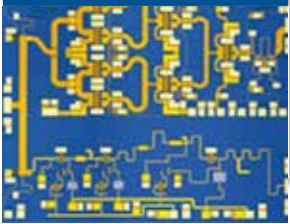


CS COMPOUND
SEMICONDUCTOR
Connecting the Compound Semiconductor Community

季刊 2018年 第3期

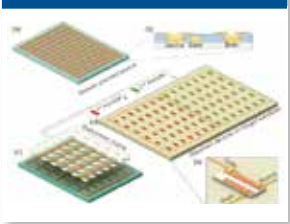
硅上氮化镓



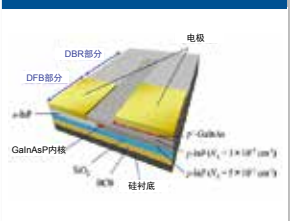
超辐射 LED



GaN HEMT 微转印



高效薄膜激光器



SiC 市场 快速增长



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

- 08 **SiC: 柳暗花明**
SiC: Going through the gears
- Richard Stevenson

业界动态 Industry

- 03 **从晶圆加工业务向外扩展延伸**
Branching out from silicon
- 06 **氮化镓技术推动电源管理不断革新?**
Gallium nitride innovations promise to improve the efficiency and size of power-management systems

技术Technology

- 13 **适用于射频功率应用的硅上氮化镓**
GaN on silicon primed for RF power
- Markus Behet和Joff Derluyn, EpiGaN公司
- 20 **超辐射LED: 目标显示应用**
Superluminescent LEDs target displays
- Marco Malinverni, EXALOS公司
- 25 **在硅CMOS上印刷 GaN HEMT**
Printing GaN HEMTs onto silicon CMOS
- Stefan Eisenbrandt和Ralf Lerner, X-FAB公司

科技前沿 Research Review

- 29 **采用 CVD 工艺来生长氧化镓功率器件**
Growing gallium oxide power devices by CVD
- 30 **凭借堆叠式 GaN 激光器瞄准 LiDAR**
Targeting LiDAR with stacked GaN lasers
- 31 **高效薄膜激光器面向硅光子学**
Efficient membrane lasers target silicon photonics
- 02 **编者话Editorial**
- 32 **广告索引Advertisement Index**

关于《化合物半导体》

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

关于雅时国际商讯 (ACT International)



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起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、射频/微波、化合物半导体、半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约二十多万专业读者及与会者。ACT亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT总部在香港, 在北京、上海、深圳和武汉设有联络处。www.actintl.com.hk

About ACT International Media Group

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



扫一扫
免费下载电子书

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

雅时国际通讯 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

SiC 和 GaN 功率半导体市场 将如何发展

本期杂志的封面文章“SiC：柳暗花明”分析介绍了 SiC 技术和市场的现今状况及未来几年的发展趋势。

SiC 器件市场前景乐观。肖特基势垒二极管的销售逐渐成熟，MOSFET 的出货量预期将在未来三年内大幅增长。Yole Développement 分析师说，在二极管方面，SiC 非常成熟，对于 1.2kV 及以上电压的 SiC MOSFET，GaN 根本没有挑战能力。GaN 可能会在 650V 范围内对 SiC MOSFET 构成一些竞争，但也是 SiC 更为成熟。预计 SiC 销售将快速增长，SiC 将从硅的功率器件市场中获取市场份额，估计未来几年年复合增长率将高达 28%。

IHS Markit 认为：SiC 行业将持续强劲增长，主要推动力来自混合动力和电动汽车，功率电子和光伏逆变器这些应用市场的增长。SiC 功率器件主要包括功率二极管和三极管（晶体管、开关管）。SiC 功率器件可使电力电子系统的功率、温度、频率、抗辐射能力、效率和可靠性倍增，带来体积、重量以及成本的大幅减低。SiC 市场的渗透也在增长，特别是在中国，肖特基二极管、MOSFET、结栅场效应晶体管(JFET)和其他 SiC 分立器件已经出现在量产汽车 DC-DC 转换器、车载电池充电器之中。

在一些应用领域中，GaN 器件或者 GaN 系统集成电路可能会成为 SiC 器件的竞争者。第一个符合汽车 AEC-Q101 规范的 GaN 晶体管在 2017 年由 Transphorm 发布，而且在 GaN-on-Si 外延片上制造的 GaN 器件具有相当低的成本，也比在 SiC 晶片上制造任何产品都更为容易。由于这些原因，GaN 晶体管可能会成为 2020 年代后期逆变器中的首选，优于较昂贵的 SiC MOSFET。GaN 系统集成电路是将 GaN 晶体管与硅栅驱动器 IC 或单片全 GaN IC 一同封装起来，一旦它们的性能针对移动电话和笔记本充电器和其他高容量应用得到优化，很可能在更广泛的范围内大面积普及。目前商业化的 GaN 功率二极管发展尚未真正开始，因为它们未能提供相对于 Si 器件的显著益处，而且太过昂贵，因此还不可行。SiC 肖特基二极管已经很好地用于这些目标，并且具有良好的定价路线图。

IHS Markit 预计：到 2020 年，SiC 和 GaN 功率半导体市场合计将接近 10 亿美元，推动力来自混合动力及电动汽车，功率电子和光伏逆变器等方面的需求。其中，SiC 和 GaN 功率半导体在混合动力和电动汽车的主传动系逆变器中的应用，将导致 2017 年之后该市场复合年增长率（CAGR）超过 35%，在 2027 年达到 100 亿美元。到 2020 年，GaN-on-Si 晶体管将会达到与 Si MOSFET 和 IGBT 持平的价格，同时也会提供相同的优越性能。一旦达到这个基准，2024 年 GaN 电力市场预计将达到 6 亿美元，2027 年攀升至 17 亿美元以上。

赵雪芹





从硅晶圆加工业务向外扩展延伸

Newport Wafer Fab 会成为世界首家硅和化合物半导体晶圆代工厂吗？

——Richard Stevenson 报道

掌握自己的命运是令人振奋的。关于这一点，问问 Newport Wafer Fab 的领导者们就知道了。他们已经在这块场地上工作了很多年，其中有些人在这块场地归 Infineon Technologies 公司所有、用于加工硅晶圆和硅基 GaN 晶圆的时候就在此处工作了。2017 年 9 月，在从这家德国电子业巨头那里购买了这家工厂之后，如今他们为能自己掌握前行的方向感到高兴。

Newport Wafer Fab 总经理 Paul James 说：“对每位员工来说这是非常激动人心的时刻。”五年多以前，James 作为一名顾问开始在这家工厂工作，于 2013 年 11 月取得了领导工程团队的永久职位，随后被提升为这家工厂的运营者。

这次振奋人心事件是由汇丰银行（HSBC）、威尔士政府和私人投资者融资支持所完成的收购，由此导致获得了大约 500 个工作岗位。但这绝不是 James 拥有乐观心态的唯一原因。

“另外，我们还获得了在南威尔士的 [化合物半导体产业集群] 环境中转向新技术和创新技术的清晰发展路线。此类技术通常要求较高的利润，而且从工程的角度来看更加有趣。”

目前，Newport Wafer Fab 的主要精力集中放在了完成与 Infineon 签订的为期两年的供货交易上，如果双方都愿意的话，此项供货交易的期限可以延长。相关的工作包含生产厚度减薄、背面镀有金属膜的测试晶圆（晶片在其中已经完成了

单颗化)。

由于 Infineon 已将其硅基 GaN 生产转移到了另一家晶圆代工厂，所以 Newport Wafer Fab 现在只加工硅晶圆。不过，James 和他的同事正计划很快将业务范围延展到可加工在硅片上具有化合物半导体异质结构的晶圆。

Newport Wafer Fab 的质量管理 (QM) 和外部事务主管 Sam Evans 眉开眼笑地说：“让我们兴奋的是：在南威尔士的化合物半导体产业集群中，我们在正确的时间跻身到了正确的领域。”

对于 Newport Wafer Fab 的工程团队来说，考虑到他们的经验，这种尝试和努力显而易见的起点就是硅基 GaN 晶圆的加工。

鉴于硅基 GaN 所饱有的巨大市场潜力，Newport Wafer Fab 的上述举动是有很多道理的。虽然许多公司都声称拥有重要的知识产权，且专利之争有可能接踵而来，但是这不应该对 Newport Wafer Fab 产生不利的影响。

James 认为：“就我们而言，我们是一家晶圆代工厂。我们期望自己的客户在因谋求自身利益加工晶圆而导致我们蒙受任何 IP 索赔时，为我们提供赔偿。一般来说，围绕 GaN 的专利更多地存在于外延片本身，特别是晶格匹配层。我们并没有外延片产品，而是依靠其他分包商来提供的。”

虽然工作有可能始于硅基 GaN，不过目标是扩展业务范围以涵盖其他的化合物半导体技术。James 指出：“我们正在对一些商机展开评估，以了解它们围绕特定化合物半导体解决方案和特定晶圆尺寸的聚合点。”

由于更加精细复杂的技术将需要资本投资和一些特殊的“小众”设备，因此他说这些业务尚

需一段时间才能为客户提供。

不过，好消息是引入这些资金和设备支持的成本可能并不是那么高。James 称：“成本可能是相对适度的，这取决于我们选择投资的技术种类。”

销售和市场主管 Graham Neil 补充道：“其中的一个关键点是，当把化合物半导体材料引入一家现有的晶圆厂时，我们已经完成了一些工序规程的部署就位。”如果做不到这一点，就存在发生污染的风险，进而导致器件性能劣化。

富有经验的雇员

Newport Wafer Fab 众多工程师所拥有的极其丰富的经验将使选择与其合作的客户从中受益。

Neil 指出：“Newport Wafer Fab 工程师在半导体领域的平均从业经验是 15 年，这是一项巨大的优势。在这些工程师中，有很多在 Newport 多年前作为一家晶圆代工厂运营时就在，因而将把所有这些技能带回来以开发新的技术。”

在这些雇员中，很多人将会发现：与他们当初在占地面积 28 英亩的园区工作时相比，如今的 Newport Wafer Fab 有了巨大的变化。虽然其中大多数人在 1982 年 Inmos 开设这家工厂时还没有到那里，但是相当数量的人在上世纪 90 年代其作为一家硅晶圆代工厂运营时应该已经在了，这早于 International Rectifier 收购 Newport 以开发 GaN 产品的 2005 年（更多详情请见附文“Newport Wafer Fab 简史”）。

在过去的几年里，员工们表现出了相当高的忠诚度。在 2015 年初，当 Infineon 判定 Newport Wafer Fab 并不适合其长期发展计划时（Infineon 准备利用它进行两年的生产，然后尝试为其找一个买家），员工们对于自身未来不确定性的担心就会浮出水面的，然而事实上并未如此。

James 说：“在被 Infineon 收归旗下那段时间里，当宣布预定的关闭和出售 Newport Wafer Fab 的意向时，有一小部分的雇员离我们而去。Infineon 制定了一项雇员保留计划，从而成功地留下了大多数员工。”

在过去的几个月里，有些员工离开了，Newport Wafer Fab 目前正在积极地招募设备、工艺和器件工程师。James 解释说：“我们需要这些工程师不仅是为了根据供应协议支持现有的技术，而且还涉及转入和开发新的技术。”随着化合物半导体产业集群的兴旺，Newport Wafer Fab 的



一些工程师可能会忍不住跑到就在几英里外的其他公司去赢得令人兴奋的新机遇。

James 承认虽然有可能出现这种情况，但是同时指出：南威尔士的一个成功的化合物半导体产业集群实际上将帮助改善所有本地公司的员工队伍质量。

James 认为：“关键是要有一个吸引人们到南威尔士的临界点。如果你是“仅会一招的小马驹”，那么想辞职并迁往某个地区另谋发展实际上是相当困难的。”然而，当某种高度专业化的技能被一个地区的多家公司所重视时，“搬家挪窝”的风险就较小，而获得的回报则较大。

展望未来

James 已经确定了 Newport Wafer Fab 在 2018 年的两个主要目标，即：从其他客户那里成功地转入新的硅技术，并最终敲定将追寻哪些化合物半导体材料发展机遇。

Newport Wafer Fab 将要瞄准的硅晶片客户是：那些通过与专为电源技术量身打造、采用 0.18 μm 工艺进行生产的晶圆代工厂建立伙伴关系而从中受益者。James 说：“我们这家晶圆厂运用的是沟

槽型 FET 技术，生产的是用于控制电路的 IGBT 和 IC 产品，其实际上基于 0.35 μm 工艺技术。”

目前的生产能力是每周 8,000 片晶圆。James 说：“在现有的洁净室空间内将生产能力扩充至每周 11,000 片是相对容易的，而且实际上，我们可兼容 8 英寸晶圆的 6 英寸晶圆生产线有不少遗留下来的工具，可利用这些工具来实现上述目标。”占地面积为 3650 平方米的现有洁净室可以扩大 480 平方米，从而将生产能力提升至每周 14,000 片晶圆。

不过，值得注意的是：不管部署到位的工具数量是多少，生产能力都不应该被认为是固定的。相反，它将随着产品的组合而变化。Neil 补充说：“因此，如果存在产品的不同组合，那么产能数字可能会上升。”

我们希望，在一年左右的时间之内，产品组合将不会局限在硅晶圆。James 说：“到 2020 年，我预计那些化合物半导体材料发展机遇已经成熟，并在工厂里投入批量生产。”

在这方面的成功将受到许多人的欢迎。它不仅将使 Newport Wafer Fab 成为首家硅和化合物半导体晶圆代工厂，而且还将南威尔士化合物半导体产业集群的创建过程中提供一个关键的因素。

Newport Wafer Fab 简史

8,900 m^2 单层建筑（最初是作为 Inmos 的一间微处理器工厂）的建造始于 1980 年，并于 1982 年完工。这座建筑引人注目的设计出自 Richard Rogers 爵士之手，他是一位拥有辉煌职业生涯的获奖建筑师，其中包括参与了巴黎蓬皮杜艺术中心的设计工作。

Inmos 并没有长时间地守着这幢建筑，而是在 1984 年将其出售给了 Thorn EMI。1989 年，这块场地被 SGS-Thomson Microelectronics（该公司现被称为 STMicroelectronics）收购。它利用这家工厂生产快速 SRAM 和微处理器产品。

1982 年为 Inmos 建造的这家工厂现归 Newport Wafer Fab 所有，其位于南威尔士州新港（Newport）的郊区，占地面积 28 英亩。

1992 年，香港 QPL International Holdings 购买了这



块场地，为 Newport Wafer Fab 的开办提供了资金。它作为一家晶圆代工厂运营了 10 年，服务的客户包括 International Rectifier、摩托罗拉、三星和 STMicroelectronics。

之后的拥有者是 International Rectifier，该公司于 2005 年收购了这家工厂，将它用作推出其大多数硅和 GaN

技术的主要研发和制造中心。2015 年 1 月，Infineon 收购了 International Rectifier，并在重新评估了其全球业务之后，决定将使用 Newport 工厂两年的时间，然后将其出售。

在 2017 年 9 月进行的收购导致 Newport Wafer Fab 获得重生。不过，这家“再生企业”制定的计划是：不仅要为硅材料的晶圆代工厂，还要为化合物半导体的晶圆代工厂。

氮化镓技术推动电源管理不断革新

Ahmad Bahai, 德州仪器 (TI) 公司首席技术官

我们可以想象一下：当你驾驶着电动汽车行驶在马路上，电动车充电设备的充电效率可以达到你目前所用充电效率的两倍；仅有一半大小的电机驱动比目前应用的效率更高；笔记本电脑电源适配器小到可以放进口袋。

电子设备的未来取决于电源管理创新。

或者设想一下：每个简单的互联网搜索查询使用的电力足以灼烧一个 60 瓦灯泡约 17 秒。现在乘上每天发生的数十亿次的查询，便可以获得数十亿千瓦时的能耗。

更有效地管理能源并占用更小空间，所面临的挑战丝毫没有减弱。氮化镓 (GaN) 等新技术有望大幅改进电源管理、发电和功率输出的诸多方面。预计到 2030 年，电力电子领域将管理大约 80% 的能源，而 2005 年这一比例仅为 30%¹。这相当于 30 亿千瓦时以上的节能。这些电力足以以为 30 多万个家庭提供一年的电量。

任何可以直接从电网获得电力的设备（从智能手机充电器到数据中心），或任何可以处理高达数百伏高电压的设备，均可受益于氮化镓等技术，从而提高电源管理系统的效率和规模。

寻找理想开关

任何电源管理系统的核心是开关，可以打开

和关闭电源。它就像墙上的照明开关一样，但是速度会数百万倍地快，尺寸会数百万倍地小。效率（低损耗）、可靠性、集成度和可负担性是半导体电源开关的关键属性。

我们不断地寻找理想的开关。理想的开关可以以极少“导通”电阻来导通电流，并在尽可能少的漏电流的情况下阻断电流，同时阻断关断状态下其端子上的明显电压。较高的开关频率也意味着工程师可以设计出更小的整体功率变换解决方案。最重要的是，半导体开关必须可靠且能够经济高效地制造。

几十年来，硅电源开关的能效、开关速度和可靠性都在不断提高。这些器件已成功解决低电压（低于 100 伏）或高电压容差 (IGBT 和超结器件) 中的效率和开关频率问题。然而，由于硅的限制，因此无法在单个硅功率 FET 中提供所有这些功能。宽带隙功率晶体管（如 GaN 和碳化硅 (SiC)）有望在高压和高开关频率条件下提供高效率，从而远远超过硅 MOSFET 产品。

GaN 可以为您做什么

根据应用的不同，高效率的高频开关可以将功率模块的尺寸缩小 3 至 10 倍，但需要优化驱动器和控制器拓扑。图腾柱 AC/DC 转换器是一种

不适用于硅片的拓扑结构，可受益于 GaN 的低导通电阻、快速开关和低输出电容，从而提供三倍高的功率密度。诸如零电压和零电流开关这样的谐振架构可以减少开关损耗并提高整体效率，也可以受益于 GaN 的卓越开关特性。

许多应用需要从相



对较高电压（几百伏）到低电压的功率转换以供电路元件（如处理器）。具有高输入至输出电压比的开关模式功率转换器的效率较低。这些电源管理模块通常涉及多个转换阶段。从中间的 54/48 伏总线直接转换到处理器内核电压可以降低成本并提高效率。氮化镓凭借其独特的开关特性，成为直接转换架构的有力候选者。目前正在研究数据中心应用服务器电源管理的直接转换。

此外，自动驾驶车辆激光雷达驱动器、无线充电和 5G 基站中的高效功率放大器包络线跟踪等应用可从 GaN 技术的效率和快速切换中受益。

GaN 功率器件的传导损耗降低，并伴随着更高的开关频率，从而导致更高的功率密度。但热管理和寄生效应无法缩放！在更小的体积中集中更多的功率为散热和封装带来新的挑战。较小的模面面积限制了传统封装技术的效率。三维散热是 GaN 封装的一个很有前景的选择。

生活更环保

为了打破成本和大规模采用周期，一种新型功率半导体技术需要解决最引人注目应用中现有

设备的一些缺点。氮化镓为功率调节的发展创造了机会，使其在高电压应用中的贡献远远超越硅材料。用于工业电机驱动或并网储能系统的逆变器可以极大地受益于 GaN 器件提供的更高密度。

GaN 还提供其他独特的未开发特性，可以为未来的电源管理提供新的价值和机会。与典型的 PN 结 MOSFET 不同，GaN 器件的双向结构可以使用双栅结构控制电流。用于电机驱动的矩阵转换器可以通过利用双向设备潜在地减少开关的数量。此外，氮化镓器件可以在比硅器件更高的温度下工作，这使其成为许多热门应用（如集成电机驱动）的有吸引力的选择。

GaN 等突破性技术的长期影响是显著的：较低的功率损耗意味着我们不需要很多新发电厂来满足日益增长的电力需求。更高的功率密度意味着更多的集成。电池供电电路（例如电动车辆、无人机和机器人中的电路）可以更高效地运行更长时间。数据中心将更有效地运作，利用其数以千计的服务器帮助我们与朋友和同事联系。我们将能够过上更加环保的生活。OSc

3D辨识和手势识别 最佳镀膜方案

www.evatecnet.com/products/clusterline-platforms/clusterline-rad



瑞士EVATEC精密溅射镀膜设备CLUSTERLINE RAD® 生产符合成本效益的干涉滤光片，用于3D和手势识别传感器

- 全自动化上下片系统-支援8英寸的玻璃片并包括自动双面镀膜的翻转系统
- 业界最好的均匀性和最低微粒-使用最新的旋转靶技术并且不需修正档片
- 最佳光学薄膜叠层精度和可重复性的原位光学监测

要了解更多资讯请联系我们的总部info@evatecnet.com或联系你的区域销售和服务办公室Evatec China Ltd., Tel: +86 21 8019 7660, 邮箱: infochina@evatecnet.com

ADVANCED PACKAGING • SEMICONDUCTOR • OPTOELECTRONICS • PHOTONICS • THE THIN FILM POWERHOUSE
www.evatecnet.com



SiC : 柳暗花明

SiC 器件市场前景乐观。肖特基势垒二极管的销售逐渐成熟，MOSFET 的出货量预期将在未来三年内大幅增长。

Richard Stevenson 报告

Rohm现在为Venturi Formula E系列赛车提供全SiC功率模块。在Venturi的最新款赛车中，逆变器相比2015/2016赛季使用的硅逆变器轻了43%，重量减轻了6公斤。



对于碳化硅行业来说，2017年2月16日，将会是其历史上最重要的一天。因为在那天，美国国外投资委员会禁止了英飞凌购买Wolfspeed。

如果收购能够进行的话，那么8.5亿美元的现金交易，就会使这家德国电力电子制造商在SiC功率器件市场中拥有令人难以置信的强势地位。根据市场分析公司Yole Développement的说法，它将不仅拥有超过一半的全球销售额，该数值在2017年接近3亿美元，它还将使该公司成为衬底的主要生产来源。有了这些以后，它完全有可能影响所有竞争对手的材料供应，并采用垂直整合的方法来生产自己的芯片，而且使用它自己制造的衬底材料。

不出所料，当这笔交易失败时，英飞凌的许多同行都松了一口气。“主要的竞争对手都很高

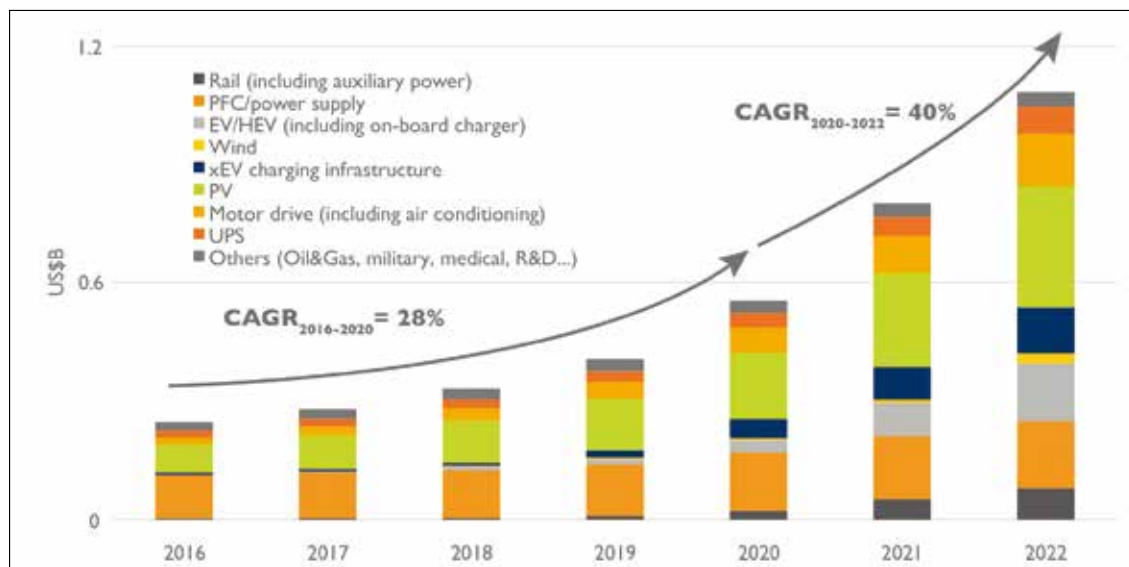
兴，”Yole的技术和市场分析师Hong Lin说。她认为，收购失败给竞争对手带来了发展空间。“这将为最终用户提供不同供应商的选择。当只有一个主导的供应商时，对市场来说不一定是最有利的。”

主导市场的二极管

尽管英飞凌收购Wolfspeed的交易失败了，而且这个家伙(SiC二极管)的市场空间也不大。据Lin介绍，目前市场销售的主要是SiC肖特基势垒二极管，占SiC功率器件市场的80%以上，其中超过一半的销售额来自英飞凌和Wolfspeed。

其他两大巨头罗姆半导体(Rohm)和意法半导体(ST)也是电力行业的知名企业。安森美半导体正要推出自己的产品，他们可能也会成为未来重要的供应商之一。

图1. Yole 预测SiC市场将出现巨大增长，其中MOSFET销售将大幅上涨。



英飞凌是这个市场上服务时间最长的制造商，早在2001年就推出了首款SiC肖特基势垒二极管。它现在提供一代产品。Lin说，一代产品与下一代产品之间的增益相比，更多是渐进式的而不是革命性的。她认为这种形式的二极管尽管在电流处理和可靠性等方面仍在不断改进，并且芯片面积也越来越小，但是事实上现在已经很成熟了。

Lin说，自从千禧年发布以来，二极管的价格已大幅下降。“在过去的五年中，价格下降了50%，但我们认为后面降价步伐将放缓一点，逐

年降价将不到10%。”

这些肖特基二极管的制造商热衷于将生产从4英寸线迁移到6英寸线。“但是，6英寸衬底供应仍然短缺，所以会同时使用4英寸和6英寸，”Lin解释说。

销售的大部分二极管是提供600V、1.2kV和1.7kV阻断电压的产品。但是，也有3.3kV额定值的产品。根据Lin的说法，600V SiC肖特基势垒二极管的主要应用是用于电源的功率因数校正电路。具有较高阻断电压的二极管用于光伏逆变器，以及具有较高额定值的电源中。

图2. SiC模块目前占SiC市场的很小一部分，并且有各种各样的形式。





图3. SiC肖特基势垒二极管用于生产很多不同的模块。本图表中提供了一些SiC的不同业务模式，关于SiC的所有业务模式，在Yole报告《Power SiC 2017：材料，器件，模块和应用》中有详细的分析。

为了达到电动列车发动机所需的更高阻断电压，一些公司正在开发 SiC p-n 结二极管。该器件的领导者是 Wolfspeed。但值得注意的是，将其技术与日本领先公司的技术进行比较并不容易。“日本公司大多使用内部专供的 SiC 产品，因此即使他们拥有这种产品，也不一定在市场上销售，” Lin 说。

快速发展的 MOSFET

英飞凌试图收购 Wolfspeed 背后的部分动机是它可以为德国公司带来领先的 MOSFET 技术。“总体而言，英飞凌在 SiC 方面拥有长期的经验，但他们的 SiC MOSFET 产品有点晚，他们的一款产品于 2016 年发布。” Lin 说。其中的部分原因是英飞凌花了很多年来研究 SiC JFET，结果却发现该产品并未受到最终用户的青睐。

Wolfspeed 和 Rohm 目前是 SiC MOSFET 的领导者。“但基于他们的客户组合，以及他们对电力电子的理解，英飞凌应该可以迅速赶上，” Lin 说。

也有一些初创企业正试图进入这个市场。“他们有一些原型器件，但要进行大规模生产将是他们面临的另一个问题，” Lin 说。

如果初创企业要想取得成功，他们就需要将自己与老牌的企业区分开来。“我认为他们会尝试使用代工模式，” Lin 相信这种方法可以降低生产成本。“从我个人的认识而言，在大规模生产方面，我认为大公司有更多的优势。”

许多 SiC MOSFET 的制造商也生产 SiC 二极管。“我认为客户会试图从同一个制造商那里购

买产品，制造 MOSFET 要困难得多。” Lin 补充说。

她说人们仍然担心 SiC MOSFET 的可靠性问题。“例如，硅器件有标准。但是，对于所有宽禁带的器件如 SiC 和 GaN，它们没有既定的标准。它们仍然需要一些国际的合作来制定标准。”

另外，还需要对 SiC MOSFET 进行更多的现场测试。确实有许多原型，而且其中一些已经在使用，但关于这些器件性能的数据则很少。

在接下来的几年里，Lin 倾向 SiC MOSFET 的销售会大幅增加。“在未来两三年内，我们将看到 SiC MOSFET 的大规模部署。目前我们仍然只是进行小批量的销售。”

由于体积小，SiC MOSFET 目前是在 4 英寸 SiC 衬底上制造。因为这些器件比肖特基势垒二极管更难以制造，因此人们更关注衬底的质量，这导致了目前向供应短缺的 6 英寸衬底过渡的停滞不前。

MOSFET 的价格在迅速下降，这种器件在市场上正日益受到关注。光伏产业和电动汽车的车载充电器中都有机会。例如，中国领先的电动汽车制造商比亚迪最近证实，它在车载充电器中使用了 SiC。SiC 也由于其方程式电动赛车 (Formula Electric) 中的部署而荣登头条新闻，其中 Rohm 的 SiC 功率器件大大降低了逆变器的损耗，同时提供了在更高温度下运行的能力。

模块的兴起

除了分立二极管和 MOSFET 之外，SiC 功率电子行业还有第三个收入来源：SiC 模块。它现在只占市场的一小部分，但它必将增长。

“现在有很多种模块,” Lin 解释说, “老一代比如使用旧的 IGBT 封装。也有很多创新的封装设计, 例如富士电机。”

客户经常寻求定制设计。这些就可能涉及新材料, 生产商正试图通过新的二极管连接材料, 不同类型的散热器, 以及在二极管和晶体管周围放置不同材料, 从而来最大化 SiC 器件的性能。

Lin 预计在高压市场, 模块的销售将会非常强劲。“对于 1.2kV 及以上, 模块将占主导地位。但是目前情况并非如此, 因为该模块非常昂贵。”

她认为, 模块的主要供应商可能与主导二极管和晶体管销售的供应商不同。Wolfspeed 于 2015 年收购了 APEI 来增强其模块设计能力, 但与领先的模块制造商相比, 该公司在模块设计和制造方面并没有那么多经验。因此, Lin 预计这个行业将由三菱, 富士电机和英飞凌等类似公司来领导。

SiC 取得市场成功的一个威胁是其他宽禁带

半导体的竞争对手, 如 GaN, 它可以在硅衬底上形成器件。这种组合有可能降低宽禁带功率电子器件的成本, 并影响 SiC 器件的销售。但是, Lin 并不认为这会很快发生。

“在二极管方面, SiC 非常地成熟,” Lin 说。“而对于 1.2kV 及以上电压的 SiC MOSFET, GaN 根本没有挑战能力。”她认为 GaN 可能会在 650V 范围内对 SiC MOSFET 构成一些竞争, 但她也说 SiC 更为成熟。“我认为在未来五年内, GaN 不能够替代 SiC 器件。”

相反, 她预计 SiC 将从硅的功率器件市场中获取市场份额。预计碳化硅销售将快速增长, 估计年复合增长率高达 28%。

更多关于 SiC 市场状况的介绍可以在 Yole Développement 的报告《Power SiC 2017: 材料, 器件, 模块和应用》(Power SiC 2017: Materials, Devices, Modules, and Applications) 中找到。

Imec 和 Qromis 公司在 200mm 硅晶圆上制造 P-GaN HEMT

近日, 比利时微电子中心 IMEC 与无晶圆厂公司 Qromis 宣布, Qromis 在 IMEC 的硅晶圆先导工艺线上, 基于 200mm 热膨胀系数 (CTE) 匹配衬底开发出高性能增强型 p-GaN 功率器件。衬底由 Qromis 公司提供, 其 200mm QST 衬底是公司专利产品。

研究背景

当前, 硅基 GaN 技术已用于 6 英寸商用 GaN 功率开关器件的标准制造平台。IMEC 率先开发了 8 英寸晶圆的硅基 GaN 技术, 以及用于 100V、200V 和 650V 工作电压的增强型高电子迁移率器件 (HEMT) 和肖特基二极管功率器件, 为实现更高量产规模铺平道路。

然而, 对于超过 650V 的应用 (例如电动汽车和可再生能源), 由于衬底热膨胀系数不匹配问题, 使得很难在 200mm 晶圆上进一步在 GaN/AlGaIn 外延层和硅衬底之间增加缓冲层厚度, 使其难以满足器件更高击穿电压和低漏电水平需求。曾经一度认为可以通过较厚的硅衬底来满足 900V 和 1200V 应用的晶圆弯曲问题, 但实践证明, 对于这些较高电压应用, 衬底的机械强度是大批量制造所关心的问题, 对于一些加工工具, 越来越厚的晶圆会产生兼容性问题。

膨胀系数匹配问题解决方法

Qromis 公司采用热膨胀系数与 GaN/AlGaIn 外延层热膨胀非常接近的精心设计的 200mm CMOS 晶圆制作 QST 衬底, 该衬底有望用于 900-1200V 器件的缓冲层。QST 衬底为实现非常厚的 GaN 缓冲层提供了路径, 包括通过大于 100 微米厚的快速生长外延层实现自立式和非常低的位错密度 GaN 衬底。这些特性使得商用垂直 GaN 功率开关和整流器适用于高电压和高电流应用领域, 而目前这些领域主要由 Si IGBT、SiC 功率场效应晶体管和 SiC 二极管主导。

此次技术转移成功的重点在于精心选择衬底核心材料以及晶圆光阻层的开发。

合作分工

在这次合作中, Imec 和 Qromis 在 200mm QST 衬底上开发了增强型 p-GaN 功率器件特定的 GaN 外延层, 德国 Aixtrons 公司则提供了 G5 + C 200mm 大批量制造 MOCVD 系统, 用于缓冲层生长。随后, Imec 在其硅先导工艺线上, 将 p-GaN 增强型功率器件技术移植到 200mm QST[®] 衬底上 GaN, 并实现了阈值电压为 2.8V 的高性能功率器件。

适用于射频功率的 硅上氮化镓

除了用于 600V 及以下的电源管理系统、无线充电和 LIDAR 以外，硅上氮化镓 (GaN on silicon) 能否继续赢得下一代 RF 应用 (如 5G 和物联网) 的部署呢？

Markus Behet 和 Joff Derluyn, EpiGaN 公司

几十年来，电子产品的创新倾向于利用硅和基于 GaAs 的技术、器件和集成电路。以蜂窝基础设施为例：其复杂性从 2G 增加到 4G-LTE 时，主要是由于得到 GaAs HEMT，HBT 和硅 LDMOS 器件方面不断改进的支持。

然而，所有这些现有半导体技术都面临一个问题：它们现在正在逼近其理论极限。因此，系统级别的任何改进都需要设计工程师付出巨大努力，并且还会不断增加开发成本。鉴于这种状况，迫切需要一种新的射频半导体技术来介入并实现 5G 射频系统的目标，而 GaN 技术正好达到了这个发展阶段。

宽禁带 GaN 技术绝对不是半导体市场的新事物。它已经部署在电源和电机驱动器中了，这些都是受益于高效的 600V 硅上 GaN HEMT。此外，还有硅上 GaN 的 RF 产品，用于基站、卫星通信、军用和 CATV 系统。由于所有这些应用，这两种形式的 GaN 产品在 2017 年的总市场价值达 4 亿美元。

随着下一代蜂窝基础设施——5G 的出现，另一个收入增长的机会也随之而来。初步部署将于 2020 年进行，预计将实现：峰值数据速率达到 20Gbit/s；任何给定区域的大量用户或传感节点；高功率效率，使得每个传输位的功耗更低；延迟小于 1 毫秒；以及无处不在的连接。这场革命不仅将大大增强现有的电信服务，还能实现新兴的应用，如虚拟 / 增强现实，自动驾驶汽车，大规模物联网和关键任务服务。

这些变化已促使市场分析专家 ABI 公司将 5G 视为一种通用技术，认为它将作为工作流程变革的催化剂，并将建立一套新的竞争性经济优势规则。ABI 表示，这种影响将是巨大的，到 2035 年它将引发 12.3 万亿美元全球经济产出——这与美国当前的年度消费支出水平相当。

5G 的支柱

为了满足用户严格的要求，定义 5G 路线图的工作组已经为 5G 网络设计了一种新颖的架构。其三个关键特征之一是使用许多小型网络蜂窝，称为 pico 蜂窝和 femto 蜂窝。它们将允许高的用户密度和低的延迟。5G 系统的另一个关键组成部分是收发器的使用，这些收发器工作在更高的基带频率，并具有可以满足数字带宽要求的非常大的（模拟）带宽。与引入 5G 相关的第三个重要创新是从全向广播转向为对每个连接使用定向波束。这将提高能效，并能够更有效地使用 RF 频谱。

可以为 5G 架构提供服务的 RF 技术有哪些要求呢？首先，它需要支持在更高频率下运行的 RF 网络。该频域比现在使用的频域更少拥塞，但是跨越 6GHz 到高达 100GHz 的范围。该频域内的新频段将具有更高的可用带宽，理想情况下将通过单个放大器模块来覆盖。

另一个重大变化是引入了大规模 MIMO（多输入，多输出）波束成形。该技术在收发器系统的相控阵配置中为每个天线单元提供多个发送和接收链。与单个全向天线相比，每个天线单元的

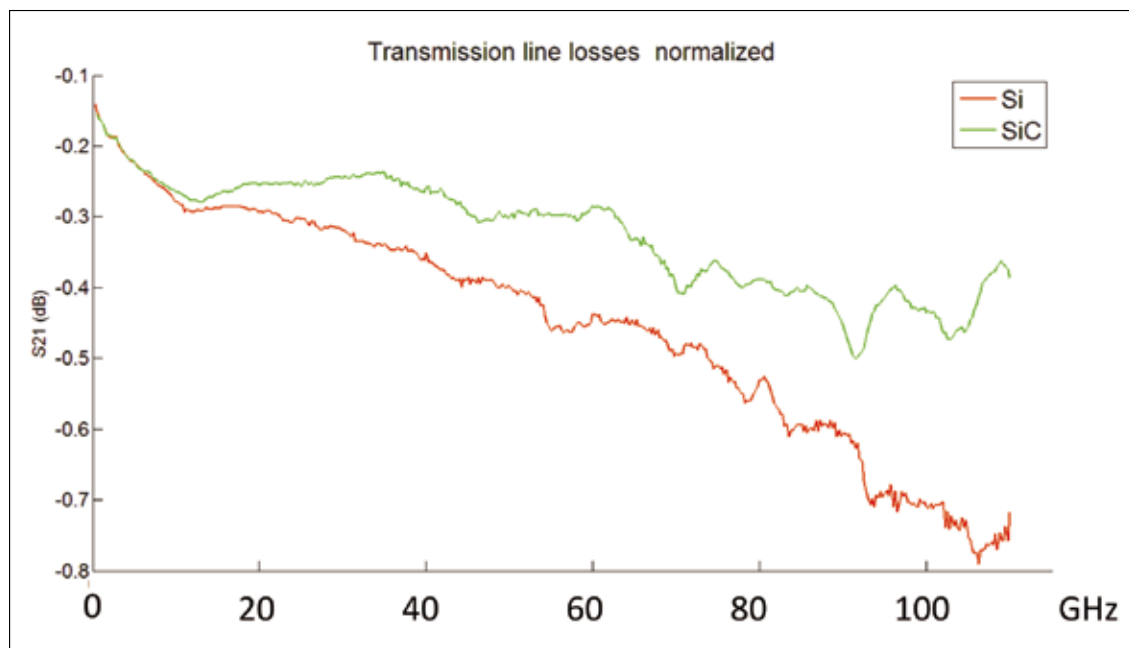


图1. 根据传输线结构的测量结果，EpiGaN公司优化的RF 硅上GaN HEMT结构可产生极低的RF损耗。

功率减小，因此有可能减小放大器的尺寸。

MIMO 的挑战之一是天线单元必须全部发射彼此之间具有明确定义相位关系的信号。由于这个准则，RF 放大器采用的技术必须允许其与驱动数字控制器的紧集成。注意，使用硅衬底制造比使用 SiC 衬底制造更容易实现这一点。

上面列出的要求定义了 5G 基础设施及其相关手机架构的功率放大器技术的强制属性。这些要求意味着需要结合紧凑性与低成本、高功率密度、毫米波频率线性度以及与 CMOS 技术可集成的器件。

在这里，硅上 GaN 技术脱颖而出。它本质上就是一种优越的 RF 半导体技术，非常适合满足苛刻的性能目标。与 GaAs 相比，GaN 的关键，经过验证的属性包括：每毫米栅极外围的功率密度要高出十倍；效率更高；在更高的电压下工作，使得阻抗变换挑战减小；以及在高频率下的出色宽带工作。更重要的是，GaN 可以比 GaAs 在更高的器件工作温度下工作。由此，冷却要求更容易，维护成本更低，并且器件可靠性也得到提高。

改善基础

在技术工具箱中，至少有两种 GaN 可供选择。其中一种是 SiC 上 GaN，这种材料配对可以在最苛刻的应用中提供最高的功率水平。常见的替代方案是硅上 GaN。这可以为需要大直径晶圆、成本敏感的大批量市场提供服务；它可以提供远远优于低频硅 LDMOS 和昂贵的低功耗 GaAs HEMT 技术的 RF 性能。

在比利时哈瑟尔特的 EpiGaN，我们正处于开发 RF 器件用硅上 GaN 外延片技术的最前沿。自 2010 年成立以来，我们已经取得了重大的技术里程碑，这将有助于推动硅基 GaN 的应用，为下一阶段的 5G 蜂窝基础设施提供支持。

如果硅上 GaN 要在高端 RF 应用中直接与 SiC 上 GaN 竞争，则必须克服几个障碍。一些是固有的，例如与 SiC 相比，硅的热导率较低，这可以通过在器件工艺期间将衬底厚度削减至 50μm 来抵消；以及在外延生长的初始阶段，通过优化工艺来最小化硅衬底和 III 族氮化物缓冲层之间导电界面的要求。过于导电的界面会导致 RF 信号的寄生传导路径，这导致在较高频率处恶化那些信号不期望的耗散。最重要的是要避免这种情况，因为在这种有损耗得衬底 / 缓冲层组合上制造的

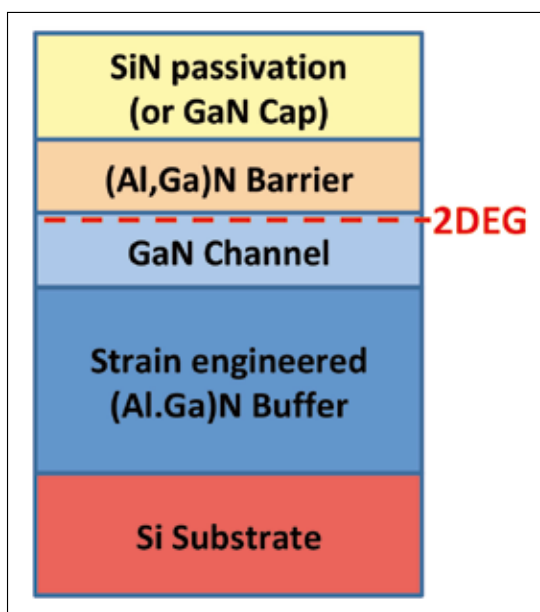


图2. 硅上氮化镓HEMT的典型结构包括：GaN 沟道，AlGaIn势垒和 GaN帽层或者氮化硅钝化层之一。

晶体管，将永远不会在高效率下获得良好的性能。

为了缓解这种导电路径，我们开发了一种强大的、优化的界面技术。对于当今的基站频率，它将硅上 GaN 材料上的 RF 信号损耗降至 0.2dB/mm 以下，这已经非常接近于更昂贵的 SiC 上 GaN 材料上所获得的值。即使在未来 5G 网络可能运行的高达 100GHz 的 E 波段，RF 信号损耗也远低于 1dB/mm（见图 1）。

如今，制造低损耗 RF 硅上 GaN 技术的最常见平台是电阻式浮区硅衬底，直径可达 150mm。我们正在开辟新的平台，最近已经在直拉工艺生产的高阻 200mm 硅衬底上发布了这种 RF GaN 工艺。使用这些外延片形成的器件提供了可比的性

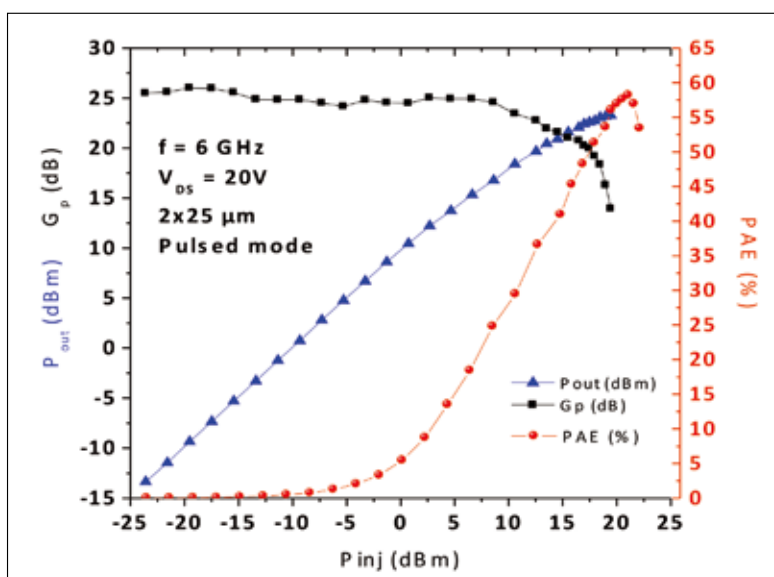


图3. IEMN-CNRS的研究人员已经使用EpiGaN公司的材料来产生0.15μm栅长的硅上AlN/GaN原型晶体管，得到6GHz下令人鼓舞的功率，增益和功率增加效率水平。承蒙里尔IEMN的F. Medjdoub提供图片。

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



能，并展示了潜在用于进一步减小成本的 RF 功率硅上氮化镓技术。这些较大外延片的另一个优势是它们会轻松进入当今主流的硅集成设备制造商和代工厂的 200 毫米工艺线。

优美的二元势垒

RF GaN HEMT 最常见结构的核心是三元 AlGaIn 势垒，通常为 20nm 厚，支持的铝含量约为 25%。该势垒需要通过一个超薄的 GaN 层盖帽并且保护，通常厚度在 2 和 3nm 之间(参见图2)。

我们开发了一种截然不同的结构。为了实现最终的高频 RF 性能，我们将纯的 AlN 势垒层（而不是 AlGaIn 三元材料）与原位 SiN 帽层相结合。通过这种搭配，势垒的厚度可以从典型的 20nm 减小到仅 4nm 到 6nm，从而使晶体管的栅极位置非常靠近电子密集的沟道，并最大化两者之间的静电耦合，换句话说，可以改善栅控制。

这些改进创造出优异的晶体管。使得栅极更靠近沟道，从而使晶体管的跨导最大化，而这是射频放大器的关键特性。对于所谓的“短沟道寄生效应”也有着显著的抑制，这种不希望的影响包括栅长低于 0.15 μm 时晶体管中跨导的减小，以及栅长与栅极到沟道距离之间比例得劣化，理想情况下，这个比例应该是 15 或更大。

从 AlGaIn 势垒切换到 AlN 势垒的另一个优点是，固有压电效应增加到最大的可能值。因此，沟道中的二维电子气载流子密度超过 $2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$ ，从而使得功率密度增加。如果采用经过深思熟虑的热芯片布局，则还可以显著减小芯片尺寸。

新器件性能

我们开发并优化了一种在生长后直接密封硅上 GaN 晶圆顶部的工艺。为此，我们使用原位生长的 SiN 钝化层。这种方法可以防止 (Al, Ga) N 层暴露在晶圆厂环境中——这是 CMOS 晶圆厂的一个主要关注点，相比标准的硅上 GaN 结构，CMOS 工厂更愿意拿我们的外延晶圆进行工艺。

然而，这不是我们的 SiN 钝化层的唯一好处。它还可以用于更广泛的目的，包括创建具有光滑、无污染表面的独特栅极介质。通过控制器件工作期间表面态的填充，我们的 SiN 层可以提供足够的电荷来中和硅上 GaN 器件中 AlGaIn 势垒层的表面电荷，因此其表面电势不再对二维电子气的耗尽贡献——这种现象常被称为电流崩塌。SiN 层的

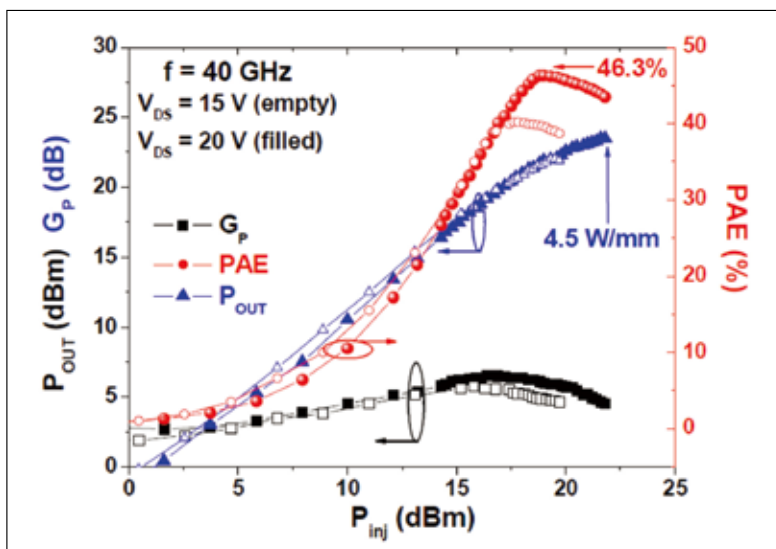


图4. IEMN-CNRS一个团队获得的 $2 \times 25 \mu\text{m}$ AlN/GaN HEMT的CW功率性能。器件工作在40GHz的频率下，并且漏极和源极电压为15V和20V。承蒙里尔IEMN的F. Medjdoub允许复制结果。

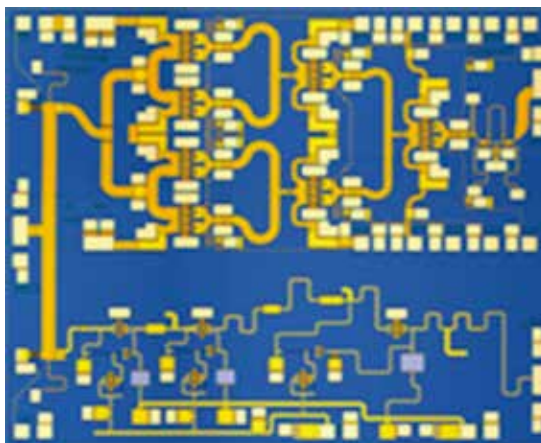


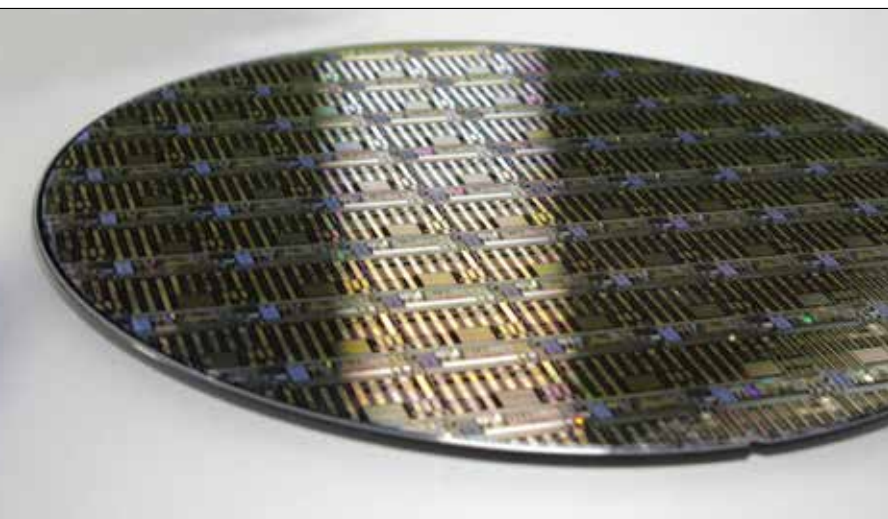
图5. 采用EpiGaN的SiN/AlN/硅上GaN RF HEMT外延片技术，在Ommic构建的完全集成的Ka波段发送器/接收器。PA位于芯片的顶部，而LNA位于底部，开关位于左侧（天线端口）。图片由法国利梅布勒瓦纳的Ommic提供。

另一个好处是它可以在高温下提高器件的稳定性。

使用原位 SiN 沉积，AlGaIn 势垒可以用纯 AlN 代替，而且不会造成任何材料退化。对于这种 SiN/AlN/GaN 异质结构，面电阻远低于 $350 \Omega/\text{sq}$ 。如此低的值使得能够制造具有更高电流密度的晶体管——因此可以在相同电流额定值下得到更小、更便宜的器件。

我们与 IEMN-CNRS 的研究人员合作，他们

IEMN-CNRS和OMMIC工程师们得到的结果进一步证实了RF GaN技术将成为主流的观点，事实上，这一点毫无疑问。SiC上GaN和硅上GaN都将获得成功。



使用我们的硅上 GaN RF 晶圆生产原型晶体管。在未减薄的硅衬底上，所得到的器件在 6GHz 时的功率附加效率接近 60%（见图 3）。在更高的频率下，性能仍然很高。

在 40GHz 时，具有 120 nm 栅长的原位 SiN 封盖 AlN/GaN 晶体管可提供 4.5W/mm 的峰值输出功率密度，并且相关的功率附加效率为 46.3%（参见图 4）。而这并不是极限：优化缓冲层从而改善散热，可以使 40GHz 时的功率附加效率上升到 50% 以上，相关增益超过 10dB。

我们还与欧洲领先的 GaN 代工厂 Ommic 合作。它利用我们独特的技术，开发出具有完整设计套件的 100nm 栅长，开放式代工 MMIC 工艺。

与标准 GaAs pHEMT 工艺相比，通过该工艺生产的 RF 硅上 GaN 器件具有更高的击穿电压，达 40V。由此，Ka 波段的输出功率密度要高得多，典型值为 3.3W/mm，峰值为 5.7W/mm。更重要的是，该器件具有更强健的输入不匹配条件性能。

Ommic 的设计人员使用在 Ka 波段工作的完

全集成收发器展示了我们技术的能力。它的芯片尺寸仅为 11mm²。在 30GHz 工作时，功率放大器和开关收发器的输出功率高于 35.5dBm，而功率放大器单独提供 37dBm。同时，在接收模式下，评估的低噪声放大器和开关收发器器件的增益超过 18dB（见图 6）。

IEMN-CNRS 和 OMMIC 工程师们得到的结果进一步证实了 RF GaN 技术将成为主流的观点，事实上，这一点毫无疑问。SiC 上 GaN 和硅上 GaN 都将获得成功，两种形式的销售水平取决于特定 RF 应用的成本与性能之间的权衡。

今天，我们已经看到 SiC 上 GaN HEMT 在 4G-LTE 基础设施系统中取代了现有的 GaAs pHEMT 和硅 LDMOS 技术，而硅上 GaN 正在迅速缩小性能差距并提供越来越诱人的爆炸性能。RF GaN 技术带来的好处太过诱人从而让人无法忽视，并且它们已经刺激了许多现有应用的创新。

为了实现针对 5G 的 RF GaN 技术的大规模市场应用，需要有一个成熟的供应链和生态系统。虽然目前尚未实现这一点，但大的产业参与者——即 IDM 和纯粹的代工厂——正在为 RF GaN 器件制造建立强大的供应链。随着 GaN 的出现，新 RF 技术的曙光已经开始变得越来越清晰，现有的硅和 GaAs 器件将在下一代蜂窝 RF 基础设施应用中失去相当大的市场份额。

最后但同样重要的是：RF 硅上 GaN 技术将在未来的智能手机中获得部署吗？它适用于目前 10V 或更高的相对较高电压下，因此它不适用于目前使用 3V 至 5V 的手机。但随着标准的发展，载波聚合引入以增加带宽，并且对多模多频带 PA 的性能要求不断提高，RF 硅上 GaN 技术也很快就會成为可行的候选技术。☑

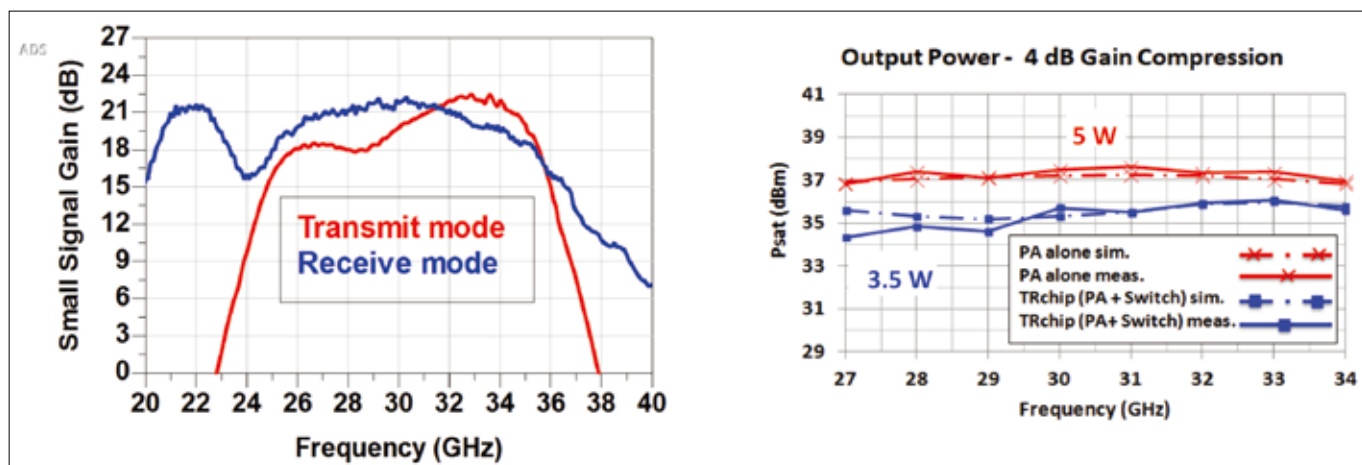


图6. 图5中的芯片发送和接收Ka波段收发器MMIC（带或不带开关）的小信号增益（左）和发送PA输出功率（右）；承蒙法国利梅布勒瓦纳的Ommic提供图片。



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

SIS
OTC

VisionCon
视觉系统设计技术会议

EDI
Electronic Design
Innovation Conference
电子设计创新大会

LaserFocusCon
激光聚会

Clean China
Conference & Product Display
洁净室研讨会暨产品展示





超辐射 LED： 目标显示器应用

具有创纪录的输出功率和效率的超辐射 LED，为平视显示器和微型投影仪的应用前景提供了必要的条件和保证。

Marco Malinverni , EXALOS 公司



当激光器用于形成图像时，它受到干涉图案的困扰，通常称为散斑。对于增强现实应用来说，这就尤其麻烦了，因为该应用中高保真的图像是关键。人们已经开发了去散斑解决方案以最小化干扰。但是这也只取得了有限的成功，而且所需的硬件通常太庞大或太昂贵，从而无法引入到消费电子设备中来。

我们需要的是结合了激光器和 LED 最佳属性的一种光源。而好消息是该器件现在已经存在了，就是采用超辐射 LED (Superluminescent LED, SLED) 的形式。它提供了一种具有宽带发射光谱的定向光源，可产生低的散斑噪声和高的图像质量 (见图 1)。

2009 年，我们在瑞士 Exalos 公司开拓性制作了 SLED，这是我们的一个里程碑。经过三年的发展，我们与洛桑联邦理工学院合作推出了业界首款蓝紫 (420nm) SLED。一直到今天，我们仍然是唯一的紫色和蓝色 SLED 制造商。然而，这不是我们唯一的产品，我们也是各种红外 SLED 器件的领先供应商，已经出货超过 300,000 器件用于各种应用，包括从电流感应到光纤陀螺仪和光学相干断层扫描。

最近，我们致力于增加 SLED 的发射波长。如果由 III 族氮化物材料系统制成的蓝色和绿色器件可以与 GaAs 基结构制成的红色 SLED 配对，则该三原色器件可以用于形成全色显示器。但是，这还需要做很多工作，因为蓝色 SLED 的性能仍然有待提高，而绿色 SLED 的性能则是处于起步阶段。

SLED 设计

我们所有的 SLED 都共享激光二极管的边发射脊型波导结构。然而，为了防止光学反馈和激射，腔体效应通过增加输出端面处的镜面损耗来进行

目前最热门的研究课题之一是为增强现实平视显示器 (head-up displays) 和微型投影仪 (pico-projectors) 开发节能显示技术。

这些技术现在倾向于使用激光二极管或 LED 作为其光源，但这两者都不是很理想。LED 受到朗伯发射曲线分布的阻碍，产生低方向性的光，影响与光纤元件 (如光纤和波导) 的耦合。激光二极管的方向性更好，因为它们发出窄光束的光，能够简单有效地耦合到光学元件中。更重要的是，激光二极管的输出尺寸减小，更接近理想的点状光源，有助于光学系统设计。然而，激光二极管由光学反馈所需的法布里 - 珀罗腔产生的单色光谱发射，导致了高度的时间相干性。这是不希望的：

图1. 蓝色激光二极管 (左) 远场图案中的散斑噪声远远高于 SLED (右) 所产生的散斑噪声。

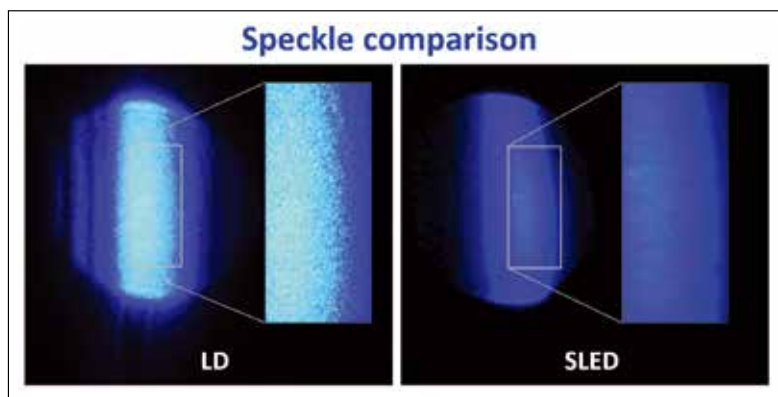
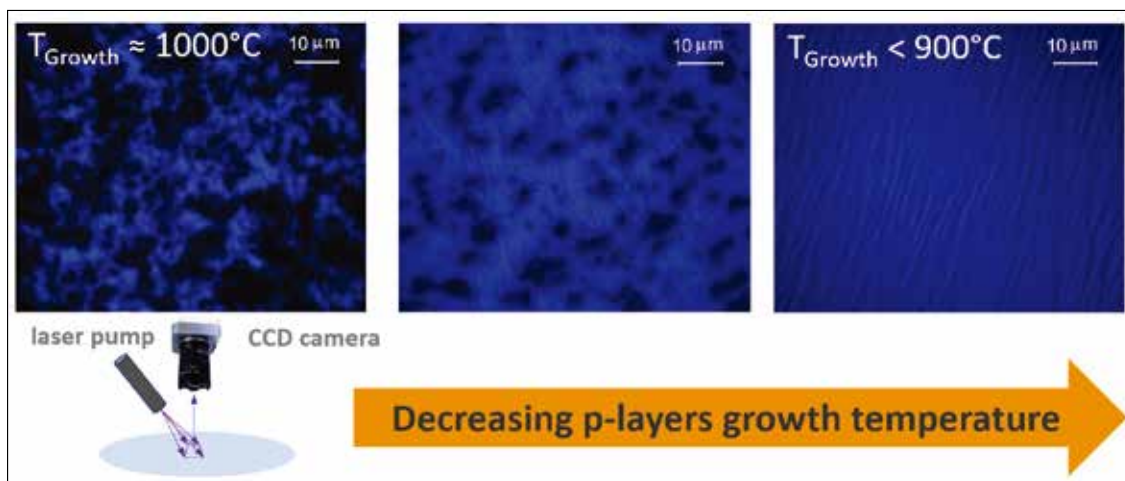


图2. 具有p掺杂InGaN有源区的荧光图像显示出在较低温度下的生长未必导致材料质量的降低。



限制。有几种方法可以实现这一点：将输出端面倾斜几度，在该端面上涂防反射涂层，或采用两者的组合。通过抑制激射行为，利用载流子的受激发射实现了定向的宽带发射光束。光谱带宽远远大于激光器的光谱带宽，并受半导体材料的增益特性控制。

2015年，我们在使用405nm器件的基础上，开发蓝色和绿色SLED。当时我们演示了连续波，高功率，单模405nm的SLED，其在室温500mA驱动电流下，输出功率达到350mW。当电流降至100mA并且器件在相同条件下工作时，相关带宽(半高全宽)为3.5nm，而外端面光功率降至20mW。

这些2015年器件的另一个特点是它们的低正向电压：在100mA时仅为5V。我们是通过优化p型层中的镁掺杂水平来实现这一点。镁的存在会影响器件的电光特性及其可靠性，但通过微调镁，我们生产出连续波、10mW的SLED，预计寿命约为5000小时（外壳温度为25℃，失效标准为外加驱动电流增加35%）。

对于所有基于III族氮化物的器件来说，特

别是激光二极管，首先开发出紫色发光体，然后是蓝色，而最后是绿色发光体，这是有其技术和历史原因的。从历史上看，开发的重点是405纳米紫激光二极管，因为短波长允许增加光学数据存储容量，并被选为Blu Ray的标准。最近，由于显示应用，人们对蓝色和绿色激光器的兴趣不断增加。

将任何III族氮化物发光体的发射波长从紫色转变为蓝色或绿色远非微不足道的小事情。在发光层内实现足够的晶体质量，并找到合适的化合物组合从而产生有效的波导结构，这些都存在若干挑战。

更好的蓝光

所有III族氮化物发光器件的核心是有源区，其中InGaN量子阱夹在GaIn势垒之间。为了增加发射波长，必须在量子阱中加入更多的铟。蓝色发光器件的阱中铟含量适中，而在绿色发光器件的阱中铟含量则偏高。

在量子阱中添加更多的铟有其缺点。晶格与

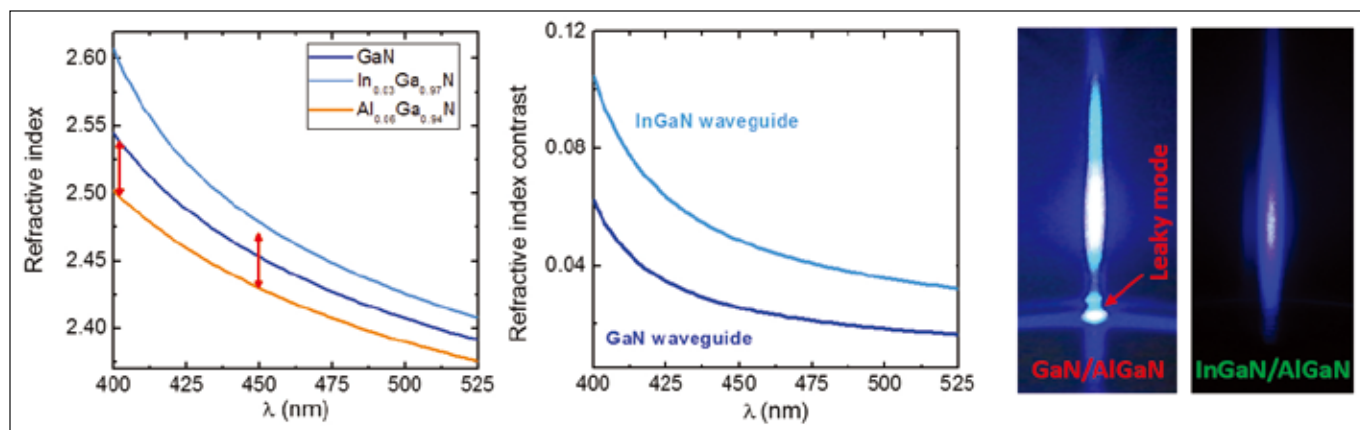


图3. (左) 对于GaN, In_{0.03}Ga_{0.97}N和Al_{0.06}Ga_{0.94}N, 折射率随波长的变化。(中) GaN/AlGaIn和InGaIn/AlGaIn波导/包层组合的折射率对比演变。(右) 两种不同架构的远场图案显示GaN/AlGaIn架构的强的衬底泄漏。

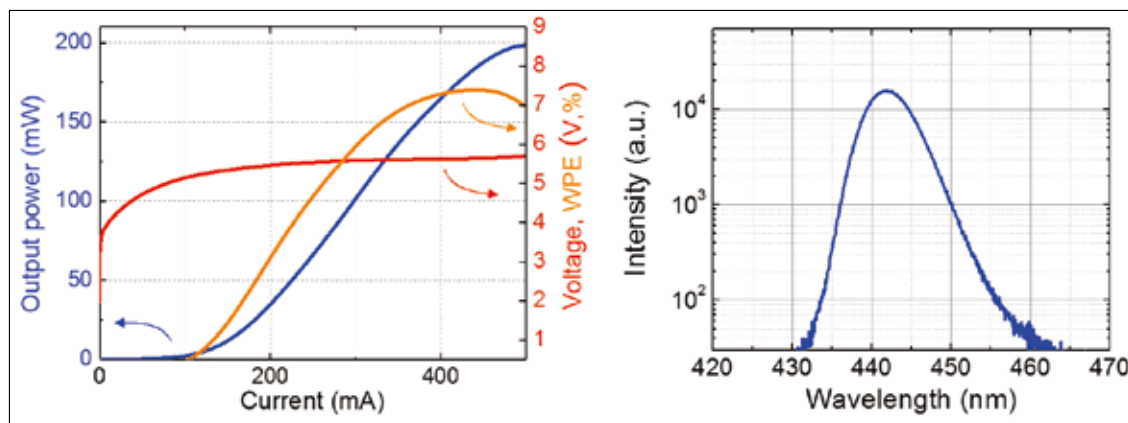


图4. (左) Exalos蓝色SLED在连续波操作下的光电流-电压特性和墙插效率。200mA下的发射光谱(右)。

其他层的不匹配会增加，将降低器件性能并减小阱的临界厚度，从而降低增益。更多的钢也意味着更多的缺陷，以及有源区中更高的电场。如果沿极性方向（c轴）进行器件的生长，这些电场会拉开电子和空穴距离，从而损害辐射效率。更重要的是，为了在阱中加入更多的钢，外延生长需要在更低的温度下进行—这可能导致晶体质量下降，并且还会导致不必要的污染。

另一个问题是随着量子阱中钢含量的增加，有源区的热稳定性下降。在SLED结构（以及激光二极管）中生长有源区之后，需要提高生长温度来沉积p型波导和包覆层。较高的温度会使量子阱退化。虽然通常高于1000℃的p型层生长温度适合于生产405nm器件，但这种温度会降低蓝色和绿色发光器件的性能。

为了解决这个特殊问题，我们致力于降低p型层生长的温度，同时确保它仍能提供良好的导电性。降低生长温度具有其缺点，包括降低p型掺杂剂镁的掺入效率，以及p层的导电性。幸好，900℃以下存在合适的窗口，其中可以生长具有良好电特性的p型波导和包覆层，而且不会导致量子阱中产生扩展缺陷（参见图2）。这种生长条件非常适用于蓝色和绿色SLED。

与激光器不同，SLED依赖于光的单程放大。该器件产生的输出取决于有源区的材料属性，同时还取决于与架构相关的光导效应。

提高性能的一种方法是增加器件内的光学限制。这是通过用较低折射率材料（通常为AlGaIn）包覆有源区和波导来实现。然而，当从紫色波长移动到更长波长时，该包覆层和波导的折射率间差异减小，导致更低的光学限制和输出功率受损（见图3）。这意味着紫色器件中使用的GaIn波导和AlGaIn包覆层传统组合不再适用于蓝

色和绿色器件。

我们的解决方案是从GaIn波导切换到由InGaIn制成的波导。为了确定最佳设计，我们对波导-包覆层结构进行了大量的模拟，揭示出理想的层厚度和组分。由于光向衬底的泄漏显著减少，这个努力还使得实现了输出光束质量的改善。为了实现这一优势，我们必须提高InGaIn的材料质量，这样可以保证波导中低的光学和载流子损耗。请注意，我们仍然在我们器件的包覆层中使用AlGaIn。实际上，为了减少光学模式到衬底的泄漏，底部包覆层要比紫色器件中厚得多。

将AlGaIn结合到器件中的挑战之一是它具有比GaIn更小的晶格常数，因此当这种三元材料生长在用于激光二极管和SLED外延的高质量GaIn自支撑衬底上时，张应变就会在该层中形成。因此，应变管理对于防止为了减少光泄漏所需厚AlGaIn层中的开裂是至关重要的。通过采取应变释放技术，我们可以成功地管理应变，从而可以将AlGaIn底部包覆层的厚度加倍。

优化器件

SLED和激光二极管之间的相似之处是优化性能的关注领域：两种器件都需要低的光学损耗，高的注入效率和高的增益。然而，增益引导的激光二极管工艺非常快速，而单模SLED工艺则复杂且耗时。因此，为了加速开发，我们将我们的

我们最近的研究结果表明，蓝色SLED器件的开发已经取得了相当大的进展。但是，用于主流应用仍然需要进一步改进。



图5. 2017年显示周展示的Exalos演示，将红绿蓝激光二极管（顶部）与Exalos的红色和蓝色SLED（底部）进行了比较。

外延片同时加工成 SLED 和增益引导激光二极管。后一种器件提供了关于量子阱结构激光特性的快速反馈，例如激光器阈值和斜率效率。通过改变端面镀膜的反射率，还有可能揭示内部器件参数，例如光学损耗，模态增益和载流子注入效率。

使用这种方法，我们开发并优化了工作波长超过 440nm 的蓝色激光二极管和 SLED。最初，未镀膜的增益引导激光二极管的阈值电流密度高达 7kAcm^{-2} 。然而，在我们解决了与光学限制、有源区稳定性以及外延层更一般的晶体质量相关的众多挑战之后，这就降至 3kAcm^{-2} 以下。

这些优化还使得斜率效率提高，对于未镀膜的器件，单面输出从 0.3W/A 跃升至超过 0.6W/A 。转向高反射率的后端面镀膜和未镀膜前端面进行进一步改进，最新的增益引导器件的斜率效率超过 1.2W/A 。通过对前端面部分镀膜，甚至可以实现更低的阈值电流。这里实现了阈值电流低于 1kAcm^{-2} 。

使用可变的端面镀膜方法，我们观察到外延开发期间内部损耗的恒定降低。材料质量的改善使得这些损耗减少了 50%，从 12cm^{-1} 到 6cm^{-1} 以下。

我们已将优化的外延片加工成了单模 SLED。这些蓝光发光器件采用 TO 帽封装，在室温下以连续波模式驱动，具有与 405nm 器件相当的电流 - 电压特性，电压仅高出十分之几伏特，尽管我们是在相当低的温度下生长了 p 掺杂层。

超过 60mA 时，我们的 SLED 的外端面输出功率呈指数增长。这是令人鼓舞的，因为它是结构中增益表象的典型特征。当电流增加到 120mA 然后再增加到 200mA 时，输出功率分别上升到 5mW 和 30mW，发射中心波长为 442nm。甚至可以提供更高的输出功率—无需任何特殊设计的散热器，最大功率可以达到近 200mW。这些功率水平以及墙插效率超过 5% 是所有蓝色 SLED 的最高报告值。

随着用于增强现实应用的下一波消费设备的发展，将会评估各种竞争的显示架构。由于其独特的光谱和空间特性，SLED 作为照明光源具有引人注目的优势，尤其是对于近眼架构，所以它肯定会成为领先的候选者。

我们最近的研究结果表明，蓝色 SLED 器件的开发已经取得了相当大的进展。但是，用于主流应用仍然需要进一步改进。我们正在努力提供 450nm 的更高效率器件，并将努力将发射波长扩展到更长的波长。一旦发射超过 510nm，SLED 就可以提供红绿蓝照明的最终光源。OSc

扩展阅读

Castiglia 等人, Proc. SPIE, Vol. 9748 (2015)

在硅 CMOS 上印刷 GaN HEMT

利用微转印技术，通过将高性能 GaN HEMT 与高集成度硅 CMOS 集成在一起，从而提高集成功率电子器件的效率。

Stefan Eisenbrandt 和 Ralf Lerner, X-FAB 公司



当今大多数功率 IC 的核心是三类硅的晶体管——横向扩散金属-氧化物-半导体设计，绝缘栅双极结构，或者超结结构。所有这些器件都可以处理高电压、高电流或两者同时。

根据摩尔定律，将这些晶体管微型化会带来性能的逐步改进，但代价是螺旋式的开发工作。更好的方式是革命性的性能提升，这可以通过集成 III-V 材料来实现。

用于功率电子器件的最有前途 III-V 器件之一，是 GaN HEMT。与所有形式的硅器件相比，它具有出色的开关速度，并且在考虑导通电阻和击穿电压之间的折衷时也具有优势。由于这些优点，

GaN HEMT 可以实现新的、高效的功率转换拓扑，这对于最先进的硅基器件来说也是不可想象的。

但是，我们暂时还不可能完全取消硅。请注意，双极 CMOS-DMOS 和高压 CMOS 技术已实现高水平的多样化，从而导致最高的设计复杂性。这些器件可用于智能功率 IC，这可实现数字控制逻辑与电源负载之间的接口。通过使用单片集成将输出功率器件定位在数字和模拟电路旁边，可以在同一芯片上组合信号处理、传感和保护电路。这种方法的其他好处是减少接口的数量、体积和电磁干扰。其结果就是提高了效率、性能和可靠性。

采用化合物半导体技术的工程师也在努力实

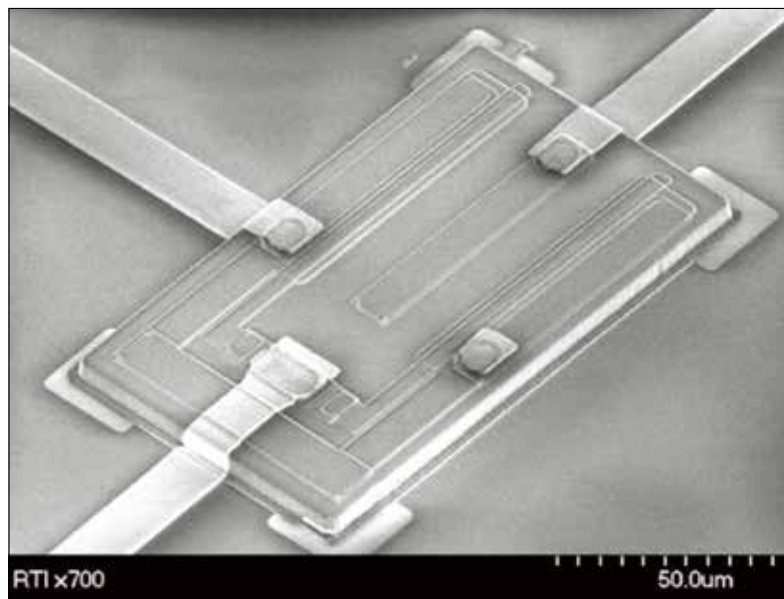


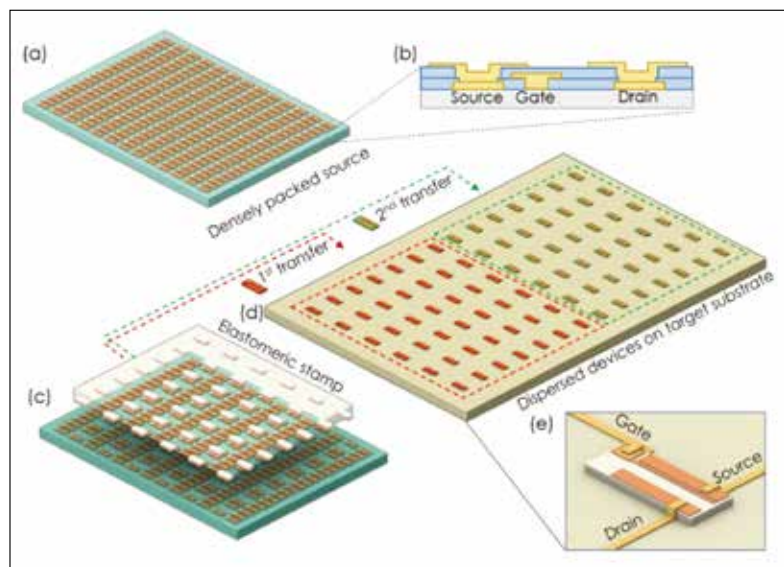
图 1. 微转移印刷可以在硅 CMOS 晶圆上定位 GaN HEMT，随后进行晶圆的金属化。

现这些硅基础智能功率 IC 类似的高级功能集成。目前正在寻求几种将 GaN HEMT 与数字和模拟电路集成的技术：基于 GaN 的智能功率 IC；硅上 GaN 的单片集成；硅上 GaN 的晶圆键合；以及我们正在德国的爱尔福特 X-FAB 半导体代工厂研究的方法：通过微转印技术（micro-transfer-printing）实现的异构集成（见图 1）。

竞争方法

几个小组正致力于将 GaN 功率器件与 GaN 数字和模拟电路集成在同一基板上。这种方法的缺点是由于较差的空穴迁移率和缺乏高性能 p 沟道 GaN 器件，导致缺少类似标准硅 -CMOS 电路拓扑结构的可行性。由于这些弱点，可能需要数年才能实现 GaN 基逻辑电路的高集成密度和功能

图 2. GaN HEMT 的微转印工艺概述。(a) 具有密集 HEMT 阵列的源晶圆，(b) HEMT 横截面，(c) 弹性体印模从源晶圆中移除 HEMT 阵列，(d) 新目标基板上的第一次和第二次印刷工艺，例如 CMOS 晶圆，(e) 晶圆上印刷的 GaN HEMT 的布线。



多样化。

GaN 和硅 CMOS 的单片集成是将基于 GaN 的晶体管与 CMOS 逻辑电路结合在一起的另一种选择。两种器件均可在同一硅衬底上制造，采用定制的绝缘体上硅晶圆来为每种技术提供层级：<100> 取向的硅用于 CMOS 和 <111> 取向的硅用于 GaN。GaN 和硅晶体管不是垂直集成的，而是横向并排布置。

雷神公司的一个团队开创了这种方法。为了降低热预算，他们通过 MBE 而不是 MOCVD 沉积 GaN 层。为此付出的代价是较低的产能，使得这种方法不利于大规模生长需要较厚缓冲层的更高电压器件。

该方法的另外一些缺点是：材料不相容，例如晶格常数和热膨胀系数的显著差异；器件限制，例如热预算和接触金属化材料对 CMOS 兼容金属的限制；以及高成本。请注意，由于与单片集成相关的分区问题，成本可能会急剧上升。例如，对于总面积为 10mm^2 的集成电路（包括 9mm^2 逻辑和 1mm^2 的 GaN HEMT），外延工艺的成本与全晶圆工艺相似，但外延层仅用于 1mm^2 的 GaN 区域。因此，每个 GaN 的面积成本以及每安培的成本都会高达十倍。

将 GaN 功率器件的优点与硅 CMOS 的优点相结合的另一种选择，是在其专用制造环境中制造每个器件，然后在芯片级将它们密集地组合在一起。通过这种方法，无需考虑材料和工艺的限制，每个器件都可以充分发挥其潜力。这是因为后处理工艺中通过晶圆键合进行了集成。

我们一直在通过由欧盟的地平线 2020 研究和创新计划资助的多伙伴项目 CMOS 上 GaN 来实现这种方法。2017 年 1 月启动的该项目，投资支持了 740 万欧元，旨在通过提供密集集成的材料，将 GaN 电力电子材料、器件和系统提升到新的成熟水平。该项目的一个关键目标是在材料、器件、模块和系统的整个价值链上，实现长期的可靠性改进。

微转印

我们项目的关键技术之一是微转移印刷（微转印）。与晶圆键合一样，它有助于 GaN 功率和硅 CMOS 器件的后工艺集成，但它也允许将微米尺度、高性能半导体器件确定性地组装和集成到非原生衬底上。

微转印的关键过程是通过弹性体印模从源晶

圆上拾取大量的微型器件阵列，然后将这些器件印刷在回收晶圆上。这是通过在高精度、运动控制的打印头上容纳印模来实现的。通过这种并行工艺，许多带有 GaN HEMT 的小芯片可以通过一次工艺来印刷到完全加工好的硅 CMOS 晶圆上（见图 2）。

大多数 GaN HEMT 在 $\langle 111 \rangle$ 取向的硅晶圆上生长和制造。为了使它们为微转印工艺做好准备，这些器件需要从其原生衬底上释放出来。

在我们所涉及的项目中，该步骤通过反应离子蚀刻进行，穿过器件层并向到达底部硅衬底（参见图 3 (a)）。然后，为了钝化侧壁和形成束缚结构的锚，通过等离子体增强 CVD 来生长 SiN 层（参见图 3 (b)）。

此后，使用高选择性、各向异性刻蚀溶液对器件下方的 $\langle 111 \rangle$ 取向硅进行湿法刻蚀（参见图 4 (a)）。由于所有 $\{110\}$ 方向的蚀刻速率比正交方向要快一百倍以上，因此硅不会底切的区域仍然作为释放工艺的锚点（参见图 4 (c)，光学显微镜图像显示出两个完全底切、准备好印刷的不同束缚配置 GaN HEMT）。

利用弹性体印模的粘弹性质，然后从其源晶圆拾取 GaN 器件，并将其印刷在 CMOS 晶圆上。由于印模和 GaN 器件之间的高粘附性，当随后印模快速移动远离粘合界面时，束缚破坏，使得微型器件可以从其原生基板上拾取。我们使用了不同的方法来打印器件。这次将印模从粘合界面轻轻移开，使印模和器件之间的粘合力低于印模键合力。由于这个原因，印模与芯片分离，芯片粘

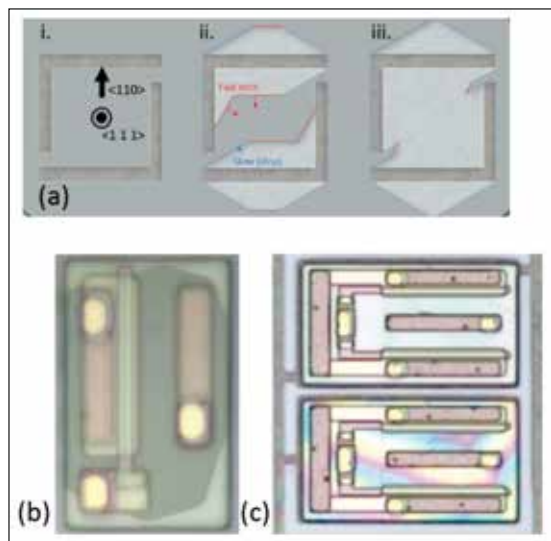
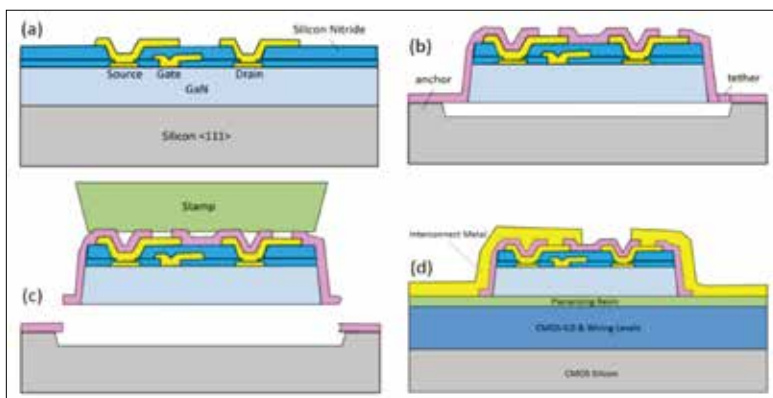


图4. (a) 器件下面的硅 $\langle 111 \rangle$ 湿法刻蚀。(b) 透过仅部分蚀刻的 GaN HEMT 观察，可以看到蚀刻的前沿。(c) 已经完全底切的 GaN HEMT 的光学显微照片，具有两种不同的束缚设计。



到了新的非原生基板上。

在微转印工艺之后，通过标准晶圆制造工艺来进行互连，例如薄膜沉积和光刻图案化（参见图 3 (d)）。采用这种涉及片上布线的方法，工艺温度不会超过 175°C ，从而允许使用复杂的智能功率设计。

令人振奋的结果

已经制造出具有各种栅指配置、沟道宽度和栅漏间距的小尺寸 GaN HEMT（见表 1 的综合）。所有这些 HEMT 都是用相同的工艺生产，并且通过相同的衬底晶圆制成，其特征为 GaN 外延结构约 $4\mu\text{m}$ 厚。使用上述工艺，HEMT 已经可以转移到两种类型的晶圆上：完整工艺后的硅 CMOS 晶圆；以及沟槽隔离的、绝缘体上硅的高压 CMOS 晶圆上。

直接在 CMOS 顶部印刷 HEMT 的好处不仅仅有最终器件的占地面积更小——它们还可以使逻辑电路和 HEMT 之间的布线更短，减少寄生电

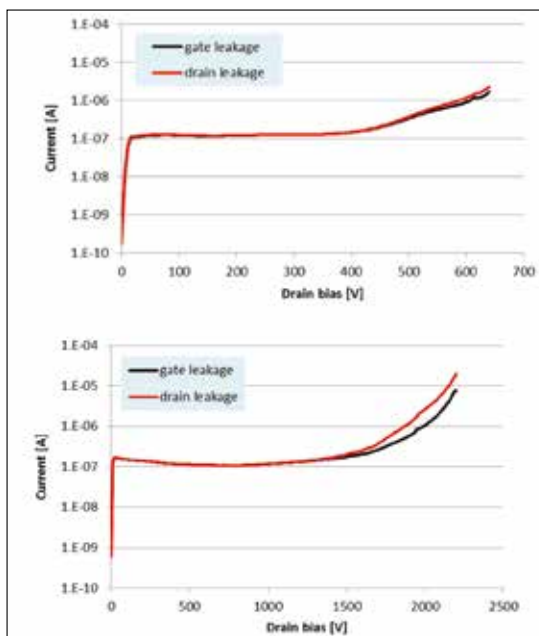
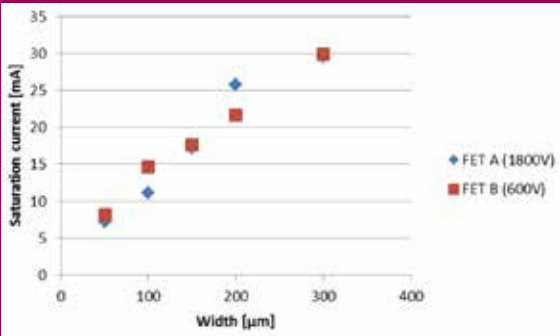


图5. 具有 $6\mu\text{m}$ （顶部）和 $17\mu\text{m}$ （底部）栅漏间距的HEMT阻断特性。

图3. GaN HEMT的异构集成工艺流程。(a) 晶体管在 $\langle 111 \rangle$ 硅衬底上制造。(b) 器件隔离、钝化然后底切。(c) 用弹性体印模拾取器件。(d) 器件印刷到硅 CMOS 晶圆上，然后使用薄膜铝线进行互连。

微转印技术的优点

- 微转印的优点有很多：
- GaN 缓冲层厚度可以在不显著牺牲印刷器件击穿电压情况下变薄。
 - GaN 缓冲层的生长时间可以缩短，并且可以减少相关的机械应力问题。
 - 采用较薄 GaN，在表面上路由印刷的 HEMT 时，拓扑步骤减少，即当金属轨道必须桥接印刷 HEMT 的边缘时。
 - 根据栅漏间距来进行击穿电压的缩放，使得 GaN 器件的制造可以在同一工艺中，甚至同一晶圆上，都具有不同的击穿电压。
 - 导通状态参数导通电阻和饱和电流的缩放有可能通过设计的沟道宽度来获得（参见右图）
 - 通过消除与印刷相关的机械设计限制，可以相对于某些逻辑块



两种电压等级下的GaN HEMT电流缩放与晶体管宽度的关系

实现印刷 HEMT 的放置。例如，可以实现 HEMT 与 HEMT 下方的堆叠 NMOS 或栅极驱动电路的非常接近。

Gate fingers	Total gate width [μm]	Gate-Drain spacing [μm]	Active device area [μm ²]	Printed device area [μm ² *)
1	50	17	2279	4956
1	50	6	1696	3983
1	100	17	4429	7614
1	100	6	3296	6063
2	150	17	5694	12264
2	150	6	3978	9052
2	200	17	7519	14280
2	200	6	5253	10540
4	300	17	10374	24675
4	300	6	6942	21000

*) including gate pads, source finger shorts etc.

表1. GaN HEMT 几何结构概述。

感和电容（请参见下页的“微转印的优势”中的详细优点列表。）

初始结果包括不受印刷 HEMT 干扰的 20V NMOS 晶体管的特性，以及针对印刷 GaN HEMT 器件很有希望的室温、漏源阻挡模式的表征（见图 5）。使用氟惰性保护层来避免表面闪光和过早失效，印刷 HEMT 已经实现了在 600V 和 1800V 之间的阻断电压，这个电压取决于漏栅间距。

在释放刻蚀期间，去除了导电硅衬底，从而允许在隔离的 CMOS 电介质顶部印刷 HEMT。这消除了通过硅的垂直漏电通路，并且限制了击穿机制，从而击穿仅在 GaN 中横向产生。因此，击

穿电压仅由栅漏间距决定。

另一项任务是进行 TCAD 的热实验设计，以确定印刷在 CMOS 电路顶部的 GaN HEMT 热阻的主要贡献者。这一工作表明，由于 CMOS 介电层，热阻只有很小的增加，例如，它比晶圆和金属化厚度的热贡献要小得多。在 AC 条件下，HEMT 的厚度对热阻的影响要大于 CMOS 介电层。因此，如果以我们所述的方式去除硅，同时实现可能的 GaN 缓冲层减薄，则 CMOS 氧化物层不会增加总热阻。

此处详述的结果已在器件级研究中实现。接下来的步骤将在正在进行的 MIIMOSYS 项目中进行，该项目由德国教育和研究部资助。该项目参与单位包括电子设计开姆尼茨 有限公司，弗劳恩霍夫应用固态物理学研究所，TURCK duotech (TDU) 有 限 公 司，Erlangen-Nuremberg 大 学，Chair of Electron Devices 和 X-Celeprint 支持下的 X-FAB 半导体代工厂，目标是首先演示 GaN 晶体管到系统级的硅 CMOS 控制电子器件上的异构集成。未来研究的主题将是微转印制造工艺的后续步骤，所涉及 GaN 和 CMOS 器件的可靠性，以及用于电机和 LED 驱动的桥接驱动器 and 控制器 IC 的微转印器件封装应用。OSc

扩展阅读

T. Erlbacher; “Lateral Power Transistors in Integrated Circuits”, Springer, Heidelberg New York Dordrecht London, 2014
“Power GaN Devices”, edited by Matteo Meneghini, Gaudenzion Meneghesso, Enrico Zanoni, Springer International Publishing, 2017
“Smart Power ICs”, edited by Bruno Murari, Franco Bertotti and Guiovanni A. Vignola, Springer International Publishing, 2002
R. Reiner et al., “Monolithically-Integrated Power Circuits in High-Voltage GaN-on-Si Heterojunction Technology”, IEEE, 2016
T. E. Kazior et al., “High Performance Mixed Signal and RF Circuits Enabled by the Direct Monolithic Heterogeneous Integration of GaN HEMTs and Si CMOS on a Silicon Substrate”, IEEE, 2011
www.ganoncmos.eu

采用 CVD 工艺来生长氧化镓功率器件

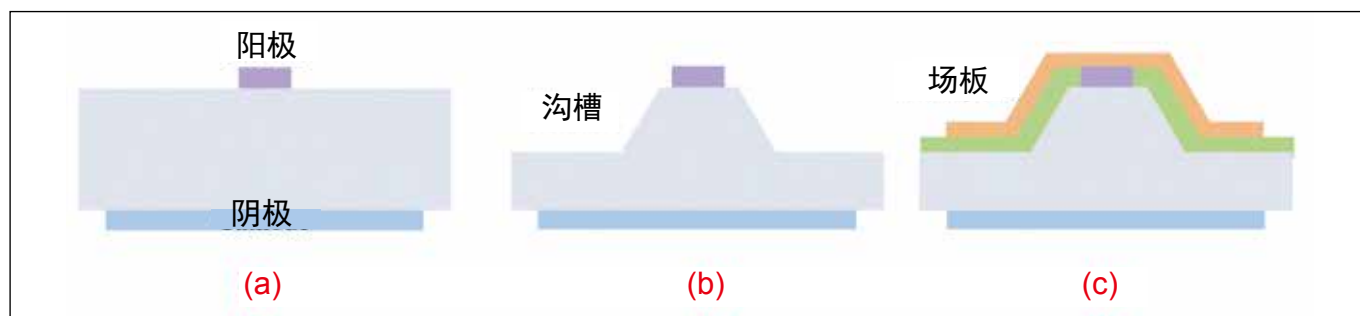
采用 CVD 工艺生长的氧化镓功率器件胜过那些用 GaN 和 SiC 制成的同类器件

来自美国的一支研究小组声称已经取得新的突破，他们用实例说明了采用低压 CVD 工艺来生长 β -Ga₂O₃ 垂直功率器件的可行性。

该研究小组的发言人、来自俄亥俄州大学的 Chandan

的电场强度提高了击穿电压。

肖特基势垒二极管的制作过程是，先取掺锡 β -Ga₂O₃ (010) 衬底，用丙酮、甲苯和异丙醇清洗其表面。将衬底装入一个卧式反应器，在 900℃ 的温度条件下进行 30 分钟的



一种具有场板的斜面设计有望削减肖特基势垒二极管中的峰值电场强度。

Joishi 指出：“采用低压 CVD 工艺生长的 β -Ga₂O₃ 外延薄膜，我们演示了击穿电场超过当今 GaN 和 SiC 技术水平的肖特基势垒二极管。”

按照他的说法，低压 CVD 工艺的优点包括低成本、高生长率、以及能够生产具有可控掺杂浓度的均匀、高质量 β -Ga₂O₃ 薄膜。

他还指出，低压 CVD 工具的使用很广泛，因为其在 CVD 市场上所占的比例超过 1/3，而且，这种生长工艺与半导体行业所用的现有工艺技术具有非常好的兼容性。

作为针对 β -Ga₂O₃ 的替代生长工艺之一，HVPE 虽然能够提供相似的生长率，但是工具不太成熟。另一种可选方案是由日本 Flosfia 公司开创的雾状外延 (mist-epitaxy) 技术，但是该方法对掺杂给予的控制较少。据 Joishi 称，低压 VD 提供的掺杂浓度范围为 10^{16}cm^{-3} 至 10^{19}cm^{-3} ，而雾状外延的掺杂浓度范围则被限制在 10^{17}cm^{-3} 至 10^{19}cm^{-3} 。

Ga₂O₃ 有几种多型体，美国的这支研究小组使用的是 β 相 Ga₂O₃，原因是其具有稳定性，而且有机会运用基于金属熔体的方法形成原生的低缺陷密度衬底。Joishi 说：“这使得 β -氧化镓衬底比 SiC 和 GaN 便宜， β -Ga₂O₃ 是采用高温和高压以非传统的方法合成的。”

他与来自俄亥俄州大学、尤他大学和凯斯西储大学的同事们制作了采用一种斜面设计的肖特基势垒二极管。

Joishi 说：“斜面设计对于高电压电源整流器和晶闸管是常见的。”他解释道，这种几何结构通过降低器件边缘处

有氧退火，并涂覆一层 2 μm 厚的 β -Ga₂O₃ 薄膜。

器件制作的下一步工序需要采用电子束蒸发器来沉积 Pt/Au/Ni 和 Au/Ni 堆叠镀层，它们分别形成了阳极和阴极。在该等离子体蚀刻确定了沟槽之后，接着利用等离子体增强型 CVD 共形地沉积 SiO₂。最后，将阳极上的氧化物蚀刻掉，这样随后的钛溅射就可以制成具有 4 μm 场板重叠量的器件。

对完工器件和仅经过部分加工的非完工器件的测量结果进行比较，研究小组发现：沟槽蚀刻将导通电阻从 3.6 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 增加至 6.7 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 。这是由于通过钝化处理未得到修复的表面损坏所造成的。

沟槽蚀刻对于击穿电压也是不利的，导致后者从 138 V 降至 74 V。然而，增设场板会使此项指标获得整体改善，阻断电压上升至 190 V，而且，这一改进将正向电流密度增至大于 1 A cm^{-2} 。

Joishi 和他的同事们计划提高 β -Ga₂O₃ 薄膜的生长率，并减少这些生长层中的本底掺杂。如获成功，将为制造 β -Ga₂O₃ 层厚度大于 100 μm 、且具有低本底掺杂浓度的器件所做的各项工作提供帮助。

Joishi 解释说：“将采用合适的电场管理以实现具有达 10 kV 的较高击穿电压、低电阻和 [低] 开关损耗的 β -氧化镓肖特基功率器件。”

参考文献

C. Joishi et al. Appl. Phys. Express 11 031101 (2018)

凭借堆叠式 GaN 激光器瞄准 LiDAR

利用隧道结堆叠 GaN 激光二极管可以创造用于激光雷达 (LiDAR) 的强大 UV 光源

应用于汽车和工业领域的 LiDAR 系统制造商正在寻找可提供高峰值功率的激光二极管。

对于长距离传感，这些光源在理想情况下应提供几瓦的峰值功率——但是，由于立法规定了对人眼的最大可行曝光量，因此这一点并非总是得到允许的。在红外线光谱中，该限值比在紫外线 (UV) 光谱中低得多，于是对于 LiDAR 来说，短波长、高功率光源特别受到重视。

为了应对这一机遇，日本滨松光子学株式会社 (Hamamatsu Photonics KK) 正试图通过将基于 GaN 的激光二极管堆叠起来的方法开发更加强大的光源。经过最近的辛勤工作，他们宣称率先开发出了一款由两个激光二极管构成的堆栈，其连接利用了一个隧道结。

该研究小组发言人 Satoru Okawara 称，这种提高光源输出功率的方法比增加激光二极管发射极条的宽度更为可取。原因是，较宽的发射极条会导致工作电流增大，接着，由于电感产生了高反向电压，因而会抑制有效的短脉冲操作。

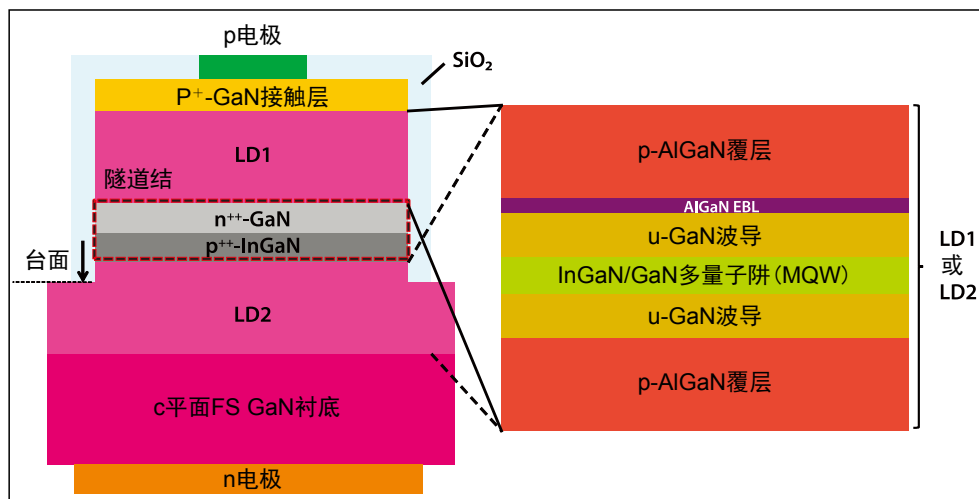
Okawara 认为，研究小组工作的一个重要方面是横向氢扩散的使用：“横向扩散方法已由日本名城大学进行了报道，它是利用隧道结实现氮基器件的关键技术之一。”

该研究小组的激光器的制造流程是，先取一个独立的 GaN 衬底，将其装入一个 MOCVD 反应腔，并用两个叠置在一起的激光器生长外延片。两个激光器在结构上是完全相同的，并且专为把光模完全限制在导光层之内而设计，因而可避免发生光串扰。

每个激光器具有两个 $\text{In}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ 量子阱和一个电子阻挡层。在两个激光器之间插入的是一个隧道结，其由一个 5 nm 厚的重掺杂 p 型 InGaN 层和一个 30 nm 厚的 n 型 GaN 层组合而成。

在异质结构生长之后，工程师部分地将晶圆蚀刻到堆栈中位置较低的激光器的 n 型层上。

Okawara 说：“这种部分蚀刻工艺并非用于电流束缚，



图注：隧道结为增加 GaN 基光源的输出功率提供了一条有前景的途径。

而是用于为来自隧道结下方的高抗性 p 型层的剩余氢原子制作一条扩散路径。”随后进行的是横向氢扩散，将氢原子从隧道结的 p 型层去除，并激活材料。

在给晶圆添加了电极并随之通过裂解形成激光之后，对双激光器芯片和单激光器控制进行了测量。双激光器结构的动态串联电阻高得多（达 45 Ω ），相比之下，用于控制的则仅为 3.5 Ω 。Okawara 和同事们将此归结为从隧道结的 p 型层和位置较低的激光二极管进行的氢去除并不充分。研究小组正通过优化 p 型层激活的退火条件来解决该问题。

脉冲式测量显示：发光波长为 394 nm 的堆叠式器件中，位置较高的激光器具有 0.8 W/A 的斜率效率，而位置较低的激光器的斜率效率为 0.3 W/A。相比之下，单个发射器的斜率效率则为 1.5 W/A。位置靠下的激光器的斜率效率较差被归咎于其活性区在第二个器件的生长过程中所发生的热降解。

Okawara 说：“我们正在考虑通过 MBE 引入部分生长。”据他说，研究小组还计划增加这些光源的功率，并开发多色彩的氮基激光二极管。

参考文献

S. Okawara et al. Appl. Phys. Express 11 012701 (2018)

高效薄膜激光器面向硅光子学

现今，薄膜分布式反射激光器能以足够低的“每比特成本”运行，适用于片内光通信。

日本东京工业大学的研究人员声称，他们已经为薄膜分布式反馈和分布式反射激光器的每比特能量设立了新标准。

该研究小组基于 InP 的薄膜分布式反射激光器在直接调制方式下的工作速率为 20 Gbit/s，具有仅为 93 fJ/bit 的能量成本。

该研究小组希望这种形式的激光器能够帮助改善大规模硅电路的性能。此类电路中的导线将限制数据传输速度和助推功耗的攀升，而如果转向由高效薄膜激光器支持的光数据传输，则有望一并解决这两个问题。

如果激光器准备在集成电路中使用，则其必需具有超低的功耗 (≤ 100 fJ/bit)。由日本东京工业大学提供的激光器的功耗恰好位于该限制范围之内。

其他几种形式的激光器也是片内光通信的候选方案。该研究小组的发言人 Shigehisa Arai 说：“微盘激光器和光子晶体激光器能够通过强大的光学限制实现低门限电流运行。不过，由于采用了如此强大的光学限制，因此输出功率和效率是相当低的。与之相比，我们的分布式反射激光器则同时具备低门限电流运行和高输出功率效率的特性。”

这并不是说光子晶体激光器就不能产生引人注目的结果。举个例子，NTT 的一个研究小组开发的器件便具有仅为 4.4 fJ/bit 的能量成本。

Arai 说：“然而，由于输出功率低至几 μ W，它们采用了一个雪崩光电二极管，此二极管需要 10 V 至 30 V 的偏置电压，因而在接收侧消耗了大量的功率。”

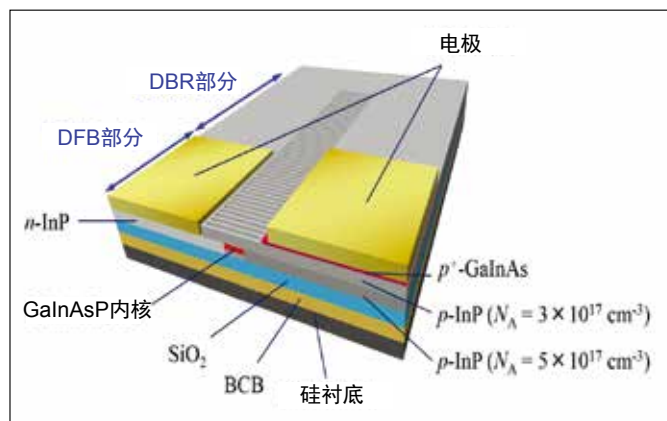


图2. 由日本东京工业大学开发的薄膜分布式反馈激光器能以 20 Gbit/s 的速率运行，并具有 93 fJ/bit 的能量成本。

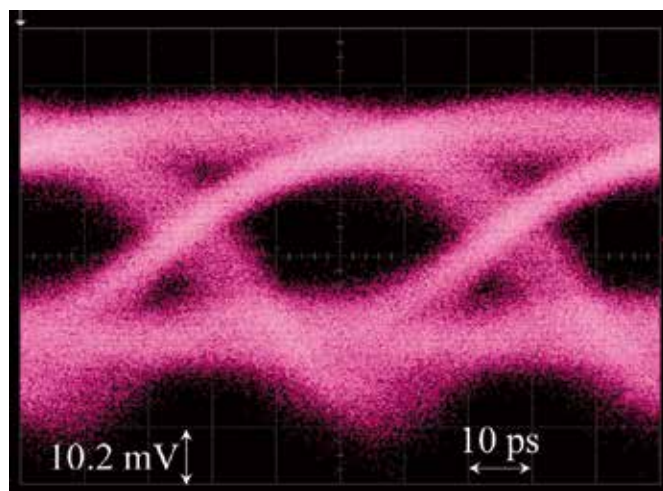


图1. 当采用一种非归零调制方案和一个 $2^{11}-1$ 字长伪随机位序列进行驱动时，基于 InP 的薄膜分布式反射激光器能够提供清晰的眼图。

据他所说，其研究小组开发的激光器足够强大，允许使用一个传统的 p-i-n 光电二极管，这种二极管需要大约 1 V 的偏置电压。“因此，当使用我们的激光器时，总系统能耗应该会比较低的。”

Arai 的研究小组几年来一直在开发基于 InP 的薄膜分布式反射激光器。近期在每比特能量成本方面取得的进展主要源于波导损耗的降低，而这得益于掺杂轮廓的优化。此举还导致了 p 侧电极和活性区之间串联电阻的增加，为了解决该问题，工程师们将 p 侧电极边缘与活性部分之间的距离从 3 μ m 减小至 1.6 μ m。

未来的一项计划是将能量成本降低至仅为几十 fJ/bit。与此同时，研究小组的工作还将包括运用一种相似的薄膜技术来开发“无放大器”型光电探测器。Arai 说：“一旦两项开发均告成功，我们就可以将所有这些器件集成在真正的 CMOS 电路上。”

参考文献

T. Tomiyasu et al. Appl. Phys. Express 11 012704 (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	BC
EDI CON China	电子设计创新大会	www.mwjournlchina.com/edicon	IBC
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	7
IQE		www.iqep.com	IFC

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、封装技术, 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)
sunniesz@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)
gavinhu@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
86-27-5923 3884/1564
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)
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

征 文



2019

Electronic Design Innovation Conference

电子设计创新大会

2019年4月16-18日

国家会议中心
中国北京

分享您的专长。帮助塑造
下一代设计技术。在
EDI CON CHINA发表
经同行评审的论文。

EDI CON CHINA 已开始接收论文摘要，
主题如下：

- 5G和区块链技术
- 5G/先进通信
- 毫米波技术
- 射频/微波放大器设计
- EMC/EMI
- 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

首席赞助商：



钻石赞助商：



企业赞助商：



主办单位：



在线提交论文：

EDICONCHINA.com

截止日期：2019年1月10日

AIXTRON

Our technology. Your future.

您认为,

全球大趋势需要

性能最佳的三五族化合物材料.

我们也这样认为.

AIX 2800G4-TM

三维传感
增强现实
自动驾驶
云计算
物联网/5G
下一代显示设备



发现AIX 2800G4-TM.

实现砷磷基材料下一
代应用的创纪录设备.



使用市场顶尖的技术
实现行业内最佳良率
和最高生产力.

