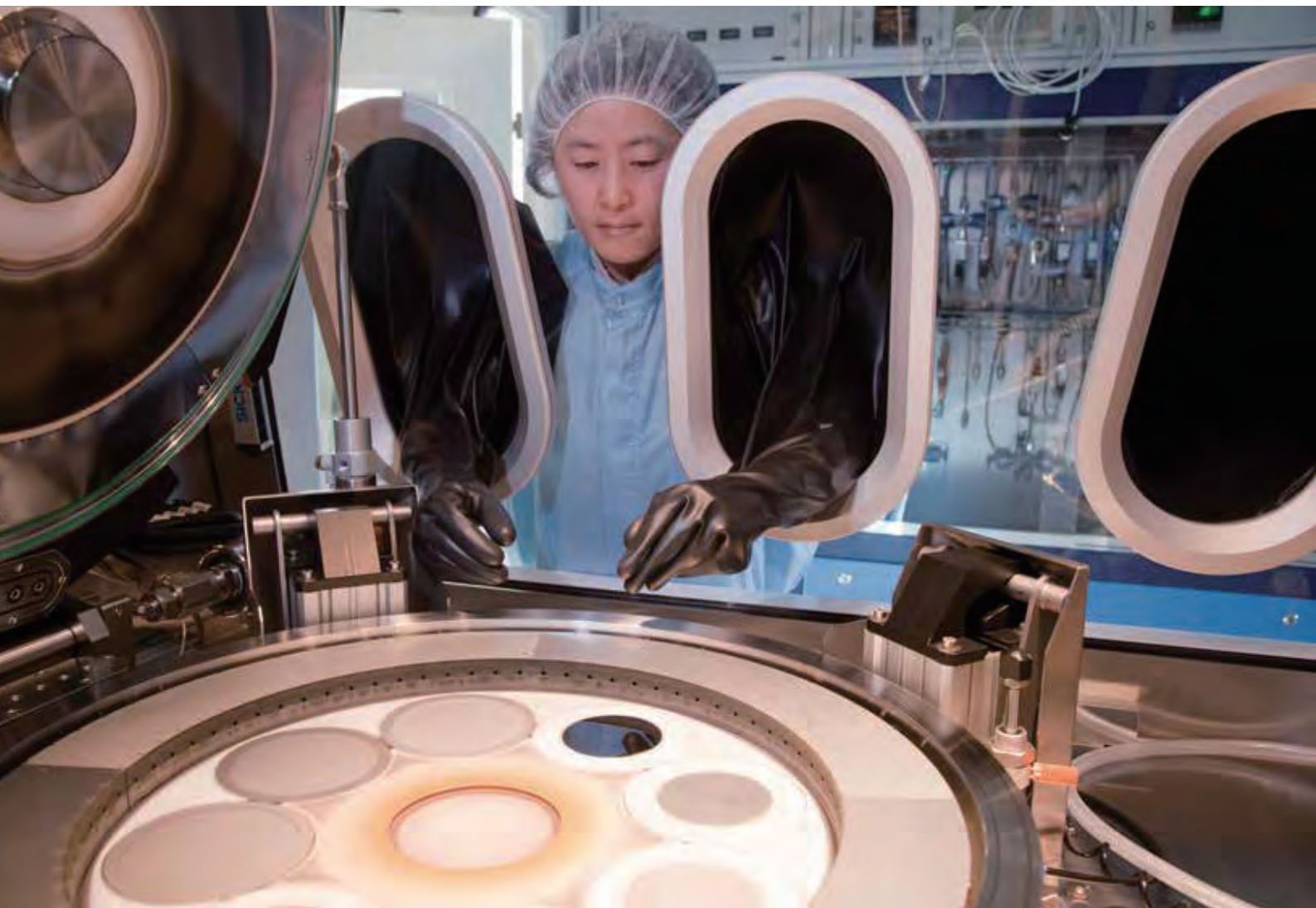
<https://compoundsemiconductor.net/article/100488-adding-colour-to-future-silicon-ics.html>

S Yadav et al. IEDM Tech. Dig., 421-424 (2017)

EA Fitzgerald et al. ECS Transactions 75 439 (2016)

D Kohen et al. AIP Advances 6 085106 (2016)

* 作者感谢新加坡国家研究基金会通过 SMART 的 LEES IRG 研究项目给予的资助, 以及 LEES 团队现任和前任的成员, 包括 Annie Kumar, David Kohen, Saeid Masudy-Panah, Kwang Hong Lee, Viet Cuong Nguyen, Cheng Yeow Ng, Chuan Seng Tan, Dimitri A. Antoniadis, Yee-Chia Yeo 和 Soo Jin Chua 对本文所述结果做出的贡献。



开发高效、可靠的 UV LED

UV LED 的性能通过减低其位错密度、提升光提取效率和强化热管理得以改善

Neysha Lobo Ploch, UV PHOTONICS 和费迪南德 - 布劳恩研究所
Michael Kneissl, 柏林工业大学和费迪南德 - 布劳恩研究所

UV LED 正在获得越来越广泛的应用，从水、空气和表面消毒到医疗诊断、光疗和各种材料的固化等均在其列。促成该器件取得成功的是其相对于现用光源（汞灯）所具备的优越属性。UV LED 可以瞬间接通和关断，它在工作状态下不会发热，拥有环保和抗辐射的特点，而且其发

射光谱范围是可选择的，以覆盖几乎整个 UVA、UVB 和 UVC 波长范围。更重要的是，它具有低工作电压、紧凑的尺寸和坚固性，因而使其成为便携式电池供电应用的理想选择。

尽管拥有上述诸多长处，但是 UV LED 的销售收入与汞灯比起来仍然是相形见绌。部分原因

是这类器件的制造技术还处于初期阶段，大规模制造尚未开始。

另外，还存在与性能相关的其他问题。UV LED 的转换效率远低于蓝光 LED，在 UVB 和 UVC 波长范围内低于 10%。而且寿命短得多：UVC LED 的持续工作时间可能只有几千小时，甚至区区几百小时。这些弱点增加了与拥有和维护相关的成本，并阻碍其在商业上获取成功及得到广泛应用。

为了提高 UV LED 的商业可行性，必需延长寿命并改善电光转换效率和外部量子效率。好消息是，在大多数情况下，这几种特性的数值不会受到基本物理极限的抑制，而是可通过改进制造工艺实现提高。

开发高效率器件

在 UV PHOTONICS，通过与柏林工业大学 (TU Berlin) 和费迪南德-布劳恩研究所 (FBH) 共同建立的 GaN 光电子联合实验室进行合作，我们正在努力解决 UV LED 所存在的这些主要弱点。我们的工作专注于提高采用 MOCVD 工艺生长、并在 UVB 和 UVC 波长范围内发射能量的器件的效率和可靠性。我们制作的器件的发射波长覆盖范围为 340 nm 至 218 nm (见图 1)。

为了推动开发成本更低、功能更强大和寿命更长的器件，我们正在评估和优化 LED 制造过程的每一步，从具有各种材料成分的不同半导体层（其构成了 LED 异质结构）的生长到个别芯片的封装都包含其中。

对于所有的 UV LED 制造商来说，第一个需要做出的决定是选择哪种衬底。我们选择的是蓝宝石：它是光学透明的，成本低，可提供的最大直径达 8 英寸。

蓝宝石的缺点是它与 UV LED 的 AlGaIn 层具有很大的晶格失配。在晶体生长过程中，这导致在界面上形成穿透位错。假如这些缺陷传播到生成光的活性区，它们就会充当无辐射复合中心，因而阻碍器件效率的提高。从仿真和试验结果来看，这种影响是非常严重的：当穿透位错密度从 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 增至 $5 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 时，280 nm LED 的输出功率会锐减 50% 以上。

为了降低 UVB LED 中的穿透位错的不良影响，我们使用了厚的 AlN 层，跟随其后的是由交替的 GaN 和 AlN 薄层组成的应力管理部分。当

采用此方法时，穿透位错密度约为 $3 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 。

在更短的波长上，位错对于效率的危害更大。为防止产生这种问题，我们的 UVC LED 的制造以外延横向过生长为起点，旨在把穿透位错密度降低至 $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 左右。

目前，我们正在研究其他有前途的成本效益型方法以降低穿透位错密度。这些方法包括将 AlN 薄膜溅射到蓝宝石衬底上，然后在高温条件下退火，以获得高质量的结晶层。

我们的 UV LED 结构的生长始于硅掺杂 n 型 AlGaIn 层，它必须将发射波长上的光透明性与用于实现均匀横向电流散布的高导电性相结合。位于其后的是活性区，包含了若干个 AlGaIn 或 InAlGaIn 量子阱，接下去是一个电子阻挡层（其作用是阻止电子从活性区逸出）和一个高导电性掺杂 p 型 AlGaIn 层（用于空穴注入）。

运用标准光刻法将这些 LED 外延片加工成横向几何结构器件。随后是激光划片和切片工艺，以制成单独的裸片。通过采用这种方法，我们造出了在 350 mA 电流条件下输出功率达 30 mW 的 310 nm UVB LED。在老化之后，推测的寿命（按照输出功率减半所需的时间来估算）为 8,000 小时。

正如预计的那样，波长较短时的输出功率降低：在位于 UVC 波长范围内的 265 nm，我们的器件在 350 mA 时可提供 25 mW 的输出功率。而在更短的 233 nm 波长上，100 mA 时的输出功率则仅为 0.3 mW。需要注意的是，这个结果是采用世界上最早推出的全封装型 UVC LED 中的一款

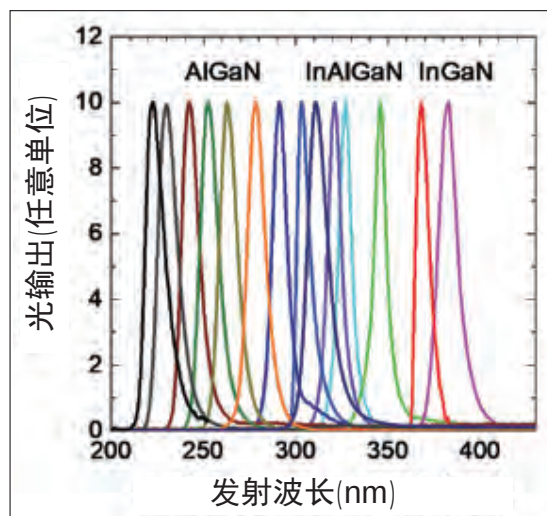


图1. 在柏林工业大学 (TU Berlin) 和柏林费迪南德-布劳恩研究所 (FBH Berlin) 共同建立的 GaN 光电子联合实验室里制作、基于 III 族氮化物的 UV LED 的归一化发射光谱 (版权所有: TU Berlin)

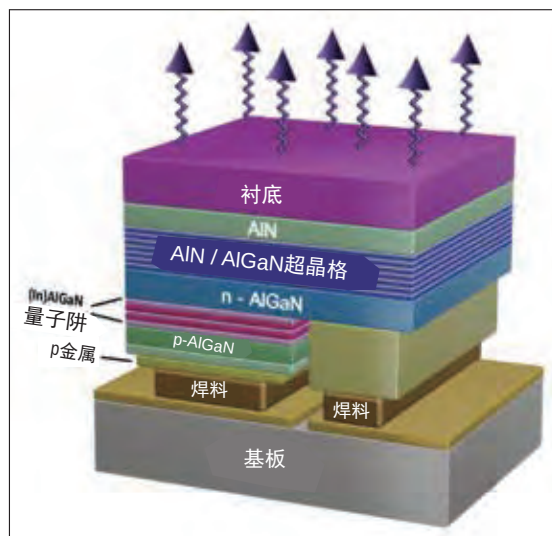


图2. 采用倒装式芯片安装并基于 III 族氮化物的 UV LED 裸片。
(版权所有: TU Berlin)

在这么短的波长上产生单个发射峰值时获得的。

把光取出来

在每个 LED 中，并不是所有在活性区内生成的光都离开芯片。但是，这种情况在 UV LED 中更加严重，因为 AlGaIn 层的高折射率增加了总的内部反射，从而在器件内部导致了 UV 光吸收量的上升。特别地，在金属触点和 p-AlGaIn 空穴注入层上会发生光丢失。

UV LED 的另一个问题是光提取效率受到 III 族氮化物价带结构变化的影响。当发射波长由于量子阱中铝含量的增加而减小时，发射光的偏振发生变化。在较长的波长上，发射主要是横向电性偏振（相对于面向 (0001) c 平面的蓝宝石衬底的表面法向），但是，当发射波长进一步深入 UV 范围时，偏振变成以横向磁性为主。这种取向导

致从芯片提取光的效率较低。

大量的试验和理论研究结果表明，偏振从横向电性切换至横向磁性时的波长在 240 nm 附近。不过，这个渡越点可通过改变衬底取向以及量子阱内的应变和量子限制进行移位。

对于未配备任何光提取功能的典型 UVB LED，仿真结果显示：在活性区中生成的光只有 8% 离开了芯片。这个数值在较短的波长上则更小。因此，光提取技术对于实现高效率器件是至关重要的。

我们的团队正在开发两种用于提升光提取效率的方法：结合了一个反射式低电阻 p 金属触点的透明 p 电流散布层（例如：连同一个铝反射器的透明 ITO 层）；以及在图形化蓝宝石衬底上的晶体生长。使用后一种方法时，通过增加光的直接提取以及 LED 中光子角分布的随机化，升高了光提取效率。

封装方面存在的瓶颈

低电光转换效率不利的一面并不限于低输出功率。从芯片提取的光越少，在芯片内部产生的热量就越多。这是个大问题，因为较高的温度会损害 LED 的电特性和光特性，而且还将加速其性能的退化。

防止 UV LED 芯片发生过热的最常用方法是采用倒装焊芯片技术将低导热性蓝宝石裸片键合至一种能够吸走热量的材料。通过运用该方法，裸片以外延片侧面朝下的方式键合，从而使热量能够高效地传递至金属焊盘（见图 2）。

如果把这种倒装式芯片器件与常用于可见光 LED 的廉价、容易采购、且导热性有限的氧化铝

UV 光源的应用

有许多应用可由工作在 UVA (315 nm 至 400 nm)、UVB (280 nm 至 315 nm) 和 UVC (100nm 至 280 nm) 波长范围内的 LED 提供支持。

在 UVA 和 UVB 波长范围内发射能量的 LED 可用于树脂和聚合物的工业固化，这是一种使物体表面变硬并能生产耐磨产品的工艺。不过，UVB LED 的主要应用是治疗诸如银屑病和白癜风等皮肤病的光疗，以及用于植物次生物质针对性触发的植物生长照明。

对于 UVC LED 来说，最大的市场是水、空气和表面消毒。这里，发射电路的快速接通以及电子式调光能力和紧凑型尺寸为设计专门针对大规模应用和小型移动系统而定制的节能型系统提供了独特的优势。对于非常短波长的 UVC LED，也存在着与非视距通信及引力传感器领域中的基本科学实验相关的市场机遇。

UVB 和 UVC LED 的其他市场机遇包括气体（例如：SO₂，一氧化二氮和氨）的检测，以及 DNA、RNA 和其他生物分子的分析。

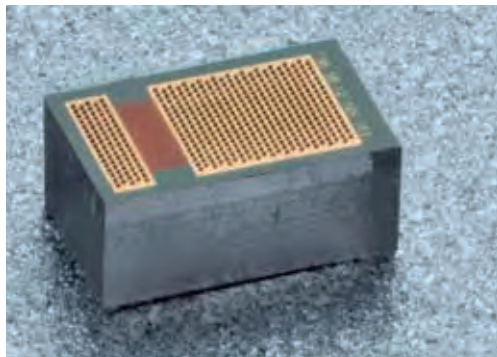


图3. 单颗 UVB LED 芯片（具有利用晶圆级上的电镀工艺沉积的金钉头凸点）。（版权所有：FBH / schurian.com）

陶瓷封装相组合，可能会是一个错误。其中一种正在为深 UV LED 开发的较新型封装要好得多，该封装采用 AlN 陶瓷层，具有 $150 \sim 170 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 的导热系数。

但是，以上这些封装还很不理想。它们不仅价格昂贵，每片售价

超过 1 美元，而且很难与铝制 UV 反射器实现集成化。此外，器件封装也是很棘手的，因为当暴露在高能量 UV 光子之下时，可见光 LED 中使用的大多数最先进的高折射率透明硅树脂和环氧树脂都是不稳定的。

鉴于存在这些问题，因此如今的封装型深 UV LED 往往包括了 UV 透明石英窗或石英透镜。

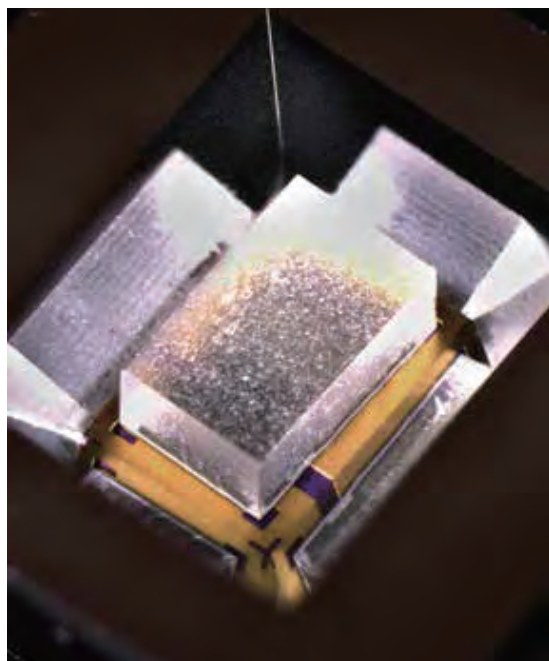


图4. 安装在硅封装中的 320 nm LED 倒装式芯片。该封装由德国 CiS 微型传感器研究所开发（版权所有：CiS）

这不仅拉高了成本，而且还会增加制造的复杂性，原因在于将石英透镜集成到器件中是颇具挑战性的工作。显然，对于商业可行性而言，为深 UV LED 开发廉价的封装材料是至关重要的。

我们正在努力解决所有这些与热管理相关的问题。我们的方法包括在芯片与封装之间的首次互连中使用金钉头凸点的热压焊。我们采用电镀法将一个 $15 \mu\text{m}$ 宽、 $8 \mu\text{m}$ 高的六角形钉头凸点阵列（凸点的分隔间距为 $30 \mu\text{m}$ ，见图 3）直接沉积在 LED 晶圆片上。由于金的导热系数为 $320 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ，因此仿真结果显示，对于金属焊盘上的钉头凸点覆盖率为 20% 的 320 nm LED，该互连线的热阻可低至 7.15 K W^{-1} 。请注意，我们能够采用自己的电镀工艺在一颗完整的 2 英寸晶圆片上形成均匀的金钉头凸点沉积，而且这种做法可扩展到尺寸大得多的晶圆，以削减成本。

通过与我们在 CiS 微型传感器研究所的合作伙伴进行协作，我们正在为 UV LED 开发一种基于硅的封装（见图 4）。利用我们的合作者在硅技术方面拥有的出色专长，我们能够开发出兼具低热阻和多功能集成（例如：用于提高光提取效率的铝制反射器，用于防止静电损害的集成型二极管，以及监视传感器）的成本效益型封装。

接下来会发生什么？

UV 市场无疑处在上升通道，越来越多的公司为扩大销售展开了竞争。UVB 和 UVC LED 的发展步伐大幅加快，业界专注的焦点将集中于开发旨在提高光提取效率的先进技术以及在热管理性能方面胜人一筹的成本效益型封装。

可以说，最大的两个问题是寿命和每瓦成本。为了确保 UV LED 系统对于实际应用的稳定性，寿命必需长得多。与此同时，尽管大约每毫瓦一美元的单位成本对于早期使用者来说可能足够好了，但是对于寿命长得多的器件而言，进入大规模市场将需要将单位成本大幅降低至每瓦一美元。

本文作者感谢德国联邦教育与研究部 (BMBF) 在 Twenty 20 项目「面向生活的先进 UV」(Advanced UV for Life) 中给予的支持。Advanced UV for Life 联盟汇集了 50 家德国工业和学术合作伙伴，他们共同致力于 UV LED 的开发和应用。这项工作由德国柏林的莱布尼茨联合会费迪南德 - 布劳恩研究所负责协调。SC

扩展阅读

- N. Susilo et al. Appl. Phys. Lett. 112 041110 (2018)
- F. Mehnke et al. IEEE J Sel Top Quantum Electron. 23 1 (2017)
- T. Kolbe et al. Materials 10 1396 (2017)
- J. Rass et al. Proc. SPIE 9363 93631K (2015)
- C. Reich et al. Appl. Phys. Lett. 107 142101 (2015)
- J. Glaab et al. J. Appl. Phys. 123 104502 (2018)
- M. Kneissl, J. Rass (Eds.), III-Nitride Ultraviolet Emitters-Technology and Applications, Springer Series in Materials Science, ISBN 978-3-319-24098-5 (2016)

在玻璃上生长 III-V 族材料

织构的 MgO 薄膜有望使大面积玻璃板上的 III-V 族器件结构用材料得以生长。

Ashok Chaudhari, SOLAR-TECTIC 公司



硅是制造 GaN 基 LED 时优于蓝宝石的衬底吗？是的，有些公司当然这么认为。以英国的 Plessey 半导体公司为例：它认为硅不仅在成本方面具有优势，而且在散热方面也有优势。与此同时，韩国三星声称，通过将 200 毫米硅上 GaN 外延片与晶圆级芯片级封装相结合，可节省高达 60% 的成本。这也是德国 Allos 的共识，他们认为随着工艺的成熟，这些成本节约最终可能会更多。

我们位于纽约 Briarcliff 庄园的 Solar-Tectic

公司，也高度赞扬摒弃昂贵的蓝宝石晶圆。但我们认为可以更进一步，并节省更多。我们的想法是，不是使用硅晶圆，而是可以在硅或锗的薄膜上生长 GaN。因此，生产需要采用廉价的基板，例如钠钙玻璃，并在其上沉积硅（或锗）的薄膜，并随后在其上生长 GaN LED 异质结构。除了减少衬底成本之外，这种方法还可以为 microLED 的制造提供另一个关键优势：器件可以单片制造，而且不需要像素转移，因为 GaN 可以直接在硅薄膜上生长。

我们预期我们的方法会引起化合物半导体界的一些怀疑，人们通常认为高质量的异质结构是器件成功的基础。很明显，根据我们的方法，采用硅的多晶膜是不可接受的。但外延材料到底需要有多好呢？如果它不是严格的单晶，而是接近单晶，是否就是足够好的呢？

几十年来，材料界的人们一直在争论这些问题。通过他们的努力，他们已经意识到硅薄膜必须具有“择优取向”或“织构”。实现这种薄膜的一种方法是在高度织构化的玻璃表面上形成薄缓冲层。通过采用这种方法，可以在硅膜中引入织构或取向。这是产生织构硅薄膜的关键，可以使得该硅薄膜的质量足够接近单晶硅晶圆，从而其上的器件性能能够相当。然后在这种薄膜上，用于 LED 的取向 III-V 材料可以实现异质外延生长。

我们接受这种方法的妥协：失去了与硅有关的热优势，因为硅具有比钠钙玻璃高得多的热导率。当然，这对于显示行业来说不是什么大问题，因为显示器的制造通常涉及在具有缓冲层的玻璃上沉积晶体硅薄膜的工艺步骤，称为低温多晶硅（LTPS）。或者通过等离子体辅助 CVD 沉积非晶硅（ α -Si:H）薄膜。后者是目前最常用的方法。

除了导热性差这个小缺点，我们的晶体硅薄膜方法对基板尺寸几乎没有限制。只有反应器会限制基板的尺寸。更重要的是，沉积硅薄膜的工艺比 MOCVD 便宜得多；并且由于该方法是单片的，所有供应链元件可以组合在一起：LED，薄膜晶体管背板和芯片传输（不使用拾取和放置）。

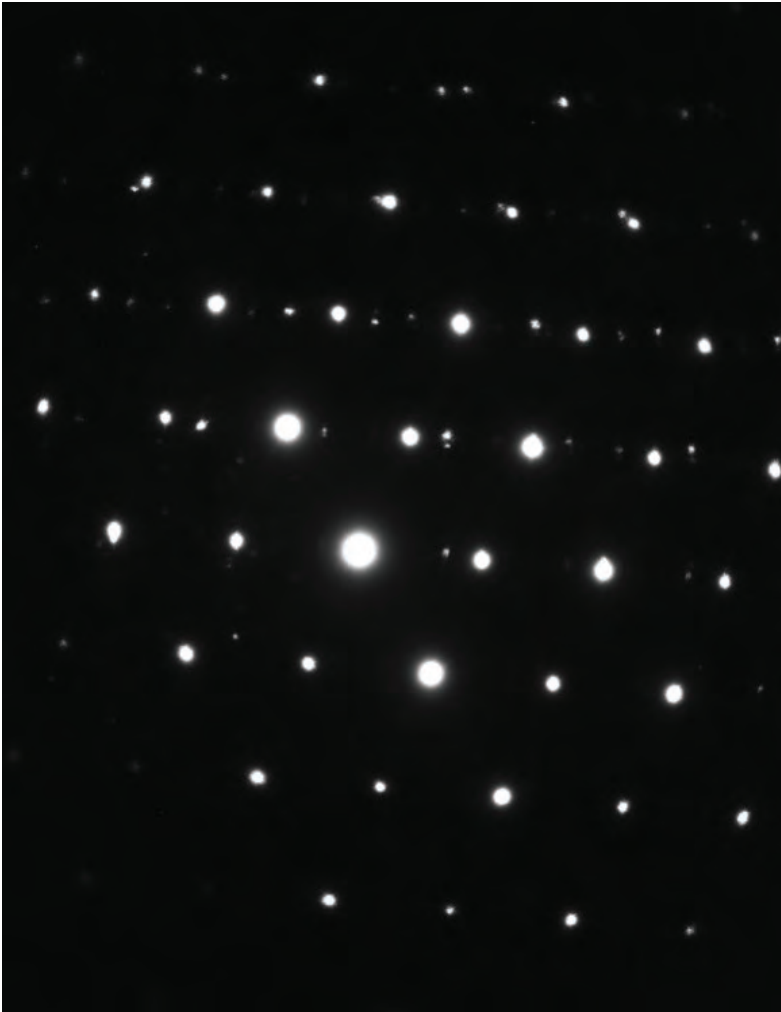


图1. 钠钙玻璃上450°C下生长的7 μ m MgO薄膜的透射电子显微镜图像，显示出了表明织构的原子对齐状态。

生长问题

众所周知，在硅衬底上生长高质量的 GaN 外延层并不容易。这两种材料具有显著的晶格失配，而且热膨胀系数也相差近 50%。这些差异导致了晶体缺陷，例如位错和裂纹，而这些缺陷会影响

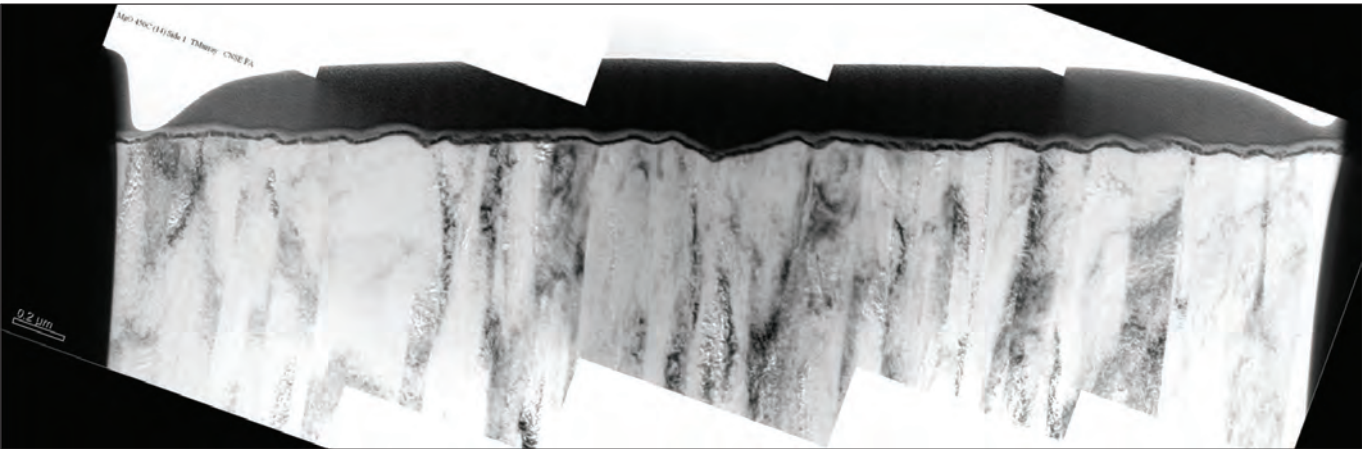


图2. 钠钙玻璃上450°C下生长MgO（111）薄膜的透射电子显微镜横截面图。

效率和可靠性，并最终导致低的良率和高的成本。

当 GaN 在硅薄膜上生长时，这些问题不再是问题，因为应变较小。这降低了位错密度，使得晶圆开裂最小化，并减轻或消除了对 AlN 或 AlGaIn 缓冲层的需求。

薄膜还为设计带来了更多自由度。例如，有可能从硅切换到锗，后者的晶格常数几乎与 GaAs 完全匹配。注意，对于任意一种薄膜，GaN 中的缺陷密度都可能小于在硅衬底上生长时材料中的缺陷密度。通过我们的方法，可以通过选择具有纳米精度的厚度来控制薄膜的平滑程度。

几年前，当我们开发降低光伏电池成本的工艺时，我们在玻璃上开发薄膜的努力就开始起步了。当时，我们正在使用 Al_2O_3 （蓝宝石）和 MgO 的织构缓冲层，我们的努力使得首次实现了钠钙玻璃上的 (111) c 轴取向的薄膜绝缘体。这是一个重要的里程碑，因为这种取向可以极大地改善材料的电子性能。

其他小组也制备出了织构薄膜。然而，他们使用离子束辅助沉积，这比我们申请专利的电子束蒸发方法昂贵得多。

最初的 MgO 薄膜就比我们期望的要好得多。我们预期会在 X 射线衍射扫描中看到单峰，以显示高的织构度。但我们其实还看到了第二个峰。该峰平行于 (111)，也就是 (222)，显示出 MgO (111) 的生长，并且具有沿着 c 轴几乎完美的单晶 (111) 排列。

从那时起，我们用透射电子显微镜（见图 1 和图 2），电子背散射衍射（见图 3），光学透射谱（见图 4）和粘附力测试等方式仔细研究了我们的薄膜。总之，这些技术表明 MgO 在钠钙玻璃上具有很高的织构，完全透明以及良好的粘附性。相比通过离子束辅助沉积形成的 MgO，我们的薄膜仅有的劣势是，更昂贵的工艺可以形成具有双轴取向的薄膜。这使得后续膜层具有双轴织构，并且比通过我们电子束蒸发生长的膜层有更好的结晶质量。

在开发光伏器件时，我们发现电子束蒸发可

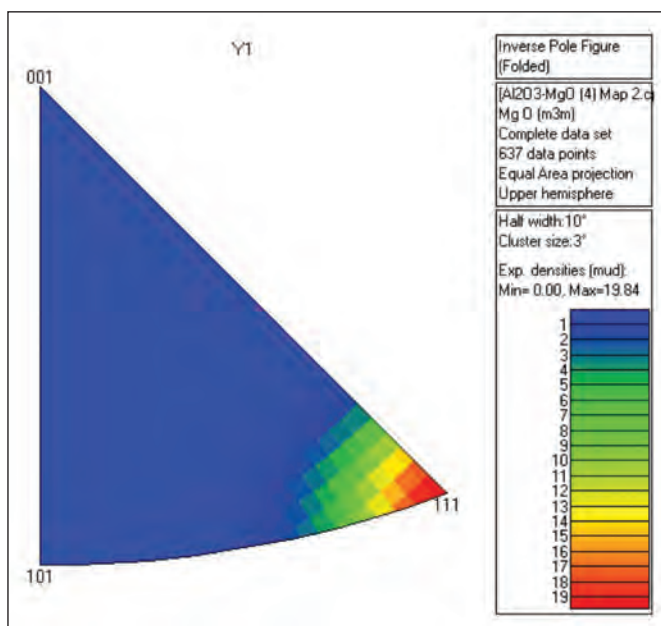


图3. 钠钙玻璃上450℃下生长的7μm MgO薄膜的电子背散射衍射（EBSD）图。图像清楚地显示薄膜的晶粒（单晶）沿（111）平面高度取向。

以形成具有 (111) 择优取向的织构缓冲层。这是我们非常希望得到的，因为它可以实现织构化的硅或锗薄膜生长，从而大幅提高效率。我们还观察到，如果在低温晶体生长期间添加铝，则形成的薄膜是 p 型的，并且可以用作 p-n 结中的底部导电层。

在这种结构中，绝缘 MgO 层可以用作铝硅薄膜的扩散层和织构促进层。此外也有可能在 MgO 上生长硅的单晶纳米线。注意，由于纳米线在 (111) 方向上生长，因此薄膜的 (111) 取向有助于实现这些纳米线垂直于衬底对齐排列。

我们生长的 MgO 与 c 轴对齐的单晶铟镓锌氧化物 (IGZO) 平行，IGZO 的生长是由日本半导体能源实验室的 Shunpei Yamazaki 小组开创的。与我们的 MgO 一样，铟镓锌氧化物是在面外织构，而不是面内，也就是说，晶体沿着 c 轴而不是 a-b 轴排列对齐。然而，铟镓锌氧化物与我们的 MgO 还有所不同，因为它沿 a-b 轴不是多晶。还有另一个关键的区别在于：铟镓锌氧化物是半导体，而 MgO 是绝缘体。因此，在显示产业中，MgO 可以用作显示器中使用的薄膜晶

当镓在硅层上形成时，镓-硅共晶合金扩散到表面，通过仔细选择前体可以将氮引入到镓从而形成GaN。这样就可以在高度结晶的膜上形成GaN（或者如果选择铟和磷前体，则会InP）。

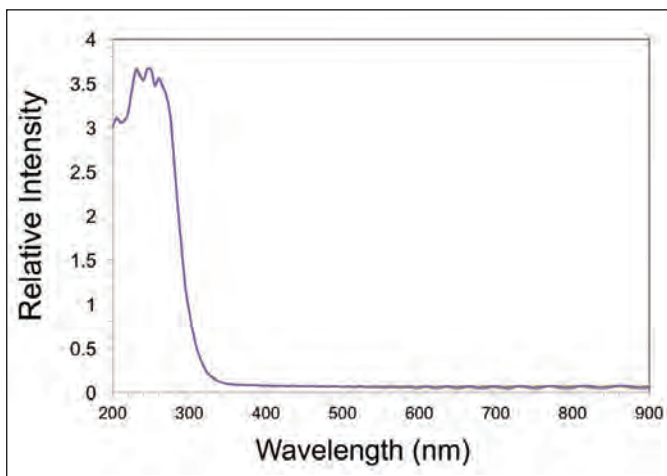


图4. MgO在很宽的光谱范围内都有高的透明度。此外就行的透射谱测量估计其值为89%。

体管的绝缘层，而镓锌氧化物可以形成该种器件的沟道。

我们对这个机会感到非常兴奋。显示行业目前使用两种绝缘材料： SiO_2 和 SiN_x 都不是结晶的，更不用说织构。切换到我们的材料将是革命性的。它将为织构化的硅薄膜打开大门，由于晶粒边界的角度更小，可以保证更高的电子迁移率。

注意，这是首次报道的以 (111) 取向生长的绝缘薄膜。早在 2005 年，国家可再生能源实验室的一个小组就采用了类似的方法，但是获得了了双轴织构的 CeO_2 (100)。

我们的另一个突破是采用准分子激光器对硅薄膜进行了退火。这不是微不足道的进步，实际上它创造了在新的，改进的低温多晶硅工艺中，通过准分子激光退火生长高度取向的硅薄膜沟道的可能性。

在该方案中，MgO (111) 层不仅在硅薄膜

中诱导出 (111) 有序晶粒，而且还保护玻璃基板免受退火过程产生热量的影响。其结果导致了允许使用廉价的钠钙玻璃。这一前景引起了一家大型显示公司的注意。他们正在测试我们的技术，织构化 MgO (111) / 钠钙玻璃上激光退火 50nm 厚的 $-\text{Si:H}$ 薄膜的初步结果让他们深受鼓舞。

生长 III-V 族材料

今年早些时候，我们获得了在织构化 MgO 上的硅薄膜上生长 III-V 族材料的专利。该工艺开拓了包含 III-V 族材料的共晶合金形成，例如镓，与硅或锗结合，沉积方法为通过电子束蒸发或溅射来进行。

当镓在硅层上形成时，镓 - 硅共晶合金扩散到表面，通过仔细选择前体可以将氮引入到镓从而形成 GaN。这样就可以在高度结晶的膜上形成 GaN（或者如果选择铟和磷前体，则会是 InP）。尽管有可能无法在低温下形成 GaN。但是，由于 MgO 的熔点非常高，超过了 2800°C ，当选择合适的玻璃基板（可能是 Lotus NXT）时，沉积温度也可以显著提高。

这种方法不适合随后的激光剥离。然而，这并不一定是障碍，因为硅和 GaN 非常薄的膜层可能更有优势，当然这取决于器件的需求。

如果我们的技术用于制造 LED，这将允许这些器件完全集成，而无需将它们转移到其他衬底上。所有材料都将直接在玻璃基板上生长。由于底层硅薄膜具有织构，硅沟道迁移率可能接近单晶 CMOS 薄膜晶体管的迁移率，并且最终屏幕尺寸或许能够小于 1 英寸（源于更紧密的集成）。这种方法也有可能应用于 5G 无线技术，其中硅上 GaN 已经引起了人们的极大兴趣。

令人鼓舞的是，我们刚刚报道了通过共晶合金制成的硅薄膜达到 $188 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 的迁移率。这个结果使用了多晶 MgO 薄膜，而且我们确信使用织构缓冲层可以获得更高的数值。

另一个令人鼓舞的结果是使用高于 600°C 的温度在 MgO (111) / 玻璃上生长 Al_2O_3 (111)。原则上，GaN 可以在 Al_2O_3 (111) 上生长，从而提供蓝宝石晶圆的另一种替代方案。

毫无疑问，用硅或锗制成的晶体薄膜取代硅和蓝宝石晶圆有很多好处。这可以削减 LED 生产相关的成本，特别是 microLED。然而，虽然取得了很大进展，我们仍有许多工作要做。☞

扩展阅读

- H. Kum et al. "Increasing the competitiveness of the GaN on-silicon LED" Compound Semiconductor magazine, March 30, 2016
- C. Teplin et al. J. Non-Cryst. Solids 352 984 (2006)
- A. Chaudhari et al. Mater. Lett. 121 47 (2014)
- R. Vispute et al. "Method of producing large grain or single crystal films," US patent 9,856,578 B2, January 2018
- S. Yamazaki, "New Crystalline Structure Yields Reliable Thin-Film Transistors," SPIE, 2012.
- R. Wagner et al. Appl. Phys. Lett. 4 89 (1964)
- A. Findikoglu et al. Adv. Mater. 17 1527 (2005)
- Z. Habibah et al. Procedia Eng. 56 737 (2013)
- A. Chaudhari "Method of Growing III-V Semiconductor Films for Tandem Solar Cells" US 9,818,964 B2, November 2017
- P. Rajbhandari et al. Mater. Lett., February 2018

新型纳米材料有望提升电池效率，可在诸多可持续领域应用

独特的纳米网，集高孔隙率、出色的表面积体积比和易于制造于一身

2019年3月，世界领先的纳米电子、能源和数字技术研究与创新中心 imec 携手比利时鲁汶大学展示了一款新颖的纳米网材料，这意味着可能在各种可持续应用领域取得突破。这款新的纳米网材料为三维纳

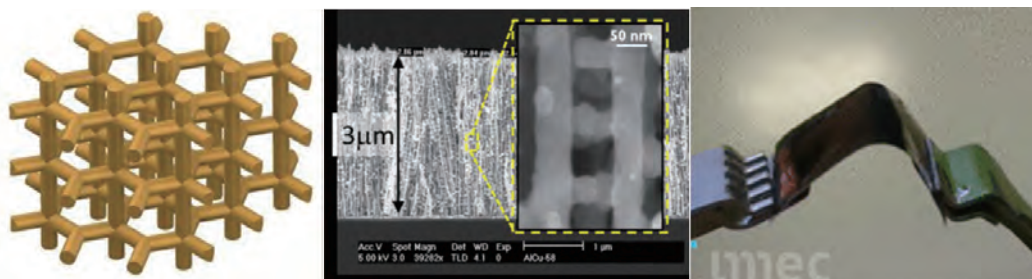


图1. 纳米网。左：格栅结构的三维效果。中：显示高度规则结构的扫描电子显微镜图像。右：在宏观层面上，该材料是柔性的。

米级（金属）格栅结构，具有高度规则的内部尺寸。由于其独特的材料特性和易于制造的特点，有望在（可持续）工业领域中得到广泛应用。它将提升电池效率，改善催化转化器、燃料电池和氢气生产。

纳米网材料是一种在多个层面上水平互连的纳米线三维（3D）结构，具有高度规则的内部间隔和尺寸。因此，它兼具高孔隙率和前所未有的表面积体积比。厚度每增加1微米，可用表面积将增大26倍。想象一下：当充填一小罐苏打水的体积时，在其包含的表面积等同于一个足球场大小的情况下。除此之外，内部和外部尺寸还可按照几乎任何规范进行调优，从而使其具备符合众多应用要求的潜力。

许多工业生产过程基于（必需）发生在物体表面上的化学反应。可用的表面面积越大，能够同时发生的化学反应就越多，而且生产速度或吞吐量越高。例如，考虑一下电池

中的电极，将锂转变为锂离子。imec 的纳米网材料能实现高容量和快速充电电池，因为其兼具大的表面积和高孔隙率（储能材料的负载量很高），同时它仍是一种与电流收集器密切接触的纳米薄膜。除此之外，在燃料电池中，imec 新型纳米网材料的金属纳米级格栅结构可同时充当电流收集器和功能性催化剂。比如，相关研究表明：在通过电解水的方法来生产氢气的过程中，几微米厚的这种新型纳米网材料的工作性能优于比它厚300倍（厚度约1mm）的泡沫镍。

此外，这种独特的材料还可相当容易地通过廉价的阳极氧化和电镀工艺制造。首先，利用铝箔的阳极氧化形成一个模具。在纳米级上实现规则穿孔的秘诀在于铝金属的受控掺杂。由此产生的结构起一个模具的作用，可以在其中沉积各种各样的材料。经过连续的化学蚀刻之后，该模具被溶解，留下一个独立式纳米网结构。在宏观

层面上，独立式纳米网是一种柔性金属箔，这使其与最接近的竞争对手（金属泡沫和气凝胶）相比另具优势，后者往往更加坚硬或脆弱易碎。

身为 imec 科学总监和比利时鲁汶大学生物工程学院教授的 Philippe Vereecken 说：“我们对这种新型纳米材料寄予很高的期望。它最大的优点在于其结构的规则性、大的开放式结构和尺寸的一致性。我们几乎是在10年前就发现了三维纳米多孔结构，但只是在 Stanislaw Zankowski 的博士研究中，这种材料的独特性才变得清晰起来。当使用传统的模板化纳米线工艺时，纳米线之间的空间很小。Stan 优化了制造工艺，以获得大的孔隙率，从而使其如今可在许多应用中得到最佳的利用。对于所有希望加入我们、旨在将这种非常有前途的材料转移到工业应用中的行业团队，我们都十分欢迎。”

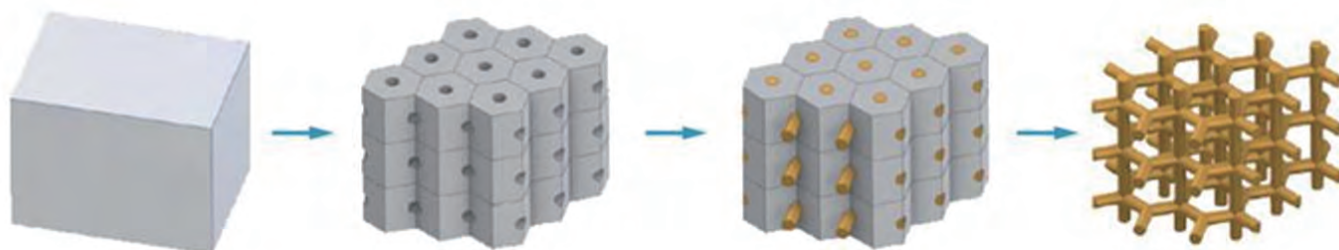


图2. 在常压下，纳米网能够相对容易地通过电化学工艺来制备。首先形成一个模具，可以在这个模具中沉积纳米网材料。在蚀刻之后，留下一个独立式纳米网。

运用 MOCVD 工艺生长 GaN VCSEL

GaN VCSEL 现在可配有采用 MOCVD 工艺生长的隧道结

由于 GaN VCSEL 具有圆形发射束、小尺寸和高调制带宽等特性，因而使其成为一种适合可见光通信、光学传感器、显示器和原子钟的非常有前途的器件。

遗憾的是，此类器件如今的输出功率低得令人难以置信，而且其制造也是出了名的困难。但是对于后一个问题，来自美国加州大学圣芭芭拉分校（UCSB）的一支团队刚刚迈出了重要的一步。该小组宣称，将仅采用 MOCVD 工艺来生长纳入了隧道结的 GaN VCSEL 结构，此举先所有人一步。

UCSB 发言人 SeungGuen Lee 解释说：“由于有效的隧道结接触难以实现，因此基于 GaN 的大多数 VCSEL 都将 ITO 用于电流散布。”然而，ITO 具有高的光吸收损耗，因而导致阈值电流较高和光输出较低。

隧道结可以解决这个问题。时光回到 2015 年，该研究小组发布报告说运用此方法获得了成功。不过，他们采用的是分子束外延（MBE）晶体生长技术，Lee 称这种方法“在行业内是不适用的。”

在最近的工作中他们对此采取了修补措施，运用 MOCVD 工艺生长了一个 408 nm 光源，该光源支持一个隧道结，并能产生超过 300 μW 的最大输出功率。其阈值电压几乎为 8 V。

Lee 承认，“隧道结接触的一个缺陷是需要额外的电

压。”因此，对于在 LED 中使用这些隧道结是有争议的，因为它们以降低插接效率来换取光提取效率的提高。但是就 VCSEL 而言，决定是很明确的：“隧道结接触实现的改善远远超过了其需要额外电压的不足，而且，随着我们不断地推进优化，所需的额外电压将持续降低。”

为了开发一种工艺，用于激活采用 MOCVD 工艺生长的隧道结中的 p 型 GaN，Lee 和同事们对基于 LED 的测试结构进行了实验。它们的制作采用了两个生长步骤：第一步是形成 LED 结构，以 p 型 GaN 结束；第二步是添加 n 型 GaN 以形成隧道结。比较不同的表面处理和激活条件后，发现：通过将表面暴露在氟氢酸中、然后采用原位加热激活 p 型 GaN，获得了最佳的结果。

这支研究小组运用他们从实验获得的知识来制造 VCSEL。他们以生长主外延结构作为开始，然后利用台面蚀刻和铝离子注入形成电流孔径。接着，在蚀刻和沉积一个 17 周期分布式布拉格反射器（由 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 配对形成）之前制作隧道结。然后添加金属触点，再使用倒装式芯片焊接法将该结构键合至镀覆金属的 SiC 衬底，并通过蚀刻工艺去除 GaN 衬底。最后一步是添加 n 型触点和一个 13 周期分布式布拉格反射器（同样由 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 制成）。

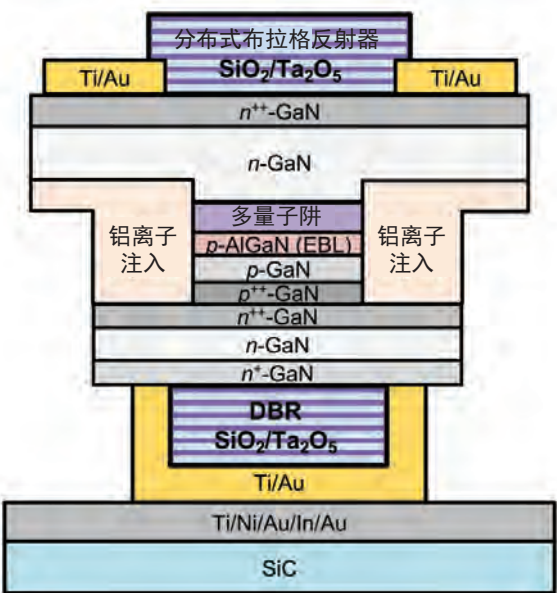
生产此类 VCSEL 的成本是非常昂贵的，因为外延结构的生长是在 m 平面 GaN 衬底上进行的。Lee 说：“有人提议在倒装式芯片键合和衬底去除之后重用 GaN 衬底。”但是，之前需要做大量的工作，这道工序才能在业内使用。

采用 300 ns 脉冲和 0.3% 占空比对该研究团队的 GaN VCSEL 进行室温条件下的测量，发现：阈值电流密度为 10kAcm⁻²，阈值电压为 7.8 V。在 12 V 时，该器件产生其 319μW 的峰值输出功率。

目前，该团队正在开发利用掩埋式隧道结（而不是离子注入）来提供电流局限的设计方案。Lee 解释说：“铝离子注入使 GaN 吸收光，因而增加了内部损耗。”这项工作尚处其初期阶段，但是 Lee 说初步结果给人的感觉是非常有希望的。

参考文献

S.G. Lee et al. Appl. Phys. Express 11 062703 (2018)



由加州大学圣芭芭拉分校的研究团队制作的 GaN 倒装式芯片 VCSEL 具有两个介质分布式布拉格反射器和一个采用 MOCVD 工艺生长的隧道结触点。

柔性纳米线激光器

将一种聚合物旋转涂覆成一组纳米线可制成柔性的光泵激光器

日本东京大学的研究人员宣称在柔性衬底上制成了首个基于纳米线的激光器。

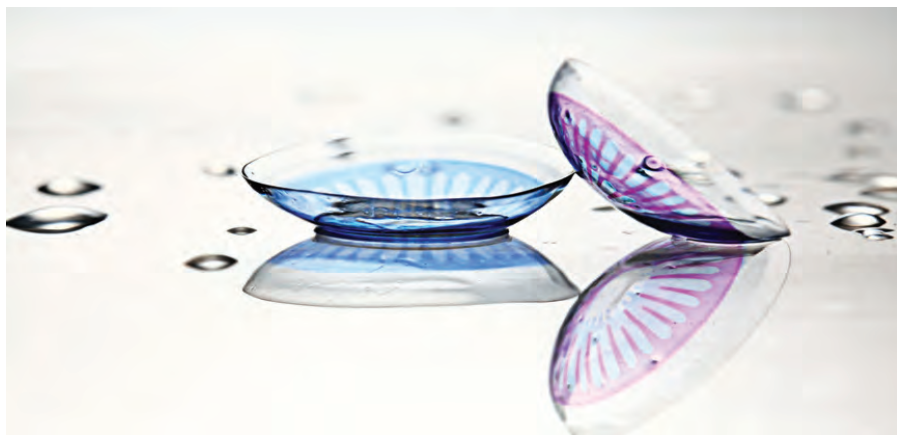
他们所做的工作将有助于开发在机械方面具有柔性的模块，这种模块能够在窗户、纸张、皮肤、隐形眼镜、甚至人体内部提供相干光源，有望实现人机交互的光电设备。

这支日本研究团队所取得的突破包括在单个纳米线谐振腔（由嵌入在柔性衬底上的量子点形成）中制作了一个光泵激光器。为了形成这样的结构，采用旋转涂覆和固化工序将纳米线谐振腔转移到聚合物 PDMS（聚二甲硅氧烷）的薄膜中。

制造的第一步是将图形化 GaAs 衬底装入 MOCVD 反应腔并生长由 GaAs 线芯构成的纳米线，之后是一个 50 层的 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 纳米线量子点堆栈和 GaAs/ $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 线芯-外壳-封帽（core-shell-cap）层。图形化衬底的形成方法是：在 GaAs 上沉积一个 10 nm 厚的 SiO_2 层，然后使用电子束光刻和反应离子蚀刻创建一个孔洞阵列（孔洞的直径为 30 nm，间隔距离为 500 nm）。

下一步是将 PDMS 与固化剂按 10:1 的比例混合，并把这种混合物旋转涂膜在样本上（持续时间为 60 秒）。重复该过程可确保薄膜的厚度足够大——根据横断面扫描电子显微镜的观察，它的厚度超过 100 μm 。

在搁置了几个小时后，为了确保聚合物完全融入到凹槽之中，研究人员在 120℃ 的温度下对该样本进行了为时 1 个小时的固化。最后，他们轻轻地将固化的 PDMS 薄膜从衬底上剥离。



纳米线量子点技术的潜在机遇之一是用于改善隐形眼镜的性能

已经用几种形式的显微镜对这种透明且易于折叠的薄膜进行了细致的观察。扫描电子显微镜显示：纳米线通常高 4 μm ，直径为 300 nm，而横断面扫描隧道电子显微镜的观察结果是：平均来说，量子点的直径小于 40 nm，长度短于 7 nm。

将样本置于低温恒温器中，冷却至 10K，并利用 780 nm 掺钛蓝宝石激光器对量子点进行泵浦将产生一个位于 1.41 eV 的发光峰（这与来自量子点基态的自发发射相关）。在弱泵浦条件下，由于量子点尺寸的波动引起了不均一的展宽，因此该峰值在 60 meV 的半最大值处具有全宽。当能量密度增加时，由于量子点内部态填充的原因，光致发光峰值移动至较高的能量。

能量密度的额外增加将激光光谱从低于阈值拉至高于阈值，这里，由于纳米线量子点谐振腔的高子带，发射移动至 1.425 eV。

该研究小组注意到，由于纳米线尺寸、量子点和晶体质量存在很大的差异，所以这种发射只来自纳米线量子点谐振腔的一小部分。有人认为，

优化生长条件可以改善纳米线量子点的尺寸均匀性，并最终实现更好的器件性能，包括较高的激光器良率。

该小组的另一个观察结果是，柔性衬底上的器件的激光阈值高于水平放置在硅基 SiO_2 衬底上的纳米线量子点激光器的激光阈值。阈值较高部分归因于端面一侧上的反射率较低，这是由于纳米线和 PDMS 之间界面的折射率较低所致。这造成了相对较大的镜面损失。高阈值背后的另一个因素是低的端面质量，这源于薄膜从衬底的剥离。

为了克服这些弱点，研究人员主张在旋转涂覆之前将金添加至谐振腔的顶部，并优化用于形成柔性器件的方法。

参考文献

J. Tatebayashi et al. Appl. Phys. Express 11 065002 (2018)

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	1
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	9
IQE		www.iqep.com	15
PCIM		www.pcimasia-expo.com.cn	IBC

欢迎投稿

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

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

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

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

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

文章投稿指南

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

图表编号一致;

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

新产品投稿指南

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

优先刊登中文来稿(翻译稿请附英文原稿)。来稿请用电子邮件寄到: 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

Sales Director (销售总监)
Steven Gan (干辉)
steveng@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)
jennyli@actintl.com.hk
Gavin Hua (华北平)
gavinh@actintl.com.hk
Tel: 86-755-2598 8571

Shanghai (上海)
Hatter Yao (姚丽莹)
hatterya@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)
evali@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

pcim
ASIA

电力电子、智能运动、可再生能源
上海国际电力元件、可再生能源管理展览会
International Exhibition and Conference
for Power Electronics, Intelligent Motion,
Renewable Energy and Energy Management



扫码快速登记
赢取精美礼品

启动电力电子，激活绿色未来

2019年6月26至28日

中国·上海
上海世博展览馆

www.pcimasia-expo.com.cn

展会亮点

- 功率元器件、被动元件、散热管理、测试测量专区汇聚行业优质企业代表
- E-mobility 展览面积扩大两倍，现场发掘更多电动汽车产品技术
- 两大论坛轮番启动，领袖企业代表与您分享行业发展动向
- 有机会参与首届企业采购商洽谈大会，与优质企业决策代表现场交流
- PCIM Asia 国际研讨会分享行业最新技术趋势及其应用，促进与会者之间的交流

参观请联系：

联系人：梁小姐

电话：+86-20-3825 1558 ext 253

邮箱：Christy.liang

@china.messefrankfurt.com

mesago
Messe Frankfurt Group



messe frankfurt

化合物半导体



•CHINA

《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

化合物半导体



•CHINA

季刊 2019年 第2期

