

化合物半导体



• CHINA

季刊 2017年 第2期

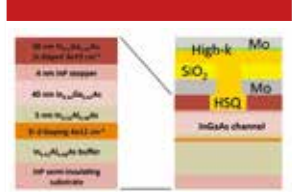
InGaAs 三栅 MOSFET



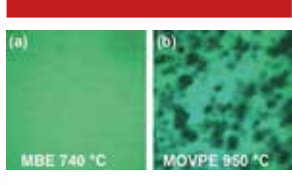
SiC 晶圆切割



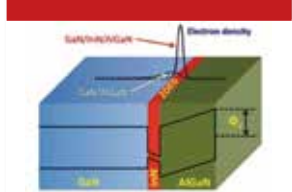
InGaAs finFET



优质绿色激光器



氮基 HEMT



全色彩单芯片 GaN LED

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.

AIX2800G4-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AIX2800G4-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.



封面故事 Cover Story

- 10 世上首个全色彩单芯片LED
The world's first monolithic full-colour LED

- JYH-CHIA CHEN, MILTON YEH, HUSSEIN S. EL-GHOURY; OSTENDO TECHNOLOGY INC.

业界动态 Industry

- 3 IEDM国际会议展示化合物半导体方面的成果
IEDM showcases compound semiconductor successes

- 8 3D-Micromac: 更快的SiC晶圆切割速率
3D-Micromac: a faster slice

技术 Technology

- 15 氮化镓 – 实现 5G 的关键技术
GaN – the key to 5G technologies

- David Schnauffer 和 Bror Peterson, Qorvo

- 18 InGaAs finFET用于未来的CMOS
InGaAs finFETs for future CMOS

- JESÚS DEL ALAMO, ALON VARDI, XIN ZHAO, 美国麻省理工学院

- 22 SOI: 为制造GaN高电子迁移率晶体管打下良好基础
SOI: A great foundation for the GaN HEMT

- HSIEN-CHIN CHIU, LI-YI PENG, HSIANG-CHUN WANG, HOU-YU WANG, 台湾长庚大学
G.-Y. LEE, JEN-INN CHYI, 台湾国立中央大学

科技前沿 Research Review

- 25 用混合型生长工艺制作更好的绿色激光器
Hybrid growth promises better green lasers

- 26 InN有望提升氮基HEMT的性能
InN looks to enhance nitride HEMTs

- 27 III-V: 将逻辑电路与存储器相结合
III-Vs: Combining logic and memory

- 2 编者话 Editor's note

- 28 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、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约十多万专业读者。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 100,000 professional readers in fields of electronic manufacturing, vision system design, laser/photronics, RF/microwave, cleanroom and contamination control, compound semiconductor, 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

化合物半导体成果斐然

随着传统半导体工艺技术日益接近物理极限，业界越来越关注通过创新材料、创新工艺及创新器件结构等方面，寻找新的路径来继续推动晶体管尺寸缩小。与此同时，化合物半导体近年加速发展，不断取得重大突破，逐渐担当起推动半导体技术发展的新生力量，成为未来半导体的发展方向。本期《化合物半导体》杂志为读者奉献的几篇文章恰好反映了化合物半导体最近的一些重大发展，在此特别向读者推荐。

五十多年来，国际电子器件会议（IEDM）一直在强调硅技术的发展。然而，最近该会议也展示在化合物半导体技术上取得的重大突破，2016年12月3-7日在旧金山召开的 IEDM 会议中有关 III-V 半导体方面的报告数量达到历史上的峰值。报告展示的成果包括有：创纪录的 III-V MOSFET 电流；创立了 1 THz InP HEMT IC 的增益新标准；GaN 整流器件中前所未有的击穿电压和反向漏电流性能；以及一种新颖的常闭型 GaN 垂直晶体管和电流塌陷的 GaN 栅极注入晶体管的开发等内容。详细内容请阅读本期第 3-7 页刊登的文章：“IEDM 国际会议展示化合物半导体方面的成果”。

不管其结构形式如何，硅晶体管都会在 7nm CMOS 及以下节点达到性能的顶峰并开始递减下降，而 InGaAs finFET 的出现则有可能使摩尔定律继续前行吗？本期第 18-21 页刊登的美国麻省理工学院 JESÚS DEL ALAMO 和 ALON VARDI, XIN ZHAO 的文章：“InGaAs finFET 用于未来的 CMOS” 详细介绍了最近几年来如何用 III-V 族材料来推动逻辑 CMOS 器件的发展，以抵消硅技术发展的递减下降趋势。目前来看，化合物半导体十分有可能成为未来 CMOS 的发展方向。

5G 预定在 2020 年进行商业发布，5G 的承诺——小于 1 毫秒的延迟、100 倍的网络能量效率、20 Gbps 的峰值数据速率，以及 10 Mps/m² 的区域流量容量。5G 的几个目标包括：更高的功率、高达 100 GHz 的频率范围以及更高的效率。实现这些 5G 目标需要技术和系统设计的不断进步。本期刊登在第 15-16 页由 Qorvo 公司 David Schnauffer 和 Bror Peterson 撰写的文章：“氮化镓—实现 5G 的关键技术”介绍了氮化镓的优异特性。RF 氮化镓这项高效、宽带隙、可靠的功率 PA 技术将使网络效率逐年大幅提高，在基站收发台 (BTS) 生态系统中引入氮化镓后，前端效率大幅提升，使其成为适合高功耗和低功耗应用的一项全新首选技术。氮化镓可以提供更“绿色”和高效的通信网络。

本期第 10-14 页的封面故事“世上首个全色彩单芯片 LED”介绍了采用全三原色高效率光发射技术的微型 LED。美国加州的 OSTENDO TECHNOLOGY INC. 制作了世界上第一个电流调节可控的、全色彩光发射 LED。请注意，除了三个主基色，通过混色技术，他们的器件还能产生其他颜色的光发射。该技术极其重要的一面是它的生长过程，它是商用单色 LED 的一种理想制造工艺，因为它在生长过程之前或之后都无需增加额外的加工或处理步骤。该技术可以对器件的尺寸实现进一步按比例缩小后，应用于低成本的大规模生产中。这项技术将应用于超高分辨率的柔性显示器中。

赵雪芹

社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak

adonism@actintl.com.hk

主编 Editor in Chief

赵雪芹 Sunnie Zhao

sunniez@actintl.com.hk

出版社 Publishing House

雅时国际商务 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



IEDM 国际会议 展示化合物半导体方面的成果

III-V 族器件在太赫兹频率下展现了创记录的导通电流、前所未有的增益和极低的功率开关损耗

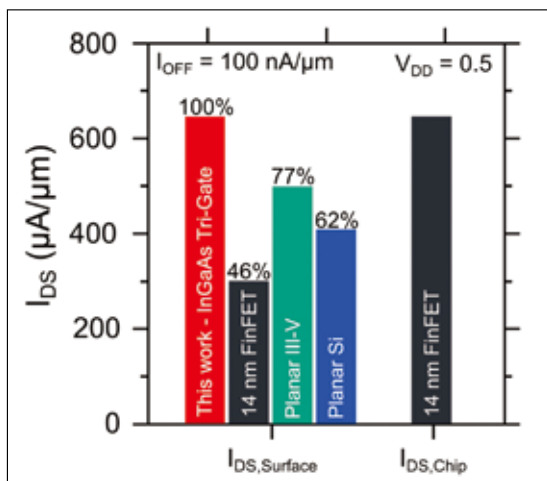
RICHARD STEVENSON

五十多年来，国际电子器件会议（IEDM）一直在强调硅技术的发展。然而，最近该会议也展示在化合物半导体技术上取得的重大突破。最近一次会议于 2016 年 12 月 3-7 日在旧金山召开，会议中有关 III-V 半导体方面的报告数量达到历史上的峰值。报告展示的成果包括有：创纪录的 III-V MOSFET 电流；创立了 1 THz InP HEMT IC 的增益新标准；GaN 整流器件中前所未有的击穿电压和反向漏电流性能；以及一种新颖的常闭型 GaN 垂直晶体管和电流塌陷的 GaN 栅极注入晶体管的开发等内容。

在过去十年中，III-V MOSFET 的性能提升使摩尔定律不断演进已成为 IEDM 会议的一个共同主题。上次会议保持了这一趋势，瑞典 Lund 大学 Cezar Zota 及其同事详细介绍了他们器件的导通电流可超过任何 III-V 族或硅基 MOSFET（见图 1）。该团队的 InGaAs 三栅 MOSFET 在电源电压仅为 0.5 V 时可达到 650 mA/mm 的导通电流。

提升器件的导通电流是一项重要的成就，“如果它高于电路运行所需，那么就可以降低电源电压，以便将导通电流减少到所需的水平”，Zota 解释说。因为总体功耗与电源电压的平方成

图1. Lund大学研究人员制作的InGaAs三栅MOSFET, 据称其导电电流可超过任何硅基和III-V族MOSFET。

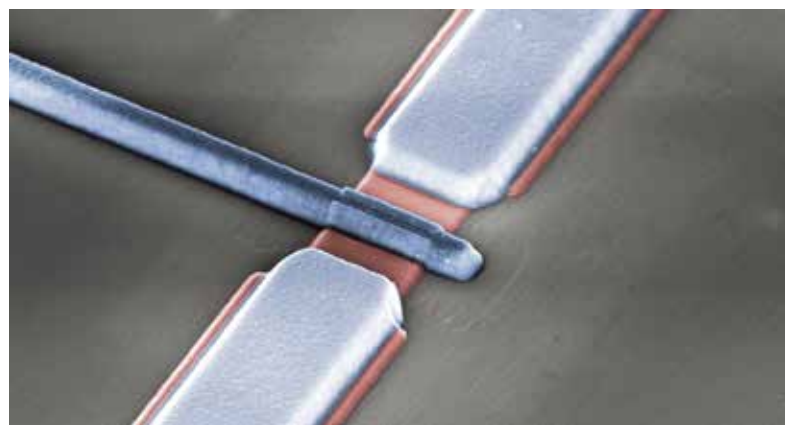


正比, 所以这样将能使电路的功耗大幅减小, 如果将该电路用于移动设备中, 就可延长电池的工作寿命。用节点尺寸来调整电源电压的另一个好处是可以防止芯片功率密度的增加。

Lund 大学的团队是用 MOCVD 方法在 InP 衬底上沉积 $\text{In}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}$ 膜, 然后用氢基倍半硅氧烷 (silsequioxane) 来生长掩模和数字蚀刻来制作纳米线图形以形成器件。用蒸发和剥离工艺产生源极和漏极接触, 并加入 Al_2O_3 和 HfO_2 栅介质层和 Ni / Pd / Au 栅金属层来形成整个栅极结构。

他们所制造晶体管的尺寸各不相同, 这有助于确定纳米线尺寸的缩减对 InGaAs 材料质量上限制效应。最小的器件为 25nm 宽, 高度为 8nm。Zota 说道: “由于散射由 8 纳米大小的结构主导, 这将与 10 纳米节点相对应”。“然而, 我们纳米线的总体尺寸与 10 纳米节点中的晶体管鳍片又有所不同, 因此, 进行这样的对比还需要谨慎”。

如果要将这种器件引入到下一代 IC 中的话, 那它们的衬底必须从 InP 转变到硅。Zota 认为这



Lund大学研究人员制作的InGaAs三栅MOSFET的优势包括: 低至66 mV/dec的亚阈值摆幅、3 mS/μm的跨导等性能。

样的转变可以通过很多方式来实现, 比如: 晶圆键合技术; 选区生长技术, 例如由 IBM 所主导的模板辅助生长方法; 以及使用厚度小于 100nm 且缺陷密度很低的缓冲层技术等。

随着器件的宽度从平面架构缩小到 25 nm, 跨导最大值可增加到 3.3 mS/μm, 这些都可归因于纳米线中砷含量的增加及其在界面态的分布上所产生的有益变化。

按比例缩小的另一个优点是可以减少亚阈值的摆幅: 当纳米线的宽度从 1μm 缩减到 25nm 时, 亚阈值摆幅从可从 100 mV / dec 降至 66 mV / dec。器件的短沟道效应也将得到改善, 而且可以通过引入更宽的带隙衬底或采用绝缘体上 III-V 族膜层结构来进一步降低这种影响。

与此同时, 对氧化层进行按比例缩小的实验表明, 将等效氧化层厚度 (EOT) 从 1.4nm 缩减到 1nm 可以将亚阈值摆幅从 81mV / dec 降低到 75mV / dec。Zota 表示这还有进一步改进的空间。他认为其他课题组已经成功制作了 0.7nm 厚的 EOT, 而他和他的同事们应该能够重现这一结果。下一步工作还可以用单层的 HfO_2 或 ZrO_2 来代替低 k 值的 Al_2O_3 与 HfO_2 的叠层以进一步提高性能。

该团队正在利用 MOCVD 选区生长技术来制备大高宽比的纳米线。采用这种方法可使单位芯片面积获得更高的电流密度, 这涉及到对生长条件和衬底表面取向的优化来促进垂直侧壁的生长。Zota 说到: “这使我们获得了具有工业化意义的鳍片尺寸, 同时又保持了无需蚀刻的鳍片成形方案和高电子迁移率的优点”。

太赫兹频率增益

Northrop Grumman 公司的研究人员正在开发应用于太赫兹频率的高频 InP 晶体管, 而在 IEDM 会议上 Bill Deal 透露说, 他们刚刚达到了另一个新的里程碑: 首次验证了晶体管放大器在 1.0 THz 或更高频率下的增益。该团队以 8μm 晶体管制成的十级放大器在 1.0 THz 时可产生 10 dB 的增益。

Deal 告诉 Compound Semiconductor 的记者, 这种晶体管技术已经应用于好几个 NASA 的技术项目, 预计在未来三到五年内将可以实现商品化。

由于所有应用都涉及到太赫兹频率下辐射吸收的测量, 因此射电天文学、大气遥感和材料性质的研究都可以从 Northrop Grumman 公司的工作

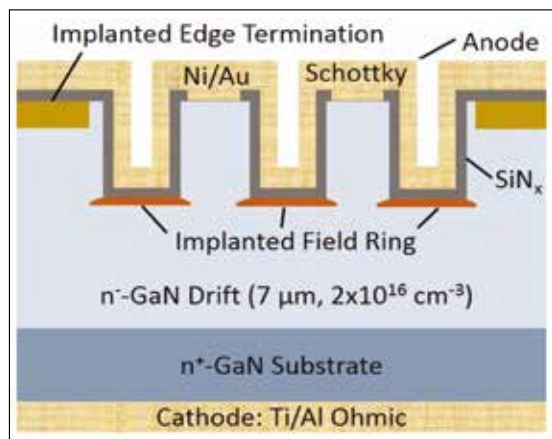


图2. 沟槽和场环结构使得麻省理工学院和新加坡MIT ART联盟制作的整流器件能同时具备高击穿电压与极低的反向漏电流的特性。

中受益。“有了这一频率下的放大器或许就可以实现新型的辐射测量技术，将有助于进一步地了解物理世界”，Deal 说道。

该团队的 InP 晶体管放大器还有望减小太赫兹频率接收器的尺寸、重量和功耗。现在这些接收器采用的还都是二极管技术，直流运行效率较低。Deal 称由 InP 晶体管制作的直流功率放大器可以将辐射接收器的直流工作效率提高十倍以上，能最终满足新型科学任务的需求。

InP 晶体管的关键技术是由 100 kV 电子束来光刻形成尺寸为 25 nm 的 T 形栅极。在形成栅极之后，通过蚀刻产生栅极凹陷区，其中金属/半导体的界面是位于比硅掺杂平面高不到 2nm 的位置上。在加工了栅极凹陷区之后，通过电子束蒸发制作 Ti / Pt / Au 基栅金属层。为了提高可靠性和耐用性，还添加了一层 SiN 来作为器件的钝化层。

最近，Northrop Grumman 公司的团队一直在致力于其器件的封装。这项工作十分具有挑战性，因为在太赫兹频率下，波导和 IC 之间的辐射耦合较为困难。为了解决这个问题，设计器件时使电磁转换在 IC 上就已经全部完成。偶极天线放置在芯片的左、右侧，这使得需要去除芯片边角上的材料。

目前正在探究该团队的太赫兹晶体管是否能适用于大气科学。这项工作是依托 NASA 资助的各种研究项目进行的，其中包括可以安装在卫星上用于测量对流层水分和云层冰晶的仪器中。

奇妙的场环

为了提高垂直 GaN 二极管的功率应用性能，

麻省理工与新加坡 - 麻省理工研究与技术联盟 (MIT ART) 一直在合作开发一种具有经离子注入掺杂场环的新型器件 (见图 2)。麻省理工学院的 Yuhao Zhang 在 IEDM 会议上详细地解释了他们的垂直 GaN 肖特基整流管，他们在器件结构上的调整使得其漏电流削减了 104 倍以上，并将阻断电压从 400 V 提高到了 700 V，而开启电压能保持在 0.8 V 不变。相比之下，以高阻断电压和低漏电流而闻名的横向 p-n GaN 二极管的开启电压通常要大于 3 V。

据 Zhang 介绍，将肖特基管的正向特性 (例如低的开启电压) 与以 p-n 结器件的高阻断电压和低截止电流相结合的关键是要使峰值电场远离肖特基接触。“鉴于 p 型离子注入及选区外延生长技术对于 GaN 器件而言仍十分具有挑战性，我们设计了这种基于沟槽并带有场环的 MIS 结构，不需要采用 p-GaN 就可以来移动高电场区域”。

这种器件可在 600 V 的电压下可实现高频率的切换，这在电动汽车、数据中心和各种电力系统中有着广泛的应用前景。

制造该器件首先是通过 MOCVD 在独立衬底上生长 7μm 厚的 n 型 GaN 层，进而蚀刻深度为 2μm 的沟槽，然后将金属 - 绝缘体 - 半导体 (MIS) 膜层堆叠到沟槽底部和侧壁上。在沟槽下方插入离子注入掺杂的场环，然后在 GaN 顶部表面上制作肖特基接触。

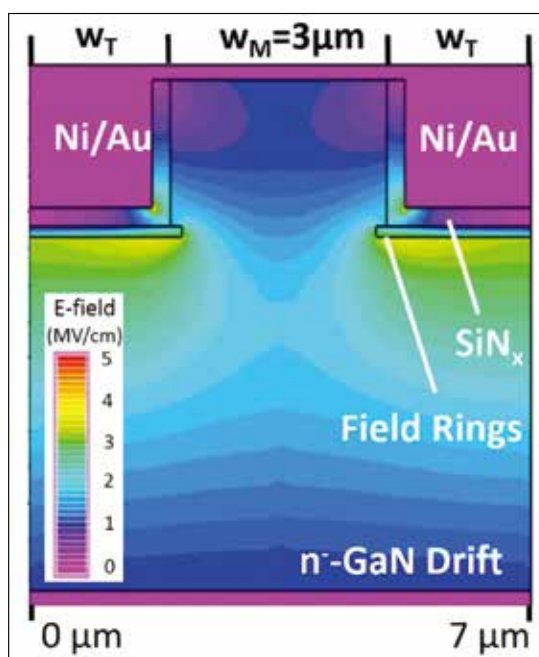
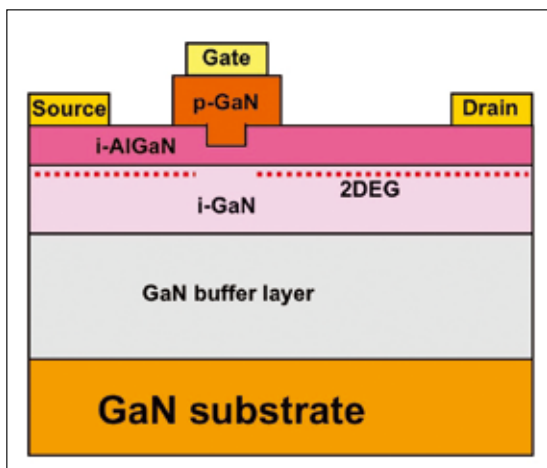


图3. 利用离子注入掺杂场环来调整电场分布，实现了对沟槽 MIS 势垒肖特基整流器件的性能改进，可以用商业软件 Silvaco Atlas 对此进行模拟和评估。

图4. 松下公司开发的 GaN 栅极注入晶体管具有凹陷栅极结构, 可降低器件的串联电阻。



用商业软件 Silvaco Atlas 对器件新架构的模拟有助于深入了解该器件优势。这种特殊设计可使得肖特基界面处的电场强度大大降低, 从而使肖特基接触的漏电流呈指数式的降低; 峰值电场的位置从器件上表面下移到 GaN 层中; 离子注入掺杂场环可使器件沟槽角部附近电介质中的电场应力更为平滑; 并且对台面宽度进行调整可改变肖特基结的电场屏蔽水平, 并降低场环附近的电场强度 (见图3)。

为了验证器件的这些优势, Zhang 和同事们制作了三种不同的结构: 肖特基势垒二极管, 沟槽 MIS 势垒肖特基整流器件和具有离子注入掺杂场环的沟槽 MIS 势垒肖特基整流器件。相比于肖特基势垒二极管, 沟槽 MIS 势垒肖特基整流器件的优点是阻断电压能从 410V 增加到 510V, 且漏电流下降了两个数量级。而场环的引入这可进一步提升阻断电压到 700 V, 另外将漏电流又降低了两个数量级。嵌入场环后的唯一缺点是器件的开启速度略有降低, 并开启电压从 0.7 V 增加到了 0.8 V。

离子注入场环加上沟道 MIS 势垒的肖特基整

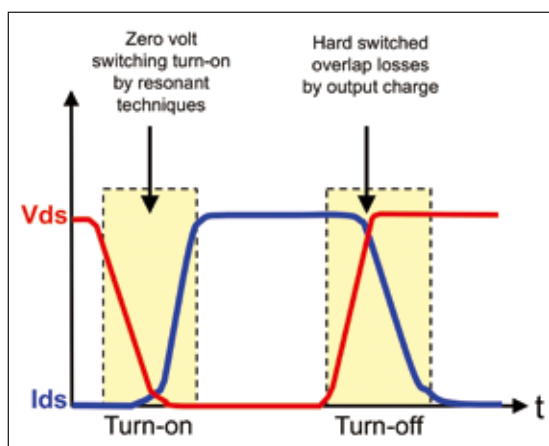


图5. 采用典型的零电压开关方法, 只有开关关断时才会导致损耗。

流器件也被认为是第一种能在 200℃ 以上高温中工作的垂直 GaN 肖特基势垒高压二极管, 它很适合在某些极端环境中工作。“能在高温下工作的器件通常也可以实现更高的功率输出”, Zhang 说道。

该团队的未来目标之一是提高该整流器件的击穿电压使其增加到 1200V 以上, “同时, 我们将利用这项技术来制作常闭型 GaN 垂直晶体管。”

卓越的开关特性

GaN 栅极注入晶体管 (GIT) 是一种处于常闭态运行的器件, 而在 IEDM 会议上, 来自日本松下公司的 Hiroyuki Handa 则揭示了如何来降低开关损耗, 使该种器件有望应用在消费类产品的紧凑型逆变器和转换器中。这类器件以往通常是在硅衬底上生长, 然而, 改用 GaN 来制作的器件可以将其开关效率提升三倍。

目前已经在硅基 GaN 上, 通过在 AlGaIn / GaN 异质结的 p 型栅极上注入空穴来增加其漏极电流并维持它在常闭态下工作 (参见图4) 的 GIT 器件。

最近, 开关技术的进步还引入了一种所谓软开关的概念, 即通过消除开启时的电流和电压之间的重叠来消除该过程的开关损耗 (见图5), 但是由于关断时电流和电压仍会产生重叠, 使得关断时还会发生损耗。因此, 能以多快的速率实现关闭态已成了 GIT 的关键性指标, 因为这可以最大限度地减少开关损耗并允许使用更高的开关频率, 并最终可打开减少电路中其他元件的尺寸、成本和重量的大门。

在一个具有厚缓冲层的 GaN 衬底上生长的 GIT 结构, 可以通过切断输出电荷来提高其开关能力, 降低导通电阻, 在高达 1 kV 电压下工作时其电流仍不会产生塌陷现象。

为了确定在天然衬底上采用厚缓冲层所产生的改进效果, Handa 及其同事们制作了一对器件: 在硅衬底上生长的具有 5μm GaN 缓冲层的 GIT (由于热和晶格失配, 这可能是缓冲层的最小厚度), 和一个具有 16μm GaN 缓冲层和 GaN 衬底结构的 GIT。根据模拟结果, 其输出电荷会随着缓冲层厚度的增加而减小, 但是在厚度为 15μm 时趋于稳定。

对这两种类型器件的测量结果表明, 使用较厚的缓冲层以及将硅衬底改换为 GaN, 可以是器件的导通电阻和输出电荷乘积从 2745 mΩ nC 降

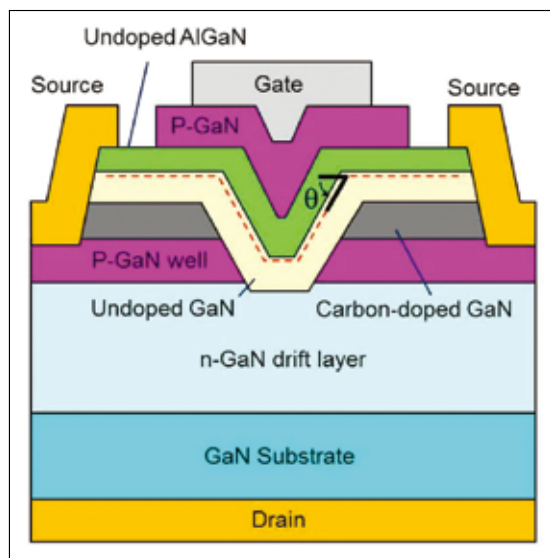


图6. 松下公司生产的垂直GaN晶体管的阈值电压随V型槽倾斜角 θ 的增加而增加。

到 $940 \text{ m}\Omega \text{ nC}$ ，其他的改进还包括有开关速率从 140 V/ns 增加到 285 V/ns ，漏极电流会增加60%，击穿电压从 1050 V 上升到 2800 V 。

Handa 承认，由于使用了原生 GaN 衬底和厚缓冲层，这种器件的缺点之一是具有“当前而言是非常高”的生产成本，但这成本可以通过增加晶圆直径和加快生长速率来得到降低。

Handa 说：“下一步计划是进行可靠性测试，并与基于硅衬底的 GaN GIT 进行性能比较”。

GaN 的半极性栅

Handa 在松下的一个同事 Daisuke Shibata 的也在 IEDM 会议上展示了他的开创性的工作。他在原生衬底上生长了可在 1.7 kV 下常闭态工作的垂直型 GaN 晶体管，该器件具有半极性栅极结构（见图 6），被认为是首个具有稳定栅性能的垂直 GaN 晶体管。

“我们重新生长的 p-GaN / AlGaIn / GaN 半极性栅极可应用于其他垂直型器件”，Shibata 说道，它不仅可以作为性能更为稳定的栅极，而且还具有更高的阈值电压（该器件为 2.5 V ）。“更高的阈值电压可以防止器件由电路噪声引起的误操作”。

1.7 kV 晶体管将可应用于电力开关系统，这种系统的工程师们正在评估在硅衬底上制作的横向 AlGaIn / GaN 晶体管，它具有高达 600 V 击穿电压。Shibata 说到，现有器件的性能，包括其可靠性，对于实际使用来说已经足够好。然而，它们受到总输出功率仅有数千瓦的限制。由于在硅

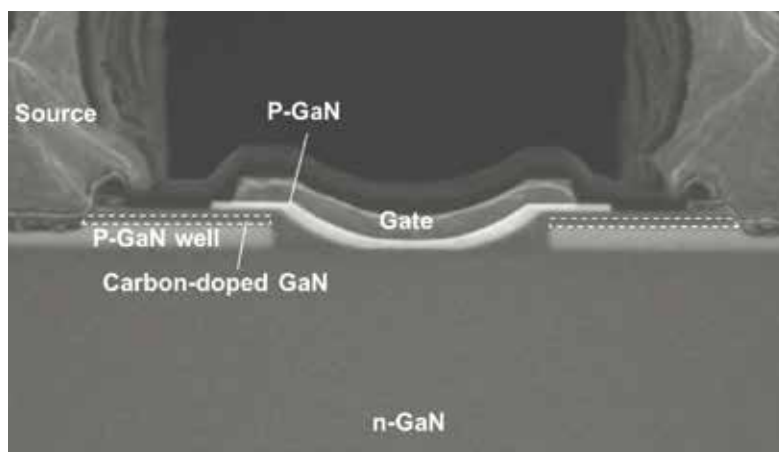


图7. 松下公司的垂直GaN晶体管的扫描电子显微镜截面图像，据称这是首次将稳定性栅极用于此类器件中。

衬底上生长 GaN 层的厚度受限，而它的横向结构阻碍了电流和电压的增加，使得它们的阻断电压被限制在 1 kV 。

Shibata 及其同事用垂直晶体管来克服横向器件的局限性绝不是首创，但是一般说来，由于氧化物和 GaN 之间的不稳定性，器件阈值电压往往会很低而且栅极的稳定性不佳，而松下的团队则同时解决了这两个问题。

成功的改进来源于器件的设计，其结构特征在于在 p-GaN 阱和 n-GaN 漂移层中形成的 V 型槽表面上生长了 p-GaN 栅极、AlGaIn 和 GaN 三种材料层（参见图 7）。

V 型槽中倾斜的材料层可提高阈值电压。以晶圆平面（图 6 中为 θ ）为基准，计算表明，随着其倾斜角度从 0° 增加到 90° ，阈值电压会从刚超过 1 V 增加到近 4 V ，实验则证实了这个结果，在 c 平面上的器件阈值电压仅为 1 V ，要比带有半极性栅的器件小 1.5 V 。

Shibata 及其同事所制作晶体管的另一个特征是碳掺杂 GaN 嵌入层，这可以抑制击穿电流，从而使击穿电压从 580 V 提高到 1.7 kV 。

该器件可在 400 V 下进行快速的开关，并能提供高达 15 A 的电流。“我们的下一步计划是在垂直 GaN 晶体管中实现更高的工作电流”，Shibata 说。

在接下来的 12 个月内，GaN 晶体管和其他 III-V 器件方面的突破会不断在松下公司及其他地方产生，其中最重要的一些成果将会在美国旧金山举办的 IEDM 2017 上进行报告和展示，届时也将会进行更多的有关化合物半导体器件方面的报道。☞

3D-Micromac : 更快的 SiC 晶圆切割速率

“全新的 SiC 晶圆切割技术能及时跟上市场增长的步伐吗？”
Compound Semiconductor 记者采访 3D-Micromac 公司。

在阅读任何近期的分析预测报告后，你都能很容易地发现 SiC 功率器件的业务正处于蓄势待发状态。

法国的 Yole Développement 公司在最近发布的综述报告中预测：SiC 功率器件的市场规模将从 2015 年的 2 亿美元扩张到 2021 年超过 5.5 亿美元。而美国 IHS 公司则估计这个数字到 2025 年将飙升至 30 亿美元。

虽然这对全球的 SiC 功率器件设备制造商来说都是好消息，但对于晶圆切割业而言，其生产

瓶颈已悄然降临。虽然如今尖端的机械刀片能够轻松地解决硅及许多其他衬底材料的切割问题，但是 SiC 却是个与众不同的怪异材料。

德国的激光微加工系统制造商，3D-Micromac 的市场发展部经理 Hans-Ulrich Zühlke 指出，SiC 几乎和金刚石锯片本身一样硬。这就导致机械切割必须在一个很低给进速率下进行——在 2mm/s 到 10mm/s 之间，以使得刀片的磨损率能降到最低。而更为糟糕的情况是，经切割后的芯片仍有可能存在破损和侧壁粗糙等问题。

“经过机械切割后，我们看到芯片存有缺陷，在芯片的上边缘出现了破损，而在其下边缘出现了分层”，Zühlke 强调道：“另外，整个切割过程非常缓慢，导致了其加工价格的昂贵”。

随着 SiC 市场已从 4 英寸晶圆向 6 英寸晶圆过渡，这个问题将变得更为严重。“对 6 英寸晶圆来说，刀片损伤率很高，你可能每切割一片晶圆就得要更换一把新刀片，这就使得整个切割流程变得愈发缓慢”，Zühlke 说道。

激光刻蚀 SiC 被认为是一种具有小损伤的切割方法，但 Zühlke 相信这个选择同样存在着重重问题。

“激光刻蚀的过程对 SiC 材料产生熔化和蒸发，因此会产生一个明显的热影响区，可以发现该区中存在着许多微裂纹和其他缺陷”，他说，“它也会对背面金属层产生问题，所以由于这样或那样的原因，SiC 需要一种全新的切割技术”。



3D-Micromac公司的激光微加工设备：准备好了吗？

一种新方法

Zühlke 对此问题的答案就是采用热激光分离 (thermal laser separation, TLS) 技术, 它是使用热诱导产生的机械力来切割坚硬的脆性半导体材料。激光加热和随后的水喷雾冷却将会在晶圆中引起一个机械应力场, 用此来劈裂 SiC 晶圆, 而无需对其材料进行熔化或去除。

这种工艺流程大约在 10 年前首先由 Zühlke 提出, 随后一家德国光电公司 Jenoptik, 以及德国弗劳恩霍夫集成系统及器件技术研究所 (Fraunhofer Institute for Integrated Systems and Device Technology) 的研究人员也陆续开展了相关的工作。

这项技术取得了迅速发展并取得了专利, 并被命名为 TLS 切割术。这项工艺技术已被应用于如碳化硅、硅、锗及砷化镓等材料的切割。

随后, 在 2014 年初, Jenoptik 公司的激光及材料加工部门将 TLS 切割术的知识产权出售给了一家激光微加工企业 3D-Micromac。在短短数月后, 3D-Micromac 发布了它基于 TLS 切割术的 microDICE 激光切割系统, 这项技术可运用于各种坚硬脆性材料的切割, 但它的首要目标则是瞄准了在功率器件及 LED 应用中的 SiC 晶圆。

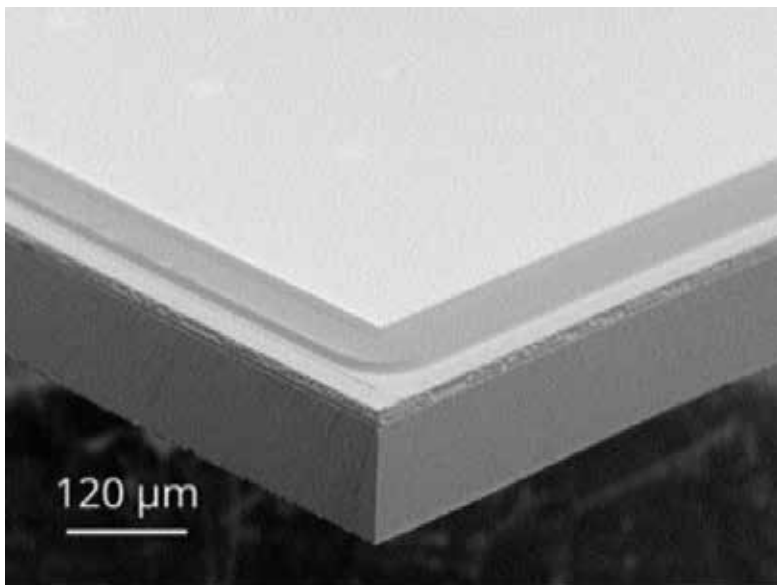
根据 Zühlke 所述, 他们的最新系统已对软件进行了升级, 以提升其加工的重复性, 但是该系统在根本上还是基于 TLS 两步工艺流程。

该切割流程首先是用一束短脉冲激光在晶圆上烧蚀出一条 10 微米宽、15 微米深的窄沟槽, 称之为切割线, 以形成一条裂缝。随后, 在流程的第二步中, 一束连续波激光将沿着这条沟槽线局部区域将材料加热至约 100℃, 随后用蒸馏水喷雾将其迅速冷却, 最后晶圆被劈裂而形成切割。

Zühlke 指出, 整个切割流程将是一次性完成, “它非常迅速, 整片晶圆都可以被分开”, 他说道, “许多其他的激光工艺都需要多次来回, 这样就降低了加工工艺的产量”。

实际试验表明, 包括工艺控制监控 (PCM) 结构、背面金属层, 以及靠近切割线的聚酰胺涂层在内, 对 4H-SiC 晶圆的完全切割加工速率可以高达 200mm/s。它对温度敏感的聚酰胺涂层不会产生任何不良影响, 正如 Zühlke 所强调的那样, 切割后的芯片不会产生碎裂, 且其侧壁非常光滑。

“我们的商业伙伴告诉我说, 对 SiC 切割而言, 标准的机械切割是在 4mm/s 的进刀速率下进



SiC 晶圆上采用 TLS 切割技术能保证芯片具有光滑的分割面。

行, 只要稍微再快一点, SiC 材料就会发生过热现象”, 他说道, “但我们可以以 200mm/s 速率下运行, 无论是对 4 英寸还是 6 英寸 SiC 晶圆都是如此”。

但它的成本是多少? 3D-Micromac 热激光分离设备的价格是其他机械切割系统的三倍以上。然而由于该系统具有更高的加工产量及更少的锯片耗材的消耗量, Zühlke 估计在这项设备上的投资将可在数月内就能赚回成本。

“如果你每个月需要切割加工 150 片晶圆以上, 我们的系统就将会比机械切割系统更加便宜, 而且这还是将投资成本也包含在内的情况下”, 他说道。

因此, 基于热激光分离技术在成本和加工产量上的优势, Zühlke 自信地认为 SiC 市场已对这项技术敞开了大门。“在现在, 几乎所有的客户都在使用机械切割设备, 如果你只切割少量的晶圆, 那还算过得去”, 他说道, “但随着 SiC 预估加工产量的增加, 我们知道客户正在寻找一种全新的切割技术”。

事实上, 3D-Micromac 公司表示, 这款切割系统已经被几家主要的行业生产商所使用, 投入到 SiC 功率器件的大批量生产中。

“你也可将 microDICE 设备用于其他材料的晶圆, 包括硅和蓝宝石的切割加工, 但我们现在则是将注意力集中在 SiC 晶圆上, 因为它在设备拥有成本上的差异最为明显”, Zühlke 总结道。☞

世上首个全色彩单芯片 LED

采用全三原色高效率光发射技术的微型 LED 将应用于超高分辨率的柔性显示器中。

JYH-CHIA CHEN, MILTON YEH, HUSSEIN S. EL-GHOROURY
OSTENDO TECHNOLOGY INC.

目前制造 LED 基的白色光源和全色彩显示器的白色光源两种主要制造方法都存在着根本性的缺陷。如果白光是由被封装在一个器件内单独的红色、绿色和蓝色 LED 进行混色而产生的话，该器件则必须将 AlGaInP 基红光 LED 与 GaN 基绿光和蓝光 LED 集成起来才行，要将这些不同类型的 LED 进行配对结合将面临着挑战，这是因为它们在电学特性和材料性质上存在着很大的差异。它的主要替代方法也存有很大的缺陷，在这种情况下，蓝光 LED 上就只能加上黄色荧光粉涂层，由光色混合来得到白光的效果。然后将是一个效率上的妥协问题，这是由于在蓝光到黄光的转换过程中光子会发生级联损失。

除了这些缺点以外，这两种方法还受困于一些基本性的问题，包括：高的封装成本、低的光效率、较大的器件尺寸、低的良率和较差的可

靠性等问题。而商业化应用所需要的是一种能发射全部三基色光的单个器件。

在这个研究方向上已经有几个研究团队取得了进展，其中韩国电子业的巨头三星公司已经能生产金字塔结构的 GaN 基 LED，可同时发射多个波长的光而成为一个白光光源。然而，这些器件不能独立地发射全部的三基色光，所以虽然它适合于照明应用，但不能应用于显示器上。

McGill 大学的 Zetian Mi 团队所追求的一种替代方法是用纳米线结构来制作单片式红 - 绿 - 蓝光 LED。研究人员使用了一种三步法的选择区域生长技术，在三个不同的区域上来形成三组纳米线结构。在进行每次选择性生长之前和之后均对硅片进行了处理。使用此方法，每个显示像素都能产生三种主基色的光，它们是从三个区域（或亚像素上）发出。但这种结构会增加显示像素点的尺寸，也即会降低显示的分辨率。

我们 OSTENDO TECHNOLOGY INC. 位于美国加州 Carlsbad 的团队已经解决了这一问题，制作了世界上第一个电流调节可控的、全色彩光发射 LED。请注意，除了三个主基色，通过混色技术，我们器件还能产生其他颜色的光发射。

我们的技术极其重要的一面是它的生长过程，它是商用单色 LED 的一种理想制造工艺，因为它在生长过程之前或之后都无需增加额外的加工或处理步骤。得益于此，我们的技术是实际可行的，并可以对器件的尺寸实现进一步按比例缩小后应用于低成本的大规模生产中。

全色彩设计

不同于传统的 III 族氮化物 LED，我们为每个主基色发光均使用了不同的量子阱。在这些阱之间专门设计了由不同厚度和掺杂浓度的 AlGaIn 层所形成的载流子中间阻挡层。图 1 是我们单片式三基色 InGaIn 基 LED 的剖面结构图。

我们发现载流子中间阻挡层发挥着关键性的作用，它在整个活性区域控制着载流子的输运和分配过程。精心选择每个载流子中间阻挡层的厚度、组分和掺杂浓度，可以在不同的注入条件下来控制电子和空穴的传输。由此，可以将电子和空穴定向输运到量子阱中，使它的特定波长光发射能占据主导地位。

我们单片式 LED 采用的是 MOCVD 生长工艺，使用了紧耦合淋浴头式的反应器，在 c 晶面

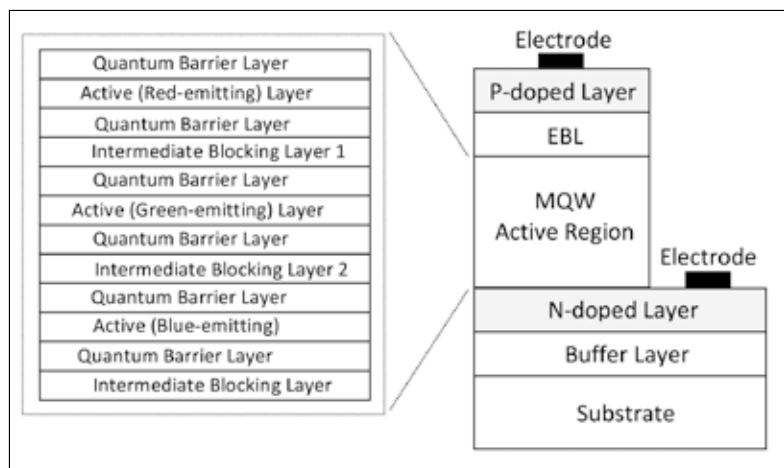


图1. Ostendo公司新的突破在于它成功制作了一种基于氮化镓多层结构的三基色单片LED。

(0001) 蓝宝石衬底上进行生长。所生长的膜层包括有：一个 $2\mu\text{m}$ 厚的未经掺杂氮化镓层；一个 $3\mu\text{m}$ 厚的高浓度硅掺杂的 n 型氮化镓层；用于品质改进而插入的一个 InGaN 缓冲层；发射 460nm 蓝光的 InGaN/GaN 多量子阱，它包括有三个 3nm 米厚 $\text{In}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 量子阱，并由 10nm 厚的 InGaN 阻挡层隔开；发射 530nm 绿光的三个 $\text{In}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ 量子阱，它由 10nm 厚的 InGaN 阻挡层隔开；发射 650nm 红光的 3nm 厚 $\text{In}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{N}$ 单个量子阱，它以三明治方式夹在两个 10nm 厚的氮化镓阻挡层之间； 20nm 厚的镁掺杂 p 型 $\text{Al}_{0.15}\text{Ga}_{0.85}\text{N}$ 电子的阻挡层；以及 200nm 厚的 p 型氮化镓接触层。

为了控制载流子分布和提高多量子阱中有源区的材料质量，器件还采用了各种各样 AlGaIn 基合金层。对每个发光区的生长温度都进行了优化，蓝光、绿光和红光阱的形成温度分别约为 864°C 、 829°C 和 809°C 。

所使用的光致发光强度分布测量设备是 Nanometric RPM 2000，它配备有功率达 150mW 、波长为 405nm 的激光器，对我们外延晶圆的光发射特性进行了研究。结果表明，LED 器件能在同一时刻发射所有的三基色（见图 2）。

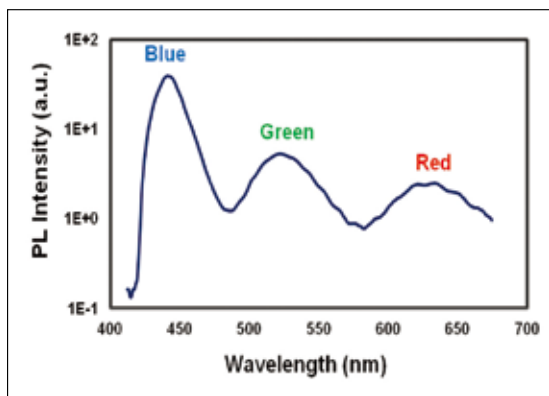


图2. 三基 LED 晶圆上的光致发光光谱，其活性区产生的红、绿和蓝色光辐射。

此外，我们还研究了它的电致发光性能，在每个外延晶圆的多个位置点上收集其电致发光的强度数据，这是在积分球内由我们自制设备‘快速检测仪’得到的。我们使用的是钢球接触，其直径通常为 0.8mm ，我们得到器件在不同注入电流下的归一化电致发光光谱（见图 3）。与光致发光的结果相反，它在某一特定电流下只出现一个主要的光发射峰。当注入电流从 15mA 变到 200mA ，然后再到 400mA 时，光发射将从红光（ $\sim 650\text{nm}$ ）变成绿光（ $\sim 530\text{nm}$ ），最后变成蓝光（ $\sim 460\text{nm}$ ）。

在发光颜色上的变化实际上比这还要微妙。红光发射出现在约 5mA 电流，随着电流增加它会变成琥珀色，然后是黄色、绿色、青色直至最终的蓝色（见图 (a)-(f)）。红色发射具有最低的效率，这是因为量子阱中含有最高的镓含量。请注意，这一发现与其他研究的成果是一致的。我们已经绘制了我们 LED 光发射全色域的 CIE 色度图（见图 5），显示我们的 LED 随着注入电流的增加，它的光发射颜色轨迹能完全覆盖标准的红-绿-蓝色光的色域。

我们的 LED 能产生三种基色的光发射，由此通过色彩混合就可以产生许多其他颜色。这包括可产生不同色调的白光，如冷色调、中性的和暖色调的白光。这些白光可以通过对驱动电流的脉冲宽度和强度进行调制后的不同组合来得到。这种技术也可能用来制作具有高显色指数的白光 LED。

超高分辨率显示

LED 和显示器的制造商对我们的技术有着很大的兴趣，因为它可以用来制造微型 LED (microLED)，它将具有：比有机 LED 更高的发光效率；由于它具有自我照明的性能，可以免除普通 LCD 中所需的背光照明。由微型 LED 构成的显示器由也将比那些采用有机 LED 和 LCD 技术的显示器更加结实可靠，使得它们更能适应严酷环境的户外应用。微型 LED 也可以安装在柔性衬底上，使得它成为可穿戴器件的优秀候选。

来自香港科技大学的 Kei May Lau 及其同事在应用微型 LED 阵列显示器方面取得了重大的进展。该研究团队最近展示了一种微型 LED 显示器，其分辨率高达每英寸 1700 万像素，其特点是在硅 CMOS 衬底上整合集成了微型 LED 阵列。

这种微型 LED 显示器具有很多的潜在应用能力，例如应用于微型投影机中的活性驱动、虚拟现实、汽车的平视显示和游戏头盔等。然而，这方面的工作目前还一直限于使用不同强度的蓝光。就我们的 LED 而论，将它与硅键合技术相结合，将可实现全色彩的显示，而在其器件制造过程中将不会增加任何复杂性。

更大的柔性显示屏

作为微型显示器的一个关键构建模块，微型 LED 已成为未来柔性照明和显示的一个重要构成部分。例如，美国伊利诺伊斯大学的 Urbana-Champaign 分校的 John Rogers 团队已经证明，这种类型 LED 可以采用微转印制备工艺来将其附着在塑料衬底上。这种技术在大尺寸、薄型、灵活照明灯具的生产中具有巨大的发展潜力。

微转印加工工艺的优点之一是它可以无需对单个器件的封装来削减整体制造成本。更为重要的是，对较小的分布式微 LED 而言，由于其尺寸很小，可以用被动方式进行冷却，使其能在很高的电流密度进行工作。最后，但绝非不重要的一点是，它可以通过更好的冷却和更优秀的光提

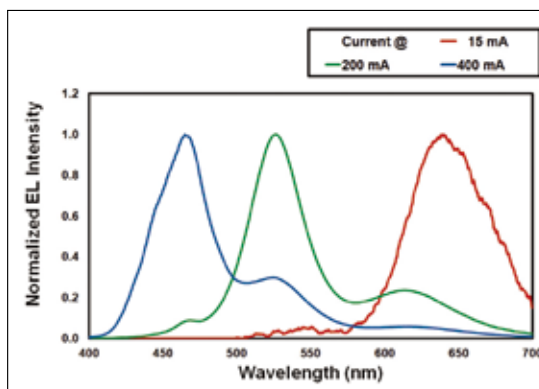


图3. 不同注入电流下的器件的归一化电致发光光谱。

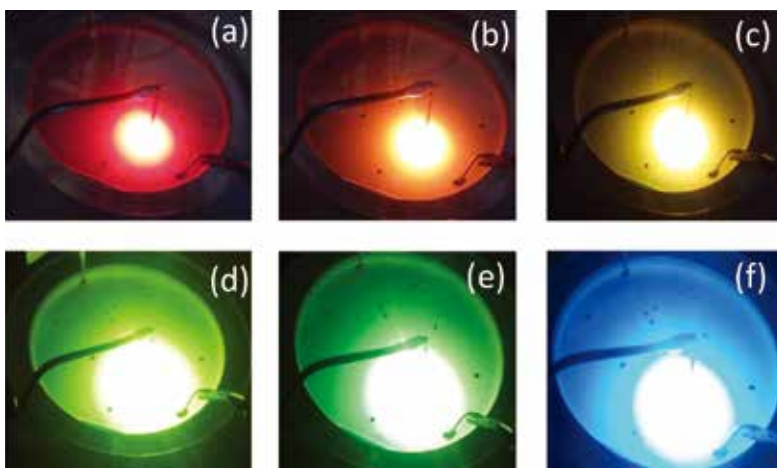


图4. (a)-(f) 在不同注入电流下的全色彩发光。



EVATEC

立足科技前沿， 引领薄膜量产技术



Our thin film production solutions reduce your process development times, enhance yields or increase tool throughput.

Chose Evatec for our know-how in the precision AlScN films required for BAW filters in **5G mobile networks**, cost-effective AlN deposition on Si for **GaN Power Devices**, high throughput RDL/UBM processes in **FOWLP**, precise bandpass filter technology for **3D Sensing & Gesture Recognition** in next generation smart consumer devices and driving down your costs in **HB-LED** production.

To find out more about Evatec processes and platforms visit www.evatecnet.com or contact your local office.



DKSH (China) Co., Ltd • Tel: +86 21 5383 8811 • E-mail: cn.spe@dksh.com

ADVANCED PACKAGING • PHOTONICS • MEMS • OPTOELECTRONICS • POWER DEVICES • WIRELESS • THE THIN FILM POWERHOUSE

www.evatecnet.com

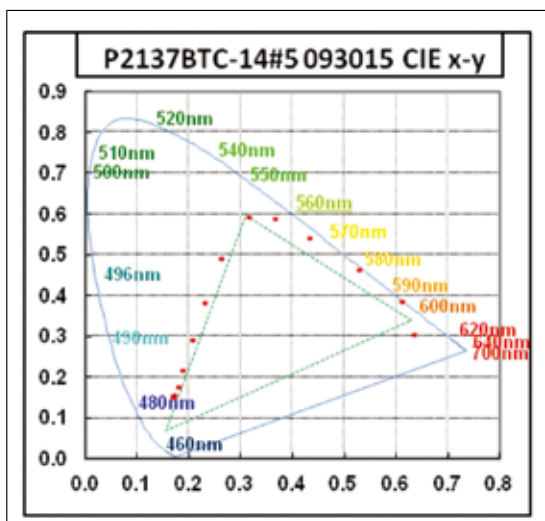


图5. 全色彩LED器件的全色域光发射 (CIE色度图)。

扩展阅读

- H. S. El-Ghoroury et. al. AIP Advances 6 075316 (2016)
 H. S. El-Ghoroury et. al. Display Week 2015 (San Jose, California) 371
 R. Wang et. al. Optics Express 22 A1768 (2014)
 W. Chong et. al. Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICs), IEEE (2014)
 H. Kim et al. Proceedings of the National Academy of Sciences USA 108 10072 (2011)

取方法来提升它们的量子效率，这是因为它具有更大的表面积，而增加了它的表面散射效应。为实现大面积照明和显示所需要的其他技术还包括有：采用微型LED的拾取和放置、喷墨印刷、自组装和丝网印刷等技术。到目前为止，在这些方面的展示成果的大部份都是采用了单色光，或由蓝光LED和黄色磷光所产生的白光。全彩色显示器需要一个更为精致的加工工艺过程，需要更加精确地将红、绿和蓝色LED制作在同一个显示像素点上。

这样做会使制造成本上升，并且也会降低分辨率，然而，如果使用我们的全色彩LED，就能够避免增加额外生产步骤，并不会影响到显示分辨率。

简而言之，我们相信这种加入了中间阻挡层的新型InGaN基LED技术，可显著降低全色彩微型LED显示器在制造上的复杂性。此外，它将能够实现大尺寸的灵活显示，能够与现有的有机LED技术进行竞争。我们现在正在开发我们新型的LED技术，由于它具有高效、紧凑、简单和可靠等性能，它也将会成为一种能改变市场游戏规则的下代照明和显示技术。CS

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
 欢迎免费索阅或参与活动 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、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约十多万专业读者。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
86-10-67484833



氮化镓 – 实现 5G 的关键技术

David Schnaufer 和 Bror Peterson, Qorvo

引言

运营商提供商经常谈论他们各自的网络如何提供更高的容量、更低的延迟和无处不在的连接。虽然当今的网络必然优于比前几代，但当提到 5G 的承诺 – 小于 1 毫秒的延迟、100 倍的网络能量效率、20 Gbps 的峰值数据速率以及 10 Mps/m² 的区域流量容量，提供商们仍大有可为。5G 预定在 2020 年进行商业发布，预计可以提供所有这些显著的优势，包括更“绿色”和高效的通信网络。

图 1 说明了 5G 的几个目标，包括更高的功率、高达 100 GHz 的频率范围，以及更高的效率。实现这些 5G 目标需要技术和系统设计的不断进步。

氮化镓的优异特性

我们之前讨论了电信行业专注于提高能源效率以实现“绿色”通信的各种方法，以及 MIMO、波束形成和小型蜂窝是如何提高效率并使电信网络整体更环保的。同时我们还强调了有多少网络能源消耗来自 RF 链。那么，今天我们就谈谈如何实现 RF 链 5G 目标和“绿色”网络目标？

进入 RF 氮化镓 (GaN) 的世界 – 这项高效、宽带隙、可靠的功率 PA 技术使网络效率逐年大幅提高。如图 2 所示，在基站收发台 (BTS) 生态系统中引入 GaN 后，前端效率大幅提升，使其成为适合高功耗和低功耗应用的一项全新首选技术。

GaN 具有优异的特性，包括高功率密度、高功率附加效率 (PAE)、高增益以及易于实施阻抗匹配，可提高 RF 链的整体效率。就像一级方程式赛车的设计师一样，无线工程师也可细致地调整和调节他们的 RF 系统来逐步优化性能。从一开始就采用基础更好的半导体技术，可以在大幅提升能源效率的同时实现性能目标。

5G 和 GaN

4G LTE 网络的扩建趋于成熟，但是要缩小与 5G 的差距，还需要进行多次升级。目前我们正处于 5G

定义和概念验证阶段，但是像 Verizon 这样的公司正在加快时间表以实现专注于固定无线接入的早期部署。

早期的 5G 试验开始于 2013 年，现在经常会有早期试验和近期实验中的数据发布出来。

那些在毫米波、大规模 MIMO 天线阵列和波束形成方面提供可观结果的关键技术已经进入预商用开发阶段。所有的基站 OEM 已进入产品试用模式。像高通、英特尔这样的公司正在测试支持 5G 的调制解调器，例如在 28 GHz 频段工作的 X50 调制解调器。Qorvo 和 NanoSemi 已针对适用于大规模 MIMO 应用的 GaN 设备的超宽带线性化结果发布演示数据。

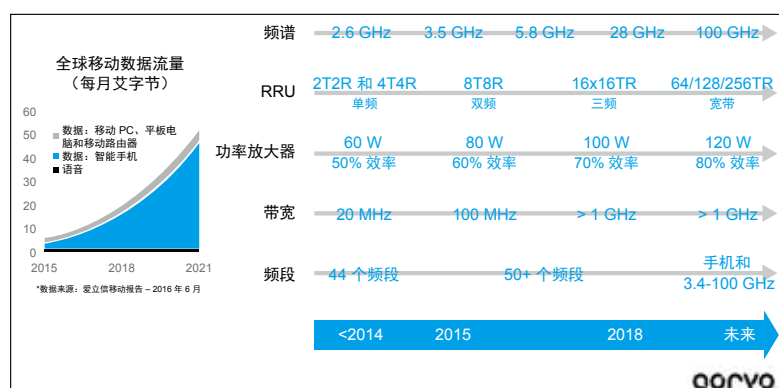


图 1. 迈向 5G 之路。

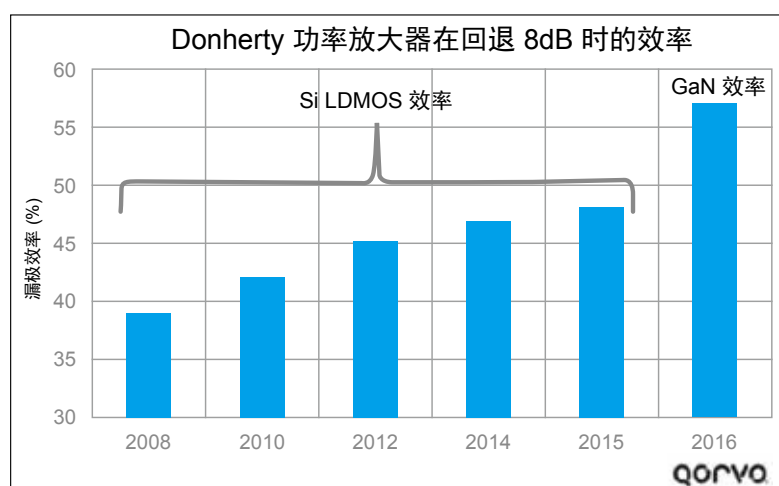


图 2. GaN 进入 BTS 市场领域提升了效率，进而大幅节约电力和能源。

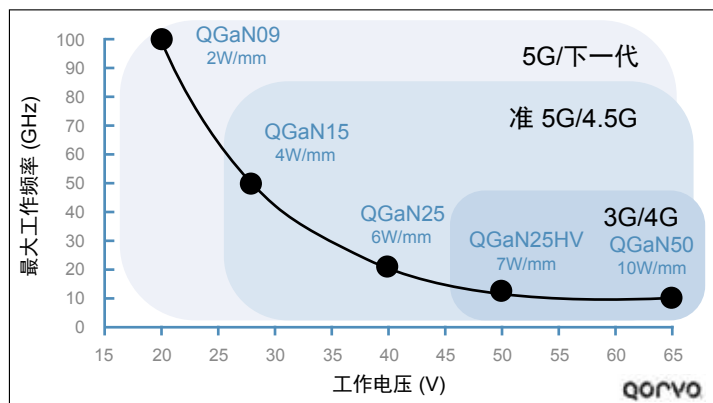


图3. Qorvo GaN 技术。

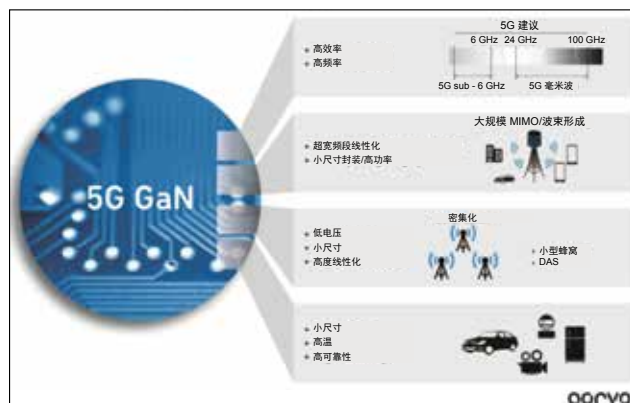


图4. 使用 GaN 满足 5G 应用需求。

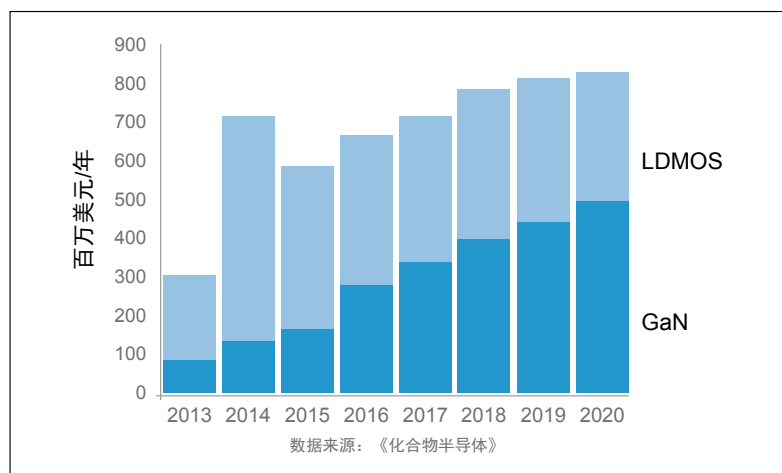


图5. LDMOS/GaN出货量。

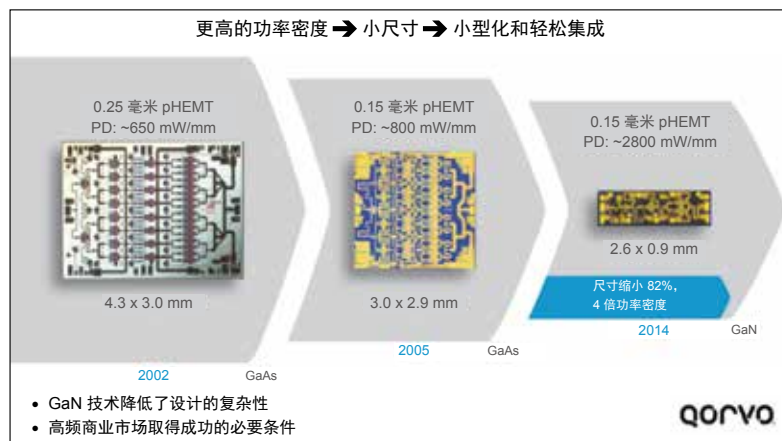


图6. GaN 为 5G 提供单片前端解决方案。

这些前瞻性公司正在探索主要的 5G 系统架构、频段和使能技术，以寻找成本、性能和复杂度的适当平衡。

为了满足多样的 5G 要求，GaN 制造商需要提供跨越宽频率和功率水平范围的多个变体。有了多个 GaN 工艺可供选择，设计人员可以将 GaN 技术与应用进行最优匹配。以图 3 说明了 Qorvo 在这个领域的的能力。

正如 Qorvo 的 Doug Reep 以前曾经在文章中

提到的，GaN 将取代传统的半导体材料用于 5G 网络应用，例如要求更高频率、紧密集成和最低实施成本的小型蜂窝。他还继续表明，低电压 GaN 所提供的效能将不可避免地进入手机设备。GaN 具有在高温环境中运行的特性，非常适合被动制冷、全户外塔顶基站电子设备和汽车应用。总而言之，拥有广泛的 GaN 技术选择将意味着更多的应用需求得到满足。

如今，GaN 被大量应用于小型蜂窝和 BTS 市场领域，并在 2016 年继续呈上升势头。GaN 出货量在 2016 年预计达到近 3 亿美元，远超过 2015 年的 1.5 亿美元。小型蜂窝、分布式天线系统（DAS）和远程无线电头端网络的密集化部署在这一趋势中发挥了重要的作用。

未利用的频谱、高吞吐量和低延迟目标的激励因素正在吸引开发人员向更高的毫米波频段迁移。毫米波频谱频段提供的带宽是目前 4G 频段（<4 GHz）的 10 至 30 倍，而网络容量与可用的带宽成正比。

GaN 非常适合提供毫米波领域所需的高频率和宽带宽。它可以满足性能和小尺寸要求，如图 6 所示。使用毫米波频段的应用需要高度定向的波束形成技术（波束形成将无线电信号聚焦成强指向性的波束，从而提高功率并最大限度地减少用户设备上的干扰）。这意味着 RF 子系统将需要大量有源元件来驱动相对紧凑的孔径。GaN 非常适合这些应用，因为以小封装尺寸提供强大性能是其最显著的特点之一。

到 2020 年，当 5G 趋于成熟时，我们都会发现其所带来的功能和优势。如今，各种试验、计划、讨论和演示不断推动着 5G 标准的定义。但明天，我们的日常生活将随处可见低于 1 毫秒的延迟和极高的容量。无论结果如何，GaN 无疑都将成为 5G 应用中的关键技术。

网址: www.iqep.com/indexchina/



全球领先的 半导体 外延片 制造商

IQE 生产先进的半导体衬底和外延片，并应用于当今高科技领域中。

射频产品：

HBT、pHEMT、BiFET、BiHEMT。

光电产品：

VCSEL，边射型激光器，发光二极管（LED）、
超高亮度发光二极管（UHB LED），
多结聚光光伏（CPV）太阳能电池。

电子产品：

硅，硅锗合金，硅层上覆锗，
MEMS，Sensors。

请立即联系IQE 以获知详情。

IQE二十多年的外延片代工制造经验，将为您 带来独特的竞争优势。

亚太营业部：

电子邮件：info@iqep.com

电话：+(44) 2920-839-400

[代办处: scistar@263.net]

[代办处: (86) 10-689-10068]

InGaAs finFET 用于未来的 CMOS

不管其结构形式如何，硅晶体管都会在 7nm CMOS 及以下节点达到性能的顶峰并开始递减下降，而 InGaAs finFET 的出现则有可能使摩尔定律继续前行吗？

JESÚS DEL ALAMO, ALON VARDI, XIN ZHAO, 美国麻省理工学院

最近几年来，人们越来越关注如何用 III-V 族材料来推动逻辑 CMOS 器件的发展，以抵消硅技术发展的递减下降趋势。目前来看，化合物半导体十分有可能成为未来 CMOS 的发展方向。这将会产生巨大的效益，它可能会将摩尔定律再向前拓展两个或三个节点，这对半导体产业来说将会是一个巨大的贡献，在硅上集成 III-V 族材料是一项革命性的技术，而化合物半导体则是这项技术中的关键。这种结合可以用于组合逻辑电路、太赫兹传感、成像和通信，以及光学功能系统等领域。

在谈到能与硅材料集成的 III-V 晶体管原型制造时，InGaAs 材料吸引了人们最多的注意力。其最大的优点是具有极高的电子运动速度，所以我们能够用它来制造具有破纪录性能指标的 HEMT 和 HBT。但人们对这种三元化合物的兴趣并非只限于它的高速性能，通过调整它的组分，InGaAs 可以具有大范围的晶格常数、有效质量和带隙，使得我们能够对其电学特性进行微调。此外，这种三元合金可以与其他 III-V 族如 InAlAs

和 InP 材料进行配对，能够对带隙和应变进行灵活和有效的调节。在与高 K 介质材料配合应用时，InGaAs 还能形成质量优异的氧化物半导体界面。

由于它具有上述所有这些优良属性，用 InGaAs 制备的平面 MOSFET 已经展现出令人印象深刻的性能。这些器件的成功制造增强了人们对该材料系统应用潜力的信心，并且已经促进了经高度缩小的 MOS 堆叠栅极器件的发展，该器件具有优异的界面特性和低电阻的欧姆接触，以及非常精准的自对准设计等优点。

虽然平面型 InGaAs MOSFET 是探索器件工艺开发和研究器件物理学的极好平台，但它的按比例缩小的潜力还比较有限，低于 40 nm 的栅极长度似乎已经是不可行的。然而，这并不是我们的主要关注点，因为三维晶体管结构，例如 finFET、三栅极 FET 或纳米线 MOSFET 等器件很可能才是未来 CMOS 器件发展蓝图中的关键所在，只有这些架构的线度尺寸才能满足摩尔定律所设定的晶体管高密度目标。

如其名称所示，finFET 中的导电沟道是放置在从晶圆片表面突出的半导体薄“鳍”的两个侧边上。采用这种架构，晶体管栅极可以放置在“鳍”的两侧以形成双栅极 MOSFET，或者放置在晶体管“鳍”的三个侧面上形成三栅极 MOSFET。这两种几何结构的 MOSFET 都有着优异的静电控制能力，使得栅极长度可以缩小到一个非常小的尺寸（参见图 1）。在这两种结构中，目前在 CMOS 节点技术中最为先进的硅 MOSFET 采用的是三栅极结构。

在过去几年中，有好几个课题组已经研发出 InGaAs 沟道的 finFET。与平面型 InGaAs

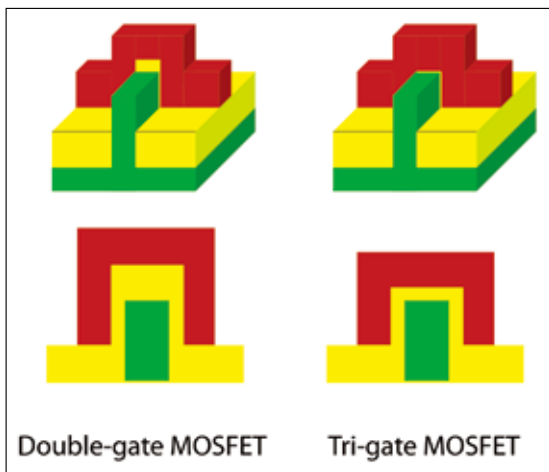


图1. 两种finFET：双栅极MOSFET和三栅极MOSFET。

MOSFET 相比, 这种“鳍”结构 MOSFET 的性能还相当有限, 因为还有待解决 finFET 所独有的问题。在美国麻省理工学院 (MIT), 我们正在努力解决这些问题, 并已经取得了重大进展, 包括已经研究出能够制作高质量垂直鳍结构的蚀刻工艺, 以及一种用于制作金属欧姆接触的新颖方法。根据对一些关键性指标的判断, 我们的晶体管的性能已经成为同类器件中的标杆。

InGaAs 鳍

finFET 器件的性能在很大程度上取决于鳍结构的质量。在 CMOS 中使用 finFET 结构时, 晶体管的鳍宽度必须小于 10nm 以及具有超过 5 的纵横比, 换句话说, 沟道的高度必须至少是其宽度的五倍。

为了制作具有上述几何形状的鳍结构, 多个团队都采用了基于“纵横比限制”的自下而上的生长工艺。这种方法是在一个窄的介质沟槽中来生长化合物半导体异质结构。它具有较大的吸引力, 因为它能够相对直接地在硅晶圆上来集成 III-V 结构。硅和 III-V 异质结构之间的晶格失配引起的位错将会在鳍的侧壁处自然终止, 从而在鳍的顶部可以获得无缺陷 III-V 材料层, 这正是我们之前所希望的。然而在实践中, 鳍上还会存在有一些残余缺陷和原子混合的现象, 使得晶体管的隔离特性及其性能会受到影响。

要解决这个问题的另一种方法是一种自上而下的加工工艺, 其中包括有反应离子蚀刻技术, 它可以产生垂直性良好的侧壁和高纵横比的鳍结构。

我们通过利用 BCl_3 、 SiCl_4 和氩气的混合物来刻蚀 III-V 族材料以形成鳍结构。我们还优化了工艺, 通过所谓的“数字蚀刻”来修整鳍结构的形状并使其侧壁表面平滑化。这是一种受到高度控制的自限制加工工艺, 它在平滑侧壁时能保持鳍结构的形状保持不变。结合应用这两种技术, 我们就能够制作宽度小于 10nm, 并且纵横比超过 5 的 InGaAs 鳍结构 (参见图 2)。

finFET 鳍的侧壁质量是至关重要的。如果它的侧壁过于粗糙或者在其组分的化学计量比上有所变化, 就可能会极大地影响晶体管的对电荷的控制和传输特性。

为了确定上述问题是否可能会在我们的器件中发生, 我们制备了一些测试用的侧壁电容器, 它是专门用来检测鳍侧壁电荷控制特性的测试结

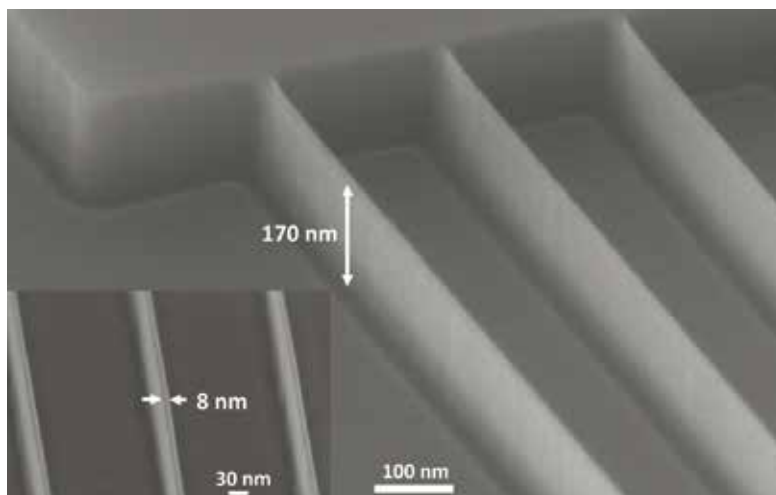


图2. 先进行反应离子刻蚀、再经过三个循环的数字蚀刻所形成的InGaAs鳍结构阵列, 最终的鳍宽度为8nm, 鳍高度为170nm (纵横比=21)。

构。测量结果表明, 我们这种数字蚀刻工艺能改进侧壁的电学性能。令人鼓舞的是我们还发现, 通过适当的处理, 蚀刻后的侧壁可以最低具有 $3 \times 10^{12} \text{eV}^{-1} \text{cm}^{-2}$ 量级的界面态密度。虽然这个结果是在鳍的顶侧电容器上得到的, 但仍然说明这是一个有着应用前景的理想结果。

不幸的是, 我们在研究中发现了在 finFET 中经超薄蚀刻 InGaAs 鳍的另一个问题。我们发现, 当鳍宽度降低到约 15nm 以下时, 电子的迁移率会迅速降低。我们仍然需要对这种现象进行详细研究, 但这并不是什么让人吃惊的事情, 因为在高度缩小的超薄体 SOI-MOSFET 中也观察到了类似的现象。值得令人注意的是, 这个现象的影响可能不像最初显现的那样严重, 因为在这一尺度上, 相对于电子迁移率来说电子的速度对器件性能有着更大的影响。

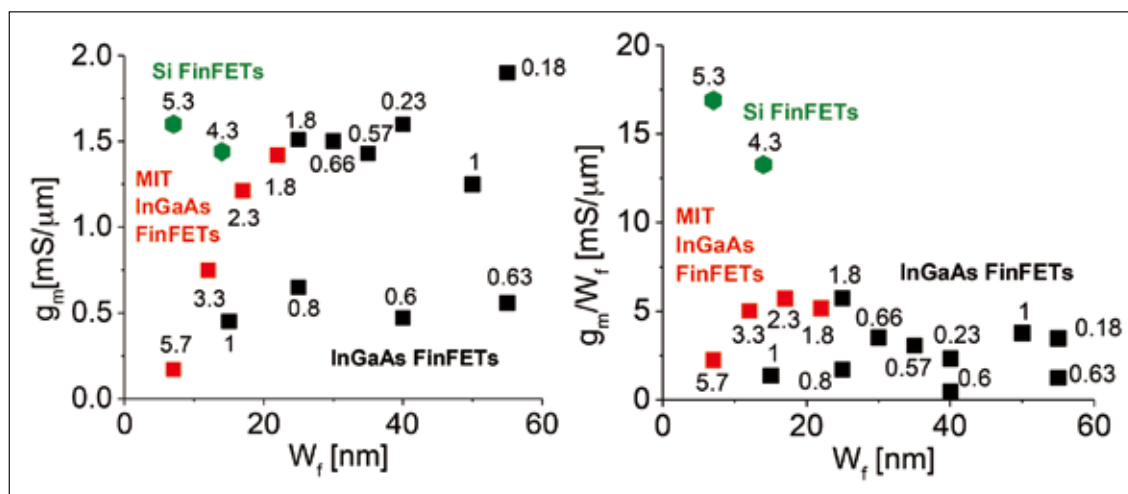
制造高性能 InGaAs finFET 不仅仅是要能制作具有高纵横比的鳍结构和高质量表面的垂直侧壁, 还要求要有低电阻率的欧姆接触、严格的自对准设计以及均匀性和可重复性等指标。将所有这些要素实现在纳米尺度上的整合集成是非常具有挑战性的。实话实说, 就现在的 InGaAs finFET 性能来说, 我们仍有着许多工作需要去做。

III-V 族 finFET 的基准

用于判断现有先进晶体管性能的一个关键性指标是它的跨导, 它反映了荷电载流子在沟道中的移动速度, 这是晶体管应用性能中的最具关键性的指标。

我们用两种不同的方法对 InGaAs finFET 的

图3. InGaAs finFET的跨导基准测试结果。左图：通过导电栅极周边来进行跨导的归一化。右图：跨导由鳍的宽度来进行归一化。还包括了最新的硅finFET以供参考，红色方块是MIT的最新结果。



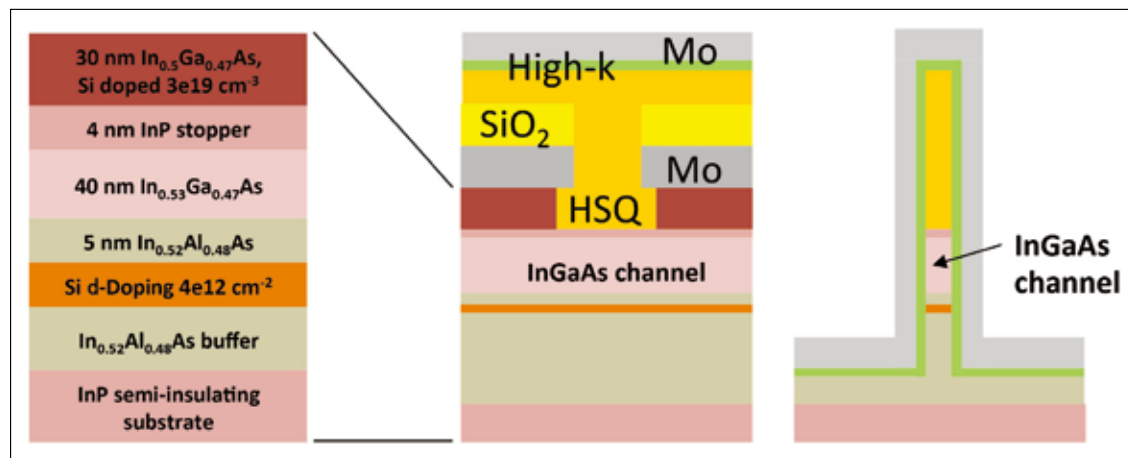
跨导进行了基准测试：一种是常规方法，即通过导电栅极的周边来对跨导进行归一化；另一种方法是用相同的数据根据鳍的宽度来进行归一化（见图3）。后一种方法非常有意义，因为它涉及到晶体管的集成密度问题，这也是摩尔定律最终所求。图3中的两张图显示了我们所选的最先进硅finFET（来自Intel的22nm和14nm CMOS）的估算和我们最近发布的测试结果。

从这图中我们可以发现几个有意思的结论。首先是尽管最新一代的硅finFET已经具有宽度小于10nm并且纵横比超过5的鳍，但直到我们的器件出现之前，文献中所呈现的最窄InGaAs finFET鳍的宽度仅为15nm，其纵横比小于2。所以，实际上绝大多数的InGaAs finFET目前只是勉强对得起这一称号。事实上，它们几乎还是一个平面型器件！我们的指标也揭示了在用导电栅极周边进行归一化时，最好的InGaAs finFET的跨导几乎与硅finFET一样。尽管纵横比不同，但是平面型InGaAs MOSFET显现出非常高的跨导——当前记录是3.45 mS/ μ m，这一记录是由我们课题组所保持的。

这显示了硅finFET和InGaAs finFET之间还存在着明显的差异。侧壁电荷控制在硅finFET中是成功的，但是在InGaAs finFET中，其效果远远不及硅finFET。很明显的是，当跨导是用鳍的宽度进行归一化时（见图3(b)），以这种归一化方式强调了从晶体管微小尺寸空间中提取大电流驱动的重要性，这是摩尔定律的本质所在。当以这种方式进行归一化时，硅finFET和InGaAs finFET之间的差距是很明显的，这表明对InGaAs finFET的开发还处于初级阶段。我们今年夏天在VLSI技术研讨会上展示了我们最近的器件，其性能指标包括在我们的基准测试数据中。这些器件具有窄至7nm的鳍宽度，超过5的纵横比，以及短至20nm的栅极长度。尽管这些器件在性能上还不如现有的硅finFET，但通过对鳍宽度进行归一化时，它的跨导比之前报道的任何其他InGaAs鳍结构的跨导要增加50%以上。那么这些器件的独特之处又是什么呢？

首先，我们的finFET设计打开了新的局面。其特性包括我们首创的欧姆接触工艺，这是在刚生长后的未受损表面上溅射低电阻率钼金

图4. 由MIT制作的InGaAs finFET的纵向和横向截面图。



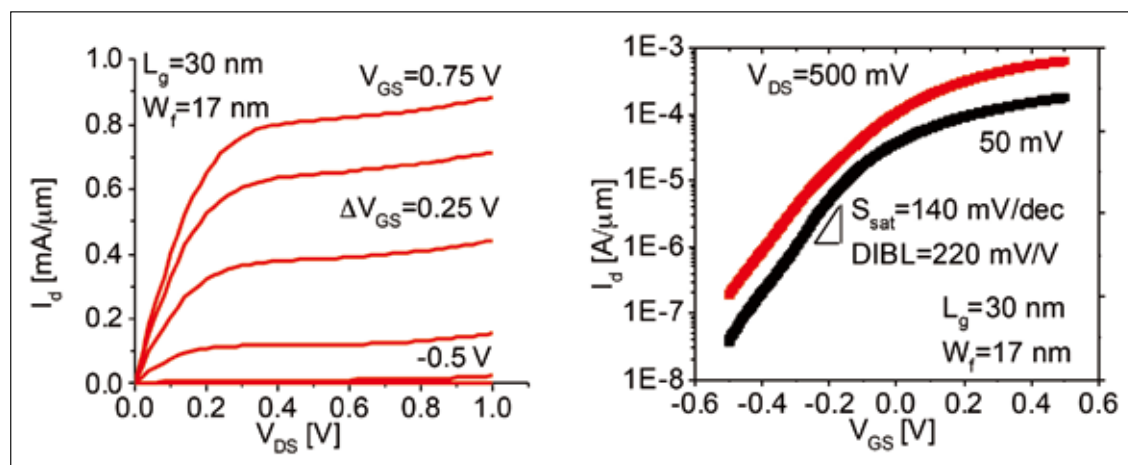


图5. MIT制造的InGaAs finFET的输出特性和亚阈值特性 ($W_f = 17\text{nm}$, $L_g = 30\text{nm}$)。

属来进行制备的。我们在制备平面型的 InGaAs MOSFET 上的经验告诉我们，用这种方法产生的接触电阻率在 $0.1\text{-}1\Omega\mu\text{m}^2$ 的范围内，但最终我们所需的电阻率是应该要小于 $0.1\Omega\mu\text{m}^2$ 。

我们器件中的鳍结构是由反应离子刻蚀结合数字蚀刻工艺制作而成的。通过这种工艺，我们可以得到表面平滑的、具有高度垂直性的侧壁。我们方法的一个特点就是用于定义鳍结构的反应离子蚀刻掩模始终是处于原来位置上保持不变。因此，通过原子层沉积 Al_2O_3 和 HfO_2 层和金属钼栅的溅射来制备栅叠层之后，所制作的器件将具有双栅极的结构。这意味着栅极仅对两个侧壁处的电子浓度进行调制，而不是像三栅极晶体管那样，也能够通过顶面的栅极来控制电子浓度。

这可以被视作为一种问题，因为三栅极设计应当能提供比双栅极结构更好的静电控制和电流驱动能力。然而，对于非常薄的鳍结构而言，在理论上这种性能差异是非常之小。我们的器件在几何形状上也有着很大的优点：由于三栅 MOSFET 结构在实际制作中会遇到很多困难，需要在加工工艺和晶体管设计方面做出重大的妥协。如果在这两者之间处理不当的话，会导致寄生电阻、寄生电容和漏电流的增加，从而损害到晶体管的性能。

我们对我们的 finFET 进行了进一步的电学表征，其中包括对宽为 17nm 鳍的器件（参见图 5）。这表明虽然我们的器件已经破了纪录，但它们仍然还远不能达到同类硅器件的性能。显然，我们面前还有很多工作需要去做。

我们在高度缩小的 InGaAs finFET 上的研究揭示了另一个值得人们关注的问题，这可能会影响未来这种器件的工业化制造进程。由于在非常

薄的鳍中存在着很强的量子限制效应，阈值电压对鳍宽度有着极强的相关性。产生这种现象的原因是 InGaAs 有着非常低的电子有效质量，所以当鳍宽度减小到 10nm 以下时就会使阈值电压产生正向偏移。在硅 finFET 中也具有相同的趋势，但是在 InGaAs 中阈值电压对鳍厚度的相关灵敏度要大约高四倍。这二者之间存在如此大的相关性，对于未来制造环境中的工艺控制将会是一个巨大的挑战。

正如我们所展示的那样，在过去几年中，在 InGaAs finFET 领域的开发已经取得了非常大的进步。虽然其性能还低于现有的硅晶体管，但对此我们也无需过于担忧，因为这一技术目前还尚未进入成熟阶段。考虑到近年来在平面型 InGaAs MOSFET 的制备上已经取得了令人印象深刻的成果，我们有充分理由相信 InGaAs finFET 存在尚未释放的巨大发展潜力。☞

扩展阅读

- J. A. del Alamo Nature 479 317 (2011)
- J. A. del Alamo CS MANTECH, Palm Springs, CA, May 16-19, 2011, pp. 17-22
- H. Riel et. al. MRS Bulletin 39 668 (2014)
- J. Lin et. al. IEEE Electron Dev. Lett. 37 381 (2016)
- X. Zhao et. al. IEEE Electron Dev. Lett. 35 521 (2014)
- A. Vardi et. al. "High aspect ratio InGaAs FinFETs with sub-20 nm fin width." Symp. VLSI Technology, 2016
- A. Vardi et. al. "InGaAs Double-Gate Fin-Sidewall MOSFETs." 72nd IEEE Device Research Conference, Santa Barbara, CA, June 22-25, 2014, pp. 219-220
- A. Vardi et. al. "Quantum-Size Effects in Sub 10 nm Fin Width InGaAs FinFETs." IEEE International Electron Devices Meeting, Washington, D.C., December 6-9, 2015, pp. 807-810
- A. Vardi et. al., "Sub-10 nm fin-width self-aligned InGaAs FinFETs." To be published in IEEE Electron Device Lett., September 2016

SOI：为制造 GaN 高电子迁移率晶体管打下良好基础

由于绝缘层上硅（SOI）衬底具有更小的损耗和更好的电学隔离特性，将硅衬底更换成 SOI 衬底可以提升 GaN 高电子迁移率晶体管（HEMT）的射频性能。

HSIEN-CHIN CHIU, LI-YI PENG, HSIANG-CHUN WANG, HOU-YU WANG, 台湾长庚大学
G.-Y. LEE, JEN-INN CHYI, 台湾国立中央大学

由于硅技术的飞速发展，工作在微波及毫米波段的纳米尺寸集成电路器件的性能正在飞速提升。然而，由于硅材料本身的原因，在毫米波频率上硅器件的输出功率密度仍十分有限，而且它的信号的损失也非常明显。

为了实现高的输出功率并获得更大的带宽，尝试与测试的解决方案是需要将硅与另一种半导体材料异质集成在同一衬底上。

一个常见的选择方法是将硅材料与 GaN 高

电子迁移率晶体管（HEMT）相结合。由于 GaN 具有较大的能量带隙并且它能够承载高的功率密度，这种组合能够在高频下实现高的输出。硅上 GaN HEMT 的另一个优点在于，由于各类尺寸硅衬底已非常普及，因此它的制造成本非常具有竞争力，并且它的器件产品还具有等比例缩小的可能性。

然而，硅上 GaN HEMT 也有一些缺点。一个显著的缺点是它会垂直通过硅衬底发生电学击穿，这是由于这两种半导体材料之间具有较大的晶格失配，并且硅的电场击穿强度比较低，只有 0.3 MV/cm。另一个缺点是在硅（111）面上生长的 GaN 具有最好的质量，然而传统硅器件使用的是（100）晶面。第三个重要的问题是硅衬底的损耗大，特别在无线频率下，这是因为它具有较低的电阻率以及较高损耗角正切的属性所致。

为了解决所有的这些问题，有几个研究组，包括我们来自台湾的团队——长庚大学和国立中央大学的合作团队——将目标转向了以 SOI 材料作为 GaN HEMT 的衬底。

在过去的十年间，这种 SOI 衬底已经证明了它在恶劣环境下仍然具有商业应用的能力，例如它能够承受高温或高强度的辐射。它也证明了它在毫米波频率下的工作效率，其截止频率可达到

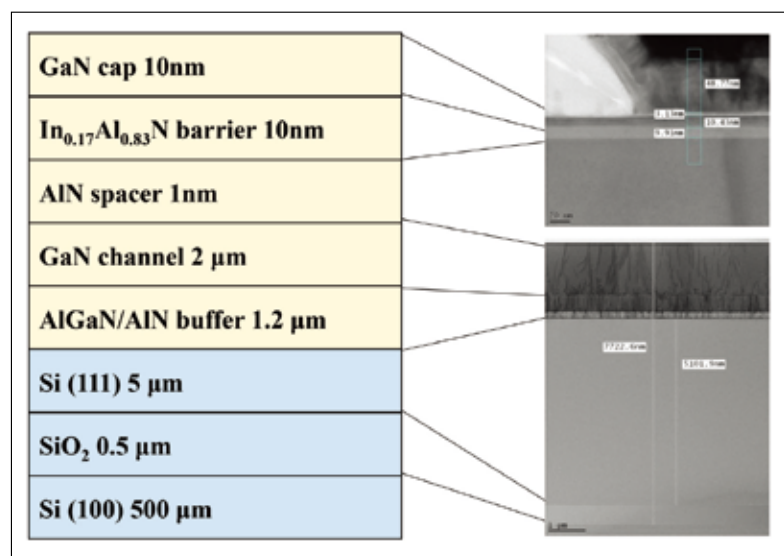


图1. InAlN/AlN/GaN HEMT制备在一个6英寸的SOI衬底上。

500 GHz。SOI 衬底的另一关键属性是它所具有的高电阻率，这将大大减少射频集成电路器件的衬底损耗。由于氧化层被埋置在有源区下方，SOI 衬底相比硅衬底具有更程度的绝缘性，这种设计还能够消除由于串信号而产生的衬底噪声。

由于 SOI 具有以上种种优势，在 2004 年，SOI 领域的开拓者，Peregrine，在 RFIC 研讨会上报道了他们已经采用 SOI 技术来制造移动通信用的射频转换器，这个转换器能在约 2 GHz 的频率下达到 35dBm 的功率水平。从那之后，美国的芯片制造商剧增了它们 SOI 器件的产量，使得它已经取代了 GaAs pHEMT，成为了手机转换器中最常见的器件类型。

SOI 的高频优势使得它成为了制造高输出功率密度微波器件中最有发展前景的衬底材料。

为这一工作打下基础的是一个来自香港科技大学的团队，他们在 2013 年报道了首个制作在 SOI 衬底上的 GaN 基 HEMT。这种晶体管展现出了较高的击穿电压、较低的导通电阻，以及较低的垂直漏电流，这三个特性对于转换器功率器件的应用是极其有益的。

我们的工作集中在微波器件上，并且使用了硅（111）衬底，它可以用来制作模拟及数字 CMOS 器件。首先进行的是 SOI 衬底的准备，包括将一个晶向为（111）的硅衬底与一个晶向为（100）的承载硅衬底进行表面键合，这样就可制作出一个夹在两层硅晶体层中间的 SiO₂ 埋层结构。

将 GaN 与 AlGaIn 配对组合

制作完成这一混合型衬底后，我们将目标集中于提升 GaN 基器件的运行速度。最终我们选择了晶格相匹配的 InAlN/GaN HEMT 器件结构，由于它有强大的自发极化以及很高的载流子迁移率，因此，它成为了最有希望替代传统商业 GaN 基 HEMT 的选择之一。

除此以外，InAlN 阻挡层为异质结构中降低应变提供了一条路径，这是因为 In_xAl_{1-x}N 合金与 GaN 的晶格十分匹配。这种组合使得器件的可靠性要优于 AlGaIn 与 GaN 形成的组合晶体管，尤其在高电压、高温的工作环境下。

我们制备并评估了在 6 英寸 SOI 衬底上的 InAlN/GaN HEMT 器件。值得令人注意的是，这种方法也正在硅产业中获得应用，互补

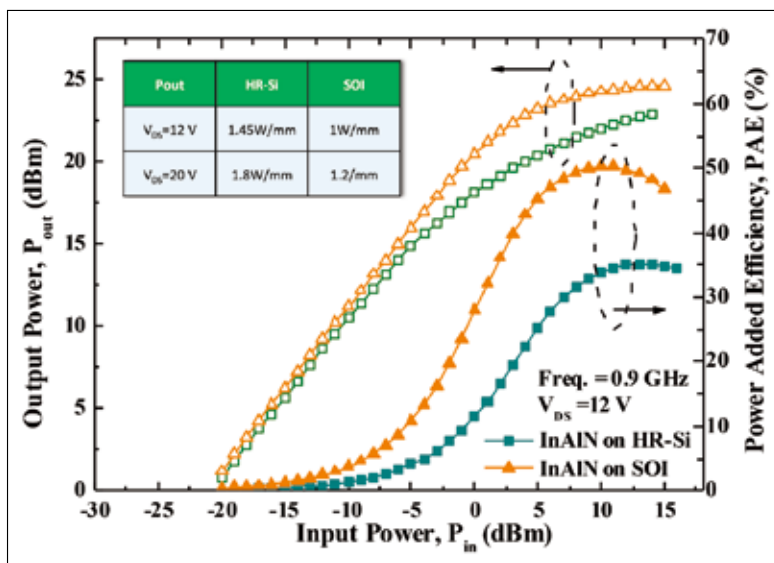


图2. 在微波波段，在SOI上制备的InAlN HEMT要比在高阻硅衬底上制备的InAlN HEMT具有更高的输出功率。

性 MOSFET SOI 技术已经被广泛的运用于微波以及毫米波集成电路的研发中。在这种情况下，SOI 技术将晶体管与硅衬底相隔离，并允许堆叠，从而提高了电路的功率处理能力，具有宽的信号摆幅。

InAlN/AlN/GaN HEMT 是通过 MOCVD 方法制备的，它被制备在一个 6 英寸 p 型（111）硅的 SOI 衬底与一个厚度为 500 μm 的 p 型（100）硅承载衬底上（见图 1 的截面图及扫描电子显微镜图像）。在这个结构中，c 型（111）硅层和 SiO₂ 埋层的厚度分别为 5mm 以及 0.5mm。采用这种 SOI 衬底的设计，将能兼容与硅（100）CMOS 的异质集成，只需要去除顶层的 GaN、（111）硅层或者 SiO₂ 材料层即可。

为了制备我们的器件，我们在 1.2μm 厚的 AlGaIn/AlN 缓冲 / 过渡层上生长了一 2μm 厚的 GaN 层。由于在 GaN 的沟道与 10nm 厚的 In_{0.17}Al_{0.83}N 肖特基层之间插入了 1nm 厚的 AlN 隔离层，使得它的载流子浓度有所提升，也提高了二维电子气的迁移率。所增加的 10nm GaN 覆盖层是为了防止在 InAlN 氧化过程中产生的水汽。

紧接着进行器件结构的制造，我们使用一种低 K 聚合物材料或光刻胶来保护器件有源区，其余的区域则是用感应耦合等离子体刻蚀进行去除，直至（111）晶向的硅承载衬底暴露出来。随后，传统的硅 CMOS 器件就可被叠加到（111）硅衬底上，来增加器件的模拟或逻辑功能。

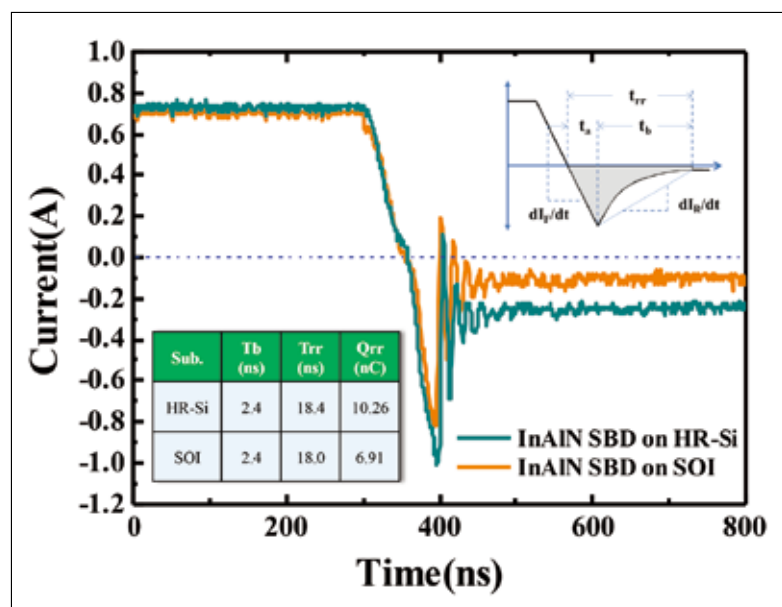


图3. 当器件是制作在SOI衬底上而非高阻硅衬底上时, InAlN/GaN肖特基势垒二极管的反向恢复特性将会更加出色。测试是通过将器件从正向导通 ($I_F=1A$) 状态, 以 dI/dt 为 60 A/ms 的速率向反向偏置 (-30V) 变化而进行的。

我们对我们的 HEMT 器件进行了晶圆级的评估, 它是一个具有 $1\mu m$ 长栅极的共源极结构, 并使用 PNA 网络分析仪与级联直接探测相结合。作为对照, 我们测量了一个器件结构相同的, 但是生长于高阻硅衬底上的 InAlN/AlN/GaN HEMT。

S- 参数测试结果显示我们 HEMT 器件在 SOI 上的最大电流增益截止频率 (f_T) 为 8.4GHz, 最大振荡频率 (f_{max}) 为 16.3GHz。相比之下, 在高阻硅衬底上的同类器件的 f_T 只有 6.3GHz, f_{max} 为 12.1GHz。我们将 SOI 上器件具有更高频率性能的原因归结于它具有更高的峰值跨导以及更小的损耗正切角, 而这两个属性都与衬底有着密切的

相关效应。

SOI 衬底上器件的功率

我们的 InAlN HEMT 器件的微波负载牵引功率性能测得为 0.9GHz, 漏极偏压为 12.0V。在 SOI 衬底上 HEMT 器件的饱和输出功率为 24.6dBm, 功率附加效率为 50.2%。相比之下, 在高阻硅衬底上的 HEMT 器件则分别只有 23dBm 和 35.2% (见图 2)。

SOI 衬底上 HEMT 器件在功率附加效率上的提升是由于它具有更小的漏电流和更高的 f_{max} 的共同作用。由于衬底引起的横向漏电流减小, 因此 SOI 衬底上的 InAlN HEMT 可获得更高的饱和输出功率, 尤其在漏-源电压较高的情况下。

我们在 SOI 衬底上制造了 InAlN HEMT 肖特基势垒二极管, 并评估了我们的器件在功率转换应用方面的潜能。当从正向导通状态向反向偏置状态转换时, 器件的反向恢复特性是由肖特基二极管的寄生电容所决定的 (见图 3)。

反向恢复的电荷量取决于几个因素: 二极管结电容、能带中深能级的密度, 以及与肖特基二极管并联的寄生电容。相比于生长于高阻硅衬底上的器件, 生长于 SOI 衬底上的器件具有更少的反向恢复电荷量, 这是由于能带中深能级的密度降低而造成的。

我们的工作表明, SOI 衬底相比高阻硅衬底有着显著的优势, 包括具有更好的电学性能, 如更高的工作频率、更好的负载牵引功率以及更少的反向恢复电荷等。所有这些特性都是受益于 SOI 衬底大大减小了在这些方面的负效应。

然而, 在 SOI 衬底上的 InAlN HEMT 仍需要做出大幅度的改进。尽管由于引入了氧化埋层使得 SOI 的衬底电容和串扰噪声更小, 但是这样一个较厚的埋层也同时增加了 InAlN HEMT 与肖特基势垒二极管中的自发加热效应。为了解决这个问题, 需要通过封装来实现更好的热管理。第二个显著的问题是, 尽管相比传统的硅衬底而言, SOI 衬底能够降低生长应力, 但在 GaN 薄膜生长时如何能有效地控制好衬底弯曲问题仍然是一个非常大的挑战。

这两个问题并不是不可逾越的, 然而, 作为可靠、高速的大功率电子器件, SOI 衬底上的 InAlN 器件的发展显然有着光明的未来。

扩展阅读

- T. Kazior Phil. Trans. R. Soc. A 372 20130105 (2012)
- K. Cheng et. al. Jpn. J. Appl. Phys. 47 1553 (2008)
- C. Zhou et. al. IEEE Electron Device Lett. 33 1132 (2012)
- D. Lederer et. al. "IEEE Trans. Electron Dev. 55 1664 (2008)
- J. Bonkowski "Integration of triple-band GSM antenna switch module using SOI CMOS," RFIC Symposium, 2004.
- Q. Jiang et. al. IEEE Electron Device Lett. 34 357 (2013)
- S. Tirelli et. al. IEEE Trans. Electron Devices 60 3091 (2013)
- H.-C. Chiu et. al. J. Electrochem. Soc. 163 H110-H114 (2016)
- W. H. Tham et. al. IEEE Trans. Electron Dev. 63 345 (2016)

用混合型生长工艺制作更好的绿色激光器

通过 MBE 来生长激光器的顶部区域可防止其有源区的功能退化。

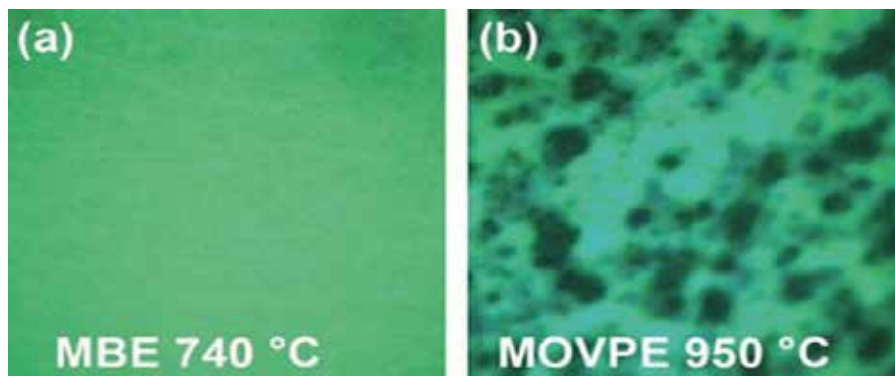
在绿色激光器的外延结构生长中，存在着一个令人尴尬的折衷性问题。如果使用最佳条件来生长 p 型层，那么约为 1050℃ 的高温将会降低量子阱的质量；但如果降低生长温度，则 p 型层的电阻率将会增加，并且包覆层及波导的光学质量也会产生下降。

为了解决这些缺点，一个来自瑞士的研究团队正在开拓一种两步法工艺流程，这个流程中，大部分结构是通过 MOCVD 来生长，而之后得 p 型层则是通过 MBE 来添加形成。根据来自 EPFL、Novagan 和 Exalos 团队的说法，这样生长的 p 型层具有最为优秀的电气特性。研究人员已经使用这种生长方法制备出了 501nm 波长的窄脊波导激光器，其阈值电压仅为 5.4V。

这种器件结构的生长方法所采用的是氨 MBE，它是在富氮的条件下进行，此生长条件与 MOCVD 生长也有关联。该团队决定采用这种方法而非等离子体辅助 MBE，因为后者只具有比较狭窄的生长窗口，使得生长高质量材料的要求变得更为苛刻。

使用等离子体 MBE 的挑战之一是要确保其具有光滑的生长表面。在生长过程中，要保证一个镓双层必须处在表面之上。“如果生长条件有所偏离，其结果要么会在其表面聚集形成镓液滴，或者是会使表面变得粗糙，”来自 EPFL 的团队负责人 Marco Malinverni 解释道。

他和他的同事制造绿色激光二极管的方法是先通过 MOCVD 在一块独立的 GaN 衬底上生长 n 型区和三周期的 InGaIn 量子阱，然后在氨气气氛中 740℃ 温度下清洗外延晶圆，之后再



一种先用 MOCVD 淀积形成 n 型区和有源区、之后再通过 MBE 形成 p 型层的混合生长方法能够使激光器发射的绿色荧光更为均匀(a)，与之相比的是仅用 MOCVD 来生长全部激光器结构所发射的不均匀分布绿色荧光(b)。

通过 MBE 生长一层 600nm 厚、掺镁的 $\text{Al}_{0.06}\text{Ga}_{0.94}\text{N}$ 包覆层和一层重掺杂的、50nm 厚的 GaN 接触层。二次离子质谱分析表明，顶部包覆层中的镁浓度为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，这一较低浓度值已经足够可防止产生高的光损耗。

在构建激光器结构之前，研究人员将他们这种结构激光器的荧光图与那些在 950℃ 下通过 MOCVD 构建 p 型层结构激光器的荧光图进行了比较。通过传统方法生长的激光器的 $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ 面积的荧光图像中具有许多黑点，表明其辐射复合受到了限制，而通过混合型生长方法的激光器结构则能发射出高度均匀的绿色荧光。

外延晶圆被加工成 $800 \mu\text{m}$ 长、 $4 \mu\text{m}$ 宽的窄脊波导激光器，在每个面上用 SiO_2 和 TiO_2 配对来形成分布式布拉格反射器。在脉冲模式（1% 工作周期、1μs 脉冲）的驱动下，激光器在 501nm 波长的光输出在 450 mA 驱动电流下达到了 15 mW。

这种激光器的主要缺点是它们不能在连续波模式下运行。Malinverni 和他的同事们相信这是由于有源层的质量缺陷所造成的，并且它只有 17% 的

注入效率也是一个问题。

这个非常低的注入效率值可能是由于再生长界面的不完美所导致的，这个问题在之前已经由该团队通过二次离子质谱进行了研究。Malinverni 在评论这项研究时解释说，他们怀疑这是在 MOCVD 反应器的冷却过程中以及连续暴露气氛中发生了污染所致。

然而，这一发现并非意味着混合生长法不能被用来制造高质量绿色激光器。“在生产中，经常使用的是集群式设备和气氛控制箱，这样可防止生长界面的污染问题”，Malinverni 说道，“然而，目前 MBE 反应器在 GaN 工业中几乎很少使用”。

该团队的目标是通过改进掺杂的分布、结的位置以及有源区的质量来提升激光器的注入效率。此外，研究人员将会调查各个界面污染的来源，并且解决这个问题。

“我们很有自信，这项技术还有很大的提升空间”，Malinverni 说道，他相信这项技术甚至能够帮助 III-N 族激光器不止能发射绿光。

M. Malinverni et. al.

Appl. Phys. Lett. 8 022105 (2015)

InN 有望提升氮基 HEMT 的性能

引入具有高迁移率的 InN 单原子层可提升氮基 HEMT 的性能

美国加州大学 Santa Barbara 分校的计算结果表明，将 InN 单原子层插入到 AlGaIn / GaN 基 HEMT 结构中可提高该器件性能。据 Mao-sheng Miao 和 Chris Van de Walle 介绍，添加超薄的 InN 层可提高二维电子气的密度、局域性和迁移率，从而大幅提高器件性能，例如具有优越的开关特性。

这些理论家考虑到 InN 比 GaN 具有更高的电子迁移率，因而决定研究这种新型器件。

为了评估将单层 InN 插入 HEMT 的作用，美国西海岸的两所学校利用 Schrödinger-Poisson 求解方法来对宏观器件进行了基于第一性原理的电子结构计算仿真。

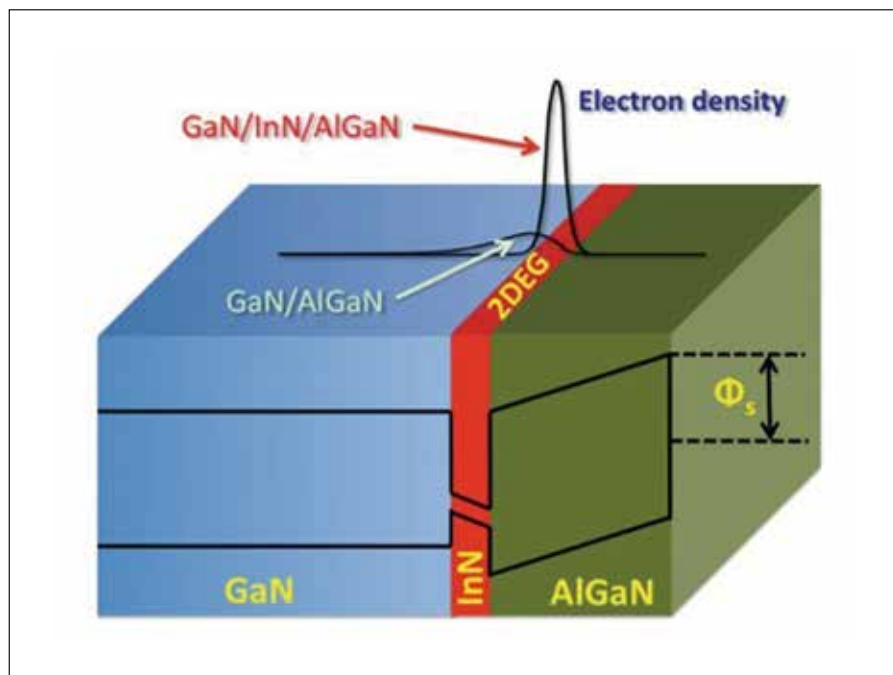
Van de Walle 解释说，使用 Schrödinger-Poisson 求解方法可以考虑诸如二维电子气局域化等特征因素。

“但是为了获得微观参数，例如 InN 层中电子的有效质量，就要进行第一性原理计算”。他们采用了一种先进的密度函数形式，即混合式密度函数来实现这一点，得到了精确的电子结构。

Van de Walle 说到：“对这种计算的要求很高，需要拥有比传统的密度函数计算高出二十倍的计算能力，这种计算只能在超级计算机上运行。”

Miao 和 Van de Walle 所研究的一个器件结构为 260nm 的 GaN 层与 4nm 的 $\text{Al}_{0.34}\text{Ga}_{0.66}\text{N}$ 层，并在其中插入 0.36nm 厚的 InN 的单原子层。假设 InN 是在 GaN 上以 pseudomorphically 形态进行生长，因而它将承受很大的双轴压应变，相应伴随着沿 c 轴的晶格弛豫。

相比传统的 GaN HEMT 结构，其电子密度分布在其半高宽 (FWHM) 上



在 AlGaIn / GaN 基 HEMT 中插入 InN 的单原子层可产生高度局域化的二维电子气，其表面势垒高度由 Φ_s 表示。

至少有着 3nm 宽度上扩展，而在含有 InN 层的结构中，其电子分布将更为加局域化，在其半高宽 (FWHM) 上仅有 1nm 宽度上扩展。

针对这种电子气性质的研究也进一步深化。计算表明，对于固定的势垒高度，含有 InN 的 HEMT 在 AlGaIn 较薄时便可形成二维电子气，并且其密度会增高很多。如果将 AlGaIn 厚度保持在 4nm，在引入 InN 原子层后，其二维电子气体的密度则要高得多，这表明晶体管对栅极电压的变化将更为敏感。

为了关闭 HEMT，需要施加负电压以降低器件的表面电位，并阻断电荷从表面状态转移到界面区域。

该团队的仿真结果表明，对于高达 3.5eV 的表面势垒，在常规结构器件的界面处仍有少量二维电子气的残留；

但是对于具有超薄 InN 层的器件，二维电子气体的密度在表面势垒为 3.0eV 时将急剧地变为零。

进一步的计算还确定了电子的面有效质量，发现只有其在块材料中有效质量的 94%，要比 GaN 中的小 30 倍以上，这表明二维电子气中的电子具有很高的迁移率。

要证明对这些新型的 HEMT 的模拟结果还需要进行实际器件的制造和测试。或许这可以在 University – academic Stacai Keller 中由 Umesh Mishra 所领衔的课题组来完成，其之前曾探索过 InN / GaN 异质结用于 HEMT 的可能性。

M. Miao et. al. Appl. Physics Express 8 024302 (2015)

III-V：将逻辑电路与存储器相结合

反相器和静态随机存储器 (SRAM) 的二维集成制造。

瑞士苏黎世 IBM 研究实验室的工程师宣称，已经首次成功由硅上 InGaAs 和 SiGe 器件构成的 CMOS 反相器和高密度 SRAM 阵列。

这项工作与绝大多数使用 InGaAs 和 SiGe 晶体管的开发工作不同，后者仅专注于逻辑功能的实现。但是，将逻辑与存储

器相结合将是至关重要的，因为在先进的 CPU 中，SRAM 缓存可占到 CPU 芯片总面积的 80%。

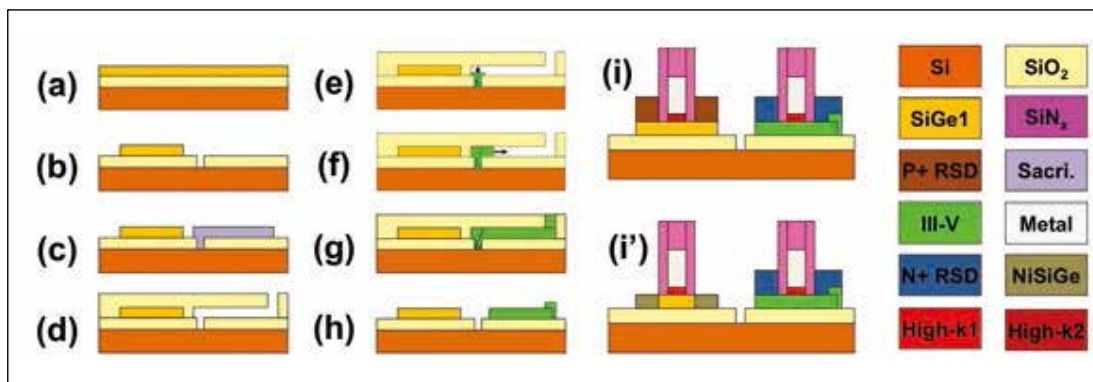
相比于硅材料而言，InGaAs 和 SiGe 合金材料具有更高的电子迁移率，它们用于制造电路的优势是在于可以降低电路的工作电压并改进其性能 / 功耗比。

论文的通讯作者 Lukas Czornomaz 解释说：“我们的目标是使我们的 CMOS 器件可在 0.5 伏的工作电压下运行，远低于先进硅技术 0.7-0.8 伏的特征值。

如果电路设计人员能将采用这种技术的器件应用于服务器中，便可在维持服务器目前功耗水平的情况下来进一步提高它的性能；如果利用这项技术来制作智能手机电路，将可使手机功耗大大降低，但依然能保持其强劲的工作性能。

Czornomaz 及其同事们使用了二维集成技术来制作电路，而这是目前制造 CMOS 芯片的标准方法。

首先，他们在具有绝缘层的硅衬



对具有绝缘层上 SiGe 的硅晶圆 (a) 进行蚀刻，可以形成 pFET 的有源区和进行硅籽晶层生长的窗口 (b)。再生长形成一个牺牲材料层 (c)，并用氧化层对其进行覆盖，再对该层进行开窗 (d)，随后去除牺牲材料层 (e)。然后在籽晶层 (f) 上通过其颈部 (g) 以填充空腔的方式来生长形成 InGaAs 结构 (h)，随之去除氧化覆盖层 (i)，形成 n-FET 有源区 (j) 以及最终 InGaAs n-FET 和 SiGe p-FET (k)。这种工艺是 IBM 公司 Zurich (k') 研究的常规高 k/金属栅极工艺的简化版。

底上通过 Ge 的凝聚在 25nm 厚的氧化埋层上来制作 8nm 厚的 $\text{Si}_{0.75}\text{Ge}_{0.25}$ 沟道层，再用干法蚀刻形成 p 型场效应晶体管 (p-FET) 的有源区。

然后制作 SiO_2 孔道，以形成连接硅衬底的通道，采用了一个籽晶层做为 InGaAs 生长起始点，使得 InGaAs 可以理想地扩展到所期望的形状和尺寸。

其它一些研究团队则是采用了不同的技术在硅上生长 III-V 族半导体材料，他们采用了长沟槽成核效应，但这样做会产生多晶结构，而这些多晶在结合转变时会产生大量缺陷。

Czornomaz 认为：“通过优化生长条件，可以在一定程度上来对晶体的结合转变过程实现良好的控制”，“但在沟槽长宽比的捕获和替换鳍技术上它明显受到这种沟槽外延生长方法的限制”。

器件的制造是采用标准的 CMOS 前端工艺与先栅极方案，来制作具有经提升的源极 / 漏极和高 K/ 金属栅介质的模块。然后，所形成的这种晶体管可用于构建反相器和存储器单元的

功能块，其大小为 0.6mm^2 到 4.1mm^2 范围。

这种晶体管的电特性显示：具有 35nm 栅长的 SiGe p-FET 不受短沟道效应影响，其亚阈值摆幅为 138mV/dec。然而，由于 p 型 SiGe 没有经提升的源极 / 漏极，使得该晶体管的导通电流受到了限制。

而 $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$ n-FET 的导通电流则会高得多，但是随着栅长从 115nm 缩减到 35nm，其短沟道效应的影响就会逐渐显现。

为了减小这种短沟道效应，该研究团队试图采用 FinFET 器件来替代平面型器件，因为当栅极长度缩小到 20nm 以下时，这样做就可改善栅极对沟道的控制能力，并且还可以从先栅工艺形式切换到替代金属栅工艺形式。

根据 Czornomaz 所言，该团队的下一个目标是进一步提高这两种器件的性能，并使该晶体管的线度能进一步按比例缩小，以满足 7 nm 节点及以后所需的基本设计规则的要求。

L. Czornomaz et. al. VLSI (2016)

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	IFC
EDI CON China 2018	电子设计创新大会	EDICONCHINA.com	IBC
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	13
IQE		www.iqep.com/indexchina/	17

欢迎投稿

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

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

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

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

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

文章投稿指南

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

图表编号一致;

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

新产品投稿指南

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

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

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

HK Office (香港办公室)
ACT International (雅时国际通讯)
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)
Mark Mak (麦协林)
markm@actintl.com.hk
Sales Director-Taiwan

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 (麦协林)
markm@actintl.com.hk
Tel: 852-2838 6298

China (中国)

Shenzhen (深圳)
Jenny Li (李文娟)
jennyli@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
Tel: 86-21-6251 1200

Beijing (北京)
Cecily Bian (边团芳)
cecilyb@actintl.com.hk
Tel: 86-135 5262 1310
86-10-6748 4833

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

Taiwan (台湾地区)
Rebecca Tsao (曹宇容)
rebecca@arco.com.tw
Tel: 886-2-23965128 x 203

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)
Robin Halder
robin.halder@angelbc.com
Tel: +44 (0)2476 718970

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

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

留出时间



2018

Electronic Design **Innovation** Conference

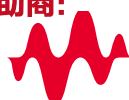
电子设计**创新**大会

回到北京！

2018年3月20-22日

国家会议中心

首席赞助商:



KEYSIGHT
TECHNOLOGIES

钻石赞助商:



ROHDE & SCHWARZ

企业赞助商:



NATIONAL
INSTRUMENTS™

主办单位:



horizon
house®



Signal Integrity
Journal

立刻预订获得最佳位置！

EDICONCHINA.com

欢迎来IMS 1202展位参观

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

