

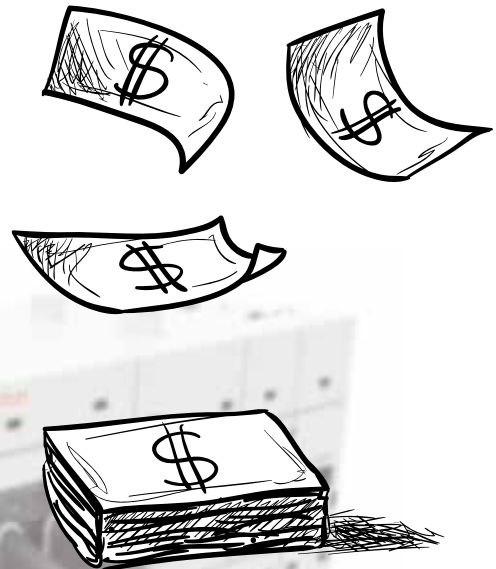
COMPOUND
SEMICONDUCTOR
Connecting the Compound Semiconductor Community

您认为,

**AIXTRON 的系统应该提供
给您最佳的生产拥有成本。**

我们也这么认为

新系统 AIX R6



探索新系统AIX R6

彻底改变一个行业不是改变一切, 而是使好的变得更好
介绍: 新系统AIX R6
它拥有业界技术领导者所期望的一切
及更好的使用便捷性, 更大的产量和最佳的拥有成本。



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 国际通过它的一系列产品—包括杂志和网上出版物、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 国际的产品包括十种技术杂志和相关的网站，以及各种会议，服务于半导体制造、化合物半导体、光伏/太阳能、电子制造、污染控制、激光/光电子、光通信、LED 技术、射频/微波等领域的十多万专业读者。ACT 国际亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT 国际总部在香港，在北京、上海和深圳设有联络处。

香港

852-28386298

深圳

86-755-25988571

上海

86-21-62511200

北京

86-10-67484833



ACT Media Group

封面故事 Cover Story

- 7 GaN突破了RF功率源在主流市场应用中的价格/性能壁垒
GaN Breaks the Price/Performance Barrier to Mainstream Adoption for RF Energy Applications
- Mark Murphy, MACOM公司高级营销总监

市场 Market

- 4 深紫外光LED: 大批量生产之路
Deep UV: the road to mass production
- 5 GaN器件在雷达上的应用
Extreme GaN
- 6 海威华芯打通砷化镓生产线
HiWAFER gets through GaAs foundry production line

技术 Technology

- 11 掌控好III-V族与硅材料的结合
Mastering the marriage of III-Vs and silicon
- Qiang Li和 Kei May Lau, 香港科技大学
- 16 用垂直结构提升GaN功率器件的性能
Perfecting GaN power electronics with vertical devices
- IsikKizilyalli, AVOGY
- 21 用于未来集成电路的纳米线FET
Nanowire FETs for future logic
- Richard Stevenson

科技前沿 Research Review

- 25 用室温键合技术制造多结太阳能电池
Making multi-junction cells with roomtemperature bonding
- 26 降低黄光激光器件的阈值电流
Trimming threshold currents of yellow lasers
- 27 载流子寿命揭示了LED光效下降的多重诱因
Carrier lifetimes uncover multiple causes of droop
- 3 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》(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

雅时国际商讯(ACT)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-为跨国公司以及中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括十种技术杂志和相关的网站,以及各种会议,服务于半导体制造、化合物半导体、光伏/太阳能、机器视觉设计、电子制造、洁净及污染控制、激光/光子学、LED技术、射频/微波、电磁干扰与兼容等领域的十多万专业读者。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、上海和深圳设有联络处。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 ten technical magazine titles and related websites plus a range of conferences serving more than 100,000 professional readers in fields of semiconductor manufacturing, compound semiconductor, PV/solar energy, vision system design, electronic manufacturing, contamination control, laser/photonics, LED technology, RF/microwave 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 and Shenzhen. 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

雅时国际资讯 ACT International
香港九龙 B,13/F, Por Yen Bldg,
长沙湾青山道478号 478 Castle Peak Road,
百欣大厦 Cheung Sha Wan,
13楼B室 Kowloon, Hong Kong
Tel: (852) 2838 6298
Fax: (852) 2838 2766

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200

Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 25988571

Fax: 86 755 25988567

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



GaN 应用处于临界点

最近几十年来, 适合 RF 商业应用的主流半导体技术, 最为常见的是砷化镓 (GaAs) 和横向扩散金属氧化物半导体 (LDMOS) 器件。然而, 随着最近市场上氮化镓 (GaN) 的出现, 在 RF 应用中的半导体技术格局将会发生根本性的改变。

对于 GaAs 和 LDMOS 来说, 经过几十年的逐步增长, 尤其是在无线基础设施应用中, 成熟的供应链和高效率的制造技术使其可以保持较低的成本。它们的性能特性, 包括它们的功率、效率、带宽和热稳定性都可以满足其目标应用的需求。它们主要的不足之处在于, GaAs 可提供的功率有限 (低于 50W), 而 LDMOS 的频率有限 (低于 3GHz)。

相对于 GaAs 和 LDMOS 在功率或频率上的不足之处, 已经证明 GaN 对此都有着优异的性能, 并且还能提供其他方面的一些优点。虽然 GaN 在性能上如此有优势, 但在过去它的成本结构是现有技术的 5-10 倍, 这明显拖累了它的普及进程。

现在, GaN 的性能优势在 RF 和微波业界已经众所周知。GaN 器件提供的原始功率密度比现有的 GaAs 和 LDMOS 技术明显要更高, 并且还有进一步提升器件使用频率的潜力。GaN 技术可以允许器件的设计者在实现大的带宽的同时又能保持高的效率。

第四代硅上 GaN (Gen4 GaN) 技术具有超过 70% 的峰值效率, 并且在 2.7GHz 的频率下对于模拟信号有超过 19dB 的增益, 这比 LDMOS 的效率要高出 10%。这个效率差距对于军事、商业和工业系统应用都具有很大的影响。

一旦 GaN 的价格不再是高不可攀, 考虑到其功率密度和采用 8 英寸衬底所带来的规模生产效应, Gen4 GaN 技术所生产的 GaN 器件有望在量产水平上的每瓦成本将会低于对应的 LDMOS 产品, 并且显著低于性能相近、但更加昂贵的碳化硅上 GaN (GaN on SiC) 产品。Gen4 GaN 技术以 MACOM 公司领衔, 并与 6 英寸硅晶圆生产商共同合作, 会在 2017 年转向 8 英寸晶圆产品的生产, 这将会打破 GaN 在量产和必要成本结构上的壁垒, 使其成为商用市场的主流。

关于第四代硅上 GaN 的发展, 请阅读本期杂志的封面故事——GaN 突破了 RF 功率源在主流市场应用中的价格 / 性能壁垒。

本期杂志更多精彩内容包括:

深紫外光 LED: 大批量生产之路

GaN 器件在雷达上的应用

掌控好 III-V 族与硅材料的结合

用垂直结构提升 GaN 功率器件的性能

用于未来集成电路的纳米线 FET

用室温键合技术制造多结太阳能电池

.....

赵雪芹

深紫外光 LED: 大批量生产之路

《Compound Semiconductor》杂志报道, SETi 日前收购了 Nitek, 将其开拓新的 UV LED 产品市场, 此举被视为是 SETi 进军平价紫外光 LED 市场的信号。

去年年底, 紫外 (UV) LED 制造商传感器电子科技公司 (SETi) 并购了其竞争对手 Nitek, 使其在向着低成本、大批量生产 UV LED 上迈出了新的一步。

正如当时宣称的: “两家公司具有互补性的公司通过并购, 将成为全球规模最大、且最具效益成本比的 UV LED 开发和制造商”。SETi 一向以生产应用于光谱仪器、航空航天、国防事业的深紫外 (DUV) LED 器件而闻名, 同时它也将目光投向更加贴近普通消费者的应用, 比如卫生消毒和医疗保健等领域。

在今年年初, 位于韩国的紫外和蓝光 LED 制造的 Seoul Viosys 及其附属公司实现了对 SETi 控股, 为适应上述市场的发展需求, SETi 已将扩大生产规模作为其首要任务。

SETi 的营销主管 Tim Bettles 强调: “我们在美国南卡罗莱纳州有着我们自己的芯片制造和封装厂, 这些工厂具有很大的生产能力, 每年约可生产几百万个器件”。

他还补充说道: “现在 Seoul Viosys 公司通过使用我们的外延片, 能够大大提高他们芯片制造和封装厂的生产量”。

那么现在由于 Nitek 的并入究竟会给 SETi 带来什么? Nitek 是从美国南卡罗莱纳州立大学 (USC) 分离出来的公司, 早在 2007 年就开启了 III 族氮化物技术的商业化进程, 能够同时供应近紫外 (NUV) 和深紫外 (DUV) LED 产品。

现在对 SETi 而言, Nitek 所开发的低成本、大批量的 DUV LED 生产工艺有着十分重大的意义。该工艺有着极高的技术含量, 315 ~ 400 nm 发射波长的 UV-A LED 是在蓝宝石衬底上生长 InGaN 外延层来进行制造的, 所采用的是与制造可见光 LED 相同的 MOCVD 技术, 但 UV-B 和 UV-C LED 所使用的则是完全不同的材料结构。

发射波长在 280 ~ 315 nm 的 UV-B LED 和发射波长在 210 ~ 280 nm 的 UV-C LED 是在 AlN 体晶圆或在蓝宝石晶圆上沉积 AlN 层来进行制造, 目前掌握这项工艺的制造商还屈指可数。

SETi 对后者进行了重点研发, 它利用了迁移增强的 MOCVD 和横向外延生长技术, 来制造蓝宝石衬底上 AlN 层结构的 UV LED。

Bettles 谢绝提供 Nitek 生产工艺的细节, 他只表示: “我



大功率、小尺寸的 UV LED 正被开发用于水质消毒、医用分析仪器等领域。

们有着极为可靠的制造设备和技术人员”。

不过正如他所强调的那样: “在收购 Nitek 之前, 我们的深紫外 LED 外延片产能已经位列世界第一, Nitek 的加入使得我们能具有更高的产能并降低我们芯片外延工艺的成本”。

他补充说道: “如今, 我们正在考虑消费类产品的设计, 这将这有利于我们去深入挖掘这些消费类市场”。

那么 SETi 的下一步将会怎么走? SETi 公司大约在 18 个月前推出了表面贴装型封装的 LED 产品, 正在为占据这一市场而积蓄力量。

SETi 最近也与美国 Wellness 中心的附属单位 Psoria-Shield 签署了一份长期合作协议, 将开发 UV-B LED 用于光疗系统。此外, 作为收购 Nitek 协议的一个组成部分, SETi 还获得了在北美销售 Seoul Viosys 的 UV-A LED 产品的独家经营权。

Bettles 说: “我们会进一步改进我们的工艺, 确保我们的产能是同行中最大的, 产品是市面上性价比最高的”。

重要的是, 不同于长波段 UV-A LED 的制造厂商, SETi 的主管并不担忧来自于亚洲的可见光 LED 生产商近期会在这一新兴市场中对他们产生竞争压力。

“虽然说我们和他们采用的都是 MOCVD 技术, 但是在 DUV LED 的加工工艺窗口上他们还有着很大的差距, 这是入行的一大技术门槛”。他还表示: “中国及亚洲其他地区的低成本白色 LED 制造厂商想要进入这一市场有着很大的难度”。

他最后总结道: “现在我们已经成为规模最大的 UV LED 供应商, 希望通过 Seoul Viosys 和 SETi 间的通力合作而成为 UV LED 的头号制造商”。SC

GaN 器件在雷达上的应用

英国 Cobham 与韩国 RFHIC 两公司通力合作来推动 GaN 基雷达技术的发展，这对 GaN 器件而言还仅仅只是个开始。

由于固态 GaN 器件具有高电压、高功率和高频率等工作特性，它在军工领域的开发应用已经有了十年，高性能 GaN 晶体管的功率放大器已经成为包括雷达、电子战等应用中的佼佼者。

当硅基器件放大器还在向 4GHz 以上的高频应用而奋斗时，GaAs 器件还无法达到大多数脉冲应用所需求的峰值功率值。尽管真空电子器件的制造商正在努力研发更为小型、具有更高工作频率的行波管来应对竞争挑战，但是 GaN 固态器件正在向着 4GHz 甚至更高的工作频率进发。

GaN 器件和系统制造商均未错过在脉冲射频功率器件市场的这一发展趋势，从 Wolfspeed、Microsemi 和 Qorvo 到 BAE Systems、Raytheon 等制造商，都已经能提供众多的 GaN 基器件和电路。

最近，英国国防及航天系统的主要生产商 Cobham 联合了韩国的射频和微波元件的主要设计生产商 RFHIC 开始强势进军 GaN 器件领域。

GaN 器件的发展

雷达按照其工作频率可分成以下几类，分别是工作频率在 1-2 GHz、2-4 GHz、4-8 GHz、8-12 GHz 的 L 波段、S 波段、C 波段和 X 波段雷达，其中 C 波段和 X 波段雷达将覆盖 4-8 GHz 和 8-12 GHz 的频率范围。

至今为止，很多 GaN 器件都把 S 波段雷达作为其应用目标，在一个名为 SOLSTx 的固态器件发射机的开发项目中，Cobham 刚刚公布了一个 35kW 的 S 波段 GaN 器件的发射机原型，用于航空管制和气象雷达等相关应用中。

现在 Cobham 正与 RFHIC 进行合作，计划在 35kW 功率放大器模块的基础上，近期开发出用于大范围雷达监测的 175kW 固态器件发射机的原型。下一步的计划是开发 175kW 模块作为构建系统的子模块应用于一些兆瓦级的大功率国防应用中。

正如 SOLSTx 生产线的负责人 Ralph Marrone 所说：“RFHIC 是商用电信 GaN 器件的主要供应商，它在大功率应用中处于领先地位”。



Cobham 企图将固态 GaN 发射机用于航空管制、长距离监视等方面。

他补充说道：“我们 SOLSTx 系统中需要用到高功率放大器，而 RFHIC 在此领域具有很强的商业竞争力”。

公司追求的都是利润，Cobham 也不例外。虽然 GaN 在性能上目前毫无疑问是功率放大应用上的首选，但是由于较高的材料和加工成本限制了它在工业上的大规模应用。

增加产量是降低成本的关键，正如 Marrone 所指出的：“RFHIC 明白大规模生产的真谛”。

他补充道：“在我所见过的功率放大制造商中 RFHIC 的生产能力是最强的”，“而这正是固态放大器产业的关键”。

RFHIC 在 GaN 领域有着十多年的研究背景，在 2004 年成为了 GaN 代工厂服务供应商的战略合作伙伴，并在 2008 年和 Cree 合作开发 SiC 上 GaN 产品。

在开发了一系列 GaN 放大器及模块之后，现在 RFHIC 还和其他几个代工厂都有合作，但依然和 Cree（现称为 Wolfspeed）保持着亲密的合作关系。

Marrone 说到：“众所周知，RFHIC 为在各地区的 Cree（现称为 Wolfspeed）公司的产品提供封装服务，将其中大部分加工好的器件返回 Wolfspeed 公司进行商业销售”，“所以，这意味着虽然我们和 RFHIC 的开发合作包含了 SiC 上 GaN 技术，但这并不意味着我们的开发仅仅局限于这一技术上，我们和其他供应商同时也在开展金刚石上 GaN 和硅上 GaN 技术的研究。”

下转第6页

海威华芯打通砷化镓生产线

2016年3月初，世界三大电信设备商之一的中兴通讯被美国商务部全面限制采购的事情，再次绷紧了电子业的神经，没有核心芯片这种硬实力，中国电子业将永远受制于人。4月8日，海特高新控股的海威华芯正式宣布6寸砷化镓芯片生产线已打通，标志着中国具备了大规模商用砷化镓芯片的生产能力，突破了国外对中国高端射频芯片的封锁，成为国家高端芯片供应安全的重要保障。

海威华芯发布了砷化镓0.25微米的功放电路生产工艺、砷化镓无源集成电路生产工艺，技术指标达到国外同行业先进水平。该生产线同时具有氮化镓以及高端光电产品的生产能力，今年将陆续发布氮化镓及高端光电工艺的新产品。

化合物半导体砷化镓、氮化镓芯片是半导体技术中的明珠，主要用于移动通讯、光通信、卫星通讯、电力电子、新能源等领域，是实现高频率、高效率及低噪声的射频核心芯片，是进行高频光纤通信、高频大功率电力转换不可或缺的芯片。全球化合物半导体产业最大尺寸就是6寸生产线，海威华芯的6寸化合物半导体生产线，是世界上化合物半导体领域最先进的生产线之一，在上市公司海特高新入股以后，提前践行“混合所有制改革”，海威华芯走上了快速发展的



道路。

海威华芯是中国的首条开放式化合物半导体生产线，意图用开放式的运营，在成都建立化合物半导体产业集群，成就产业链、地方经济、学术、就业、消费等多方面共赢的局面。海特高新董事长李飏也表达了这种开放的理念。在目前工艺开发进展顺利的情况下，海威华芯已经提出了二期工程的建设方案，将推进封装平台、技术研发中心和产品孵化中心的建设。有理由相信，中国自己的芯片实现自主可控，中国自己的高端半导体产业一定能在全世界做大做强。☞

上接第5页

他补充道：“我们是技术上的‘不可知论者’，并且会根据顾客需求和应用来选择最好的匹配方式。当然这种选择也和工作频率密切相关，在低频应用中我们会选择硅基LDMOS，但是对于S-波段、C-波段、X-波段的中高频应用，目前GaN依然是最佳的技术选择”。

失效间隔时间

传统真空电子器件的情况又是如何？当今的雷达发射机使用了众多的真空电子器件，包括有行波管、磁控管和速调管。事实上，最近来自DARPA的数据表明仅仅是在国防部门的危急通信和雷达系统中就应用了超过200,000个真空电子器件。

但是根据Marrone的说法，这种真空器件都有很高的运行成本，需要大功率的高压电源，有着特殊的可靠性要求。正如他所指出的那样，和行波管相比，最新的35 kW固态发射机原型能大大增加平均故障的间隔时间（MTBF）。

Marrone说道：“这个可靠性度量标准会随着其应用不同而变化，但是你也许可得将此可靠性要求增加十倍”。“人们

经常会问如何来证明器件的可靠性，但我认为在过去的十年中，我们所使用的具有高MTBF值的GaN器件已经给予了很好的证明”。

产品主管也同样会提到业界人士对于替换行波管(TWT)所产生的担忧：“行波管在真空管电子学中有很高的地位，所以客户更想要了解进行这种替换的实质，而我们又能不能给出一个让他们满意的价格来提供这种系统”？

同时他还说道：“我们总是会对未来技术提出各种问题，但是固态GaN器件将能够提供更高的可靠性和更低的总体拥有成本”。

更为重要的是，Cobham目前正着眼于将固态器件推广到更高频率的应用中。目前主要用于S波段和C波段的SOLSTx产品还将会用于航空交通管制以及陆地和航海的大范围监视中，未来还将会有更多方面的应用。

Marrone总结道：“我们目前正专注于S波段和C波段的应用研究，但是这并不意味着我们不会关注更高频率的应用。我们的产品发展路线图已经涵盖了整个雷达波段，它将一直延伸到X波段”。☞

GaN 突破了 RF 功率源在主流市场应用中的价格 / 性能壁垒

RF 功率器件从 GaAs、LDMOS 到 GaN 的转变，预示着在消费产品、ISM 系统到基础设施的应用中将发生整体性的市场变革。

Mark Murphy, MACOM 公司高级营销总监

射频 (RF) 和微波领域一直以来都是半导体技术的一个小分支。其目标在于满足从消费无线电子设备到军用雷达等复杂应用中的特殊需求。如同对其他技术一样，我们对它们进行评估，依据是这种半导体技术的性能、可靠性和成本属性。它们在 RF 领域中的应用，已经有了一系列的半导体解决方案能以合适的成本结构来应对这种特殊技术上的挑战。

最近几十年来，适合 RF 应用尤其是在商业应用中的主流半导体技术，最为常见的是砷化镓 (GaAs) 和横向扩散金属氧化物半导体 (LDMOS) 器件。然而，随着最近市场上氮化镓 (GaN) 的出现，在 RF 应用中的半导体技术格局将会发生根本性的改变。要完整地认识这项 GaN 技术及其促使产业界转向所带来供应链的变化，我们就有必要回顾 GaAs 在这数十年期间从高技术变成大规模商业市场主流的历程。这也是与我们要追寻的 GaN 所具有的相似发展轨迹，与此同时，考虑 LDMOS 在 RF 市场所扮演的角色也是重要的。

传统技术

20 年前，GaAs 技术还在其形成阶段，其处境与最近几年的 GaN 十分相似。当时它是一种刚出现的新技术，只能靠政府基金的扶持来获得其经济性，或者只用于那些不计成本的应用中。使 GaAs 成为市场主流的催化剂是消费者对于手持无线设备的大量需求，这带来了极大的规模经济效益。化合物半导体公司引领整个半导体业界建立

了稳定可靠、规模庞大的 GaAs 供应链，投资数亿美元用于建设大规模 GaAs 工厂，这些努力使得这项技术从高精尖的小众产品变成规模市场的主流。

然而，如今在手持式设备中 GaAs 器件正在被硅基器件，例如 CMOS 和 SOI 所替代，多家领先的硅基产品供应商已经提出倡议要取代大部分 GaAs 产品，以进一步提高硅基产品的规模经济，这使得即使是最大的 GaAs 工厂现在也为此变得相形见绌。

与 GaAs 类似，LDMOS 在过去的几十年中也在 RF 市场中逐步增长，尤其是在无线基础设施应用中。LDMOS 成熟的供应链和高效率的制造技术使其可以保持较低的成本。对于 GaAs 和 LDMOS 来说，它们的性能特性，包括它们的功率、效率、带宽和热稳定性都可以满足其目标应用的需求。它们主要的不足之处在于，GaAs 可提供的功率有限（低于 50W），而 LDMOS 的频率有限（低于 3GHz）。



图1. GaN器件用于无线基站。



图2. 微波炉中磁控管替的替代。

相对于 GaAs 和 LDMOS 在功率或频率上的不足之处,已经证明 GaN 对此都有着优异的性能,并且还能提供其他方面的一些优点。虽然 GaN 在性能上如此有优势,但在过去它的成本结构是现有技术的 5-10 倍,这明显拖累了它的普及进程。

处于临界点上的 GaN

现在, GaN 的性能优势在 RF 和微波业界已经众所周知。GaN 器件提供的原始功率密度比现有的 GaAs 和 LDMOS 技术明显要更高,并且还有进一步提升器件使用频率的潜力。GaN 技术可以允许器件的设计者在实现大的带宽的同时又能保持高的效率。

第四代硅上 GaN (Gen4 GaN) 技术具有超过 70% 的峰值效率,并且在 2.7GHz 的频率下对于模拟信号有超过 19dB 的增益,这比 LDMOS 的效率要高出 10%。这个效率差距对于军事、商业和工业系统应用都具有很大的影响。

并且一旦 GaN 的价格不再是高不可攀,考虑到其功率密度和采用 8 英寸衬底所带来的规模生产效应, Gen4 GaN 技术所生产的 GaN 器件有望在量产水平上的每瓦成本将会低于对应的 LDMOS 产品,并且显著低于性能相近、但更加昂贵的碳化硅上 GaN (GaN on SiC) 产品。Gen4 GaN 技术

以 MACOM 公司领衔,并与 6 英寸晶圆生产商共同合作,会在 2017 年转向 8 英寸晶圆产品的生产,这将会打破 GaN 在产量和必要成本结构上的壁垒,使其成为商用市场的主流。

射频功率源 (RF Energy) 的应用

具有 GaN 性能而成本结构又与硅相同的器件时代即将到来,这将加速 RF 功率领域的技术创新,并且打开大规模新市场的机遇大门。其中最主要的就是 RF 功率源应用,即利用可控的电磁辐射来加热物体,或者是用于各种类型的加工进程。时下这种 RF 功率源主要是由磁控管构成,而未来将会使用固态 RF 半导体器件。

固态 RF 功率源有很多其他方法所没有的优点:低电压驱动、半导体级的可靠性、更小的形状参数和“全固态电子器件”的尺寸。其最具竞争力的特性应该是对频率、相位和功率的快速的、高精度响应能力。综上所述,这项技术具有前所未有的对过程控制范围,包括功率分布,以及在负载条件变化时的快速匹配能力。

随着 Gen4 GaN 时代的到来,在商业 RF 功率源应用中将会出现变更的有:

微波炉 现有的磁控管替代品是使用 LDMOS 技术。在 LDMOS 上的挑战是其如何提高其效率以接近主流磁控管的性能。GaN 可以解决这个挑战性问题,并且可以弥补目前 LDMOS 组件效率与目标效率之间的差距,即 GaN 的效率将有望提升 10% 以上。

MACOM 公司 的 GaN 技术对于在市场上整体替代磁控管而言是一种理想的选择。它已经克服了两方面的挑战:在技术上它可以在 2.45GHz 时达到 70% 的效率。在经济性上,它可以替代 1940 年代就出现的,并且经历多年优化的磁控管技术。GaN 技术可以提供更长的系统寿命,更加恒定的输出功率以及加热区域可控等功能。

等离子体照明 目前使用 RF 功率源激发的等离子体照明市场主要使用的还是 LDMOS 技术。等离子体照明通常使用的是几百 MHz 的较低 RF 频率。等离子体照明已经放慢了进军整体照明市场的步伐,但是在成长中的照明细分市场找到了自己的位置。因为它的色温非常接近于自然太阳光,所以是理想的太阳光模拟光源。

等离子体照明目前正在向着将 RF 功率源的频率提升至 6GHz 和效率提升至 70% 以上的方向

汽车点火

工业烹饪

工业烘干

医疗肿瘤消融

等离子路灯照明

MACOM GaN...发布

在射频能量应用中实现了杰出的效率和增益

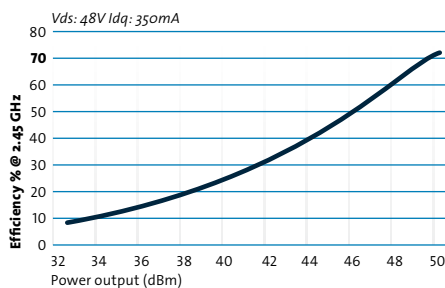
产品组合、长期合作、人员投入正助力GaN技术广泛应用于工业射频能量领域

我们正在打破阻碍GaN成为主流应用的最后壁垒，提供业界领先的低成本射频功率器件产品系列。在过去四十多年里，我们的工程师一直致力于重新定义高功率射频技术，并把他们在GaN方面的技术积累广泛应用于商业、工业、科研、医疗、以及无线等各个方面。

MACOM的GaN技术和产品在成本、带宽、功率密度和效率方面更有优势：

- › 支持功率范围 2 – 1000 W
- › 支持频率范围 890 MHz – 2.45 GHz
- › 支持封装类型QFN到TO-272到陶封系列

MACOM的MAGe系列 拥有业界领先的效率水平



MACOMTM
Partners from RF to Light

订购样品和了解更多信息，请访问：
www.macom.cn.com/gan



图3. 等离子体灯用于街道照明。

发展；这对于 LDMOS 而言几乎是不可能实现的，而 GaN 技术则可以轻易地达到。得益于 GaN 具有更高的功率密度，GaN 晶体管的尺寸可以做得更小，这就产生了另一个关键性的优势，即供应商可以将 GaN 基等离子体照明引入到室内照明灯泡市场中，以与 LED 照明展开正面的竞争。

汽车点火、加热和烘干等 GaN 的性能优势和成本下降趋势已经得到证明，使它在一些新兴的应用领域，包括在汽车点火、工业加热和烘干系统，以及科研和医疗应用领域中成为 LDMOS 有力竞争对手。

对于上述汽车点火的应用中，在使用燃料的汽车中，基 RF 功率源的点火系统将会取代传统的火花塞技术。将 RF 能量引入车辆发动机的燃烧室可以得到更加均匀的点火分布，显著提升燃料利用效率并且能减少二氧化碳的排放。

在上述加热和烘干的应用中，RF 功率源可以使材料更加均匀地被加热和烘干，防止传统方法所产生的不想要的温度梯度分布，尤其是处理导热性差的材料时更有优势。这种加热性能可以帮助加快生产进程，改进包括血液和器官加温在内的医疗处理程序，提高在科研应用中的化学处理能力等其他潜在应用。

市场潜力和技术里程碑

RF 功率源应用市场的需求规模是非常巨大的。仅仅以微波炉为例，MACOM 估计全球每年售出超过七千万台微波炉，其功率范围在 600-1500W，这样微波炉的总 RF

功率需求量就在 42GW 到 105GW 之间。在目前主流的半导体价格结构下，对应的潜在市场收入大约在 100-250 亿美元之间。

用于这些系统的 RF 器件必须在性能、功率效率、小尺寸和可靠性之间做好平衡，并且其价格应该可以被主流商业市场所接受。一个非盈利的技术组织——RF 功率源联盟（RFEA）致力于挖掘 RF 功率源的全部商业潜力，它预计在 300W 功率放大器可以达到 70% 的效率、并且其价格为每瓦 4 美分时，RF 功率源大量进入商业市场的拐点就会到来。

MACOM 最近发布了新的 MAGE-102425-300 器件回应了这一挑战，这是一个 300W、高可靠的硅上 GaN 功率晶体管，其封装形式采用了经济型的塑料封装，并且为商用级别的固态 RF 功率源应用进行了优化。基于 MACOM 公司的 Gen4 GaN 技术，MAGE-102425-300 能够在量产级别上、以相似的成本来实现 LDMOS 由于其固有属性的限制而无法企及的功率效率和功率密度。

MAGE-102425-300 在 2.45GHz 下可以提供 300W 的输出功率和 70% 的效率，已经达到了当前业界的领先水平，并且满足了 RF 功率源联盟（RFEA）所提出的下一代固态功率放大器的核心技术要求。作为这个联盟中的一员，MACOM 已经获得授权来改进该组织的章程，以规范固态 RF 功率源技术及其相关的组件和子模组的发展路线图。这个路线图可以降低 RF 功率源技术的复杂性、成本以及减少从产品开发到推向市场的时间。固态 RF 功率源是否能成为市场主流，其部分还取决于联盟成员以及整个产业界的团结与合作。

变革性的技术

如果能在 GaN 供应链的生态系统上和 GaN 技术发展路线图上齐头并进，将能使 GaN 在大规模生产制造上获得突破的同时，还可以降低生产成本以利于被主流市场所接受。通过打破 GaN 在主流市场商业化上的最后一个壁垒，我们将会在业界中建立一个新的长期增长引擎，构建一系列新的 RF 功率源技术，对整个市场实现变革，以在消费产品、ISM 系统、再到基础设施的大范围应用中获得效益。

继承我们半导体产业 60 年的发展历史，MACOM 已经准备好通过支持整个固态 RF 功率源的供应链来推动 Gen4 GaN 技术的普及。QSC



图4. MACOM公司的MAGE-102425-300可达到70%的效率，并能提供300W的输出功率。

掌控好 III-V 族与硅材料的结合

能捕获缺陷的“口袋”技术可在传统的大面积硅衬底上生长出高质量的 GaAs 薄膜

Qiang Li 和 Kei May Lau, 香港科技大学

1965年，时任仙童半导体（Fairchild Semiconductor）研究和研发部总监的GORDON MOORE在Electronics（电子学）杂志上发表了一篇著名的文章。在这篇总共就四页的文章中，他描绘了缩小硅晶体管的尺寸可以为半导体产业带来的好处，并且预言了这种尺寸缩小的频率会有多快。这个预言也被后世称作摩尔定律，摩尔定律的成功昭示了摩尔先生在当初是多么地有先见之明。

如今距离摩尔发表那篇半导体文章才过去了五十几年。在这期间的大部分时间中，通过简单的等比例缩小器件的尺寸，工程师们就能在缩减每个晶体管工作能耗的同时，还降低了器件的生产成本和提高了它的工作速度。但是近年来，单单缩小器件的尺寸已经无法满足半导体产业的发展，要维持器件性能的发展势头并且同时还要缩减尺寸就必须引入新的材料。在这方面，目前最大的改进是用高K值的HfO₂来取代SiO₂作为栅介质层材料，以防止在栅介质层厚度被缩减为只有几个埃量级时，其漏电流会上升到不可接受的程度。

这种将多种新材料用于晶体管的改革正在开创数字和存储器件的新纪元。“超越摩尔定律”的新时代已经来临。在这个新时代里，新材料和三维非平面结构被视为未来晶体管的发展方向。其

中在缩减尺寸、成本和功耗的同时又能极大提升器件工作性能的系统级芯片解决方案也有着很好的发展前景。

“超越摩尔定律”的发展需要对多种材料进行异构集成，而在传统的半导体厂中并不使用这种新的材料结构。硅材料在制备电子开关和存储器件上有着极大的优势，但是它的间接带隙阻止了它在高效光发射和光子相互作用方面的应用。在对数据传输有着爆炸性需求增长的‘大数据’时代中这个缺点将更为突出。幸好硅器件的这种缺点可以通过将它与光子半导体（如III-V族）材料进行集成来给予解决，这种集成结合将会对未来芯片内部和芯片到芯片之间的光学互连通讯技术产生革命性的影响

将这两种类型材料结合起来的一个好方法就是在硅衬底上生长III-V族材料的外延层。当然，这种方法也有其技术难点，主要源于二者在晶格和热性能上的不匹配，它们的晶体取向也是个问题。早在二十世纪八十年代就有人在尝试这项技术，但是尽管全球的研究者们对此进行了非常大的努力，其进展还是很缓慢，在技术上的突破也寥寥无几。

在这个研发方向上有一个课题组取得了很大的进展，那就是我们香港科技大学（HKUST）。我们利用MOCVD技术研究在与CMOS兼容的硅衬底上生长III-V族纳米结构和薄膜。在这一研究道路上并非只有我们在独自前行，然而大多数其它课题组采用的是催化技术并专注于垂直取向的纳米结构，而我们正在集中精力研究可以与成熟硅平面工艺相匹配的“顺从性”衬底。我们最大的优势是在于我们可以填平在材料生长机制和实现最终器件结构之间的技术鸿沟。

我们的这项研究工作的开启可以追溯到上个世纪，当时我们首次在[001]面的硅衬底上进行InP的异质结构生长，并取得了技术上的领先。我们并没有采用如成分渐变的III-V合金或者锗缓冲层这些传统的手段，相反的我们发明了一种双温生长工艺和经优化的GaAs中间缓冲层。我们解决了它们在晶格常数上有着8%不匹配的问题，并且制备出具有器件级高质量的、表面光滑的InP外延层。这个研究成果使得我们可以在硅衬底上制作基于InAlAs/InGaAs的HEMT和MOSHEMT，这两种类型的器件都具有十分先进的性能。

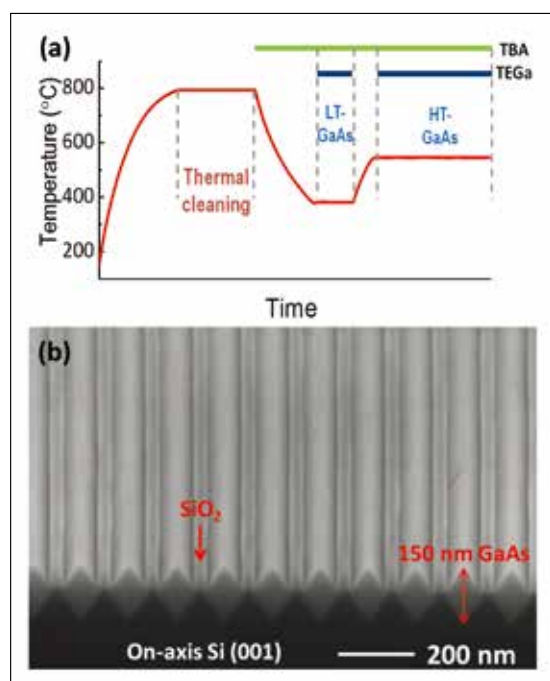


图1. (a) 用两步工艺在硅衬底上生长平面GaAs纳米线的气体流量和温度设置，反应前驱体采用的是三乙基镓（TEGa）和特丁基肿（TBA）气体。 (b) 硅衬底上平面GaAs纳米线的斜向扫描电子显微图像。

双管齐下

为了进一步提高材料的晶体质量，我们引入了一种杂化方法在硅衬底上生长 III-V 族薄膜。我们在一个经纳米级图形化加工的硅衬底上，将选择性区域异质外延与横向外延相结合来进行生长。采用这种经特别加工衬底的优点之一，就是可以形成一种设计好的凹陷“口袋”，它能够提供一种传统的空白（无图形）异质外延所没有的对缺陷的捕获能力。

利用这种方法，我们在硅衬底上制备出了具有超低缺陷、没有反相畴（antiphase-domain-free）的 GaAs 外延薄膜，它是通过在刻有 V 形沟槽的硅衬底上沉积高度有序的 GaAs 平面纳米线而形成的。

为了制作这种 GaAs 外延薄膜，我们选择采用 [110] 晶向的平面硅晶圆，并且沿着 [110] 晶向加工形成 90nm 宽度、130nm 节距的 SiO₂ 条带图形。这样就在硅衬底中产生一个个浅凹槽区，也就是我们所说的能够捕获缺陷的硅“口袋”。这种方法与传统的空白（无图形）异质外延有着很大的不同，传统空白异质外延没有采用我们具有严格晶向要求的硅衬底，来将反相畴实现最小化，它使用的是经切割加工后的硅片。

我们通过刻蚀出底部为 V 形的沟槽来避免反相畴的产生。由比利时 imec 的一个研究团队介绍的这种技术，可以在裸露的 [111] 硅晶面族上来沉积 III-V 族材料。在这种硅材料的边墙上淀积薄膜不会产生反相畴。

我们通过采用两步生长方法来制备 V 形沟槽硅上的 GaAs 平面纳米线外延层，可以获得卓越的结晶质量（如图 1 (a) 所示）。在 MOCVD 反应室里硅衬底经过 800℃ 的加热清洗之后，我们先是在 385℃ 温度下淀积 GaAs 成核层，之后在 550℃ 温度下生长 GaAs 主层。

我们所制作的这种高度有序的且被 SiO₂ 隔开的 GaAs 纳米线的优点是具有光滑的表面和均匀的形貌（如图 1 (b) 所示）。XRD ω - 摇摆曲线分析结果表明，150nm 厚纳米线的半峰宽 (FWHM) 可以与在平面切割硅片上的 1 μ m 厚 GaAs 薄膜的半峰宽 (FWHM) 相媲美。换句话说，在相同的结晶质量下，将直接在平面上生长改为我们这种能减少缺陷的新方法可以将缓冲层的厚度减小六倍以上。

用透射电子显微镜 (TEM) 来观察我们的截

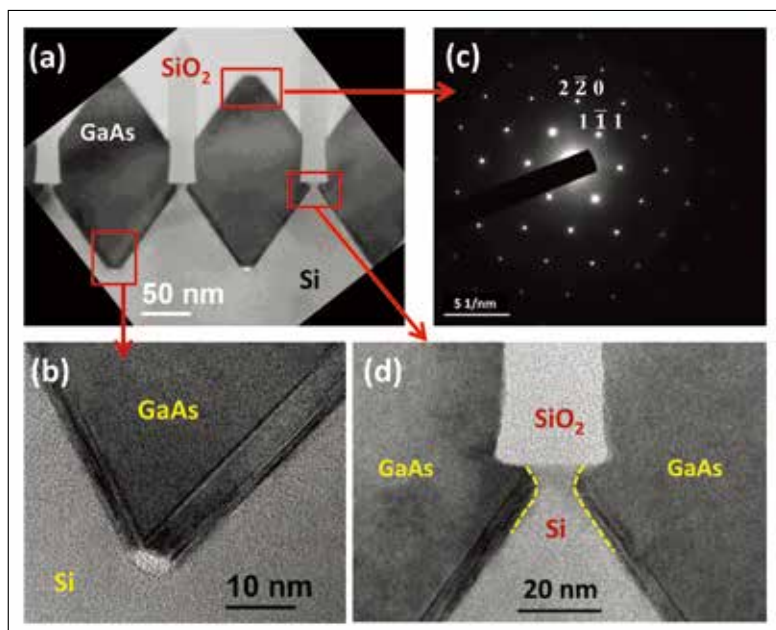


图2. (a) GaAs纳米线横截面的透射电子显微镜图像；(b) GaAs-Si界面的高分辨率透射电子显微镜图像；(c) 纳米线尖端部位的选择X线衍射图；(d) “头饰”状硅结构捕获堆垛层错的透射电子显微镜图像。

面结构时，发现了一种奇特的捕获缺陷现象（如图 2(a) 所示）。对 GaAs-Si 异质界面进行仔细观察，发现 4.1% 的晶格不匹配并不与螺旋位错的传播蔓延相对应，而是与几个纳米厚的无序堆叠层相关联（如图 2 (b) 所示）。由于这种能够释放应力的新颖机制，GaAs 体层就能具有一个高的结晶质量，就如在尖端区的选择性衍射图所表现的那样（如图 2 (c) 所示）。

一个巧妙的“头饰”

仔细观察在 GaAs-Si 异质界面处几个原子层堆垛层错的滑移面，我们可以发现这些层错是在“头饰”状结构处终止（如图 2 (d) 所示）。这种“头饰”状结构可以通过干法刻蚀和氢氧化钾湿法刻蚀将 SiO₂ 下方的硅加工成凹陷状结构来形成。

利用这种异质外延来阻止缺陷的方法通常被称为高宽比捕获 (ART) 或外延瓶颈效应。尽管对 ART 的研究并非新闻，但是之前研究只是集中在小孔洞中来生长高质量的晶体，发现它会受到图形化介质的约束。很多人也尝试将 ART 和外延的过度生长 (over-growth) 相结合来生长大面积的平面薄膜。但是，此时介质层图形会变得难以控制而产生不对称现象，并且在晶面生长区域也会变得不规则，结果就是会产生高密度的聚结缺陷，表面的形态也会变得很粗糙，甚至会产生更多的来源于介质层的缺陷。

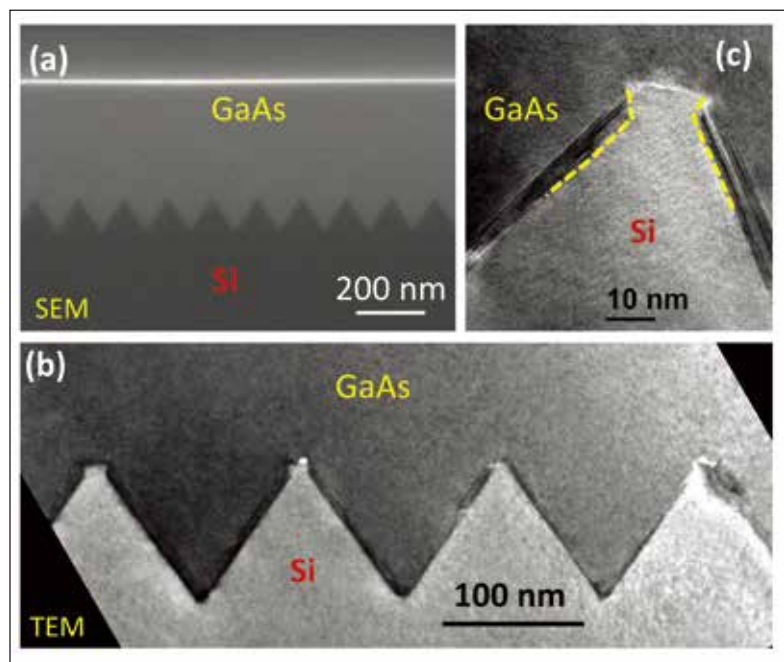


图3. (a) 用纳米线作为一种特别的缓冲层, 300nm厚GaAs聚结生长薄膜的截面扫描电子显微图像; (b) 透射电子显微图像显示了在异质界面处的堆垛层错被硅“口袋”局限和捕获。(c) 聚结生长薄膜经图形化加工后的透射电子显微图像, 突出了其中的缺陷捕获效应。

但是在我们的薄膜中并不会发生这种情况, 因为我们的“头饰”结构会使钻石状的硅“口袋”集中和局限在大多数的异质界面上。另一种方式去观察这种现象是去除 SiO_2 层后, 可以看到我们纳米线聚集在有着十分光滑的表面的平面薄膜中, 与此同时它还保持着由于外延瓶颈效应所产生的对缺陷的捕获能力。

将纳米线之间的 SiO_2 去除可以改善最终平面薄膜的表面形貌。根据扫描电子显微图像显示, 只需要进行 300nm 厚的 GaAs 过度生长就可以形成一个平整的表面 (如图 3 (a) 所示)。用透射电子显微镜进一步的观察这个结构, 我们发现硅“口袋”还可以阻止界面缺陷扩展进入到上层 (如图 3 (b) 和 (c))。与此同时, 原子力显微镜 (AFM) 图像显示在 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 的扫描区域中其表面粗糙度为 1.9nm, 并且没有反相畴的边界出现 (如图 4 所示)。

我们用 X 射线衍射评估了聚结 GaAs 的晶体质量。随着 GaAs 的厚度从 $1 \mu\text{m}$ 到 $2 \mu\text{m}$ 的变化, 其 ω - 摇摆曲线峰的半峰宽将从 230 弧秒减小到 154 弧秒。w-2 θ 的线宽是 72 弧秒。这些数值都表明我们的材料质量非常之好。

感受我们所获得的成功的一种方式就是与在空白无图形切割硅片上生长 GaAs 进行比较, 在具有相同的缓冲层厚度的条件下, 我们结构的 X

线衍射峰宽至少减小了 50%。另外, 如果要使两者的 X 线衍射峰宽保持一样, 那么我们的缓冲层厚度就可以减小三倍 (见图 5)。

结构表征的结果表明, 我们生长方法的优点并不仅仅局限于无需再用切割硅片来消除反相畴问题, 还包括它要比传统的空白 (无图形) 异质外延具有更加优秀的捕获和降低缺陷的能力。不仅如此, 我们的工作还表明低缺陷密度 GaAs 可以直接沉积在硅上, 无需在中间添加一层如锗或者渐变成分 SiGe 的缓冲层。

还可以通过引入其它降低缺陷的技术, 来对我们生长 GaAs 的结晶质量做出进一步的提升。例如, 对在 V 形沟槽硅上厚为 $1 \mu\text{m}$ GaAs 薄膜进行三个循环的热退火, 其 ω - 摇摆曲线的半峰宽值就会从 230 弧秒减少到 180 弧秒。

另一种提高材料的质量的方法是调整纳米线节距的大小。如果能对它实现正确的调节, 那么在外延层过度生长的过程中还可以进一步减少聚

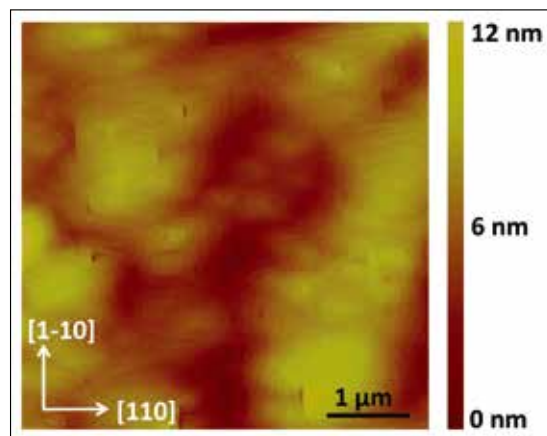


图4. 高度有序纳米线构成300nm厚GaAs聚结薄膜的原子力显微镜图像。

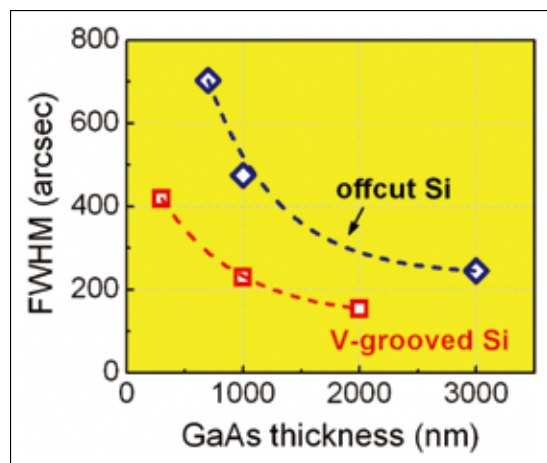


图5. 无图形切割硅片和V沟槽图形硅衬底上生长GaAs薄膜XRD ω -摇摆曲线半峰宽的比较。

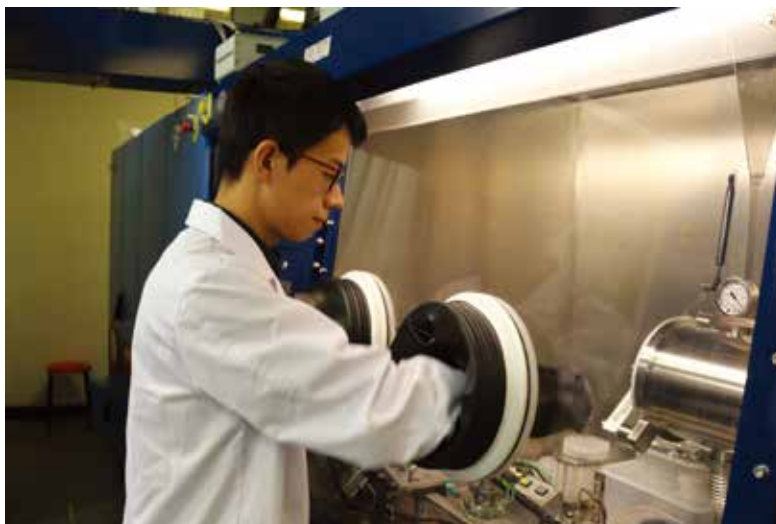
结薄膜上的缺陷密度。值得注意的是，如果横向生长距离太长的话，将会引入聚结缺陷和增加表面的粗糙度。

一般说来，对于不同的材料它的优化生长条件和硅“口袋”的形状都会是不一样的。我们现在正在寻找与硅有着更大晶格不匹配的材料，例如 InP，因为这两种材料的结合可以用来制备具有更长波长的激光器件和硅上 HEMT。在这方面的努力已经取得了一些成功，我们已经制造出一种硅上 InP 的顺从性衬底。

我们技术的未来机遇还在于如何用我们的外延平面纳米线来在工业级标准的 [001] 硅衬底上构建多种多样的异质结构。

将这些纳米结构材料与纳米制备工艺相结合，将会在三维领域开发新器件以及提高和优化传统器件上提供新的机遇。

把纳米线作为制备微型晶体和大面积薄膜的起点，将会为在大面积、廉价的、来源丰富的硅衬底上制备多种器件打开了大门。这其中包括那些需要较厚异质外延层的器件，例如单片集成量子点激光器件、探测器和多结太阳能电池等。如



果我们的工作能够激发起全球同行在这个方向上研究兴趣的话，那么它也可能会点亮向着业界长期梦想的、将电子学和光子学融合在一个共同平台上的前进道路。☞

扩展阅读

Q. Li et. al. Appl. Phys. Lett. 106 072105 (2015)

Q. Li et. al. J. of Crystal Growth 405 81 (2014)



KEEPING AN EYE ON THE FUTURE

Evatec brings you advanced thin film production solutions for Advanced Functionality Materials

From new high piezoelectric coefficient materials like AlScN to highly aligned NiFe soft magnetic layers or complex optical interference coatings, Evatec sputter platforms and processes help you keep an eye on the future. Advanced Process Control (APC) technologies bring precision and throughput to the deposition of new **Advanced Functionality Materials** in **Wireless, MEMS** and **LED** technologies. To find out more about Evatec processes and platforms visit www.evatecnet.com or contact your local office.

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



MORE INFO

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

www.evatecnet.com

用垂直结构提升 GaN 功率器件的性能

垂直结构成为制造具有高工作电压、小外形和高可靠性晶体管的关键

IsikKizilyalli, AVOGY

我们无法想象一个没有电的世界。因为电能是我们用得最多的能源，从我们的电脑、电视到时钟、照明灯和网络，任何设备都需要电能。

在不同的环境里我们需要不同形式的电能。因此，就需要有一个功率电子接口来控制电源的频率、幅度及其相位。用这种方法来进行电功率转换的实例有：笔记本电脑的充电器、太阳能逆变器和电动汽车电源控制器等。笔记本电脑充电器将来自插头的交流电转换成 19V 的直流电，插头的交流电电压根据不同国家的标准从 110V 到 260V 不等；太阳能逆变器则是将 48V 的直流电转换为 220V 的交流电；而在电动汽车中，一个

200V 的直流电需要转换成驱动马达用的 650V 三相交流电。

这些功率电子系统的核心部件是半导体器件、栅极驱动器和控制器电路。这些目前都采用硅基器件，它是肖特基二极管和 p-i-n 二极管的结合，以及其他类型的晶体管，如 MOSFET 和 IGBT 等。

由于硅基功率电子器件在可靠性和性能上的优越性，使得进行电压控制的电气系统变得更有效率、更轻和更小。但是这种趋势在未来几年内将很难再延续下去，因为硅器件的性能已经快到其自身的极限了。

目前要突破这种性能极限最好的方法就是发

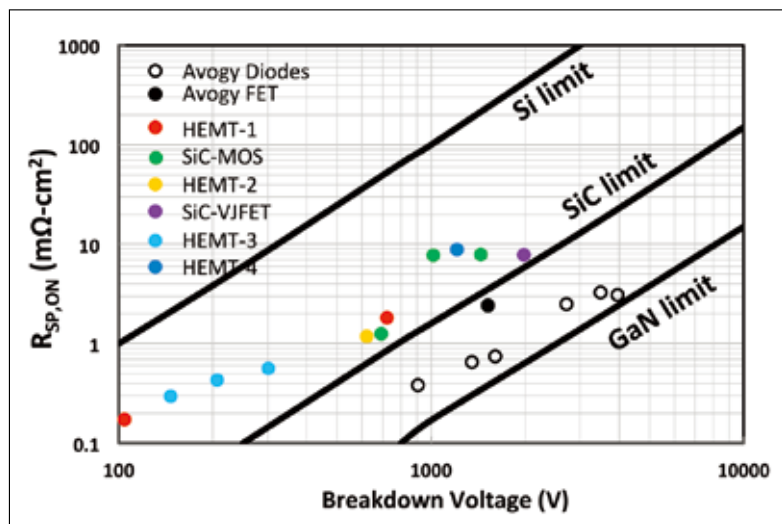


图1. 不同禁带宽度半导体功率器件的品质因数对比。

展一种新型的由宽禁带材料制作的半导体器件。采用 SiC 和 GaN 器件的功率电子系统可以比现在的更轻、更小和更有效率。

很多公司现在都在开发宽禁带半导体材料，以期能够进入或者扩大这个价值数十亿美元的半导体功率器件市场。这些公司中就包括在美国加州 San Jose 的我们，我们这个团队是在五年前成立的，旨在在同质衬底上制造出垂直型结构的 GaN 器件。这些用 MOCVD 生长的新型器件的特征就是——电流是沿垂直晶圆表面的方向流动，其漏极设置在衬底背面，这种器件还有着非常低的反向漏电流，并且在高温时它的可靠性也相当好。

通过控制在漂移层的掺杂，我们可以制备出漂移层厚度在 6mm 到 40μm 之间、净载流子浓

度低至 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的垂直结构器件，这些特征使得我们的器件能够获得一个很大范围的击穿电压值。

为什么要采用 GaN ?

我们选择 GaN 材料来制造我们的器件，是因为 GaN 的性能比 SiC 要好，也远远超过硅的性能。GaN 及其合金材料的优势包括有：大的禁带宽度，保证了它在高温工作时其本征载流子浓度很低；良好的输运性能，例如具有高的电子迁移率和高饱和速度；以及具有高的临界击穿电场和高的热导率。

要对一个功率器件进行评分，就一定要结合它的阻断和导电性能进行评估。一个性能良好的器件一定能同时具备有低的阻抗（也即低的特征电阻 R_{sp} ）和高的阻断电压（也即高的击穿电压）。可以用一个品质因数来描述这种在单极体功率器件上这两个互相矛盾的要求，这种品质因数的数值由阻断电压的平方除以特征开启电阻 R_{sp} 所决定，它近似等于电子迁移率与临界击穿电场立方的乘积（见图 1）。

由于品质因数与临界击穿电场的三次方成正比，所以宽禁带器件的性能要比硅好很多。硅的临界击穿电场强度是 0.3 MV/cm，而 GaN 体材料的临界击穿电场强度至少是 3.5 MV/cm，甚至可能达到 3.75MV/cm。由于其临界击穿电场在数量级上的巨大优势，如果我们忽略热和自加热效应，我们可以期待一个垂直结构的 GaN 器件如果有着和硅器件一样的击穿电压和导通电阻的，那么它的占位面积只有硅器件的千分之一而已。

在实际上，器件面积的缩减可能没有那么大，但是它仍然还有很多方面的好处。更小的器件具有更低的电容，可以在比硅器件高得多的频率下来开关电流，使得电能存储单元，也即电感和电容的尺寸可以进行缩减。

横向器件结构的缺陷

对于功率应用来说，一般认为横向器件结构性能总是要比其纵向器件结构要差一些。由于现在可以沉积任意厚度的电子漂移

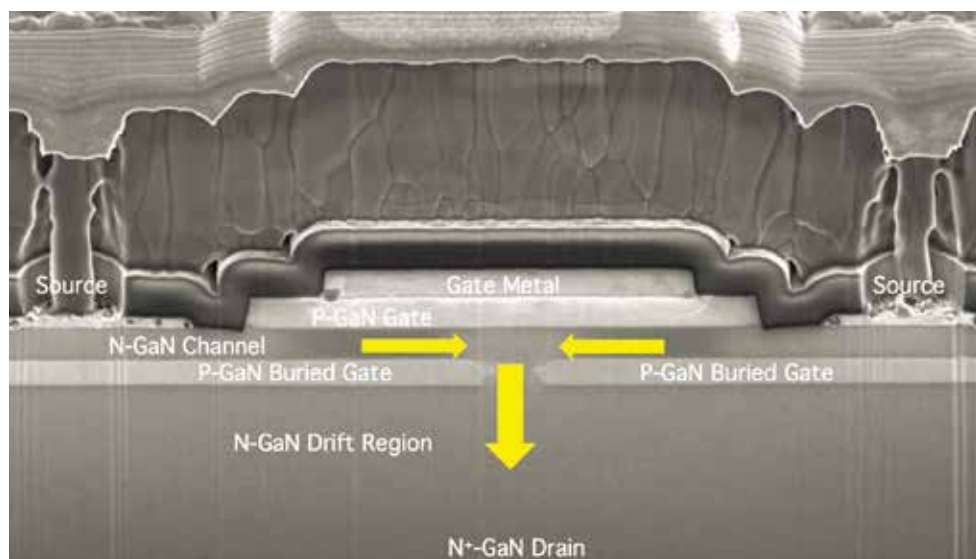


图2. Avogy垂直晶体管横截面的扫描电子显微图像。在这个器件结构中，电流（黄色箭头）从源极沿着沟道通过埋层栅的窗口向下到达漂移区，电流受到顶部栅极和p-GaN埋层栅极的控制。



图3. Zolt Plus: 只需一个充电器就可以同时给笔记本电脑、平板电脑和手机进行充电。

层，垂直结构的 GaNHEMT 更加适合用来制造高击穿电压的器件。不仅如此，垂直结构器件不需要进行并联就能够承受 50A 以上的电流。由于可在整个器件体内部进行能量耗散，它也没有热管理问题。因为电子漂移区是向往器件内部延伸，而不是横向扩展，因此在每个晶圆上就能生产更多的芯片。

需要注意的是，垂直型结构实际上已经是器件在功率应用中的标准结构，如一个工作电压在 600V 以上硅或 SiC 器件的结构。如果要用 GaN 材料来制备垂直器件的话，那么就会涉及采用什么材料衬底的问题了。从理论上来说，在异质材料衬底上来生长 GaN 是有可能的，例如可以在硅或者 SiC 衬底上进行 GaN 生长，但是由于热和晶格常数的不匹配问题，很难制备出厚度在 10 μ m 而且材料具有高质量的 GaN 电子漂移层。如果该漂移层太薄的话，它的击穿电压就会变小。而且如果外延层的缺陷密度超过 10⁸ cm⁻² 的话，就会损害到器件的良率及其一些关键的特性，例如击穿电压、关态漏电流和可靠性等，这种可靠性包括有器件的工作寿命、高温下的反向偏置特性和抗雪崩击穿等性能。

尽管有很多不可抗拒的因素使得我们需要采用同质衬底来制备垂直型 GaN 功率器件，但是很少有研究团队采用这种方法，这是因为缺少低缺

陷密度（小于 10⁶ cm⁻³）的 GaN 体衬底。说到这一点，人们总以为是 GaN 体衬底太贵以至于不能进入商用，但是事实情况并非如此。如今已经有了很多 GaN 衬底的供应商，并且由于科研人员的努力，GaN 材料的质量也有了很大的提升。与此同时，也由于光电产业对 GaN 材料持续增加的需求，大规模生产也使得 GaN 的价格有了快速的下降，再也没有人去谈论它的价格高昂问题了。值得注意的是，在同质衬底上制备垂直 GaN 器件，其芯片尺寸要比采用横向结构的要小得多，而且它们可以提升最大击穿电压，可进行安全操作的工作电压也可以提升到 600V 以上。

我们制备的有着 4000V 击穿电压的 GaN 二极管显示了这种器件高电压下的工作能力。如果将击穿电压减小至 1200V，那么该器件就可以很轻松地达到 400A 的脉冲电流值。我们正在由 ARPA-E 资助的 SWITCHES 项目中研究在这一击穿电压下器件的工作性能，我们的目标是要使 GaN 器件的制造成本能够接近硅器件的制造成本。如果我们能实现这个目标，那么我们的 GaN 器件就会变得非常有竞争力，因为它的开关速度将能达到当下器件的 10 到 50 倍。

对于垂直器件来说，其必须具有的一个特性就是器件边界有着很好的确定性，同时在器件内部中要有很好的电场梯度分布，而横向结构器件

则不具备这些特征。我们利用了原先在垂直硅和 SiC 器件开发上的经验，通过调节 PN 结终端边界扩展的方法做到了这一点。我们同时也在研究可靠的 p 型 GaN 欧姆接触以及在富氮 GaN 上形成的底部 n 型欧姆接触。

我们对我们垂直场效应晶体管器件的多种组合方式进行了评估，提取了多种材料特性，包括电子迁移率、少数载流子寿命和热导率等参数。我们把这些参数应用于我们所建立的器件模型中，并且将热（焦耳）效应的作用也考虑进去，就能制定出我们垂直器件的尺寸的缩放规则。这为我们确定器件的尺寸和建立成本模型提供了重要的手段。有关从研究 p-n 结器件所获得的知识也给我们开发垂直结型场效应晶体管提供了额外的帮助。

现今，我们这种具有在常开或者常闭灵活工作模式的器件正处于预生产阶段（如图 2 所示）。我们还正在研发常开工作模式的器件，因为它更容易生产。由于缺少对 GaN 进行成熟的、可行的 p 型离子注入和激活方案，我们开发了一种可进行选择性平面外延的 MOCVD 生长技术，它可以用来产生 n-GaN 沟道区和顶部的 p-GaN 栅区，这些都是在 p-GaN 埋层刻蚀出窗口后要进行的工序。

在我们的器件中，p-GaN 埋层区必须与源极相连（在常关器件中）或者与栅极相连（在常开器件中），而不是让其处于悬浮状态。我们还研发了一种插塞（plug）工艺，这样我们就可以在刻蚀后的 p-GaN 表面上来形成欧姆接触。

这是一项已经由 60 多个专利所保护的技术，使得我们可以制备出击穿电压超过 1500V、正向电流超过 5A 的场效应晶体管。就如同所期待的



那样，这种垂直结构的晶体管能在正常工作时或高温条件下不会产生阈值电压得漂移、开态电阻的退化或崩塌，以及漏极电流崩塌减小等现象。我们的器件具有 4kV 以上的击穿电压和 400A 以上驱动电流的能力，使它可以获得众多的市场应用（表 1 列举了一些常规的细分市场和应用于这些市场的半导体技术）。

除了这些应用机会之外，我们也打算涉足电力供应市场。将会通过利用我们的 Zolt 品牌，来创造出世界上最轻、最小、也最有效率的笔记本电脑充电器（如图 3 所示）。这些产品的核心部件就是受到我们专利保护的专有核心系统（谐振开关拓扑）及其组件技术。

我们公司的下一步计划包括了和 GaN 体衬底供应商来一起工作：进一步提升衬底的质量；降低 GaN 体晶圆的成本，以及很快地实现 4 英寸衬底的生产。我们与器件相关的工作包括：开发更高的电流能力；为数据中心和太阳能应用来设计具有更高功率的电子系统；开展对器件可靠性更为深入的研究，以证明在同质衬底上制作的垂直结构晶体管可以满足汽车市场的标准。☞

表1. 功率电子细分市场和半导体技术。

	Power Supplies*	Solar	EV	Wind	Motor Drive	UPS/Grid/ Rail/Ship
Voltage (V)	600-1200	600-1200	600-1200	1200-3300	600-1200	1200-3300
Current (A)	0.5-20 A	1-75 A	50-200 A	100-200 A	2-100 A	100-400 A
Devices in Systems Today	Si MOSFET Si PN SiC SBD	Si MOSFET Si IGBT Si PN SiC SBD	Si IGBT Si PN	Si IGBT Si PN	Si IGBT Si PN	Si IGBT Si Thyristor Si PIN

用于未来集成电路的纳米线 FET

为了能跟上摩尔定律的步伐，硅代工厂可能会在 5nm 节点引入锗和 III-V 族纳米线 FET。

Richard Stevenson

我打赌在你关上大门之前，你会检查随身必备的物品：钥匙？在，钱包？在，智能手机？

如果你忘记了手机，就一定会再进门去找。我猜你首先会去看充电器，因为有很大的可能性手机还连在上面充电，来获得这一天所需的电量。

这个场景描述了我们对于智能手机又爱又恨的态度。我们喜欢智能手机在无时不刻地为我们提供娱乐和通讯，但是也对其电量的快速下降而感到烦心。

因此，如果智能手机制造商能推出功能更为强大的手机来吸引消费者们购买的话，那么它在电池的使用时间上必须不能妥协。这就意味着其中的微处理器在增加晶体管数量来提高计算能力的同时，其耗电量不能超过其前代的产品。

自从硅工业诞生以来，就通过使用更小尺寸的、功耗更低的器件来推动晶体管数量的增加。晶体管的小型化可以使其工作电压更低，由于器件的功耗与其工作电压呈四次方关系，所以器件小型化是很有意义的。

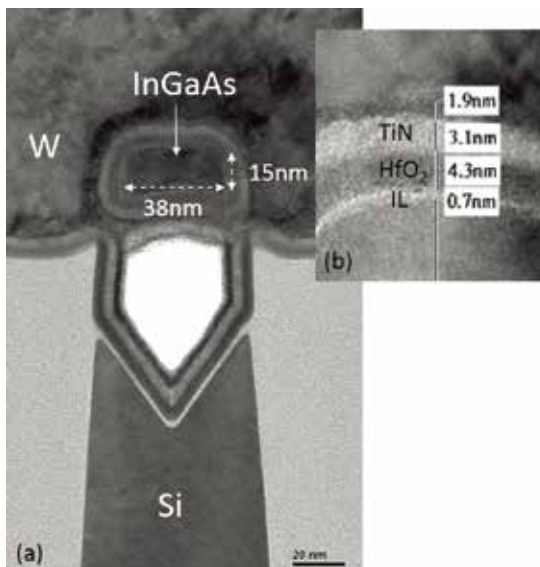
不幸的是，如今要在维持性能不变的前提下降低硅 MOSFET 的工作电压将会更加的困难。这个拦路虎促使人们对其他类型器件的兴趣正在上升，这些器件的沟道使用了高迁移率材料来制造，例如锗和 III-V 族半导体材料。这些器件要比对应的硅器件有着更低的工作电压，同时要保持它的工作性能。

国际电子器件会议 (IEDM) 是一个发现非硅基 MOSFET 最新发展的地方。最近一次的 IEDM 会议于 2015 年 12 月 7-9 日在美国华盛顿举行。在会上报导了一系列新颖的纳米线 FET，

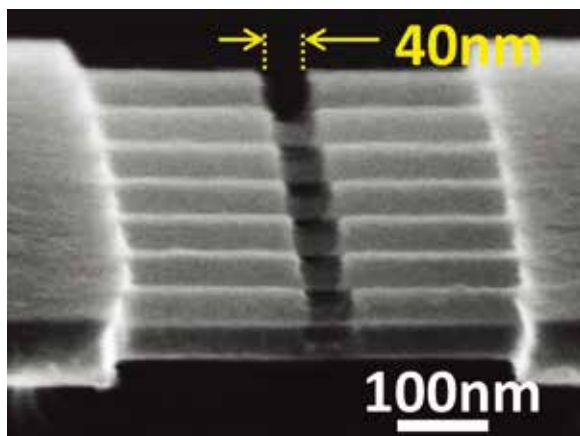
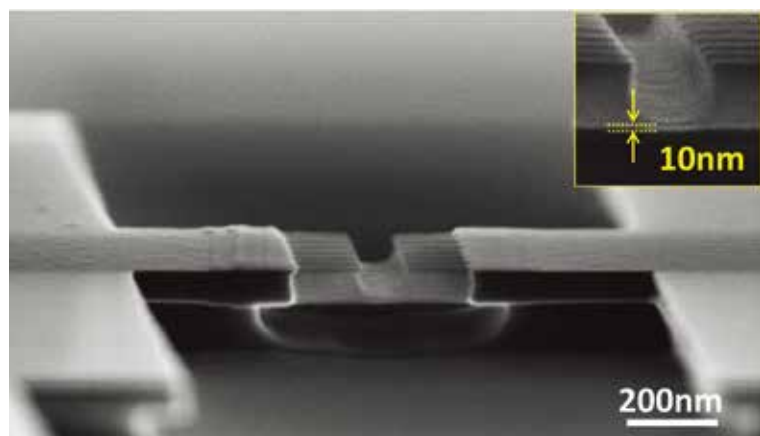
这些器件有望替代目前最新的硅基 FET，即带有凸出鳍式结构的三维器件。在 IEDM 上，imec 报告了他们在 InGaAs 纳米线 nFET 上的最新成果。来自 Purdue 大学的 Peide Ye 宣布了使用锗纳米线 nFET 和 pFET 制成的 CMOS 倒相器。来自新加坡的一个团队在非常薄的缓冲层上制备了 III-V 族纳米线的 pFET 和 nFET。

作为 finFET，硅以及非硅纳米线 FET 的开发者，欧洲微电子中心 imec 在评估所有这些技术的发展前景上处于一个很重要的地位。

imec 逻辑部门的副总裁，Aaron Thean 在接受《Compound Semiconductor》杂志的采访时表示，他预计硅 MOSFET 在 10nm 和 7nm 节点时仍然会占据主导地位，并且可能会引入 SiGe 沟道。Thean 表示：“在这之后情况我们还不能确切地给



由imec领导的团队制造的InGaAs纳米线FET，是在底部V形槽中进行材料生长随后再将其刻蚀掉。



Peide Ye' 的团队已开发出一种工艺来制造锗纳米线nFET和pFET，并利用它们来制作倒相器电路。

出预测”。“静电”控制的退化效应会引起漏电流的大幅上升。“已经证明，在三重栅极的结构中，顶部栅极具有静电控制能力，但是鳍的高度越高，该栅极距离鳍的底部就越远”。

为了提升对静电的控制能力，在 5nm 节点就必须采用纳米线晶体管器件结构。在这种结构中，栅极将沟道全部包围。imec 的研究人员正在评估这种硅纳米线晶体管的性能，同时他们也在研究 III-V 族 nFET 和锗 pFET 的性能。对于所有类型的器件，研究的内容都包括如何能在世界领先的代工厂中以高良品率、大规模地制造包含 p 型和 n 型器件的集成电路。

如果这些芯片制造商准备在 2030 年之前转用非硅类型的沟道材料，那么它们必须能开发出相应的工艺用来在直径为 300mm 或更大的晶圆上来制造器件。这是一项十分具有挑战性的工作，因为硅和其他替代性沟道材料在原子间距上有着显著的差异。因此，当 III-V 族或者锗材料直接沉积在硅衬底上时，会在外延层中引入应变，进而导致器件产生严重缺陷，足以损坏器件。

在 imec，研究人员经过数年的努力已经开发出一种技术，可以用来在硅衬底上制作形成高质量的 III-V 族和锗器件。在使用非硅沟道制备 FinFET 方面已经有了一些进展，这将成为制备纳米线晶体管的基础。

这种制造过程首先是在常见的硅晶圆上制作沟槽开始的，即具有浅沟隔离结构的特征。在这种经加工的衬底上形成了很多硅沟槽，其间由氧化硅区隔开。之后将硅刻蚀掉，在其底部形成 V 形槽 (groove) 结构。如果直接在 V 形槽中沉积 InP 就会产生很多缺陷，这是由于 InP 与硅有着 8% 的晶格失配。然而，这些缺陷——其原

子的错失面约与晶圆表面成 45 度角——它会槽的侧壁终止，这样就能够晶圆表面附近生长出高质量的 InP 晶体材料。

InGaAs 生长在 InP 柱体的顶部，之后 InP 将被去除，之后制备栅极叠层，形成栅长为 50nm 的纳米线 FET。

在 2014 年，这个团队在《Electron Device Letters》杂志上上报导了这种工艺的早期成果。此后，通过与 ASM 强有力的合作，在栅极叠层上又取得了一些技术进展。

Niamh Waldron 是 imec 的首席工程师，同时也是发表在 IEDM 上论文的第一作者。她相信这种新器件标志了一项重大的技术突破，因为这种 III-V 晶体管与在同质衬底上制作的硅晶体管具有一样好的工作性能。

更令人印象深刻的是，这种工艺已经可以利用代工厂的 300mm 生产线设备。Waldron 表示说：“你总是会担心工艺中的损伤、外延中的缺陷，以及你是否可以坚持到获得成品”。

她强调，从栅极跨导的角度来看，这种纳米线 MOSFET 的性能与 III-V 器件是相当的。而跨导是反映沟道迁移率的指标，imec 器件在工作电压为 0.5V 时，其跨导可以达到 2200 $\mu\text{S}/\mu\text{m}$ ，而 Intel 的 14nm finFET 的工作电压则是它的 2-3 倍。

这个晶体管的另一个优势在于其亚阈值电压的摆幅，这反应了晶体管在开、关切换性能上的质量。

亚阈值电压的摆幅在降低集成电路的工作电压中起到了关键的作用，而且工作电压的降低又会降低功耗。但是在降低电源电压时而又保持阈值电压不变，就会减小流过器件的电流。为了解决这一问题，最直接的解决方案就是同时缩减电

源电压和阈值电压。但是阈值电压的降低却又会增加漏电，由此更为现实的解决方案就需要器件具有更为陡峭的亚阈值摆幅，这样才能使晶体管在有着很低阈值电压的同时又能使其漏电流水平保持不变。

对于 MOSFET 而言，载流子的统计规律决定了能达到的最低亚阈值摆幅数值为 60 mV/dec。而 imec 器件的远比这个要高，达到了 110 mV/dec。所以，如果要把这样的器件应用于 IC 中，其亚阈值摆幅数值必须下降。然而，事实证明这个问题并不是特别难解决。在 2014 年，该团队在《Electron Device Letters》杂志上发表文章，4 nm 的 InGaAs 纳米线器件就可以达到约 65 mV/dec 的亚阈值摆幅。Waldron 表示说：“但是我们并没有获得好的开态性能”，“现在所有的问题是要能同时获得良好的开态和关态性能。因此我们必须跳出这个圈子，来使我们可以同时达到这两个目标。”

Thean 相信 5 nm 或者更小的节点，即使能将 III-V 和锗纳米线 FET 引入到代工工厂的生产工艺中，它们也不可能完全替代硅基的产品。他预计由于对漏电问题的担忧，这三种器件将会处于共存状态：“锗和 III-V 族器件很难做到 10 nA 以下的漏电，并且很难想象在未来人们不会关心漏电流的问题”。

全部采用 III-V 族材料的方法

由新加坡国立大学 (NUS) Yeo Yee-Chia 和 Gong Xiao 领导的团队与南洋理工大学 (NTU) Yoon Soon-Fatt 的团队合作在 III-V 族 nFET 和 pFET 上进行了开创性的工作

NUS 的 Gong Xiao 表示：“InGaAs 在制造 nFET 上有着非常大的优势，然而它并不适用于 pFET，因为它的空穴迁移率很低”，“因此我们需要用另一种材料来制造 pFET。在这项工作中我们选择了 GaSb，它具有更高的空穴迁移率”。

工程师们在衬底和器件层之间插入了一个缓冲层以使在硅衬底上可以制造这些晶体管。这种技术方法是众所周知的，但是这个新加坡团队所使用的缓冲层厚度远比一般的要小，大约只有 150nm 厚，而一般典型值大约在 1 μm 左右。

这项工作的另一个显著特点是它的 MOSFET 结构。根据 Xiao 的说法，如果使用单根纳米线来替代鳍的话，在传输电流上就必须做出妥协。因为可用来承载电流的材料体积变小了。“这就

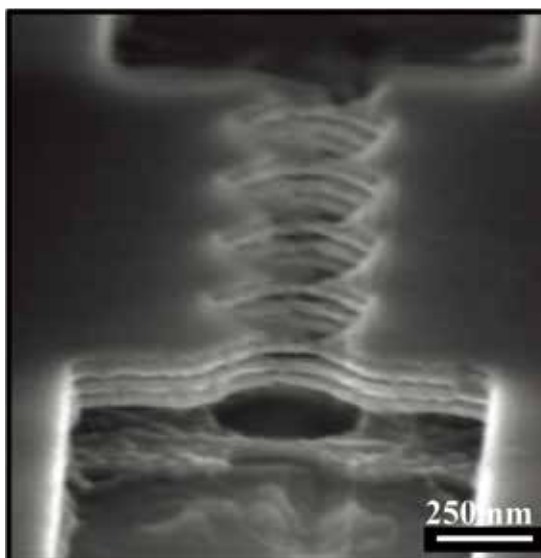
是必须将纳米线堆叠起来的原因，即为了能在有限的占位面积上来传输高的电流。在这项工作中，我们不仅实现了 InAsnFET 和 GaSbpFET，还将他们垂直堆叠在一起”。

这种薄缓冲层技术由于减少了材料的使用量而能增加工艺设备的产量，可以显著地节约成本。这项技术是由 Yoon Soon-Fatt 的课题组开发的，他们硅基底上采用 6° 倾斜切割的绝缘体上锗晶圆为起点，通过 MBE 沉积了 70nm 厚的 GaAs 层，之后又沉积 50nm 厚的 GaSb 层。

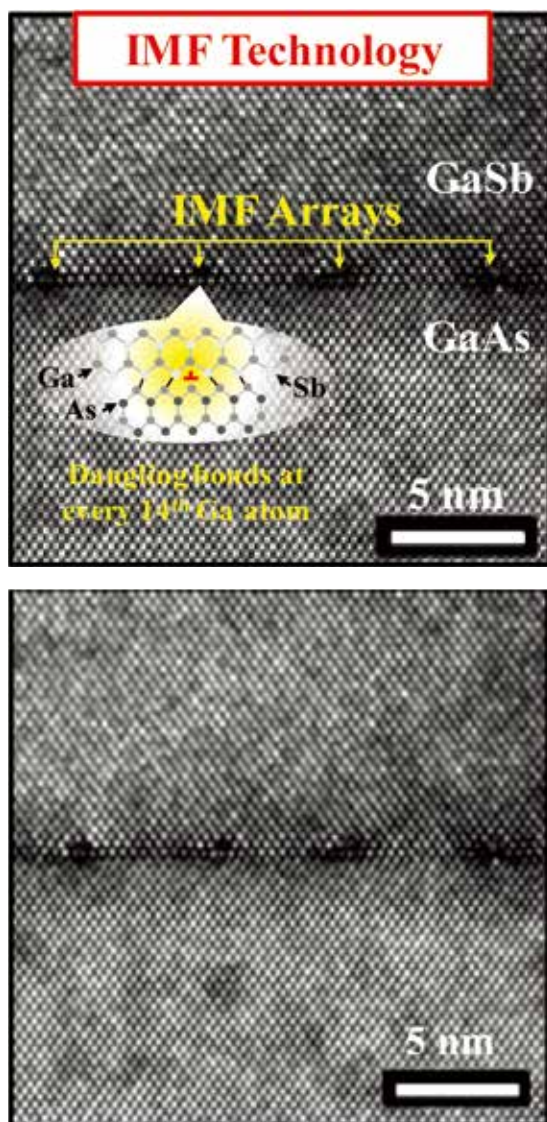
Xiao 这样解释：“采用合适的生长技术，在每 14 层锗原子位置上来形成悬挂键，用以调节 GaAs 与 GaSb 之间较大的晶格失配”。由锗悬挂键而产生的晶体缺陷将会被限制在界面上，离开界面 10nm 的区域就可以生长出高质量的材料。

该团队利用这种晶圆来制造纳米线 FET，在 0.5V 的工作电压下，500nm 沟道 pFET 和 20nm 沟道 nFET 的亚阈值摆幅分别是 188 mV/dec 和 126 mV/dec，而跨导的数据则没有报导。

这种器件的性能还有待于进一步的提高，这是可以理解的，因为它还处于初始研发阶段。Xiao 表示目前的他们的工作计划包括有：改进栅极叠层以增加驱动电流，以及提高外延晶圆的质量。首个这种类型的器件是在表面粗糙度为 2.6nm 的晶圆上制造的，最近这个来自 NTU 的团队改进了生长工艺，将表面粗糙度降低至 0.5nm，Xiao 表示在未来他们将会采用这种晶圆来进行器件制造。



来自新加坡的研究者追求的垂直堆叠纳米线，在相同占位面积情况下可以增加电流密度。



高分辨透射电子显微图像揭示了界面失配缺陷是如何来解决在锗膜上生长III-V材料引起的应变问题。

把研究转向锗

选择能制造 nFET 和 pFET 的恰当的材料是件很困难的事情，Ye 对于这个问题思考了很多。他在过去的 15 年当中一直致力于 III-V 族晶体管，最近他将研究领域扩展到了锗基器件上，因为锗是一种更加容易进行加工的材料。

利用锗很容易制备出 pFET，但是很难制备出 nFET。因为在费米能级钉扎 (pinning) 上会遇到问题，使其很难形成良好的 n 型接触。

Ye 解释道：“两年半以前，我的一个博士生使用一种极其简单的方法，他尝试使用高浓度掺杂来制作 n 型接触”，“我们偶然间将电流强度比通常的水平增加了一个数量级”。

这项成果促成了首个平面器件 CMOS 工艺的出现，随后是第一个锗 CMOS 的 finFET。如

今，他们在最近的 IEDM 上宣布了第一个基于纳米线的锗 CMOS。使用这项技术的 nFET 的亚阈值摆幅仅有 64 mV/dec，跨导为 1057 $\mu\text{S}/\mu\text{m}$ 。将其与 pFET 结合制造出的倒相器电路的工作电压为 1V，最大的电压增益为 54V/V。Ye 强调，这个增益与时下最先进的硅纳米线 CMOS 倒相器电路相接近，并且表示他希望能将工作电压减低至 0.5V。

高分辨透射电子显微图像揭示了界面失配缺陷是如何来解决在锗膜上生长 III-V 材料而引起的应变问题。

在将 Ye 的锗 FET 引入到代工厂之前，它的尺寸还应该缩小——不过并不需要太多。例如，如果它要从 7nm 节点开始引入的话，纳米线的宽度需要从 10nm 缩小到 6nm。

Ye 的工艺有一个非常吸引人之点是它并不需要外延步骤。他们团队使用的是 Soitec 制造的 200mm 硅晶圆，之后在上面增加绝缘层和锗层。在世界领先的代工厂中，可以轻易地将这个工艺移植到 300 mm 晶圆上。

Purdue 大学的工艺和适用于大规模生产工艺之间的一个显著的差异就是在光刻步骤上。Purdue 大学的团队使用电子束光刻，而不是自对准技术，这将会导致产生更大的电容，会影响电路的工作速度。

相比之下，imec 的所有工作都能与代工厂加工设备相兼容，这会加速工艺从研发到准备投产之间的进程。在此 III-V FET 研究人员所担心的最大的问题是，是否具有足够低的器件缺陷水平。

Thean 表示：“我们已经证明了我们的器件已经具有足够低的缺陷水平”，“但是我们仍然不是很清楚它是否能满足未来高密度集成电路的发展要求”。下一步努力的方向是开发一种先进技术用于缺陷的测量和量化，并且找出缺陷与器件以及电路良品率之间的关系。

在 III-V 族和锗纳米线 FET 在硅代工厂中开始正式生产之前，还需要引入进行外延生长和钝化步骤的合适工艺设备。

大约在五年以后会进入 5nm 节点，非硅基的纳米线需要加快发展才能获得足够的影响力。不过，即使这种器件错过了这一时机，它们仍然可以在商业上获得成功。Thean 这样解释道：“如果你可以将这些器件与硅实现共同集成，那么你可以将它应用于 RF 或者其他领域”。

用室温键合技术制造多结太阳能电池

研究者们用一台商用晶圆键合设备将一对双结太阳能电池芯片键合为一体。

根据来自中国的一个科研团队的报告，他们首次将室温晶圆键合技术用于制造效率超过 40% 的四结太阳能电池。

研究者们相信，晶圆键合技术在制备四结或多结的太阳能电池上是一个非常吸引人的选择，因为它提供了一种简单的技术途径来应对各个电池中不同材料的晶格常数的匹配问题。

传统的晶圆键合技术总是采用提高温度和加长键合时间来确保其键合界面具有高机械强度和低电阻的特性，但是这两种手段都会降低器件的性能。晶圆之间不同的热膨胀系数会导致它们产生弯曲和空洞缺陷，并且高温退火还会使内插在子电池之间的高掺杂隧道结中的掺杂原子产生扩散。

由苏州纳米技术与纳米仿生研究所领衔的中国科研小组利用了室温晶圆键合技术完美地解决了这些问题。他们利用三菱重工的晶圆键合设备将 InP 衬底上的 InGaAs 和 InGaAsP 电池与 GaAs 衬底上的 GaAs 和 GaInP 电池键合为一体，在该键合设备中配置有一个氦离子枪和高真空的反应室。

他们先用氦离子枪产生的低能氦离子束扫描这两种晶圆，将其表面活性化并产生悬挂键，然后施加 5000N 的力将这两种晶圆表面进行键合，产生一种四结电池的一体化结构。

研究者们为了避免在键合表面上产生污染问题，整个操作都在高真空室里完成。这种预防措施可以说是非常重要的，因为空气中的小颗粒将会在键合界面上造成大面积的空洞和缺陷，从而降低了电池的性能。两个双结的外延层都是用 MBE 工艺制备的，课题负责人 ShuLong Lu 向我们解释道：这种 MBE 生长技术非常适合制备高掺杂的隧道结，但目前 MOCVD 在制备四元合金 InGaAsP 材料上还是占有着优势。

中国团队的研究工作还包括了对太阳能电池效率的模拟，模拟过程考虑了三种损耗机制：辐射损耗、热损耗和传输损耗。模拟计算结果表明，如果将两个具有最高能量的电池，也即将 InGaP 电池和 GaAs 电池的禁带宽度分别设定在 1.91eV 和 1.42eV，且其余两个电池的禁带宽度分别设定为 1.01eV 和 0.56eV 的情况下，单位太阳光强度下太阳能电池的整体效率有望达到 45.4%。

然而，根据研究者的推论：要制备这样具有不同禁带宽度且晶格匹配的材料是不现实的。故他们采用了 InP 基材料衬底的两个晶格匹配电池组合：一个能量为 1.07eV 的 InGaAsP 电池和一个能量为 0.74eV 的 InGaAs 电池。在同样强度（单位太阳光强度）的光照条件下，采用这种结构电池的最高效率可达到 39%。



室温晶圆键合技术可以制造具有更高转换效率的太阳能电池，从而提升了聚光型光伏技术的竞争力。

在外延层生长完成后，研究者们用透射电子显微镜仔细地截面分析了键合界面的质量，并没有发现有任何的空洞、螺旋线位错或平面型缺陷的存在，而这些缺陷问题在晶格不匹配的外延生长中是经常会发生的。

这种器件采用 AuGe/Ni/ Au 作为前电极，用 Au/Zn/ Au/Cr/ Au 作为背电极，还淀积有一层 Ta₂O₅/TiO₂ 抗反射薄膜。测量电池的短路电流与其电压间的函数关系，所得到的结果说明该太阳能电池在单位强度太阳光下的效率达到了 31.6%。如果将太阳光强度提升到 230 个太阳，那么电池的转换效率将可达到 42%。

通过优化电池的结构，研究团队对打破 46% 的多结太阳能电池转换效率记录的前景非常乐观。要优化电池结构则涉及到精细调整某些薄膜层的厚度，在 Soitec、CEA-Leti 和 Fraunhofer ISE 等机构所制作的创记录的器件中，InGaP 和 GaAs 层的厚度分别为 650nm 和 1400nm，而中国研究团队所制作光电池中的 InGaP 和 GaAs 层厚度则分别为 480nm 和 800nm。

改进底部电池的质量也有利于提高整体电池的效率，而中国研究团队底部电池的开路电压分别只有 0.54eV 和 0.13eV，低于最高效率记录电池的开路电压值。据推测，相对于 MOCVD 来说，MBE 较低的生长温度可能会导致缺陷态和深能级中心的产生。

Lu 表示，他们的研发团队正在努力通过优化材料的生长和光电流的匹配来进一步优化器件的性能。

P. P. Dai et. al. Appl. Phys. Express 9 016501 (2016)

降低黄光激光器件的阈值电流

采用一种脊型波导结构可降低 BeZnCdSe 基黄光激光器件的阈值电流

两名日本研究者通过采用一种脊型波导结构成功地降低了 BeZnCdSe 基黄光激光器件的阈值电流，这项改进将有助于这种激光器件的商品化，能使其在医疗领域获得应用。

文章的通信作者，日本产业技术综合研究所 (AIST) 的 Ryoichi Akimoto 对此解释道：“在视网膜治疗上常使用黄色激光，例如氩-氟气体激光和基于非线性波长转换的激光”，“激光二极管由于具有低成本、低功耗和易操作等优势，也可在这种新兴领域中获得应用”。

然而，为了达到这一应用目标，就必须提高激光二极管的输出功率。Akimoto 和在 AIST 与上海理工大学同时任职的 Jijun Feng 合作，制备出了发射功率为几毫瓦的激光器件，而实际应用所需要的功率需要达到 100 mW 到 1W。要制备发射波长在 560nm 到 590nm 之间的黄光激光二极管是一项十分具有挑战性的工作，因为氮化物基激光器件难以覆盖这个波长区域，InGaP 基激光器件也不可能实现，最有希望的是基于 ZnSe 材料系统，它可以通过掺入铍来增加激光器件的寿命。

添加镉元素可以使激光器件的发射波长向长波方向移动，但是在 GaAs 衬底上生长 ZnCdSe 量子阱会在材料中引入显著的应变。

选用例如 ZnTe 或者 InP 等其它类型的衬底，可以实现更长波长的激光发射。但是为了实现能在室温下发射，需要采用光泵浦 (photopumping)，而采用电泵浦的激光发射只能在较低的温度下才能实现。

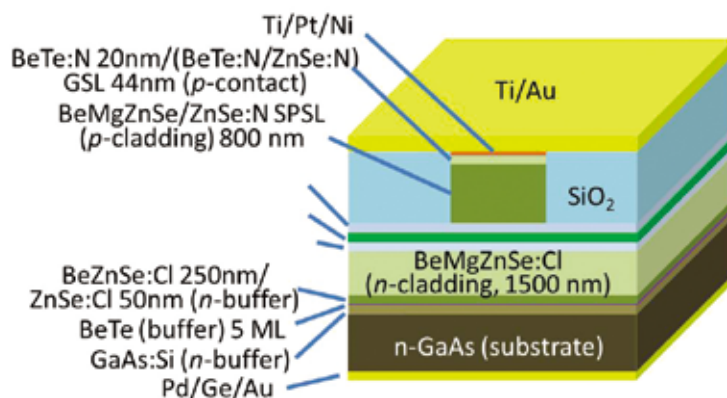
在 2012 年，Akimoto 所在的团队宣布 BeZnCdSe 有望成为制造黄光激光器件的材料，它与 GaAs 衬底之间的晶格失配较小。在过去的几年中，采用这种四元合金材料制造量子阱的波导增益型绿光激光器件已经获得了超过 50mw 的输出功率，具有脊型波导结构激光器件的阈值电流可以做到小于 10mA。

在 Feng 和 Akimoto 最近发布的黄光激光器件中，脊型波导结构是实现低阈值电流的关键。其中一个发射波长为 567nm 激光器件的阈值电流是 0.51 kA/cm^{-2} ，而另一个 563nm 激光器件的阈值电流是 0.82 kA/cm^{-2} 。

研究者们使用 MBE 的方法来制备这种激光器件。首先是在一个 III-V 族化合物生长室内沉积 500nm 厚的缓冲层，之后转移到 II-VI 族化合物生长室中，这样，就可以将一个 BeZnCdSe 单量子阱层与两个 BeZnSe 波导层形成一

种三明治结构。然后将由 n 型 BeMgZnSe 覆盖层以及一对 BeMgZnSe 层和 ZnSe:N 层形成的短周期超晶格 p 型覆盖层进行包覆。

在外延晶圆上制作的这种脊型波导激光器件的台面宽度是由电子束光刻制作完成，之后淀积金属层并且利用剥离 (lift-off) 工艺来制作 Ti/Pt/Ni 金属叠层。这个金属层同时也充当了后续干法刻蚀过程中的掩膜，并形成与 p 型层的欧姆接触。采用电感耦合等离子体 (ICP) 刻蚀出深度为 900nm 的槽以产生波导结构，随后用等离子体增强 CVD 工艺来填充 $2\mu\text{m}$ 厚的 SiO_2 层，再采用化学机械抛光 (CMP) 形成一个平整表面，并去除掉残余的 SiO_2 以暴露出金属掩膜层，最终利用光刻手段在金属掩膜层上形成电极。



脊型波导结构能使黄光激光器件实现毫瓦级的连续波输出。

使用劈裂 (Cleaving) 方法可以制造具有不同共振腔长度的脊型波导激光器件，使用四对 SiO_2 和 ZrO_2 材料层所形成得介质叠层可以使激光端面的光反射率达到 90% 以上。

在制备 657 nm 波长激光器件的晶圆上，最好的结果来自一个 $7 \mu\text{m}$ 宽、 $300 \mu\text{m}$ 长共振腔体的激光器件，它的阈值电流是 10.8 mA，阈值电压为 8.4 V。而对于 563nm 波长激光器件，其最好的结果也来自于具有 $7 \mu\text{m}$ 宽、 $300 \mu\text{m}$ 长共振腔体的芯片，它的阈值电流和阈值电压分别为 7.4 mA 和 8.48 V。

这两名研究者的目标是提高激光器的输出功率及其稳定性，根据 Akimoto 的说法，商用化器件的输出功率需要超过 100mW，并且其可靠性要大于 5000 小时。

J. Feng et. al. Appl. Phys. Express 9 012101 (2016)

载流子寿命揭示了 LED 光效下降的多重诱因

对载流子寿命的分析揭示了在高电流密度下载流子泄漏占主流时，载流子的离域（delocalisation）效应是引起 LED 光效下降的起因。

中国清华大学研究小组最近的研究成果为俄歇效应不是 LED 光效下降主要诱因的观点提供了新的证据。通过对载流子寿命差异的分析，研究人员发现在较高电流密度下载流子泄漏形成的载流子离域（delocalisation）效应是产生光效下降现象的起因。

由于俄歇复合和载流子泄漏这两种过程对于载流子寿命的影响完全不同，由此来自清华研究小组的方法可以对这两种过程进行区分。俄歇复合会增加复合速率，因此会降低载流子寿命，但是电子泄漏对载流子寿命没有影响，它只会降低活性区的载流子浓度。

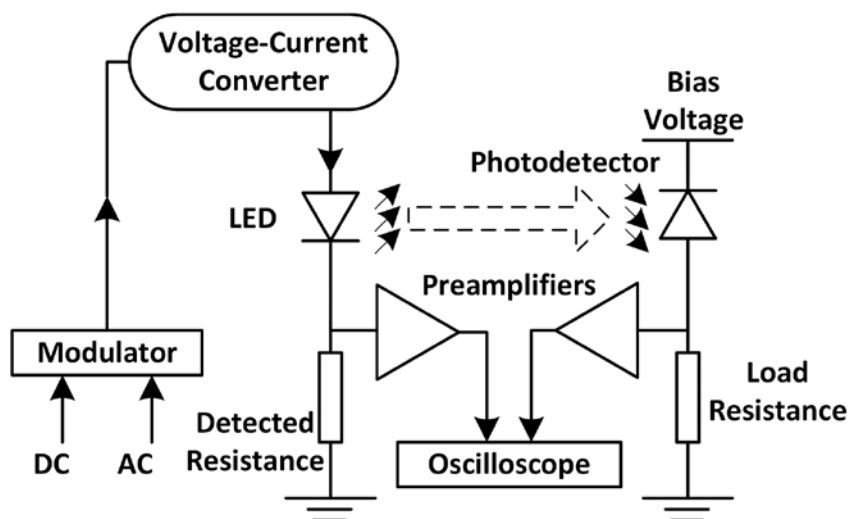
他们工作最为重要的贡献之一就是实验装置实现了最优化，从而能以更高的精度来测定载流子的寿命。在掌握了这些技术信息后，研究小组对外量子效率及载流子寿命的电流函数曲线进行了拟合，通过应用著名的 ABC 模型，获得了对光效降低影响因素的进一步认识。

通过分析载流子寿命的差异来推测光效降低的起因并不是一个新的设想。早在 2013 年，来自芬兰 Aalto 大学的 Markku Sopanen 研究小组就已经采用过这种方法，进行了微秒级精度的载流子寿命测量。他们的测量结果比中国研究小组的结果要大一个数量级，而中国小组认为这种测量值上的差异可能是由芬兰小组所采用高速探测器的寄生电容所引起。

Philips Lumileds 公司的两位研究者也通过分析载流子寿命的差异来研究光效降低问题，在假设 100% 的注入效率的条件下，通过载流子寿命数值来确定载流子的浓度。

为了排除因为电阻和电容引入的相移问题，将一个负载电阻和光探测器进行串联。由于所得到的信号强度太弱，达不到示波器所需的信噪比，因此在探测电阻端加入了一个前级放大器，同样在电信号负载电阻端也加入一个前级放大器，以消除因使用前级放大器而造成的相位延迟问题。

而清华大学论文的作者 Lia Wang 认为这种方法是存在缺陷的，因为由此确定的 A、B、C 三个系数有着很大的宽泛性，“根据这些系数是不可能来正确地计算出外量子效率和载流子寿命的”。



Wang 和他的合作者在商业化的绿色和蓝色 LED 上进行了他们的测量，用一个交流信号来调制直流注入电流，并比较了 LED 电信号输出和光信号输出间的相位差。测量发现在 2mA 电流时蓝色 LED 的载流子寿命是 103.2ns，而绿色 LED 的载流子寿命是 198.7 ns。如果电流增加到 50mA，蓝、绿 LED 的载流子寿命值则分别降至 37.2ns 和 50.8ns。

为了证明俄歇复合不是造成光效降低的主要因素，该研究小组首先假设光效降低仅仅是由俄歇效应所引起，然后他们再尝试对载流子寿命倒数与载流子密度的函数曲线进行拟合，发现完全没有可能拟合出理想的曲线。同样，对外量子效率和注入电流间的函数曲线也无法进行拟合。仅用载流子泄漏来解释光效降低现象也无法得到理想的曲线拟合，而结合考虑载流子泄漏和俄歇复合两个因素所得到的拟合结果将会更糟。所以研究小组提出了另一种损耗机制，即载流子的离域（delocalisation）效应，即是在较高驱动电流下它会使得到达非辐射中心载流子数量增加而导致光效的降低。综合考虑载流子泄漏和载流子离域（delocalisation）效应这两个因素所拟合出来的曲线就非常之理想。

Wang 说道：“我们接下来的工作计划是设计一个新颖的活性区域来降低载流子的浓度”，“以及设计一个超晶格电子阻挡层，使得不仅能够增加它的电子阻挡能力，同时也能增强空穴的隧穿注入”。

X. Meng et. al. Appl. Phys. Lett. 108013501 (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
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	15
M/A Com		www.macom.cn.com/gan	FC, 9

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)
sunnies@actintl.com.hk

Sales Director (销售总监)
Mark Mak (麦协和)
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 (麦协和)
markm@actintl.com.hk
Tel: 852-28386298

China (中国)
Jenny Li (李文娟)
jennyli@actintl.com.hk
Tel: 86 755 2598 8571

Shanghai (上海)
Judy Huang (黄作美)
judyh@actintl.com.hk
Tel: 86-21-62511200

Beijing (北京)
Cecily Bian (边团芳)
cecilyb@actintl.com.hk
Tel: 86-13552621310
86-10-67484833

Wuhan (武汉)
Sky Chen (陈燕)
skyc@actintl.com.hk
Tel: 86-13723739991
86-27-68852360

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

Singapore (新加坡)
Joanna Wong
triplesinternational@gmail.com
Tel: 65-63395596
65-90626227

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

视觉系统设计

VisionSystems China

DESIGN

《Vision Systems Design》杂志是美国领先的媒体品牌，主要致力于报道机器视觉及影像处理系统领域的内容。其深度的技术杂志、投稿邮箱投递的电子快报以及网站内容，每月为全球143个国家的超过94,000名工程师和设计专家提供最新报道，是同类媒体中的佼佼者。《Vision System Design》杂志是机器视觉与自动化解决方案领域非常受欢迎的一本杂志。

《视觉系统设计》在内容方面将以《Vision System Design》为蓝本，同时增加中国机器视觉领域的相关报道，为读者提供机器视觉及影像处理系统领域的技术、设计、应用和市场等诸多方面的最新发展状况，欢迎该领域内的广大厂商积极参与，踊跃投稿及宣传。

《视觉系统设计》的权威性内容是视觉及相关应用领域使用者所关注。

免费索阅



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

