

化合物半导体



• CHINA

季刊 2016年 第1期

未来型IC



硅衬底GaN晶体管



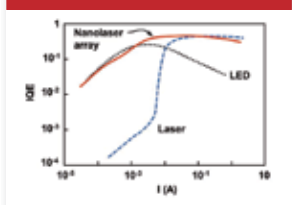
红光LED



功率开关



新型激光器件



单晶圆外延系统



ACT



扫一扫 免费下载电子书

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, 更大的产量和更佳的生产拥有成本。



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 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 **ACT Media Group**

封面故事 Cover Story

- 8 单晶圆外延系统推动功率器件产业发展
Propelling The Power Industry With Single-Wafer Systems
- Sudhakar Raman, Somit Joshi, George Papasouliotis; VEECO INSTRUMENTS

市场 Market

- 4 研发一种未来型的IC
Delivering the future
6 SiC时代到来?
SiC comes of age?

技术 Technology

- 12 硅衬底GaN晶体管突破广泛应用的障碍
GaN transistors Breaking barriers to widespread adoption with silicon substrates
- Tom Kole, MACOM
16 掺镱GaN推进了红光LED的发展
Europium propels the GaN LED into the red
- Yasufumi Fujiwara, OSAKA UNIVERSITY
- Wojciech Jadwisieniczak, Faiz Rahman; OHIO UNIVERSITY
19 纵向GaN晶体管：提高功率开关效率的途径
Vertical GaN: The Pathway To Power Switching Efficiency
- Bryan Bothwell, David Drummond, Manyam Pilla; QORVO公司
- Huili Grace Xing, Debdeep Jena; CORNELL UNIVERSITY

科技前沿 Research Review

- 24 新型照明用激光器件
A better laser for lighting
25 功率器件GaN衬底的优化
Optimising GaN substrates for power
26 采用量子点-阱组合结构来增加绿光LED的效率
Increasing efficiency in the green with a dot and well combo
27 降低栅极中陷阱的密度
Trimming traps in the gate

- 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》中文版(CSC)是全球最重要和最权威的杂志Compound Semiconductor的“姐妹”杂志，亦是中国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

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—为跨国公司与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/光电子、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/photronics, 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

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

雅时国际商业 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



更宽的禁带：提高功率器件性能

随着 SiC 和 GaN 功率电子器件取代硅半导体器件，更宽禁带的材料不久可能会参与市场竞争。最近法国 Yole Développement 公司的一个分析报告，分析了目前宽禁带材料在功率电子方面的应用情况。正如预期，SiC 和 GaN 的性能没有突破性进展。但报告作者，化合物半导体市场和技术分析师 Hong Lin 分析认为，更宽禁带的材料有望为功率器件提供更高的性能。

Ga₂O₃ 功率电子发展

由于具有更宽的禁带，并且有在室温条件下掺杂的可能性，氧化镓（Ga₂O₃）用于功率电子应用的开发正在进行中。

日本公共研发机构 New Energy and Industrial Technology Development Organization（新能源和工业技术发展组织）正在推进新一代功率电子研发，他们为一个叫“氧化镓功率器件基础技术的研究和开发”的项目提供部分资金。该项目的合作伙伴包括东京的一些从事功率转换业务的公司。

研究人员已经首次开发和演示了在单晶 Ga₂O₃ 衬底上的 Ga₂O₃ MOSFET，声称获得优秀的器件性能。他们已经证明，该器件具有很高的基础漏极电流，很大的关断击穿电压，极低的泄漏电流，并且开/关漏极电流比率高，打开了在开关操作过程中功率器件低损耗的大门。事实上，研究人员确信其性能将超过硅、SiC 和 GaN 器件。

Lin 强调，像蓝宝石基底一样，价格便宜的大尺寸单晶 Ga₂O₃ 晶片可以通过熔体生长大规模生产，所以有望实现低成本、大批量的功率器件制造。两英寸的商用单晶晶片市场上可以买到，现在 6 英寸晶圆也有生长。

虽然价格便宜的天然单晶基底对未来功率器件制造有很大吸引力，但是 Ga₂O₃ 的热导率相对较低，对于功率器件的散热挑战很大。“器件设计师将会致力于这个工作，有很多方法除去热量，如减薄晶片以降低热阻。这个问题是可以解决的，但 Ga₂O₃ 仍然需要更多的研究和开发。” Lin 强调，“虽然我们有了概念验证器件，但 Ga₂O₃ 开发处在非常早期的阶段，我们需要许多年才能实现最终产品。”

AlN 功率电子发展

由于市场需求疲软，一些 AlN 基底紫外发光二极管的供应商现在针对功率电子市场开展多元化经营活动。主要公司包括美国的 Crystal IS 和 HexaTech，还有德国的 CrystAL-N。

Lin 说：“AlN 传统上一直用于短波紫外线发光二极管，但市场的增长并没有那么快，所以这些公司一直在考虑将这一技术应用于功率电子。AlN 具有非常大的禁带，有可能被用来制造高性能器件。”

事实上，HexaTech 公司和北卡罗莱纳州立大学的研究人员，以及日本 Tokuyama 德山化学公司、富士电机株式会社和东京农业技术大学，去年公布了第一个基于 AlN 基底的垂直肖特基势垒二极管。

与 Ga₂O₃ 不同，AlN 具有高热导率，能够缓解高功率密度时的散热问题，但是器件的挑战仍然存在。近年来，HexaTech 公司一直在为高压功率器件开发新型掺杂配方。然而，正如 Lin 所断言：AlN 材料掺杂将是我们面临的主要挑战。

更重要的是，AlN 晶片并不便宜。目前 AlN 晶片生产仅是小批量，还没有真正的应用驱动需求，成本相对较高。现在 AlN 器件处在概念验证阶段，研究人员正在努力提高器件的性能。

Lin 说：“2000 年，我们看到第一个 SiC 二极管，它花了十五年时间才成为商用器件。接下来研究人员需要证明：他们可以制造具有良好性能的 Ga₂O₃ 器件和 AlN 器件。如果行业参与者发现市场上现有的器件不适合某个应用，我们将看到这些新材料可能有很多机会。”

赵雪芹

研发一种未来型的 IC

尽管 III-V 族器件与 CMOS 器件的集成整合工作还处于起步阶段，但一个来自新加坡 -MIT 的联合项目 SMART-LEES 所研发的新颖 IC 即将进入市场化应用阶段。

来自 Compound Semiconductor 杂志的报道，新加坡 -MIT 的联合技术研发 (ART) 中心在开发低功耗电子器件系统时，在一开始就决定要对这项技术进行根本性的改变。

随着摩尔定律的预言即将失效，新加坡政府和 MIT 在 2012 年 1 月建立了联合研究项目 SMART-LEES，计划在 III-V 族和硅材料上制作具有全新结构的集成电路。

根据 MIT 教授 Eugene Fitzgerald 的说法，他们仍然会优先利用硅材料来进行这种革新。

Eugene Fitzgerald 说：“硅片代工厂具有 CMOS 生产的能力，我们不能期待这些工厂仅仅为了迎合大学的科研需求而去改变他们原有的生产工艺”。

“此外，如果有人能够研发出一种新型器件，目前也仍然很难将它们移入到基础生产中去”。

他补充说道：“所以从资本的观点来看，我们十分清楚，为了一种新器件而去建设全新的生产设施是一件毫无意义的事情”，“所以在项目的一开始我们就提出要将 III-V 族材料融入到硅器件的成套工艺设计工具中”。

基于这种理念，SMART-LEES 项目是由 MIT、新加坡国立大学 NUS 和南洋理工大学 NTU 联合进行，其研究人员已经和众多工业合作伙伴一起来探索解决这个问题的办法，

该项目中最为主要的合作伙伴有：Global Foundries、新加坡、位于日本的 Tower Semiconductor-Panasonic 合资企业、TPSCo 等多家公司。

与此同时，德国的 Aixtron、英国的 IQE，澳大利亚的 ECG 以及日本的 Samco 等公司都先后加入到了该项目所对应的产业链中。

项目还受到 IQE、荷兰的 Lumileds，美国 Analog Devices 等的广泛支持，使得 SMART-LEES 项目具有了更强



LEES拥有一间能够处理200mm晶圆片的洁净室，装备了外延和微制造设备，还有表征分析设施可以提供晶圆和器件的检查和析。SMART-LEES项目的目标是开发一种全新的集成电路，当前的研究进程正在逼近这一目标。

的影响力。Fitzgerald 强调说：“我们专门为各利益相关者建立了董事会，他们很希望能看到该项目的成功”。

他补充道：“由于在材料、器件和电路设计上会相互影响，因此我们将从这三个领域的研究部门整合成为一个研究团队”。此外，“因为我们不可能对整个 CMOS 工艺流程进行改动，所以我们开发了一种“模块式加工”方法”。

研究人员利用合作伙伴的 CMOS 前道生产工艺来制作 200mm 硅晶圆，还利用了目前的 CMOS 设计工具，在新加坡 SMART-LEES 项目的 200mm 晶圆加工工厂中来开发这种新型的 IC。

该项目工厂拥有两台 AIXTRON CRIUS 反应器和原位光学监控器，在那里已经可以对所增添的 III-V 族器件进行加工。

然后将加工完成后的晶圆再送回到代工厂中进行后道工艺，来将芯片上的 III-V 族器件和硅 CMOS 器件进行电学上

的互连。

Fitzgerald 说道：“我们已经具备了 LEES 项目所需的工艺条件，因此我们能够加入任何类型的 III-V 族材料，但还需要做到一点，即看起来这种晶圆就好像是从来没有离开过代工厂一样”。“所返回的晶圆上具有介质和接触金属区，使得代工厂可以直接进行后道工艺的加工，就好像它从来没有离开过代工厂一样”。

同时他还补充道：“实际上这样做的主要目的是为了进行一种创新，使之能够精确地迎合未来制造的需求，我们的创新工作主要是围绕在温度和工艺处理方面，其结果都已经达到商业化生产的要求”。

快速的进展

在 2012 年，LEES 项目组开始研究在硅衬底上 GaN、GaAs 和 InP 层的生长技术，但是正如 Fitzgerald 所指出的那样：该项“研究仍在进行中”。研究人员目前正致力于 InGaAs 和 GaN 材料的研究，准备将 InGaAs HEMT、GaN HEMT 和 GaN LED 集成整合进硅基工艺设计平台中去。

MIT 的教授解释道：“我们已经掌握了整套工艺流程，并拥有了齐全的工艺设计工具，包括对晶格失配的工程化处理办法，例如纵横比的确定和缓冲层的变形等技术”。“我们做了很多的外延和晶圆键合上的工作，基本获得了能够制作

我们所想要器件的工程化衬底”。

他补充道：“我们先在衬底上进行 CMOS 工艺加工，然后再制备 III-V 族器件……，最后再将它们送回到代工厂”，“这样我们就能够首先设计电路，并将它作为真实代工工艺的一部分，但要实现这一点并不容易，因为代工厂并没有为此进行专门的研究，它需要一个独特的工艺”。

显而易见的是，LEES 生产模式的主要作用是能够以更快、更容易的方式将这种新型集成电路推向市场，但是究竟何时能够在市场中真正见到这种 IC 器件？我们坚信将不会太久。

根据 Fitzgerald 的说法，明年他们将能研制出测试芯片，他很期待着在未来两三年内能看到这种新颖的原型器件能够真正进入实用阶段。

Fitzgerald 还说道：“我们已经非常清楚如何来将 III-V 族器件制作在硅晶圆上，但是当我们实际开始加工后，才发现如何将 CMOS 转移到这种工程化衬底上是一个完全未知的技术领域”。“但是现在这种晶圆已经能够在我们的项目工厂和代工厂之间来回进行加工处理，正是由于有足够大的资金支持，才能够让我们的公司和研究人员能够以这种本来是完全不现实的方式来进行合作”。

他还总结道：“不久之后，我们将会做一件所有人都想做的事情”，“那就是我们将会拥有一个成套的工艺设计工具，可同时用于 III-V 器件和 COMS 器件的制作”。☞



HEXAGON –

YOUR ADVANTAGE IN FANOUT WAFER LEVEL PACKAGING (FOWLP)

See us at SEMICON China 2014, March 15-17, Booth 3639



Choose HEXAGON for processing of strongly outgassing PI/PBO coated wafers and enjoy etch kit lifetimes of more than 10,000 wafers. HEXAGON delivers atmospheric Batch Degas combined with Arctic ICP Etch and Evatec's metallization technologies. Achieve stable low contact resistance (Rc) values at throughputs of 40Wph on a tool with the smallest footprint in the industry. For more information about HEXAGON visit www.evatecnet.com/products/hexagon

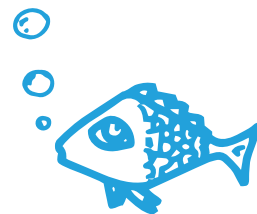


MORE INFO

LEDs • ADVANCED PACKAGING • POWER DEVICES • MEMS • WIRELESS • EVATEC - THE THIN FILM POWERHOUSE

www.evatecnet.com

SiC 时代到来?



在经过多年的疑虑和犹豫之后，SiC 器件终于迎来了春天。本文 Compound Semiconductor 杂志与 Yole Développement 公司的对话将为您带来更多关于这方面的细节。

随着 Cree 公司向市场提供了 900V 电压的 SiC MOSFET 晶体管，GE 公司发布汽车级应用的 SiC MOSFET 和 SiC 二极管也赢得了很多的市场，行业专家们都纷纷预测这种宽禁带半导体将迎来它的黄金时代。

最近，法国 Yole Développement 公司的 Pierrick Gueguen 及其同事就 SiC 市场发表了调查报告，报告描述了 SiC 的开发是如何在经过多年的停滞之后，已经具有了比现有半导体技术更高的附加值。

Yole 公司的分析员告诉 Compound

Semiconductor 杂志：“SiC 二极管在过去的一年中取得了极大的发展，包括了在器件的可靠性方面，而且在我们现有的应用中 SiC 二极管的成本已经不再是个问题”。

他补充道：“在这个市场中有足够多的二极管器件供应商，而且其器件也很容易实现集成”，“SiC 二极管几乎占据了整个 SiC 器件市场份额的 80%，我们相信这个数值未来还会持续地增长”。

实际上，据 Yole 公司的预测，到 2020 年，包括二极管和晶体管在内的

整个 SiC 市场容量将能够达到现在的三倍，总额将会达到 4.36 亿美元。目前，SiC 二极管已经覆盖了中等电压的市场，包括了光伏逆变器，电动机控制器，电动或者混合电动汽车以及不间断电源（UPS）等领域。

尽管 SiC 二极管在 2020 年之前都会被视作为 SiC 器件的主流首选，但电动和混合电动汽车领域将会成为 SiC 二极管和晶体管最有希望的市场。

全球很多汽车公司都在竭尽全力进行宽禁带半导体材料研究，使得 Gueguen 把 SiC 二极管仅仅看作是 SiC 商业机遇的一个触发器而已。

事实上，制造商们早就已经将 SiC 二极管集成到具有功率因数校正器拓扑功能的电动汽车充电器中，并且此项工作还会持续进行下去。

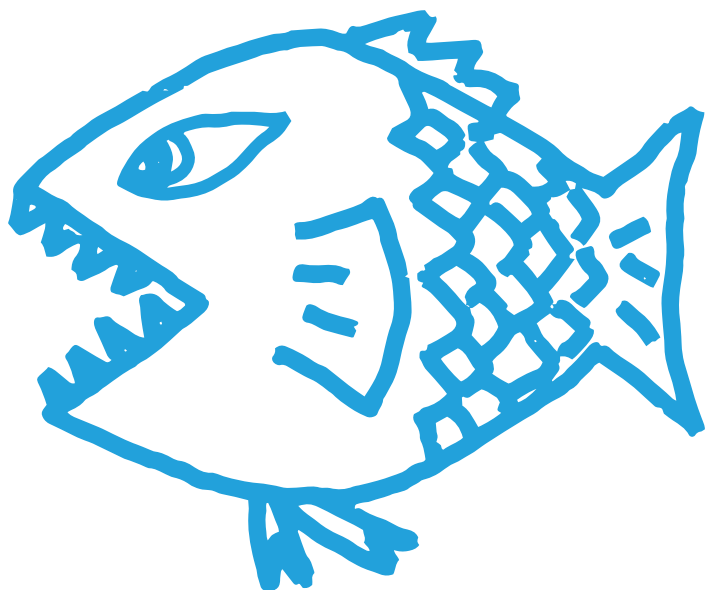
与此同时，未来的器件发展将会使我们很快地就能看到 SiC 二极管和 SiC 晶体管同时应用于 SiC 转换器，例如列车中的电功率逆变器中。

Gueguen 说道：“我们的 SiC 二极管能够适应汽车中的应用，如丰田汽车等公司正在努力地推动 SiC 晶体管集成技术的发展，以在功率转换器层面上来将 SiC 的潜能发挥到极致”。

没有任何的犹豫，日本的丰田公司已经把 SiC 器件的应用提上了日程。2015 年初，该公司认为混合电动车上



Cree 和 APEI 两家公司合作目标是实现将 SiC 器件集成到功率组件和转换器上的工业化应用。



有 20% 的能量都是损耗在功率半导体器件上，由此这家重量级的汽车公司在其 Camry 混合原型车和燃料电池巴士上已开始使用 SiC 二极管和晶体管。

丰田公司已经确认这么做将会使燃油效率提高 5%，并且正如 Gueguen 所强调的那样：“这个试验非常成功。在获得实际应用之前，丰田公司一直希望能将 SiC 器件集成整合到汽车上，现在他们正在解决 SiC 晶体管在汽车中的集成问题”。

事实上，丰田和大多数其它大型汽车公司已经完成了对这种 SiC 器件系统的质量认证，并且确保供应商能够批量提供这种器件，使得 SiC 逆变器有望在 2020 年左右实现大规模的生产。

器件的领导者

但是目前谁是主要的 SiC 供应商呢？根据 Yole 地说法，目前行业的龙头，Infineon 和 Cree 两家公司研发出新的 RF 功率系统 WolfSpeed，已经占据了整个 SiC 市场份额 68%。

不仅如此，Cree 公司最近还收获了功率组件和电子应用上先驱新产品—APEI 的订单，这款产品有可能对 SiC 市场造成很大的冲击。目前这两家公司都把目光放在如何实现将 SiC 器

件集成到功率组件和转换器上的工业化应用问题，同时也能为这些 SiC 器件系统提供经特别设计的封装。

Gueguen 强调说：“Cree 公司说过，如果对这种最先进的功率器件还是采用已具三十年历史的老旧封装技术，将无法发挥出 SiC 器件的全部潜能”，“但是现在，公司可以提供一个完整的系统解决方案，而不仅仅是功率器件的本身”。

他补充说：“Infineon 公司已经具备了开发用于 SiC 器件功率组件所需的技术基础，而 Cree 公司正在发展它的 SiC 功率业务的供应链，如同它们之前在发展 LED 业务时所做的那样”。

尽管这两家大公司都打算加速其在 SiC 应用上的进程，但是它们并不企图在未来继续统治这个领域的市场。如同 Gueguen 所预测的那样：“Infineon 和 Cree 公司从一开始进入这个市场时就占据了大量的市场份额，但是 Rohm、STMicroelectronics 等公司也正在对这个市场虎视眈眈”。CS

New CS APP ready for Download NOW!

Continuing our aim of 'connecting the compound semiconductor industry', Compound Semiconductor has a Free app for Android, iPhone and iPad to allow you keep up to date wherever you are.

Available **FREE** from the App Store or Google Play, the app allows you to access:

- Latest Compound Semiconductor, CS China and CS Taiwan magazines
- Latest features
- Latest news and more...



For further information contact:
scott.adams@angelbc.com

www.compoundsemiconductor.net



单晶圆外延系统 推动功率器件产业发展

单晶圆外延系统兼具高度均匀性和低维护成本的特性，可以从研发轻松过渡到大批量生产，被认为是制造硅上 GaN HEMT 的理想选择。

Sudhakar Raman, Somit Joshi, George Papasouliotis; VEECO INSTRUMENTS

对性能更佳功率电子器件的需求正在不断提升，全世界的工程师都在寻找效率更高、尺寸更小、工作温度更高、开关速度更快、可靠性更高的功率器件。

如果哪家公司能够生产出满足上述标准的器件，无疑会得到全行业的羡慕，因为这种产品在极为广泛的领域内都有很大的潜在应用价值，推动诸如IT服务器、电动机、电动汽车充电系统、风力发电、太阳能发电逆变器等一系列产业的发展。

近年来能源的效率问题已受到越来越多重视，与此同时，目前以硅为基础的功率器件技术在很多人看来已经达到了其性能极限，这就刺激了新型功率电子器件的研发。新型功率器件将摒弃传统材料而采用新材料，将在能源的效率方面树立新的技术标杆。

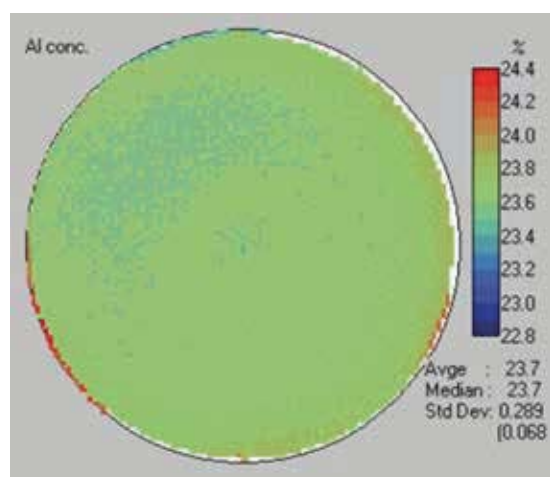


图1. 8英寸Si上GaN晶圆的荧光分布图，显示AlGaIn层中铝元素含量的标准差为0.29%。

现在不仅有很多集成器件制造商 (IDM) 的工程师团队正在追求这一目标，行业内的一些合作团队也在进行积极的探索，其中包括有著名的欧洲微电子研究中心 (imec)，以及总部设在美国的行业新星 PowerAmerica。

PowerAmerica 是美国能源部、产业与学术界携手开创的公私合作机构，学术部分由美国北卡罗莱纳州立大学领衔，美国能源部已向 PowerAmerica 投入了七千万美元，以表示对新型功率器件开发的重视。

为了研发与硅基器件相比具有更小尺寸、更高效率和更高工作温度的新一代功率器件，PowerAmerica 和 imec 将目光转向了宽禁带半导体材料。这两家机构的着眼点并不仅限于新的器件构造，它们还引入了新的制造工艺。PowerAmerica、imec 和很多 IDM 公司目前所研制的器件不是采用基于同质衬底上生长 SiC 的技术，就是采用硅上 GaN 技术，由于 GaN 衬底价格高昂且产能有限，因此被许多功率器件研发者认为并不适用于功率器件的工业化生产。

宽禁带材料的禁带宽度约为硅材料的三倍，这将有助于加快功率器件的开关速度，降低其能量损耗，减小器件的尺寸，并具有更高的可靠性，这些特性最终体现为器件系统层面上的优势（详见本文所附的“硅上 GaN 的发展前景”一文）。

为加速硅上 GaN 功率器件的开发，我们 Veeco Instruments 团队已经研制出 Propel PowerGaN 单晶圆外延制造系统，它所使用的全



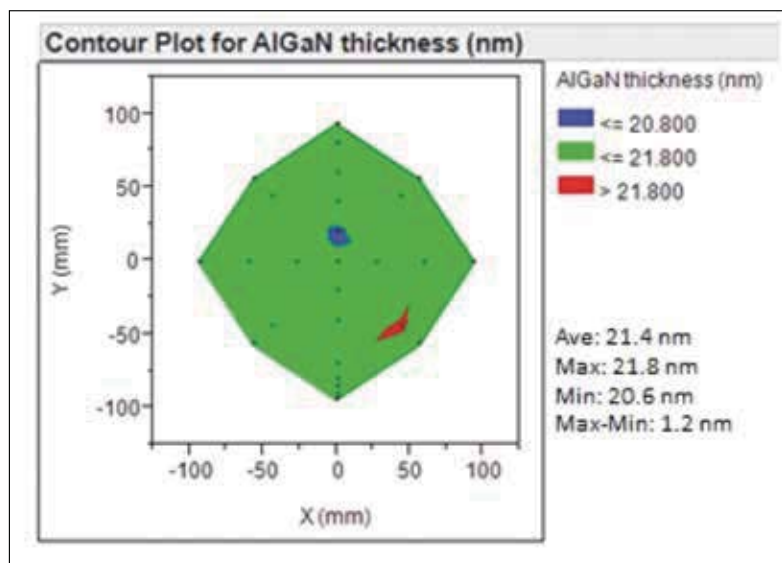


图2. 三轴X射线衍射图显示了AlGaIn势垒层的厚度差分布，其数值仅为由多晶圆系统厚度差值的1/3-1/2。

属有机气相沉积（MOCVD）核心技术已成功地应用于我们的多晶圆 TurboDisc EPIK700 设备和 MaxBright 多晶圆批量生产系统中。Propel 系统可以加工直径 200mm 晶圆，它将我们多年来在 MOCVD 技术上的专长和市场经验集于一体，来为功率器件制造商提供服务。

由此，芯片制造商在购入 Propel 外延系统后就能够加快下一代硅上 GaN 器件的研发步伐。

硅上GaN的发展前景

与硅晶体管相比，在硅衬底上淀积 GaN 层制作的晶体管具有更小的外形、更好的热学性能以及更高的效率，它在 IT 服务器等应用中是一种理想的选择。因为对 IT 服务器应用而言，发热问题随着服务器库的增大而成为令人感到越来越棘手的一个问题，而且其热量控制和能量效率问题亦越来越受到重视。

可以预料，随着生产量的上升和生产成本下降，硅上 GaN 器件的应用范围将会进一步得到扩展，将会延伸到消费电子产品、太阳能和风能发电、电力供应、汽车制造等领域。

如果当前该功率产品的开发进程能得以保持，很多市场分析师都预计，器件出货量将在 2016 年会上升，而且会开始进入具有较低价格敏感度的高端产品领域。比如 IHS Research 就预测，从 2015 年到 2020 年间的该器件的年均复合增长率将会达到 90% 左右。对于 SiC 上 SiC 功率器件的需求也在增加，但它们主要还是应用于汽车和光伏产业中。

目前，虽然已有少量的 200V 器件已经开始出现在市场上，但是硅上 GaN 器件在主体上仍处于研发阶段。人们期待已久的 600V GaN HEMT 已有一、两家芯片制造商运用到市场化生产中，但这些产品尚未成熟。最新数据显示，采用了 GaN 功率集成电路的服务器和“白牌产品（white-box goods）”还没有真正进入市场。但好消息是器件制造商正在完善功率晶体管的结构设计以及改良生产工艺，硅上 GaN 器件的制造在未来一到两年内将有望进军工作电压为 600-900V 的功率器件市场。

为什么选择单晶圆外延生长？

外延薄膜的品质优劣是决定 GaN 功率器件性能的重要因素之一。想要改善外延膜的质量，我们推荐使用单晶圆的外延反应器，它已被证明能成功地提高研发的速度及其性价比。与多晶圆的批量外延系统相比，我们的单晶圆外延反应器所生长的关键薄膜层具有更为优秀的性能，并且各个加工批次间的工艺重复性要高很多、生产效率也更高，备件消耗更低。它的另一个亮点是可将多台外延设备进行集群组合，就能够以更高的性价比将它们转化为批量生产。

我们设计的 Propel 反应器使得外延生产的灵活性达到了最大化，其中一个优点是在单一机架（backbone）中便可实现多反应腔室集群设备的整合。我们的方法一经采用，生产商前期研发中投入的资金能在在后期生产中获得很快的回报，从而实现工艺菜单从试验性生产到大批量生产的无缝对接。

另外值得一提的是，虽然该反应器当前的设计标准是生产 6 英寸和 8 英寸的晶圆，但是它具有扩展性，如果未来行业的发展要求生产 12 英寸的晶圆，我们的平台能以同样的生产效率达到这个目标。在对衬底材料的选择上也具有多样化，Propel 设备亦可用于 SiC 上 GaN 晶体管结构的生产。

提倡使用单晶圆外延系统也许会令人有些诧异，长期从事化合物半导体行业的人都知道，最早一批外延生产系统就是制作 2 英寸晶圆的单晶圆外延设备。之后，为了提高产量、降低设备的拥有成本，采用了更大尺寸晶圆以及多个晶圆一起加工的批量形式来提升 MOCVD 系统的生产能力。

那么我们为什么要回归到单晶圆外延系统？因为历史已经证明这是提高生产效率的最佳途径。20 世纪九十年代的硅工业，批量生产设备在硅基 IC 外延工艺中占有统治地位。在这个时期，130nm/90nm 节点技术沿用了 180nm 节点技术，同时批量生产系统也没有发生根本性的变化，这被视为从器件研发过渡到批量生产最为有效的途径。

但这个方案在理论上可行，而在实际操作中并不奏效。批量生产系统在工艺重复性和均匀性上并不尽如人意，特别是在具有更小技术节点、更大晶圆等新技术提出后，它所显现的问题显得更加致命。在批量外延系统上化费了大量的精力和财力之后，多家企业决定转为采用单晶圆外延设备来降低这方面的损失。

这一工艺转型的收效超越了众多的预期，因为将单晶圆外延设备组建成为一个集群设备系统之后，它就能很容易地进行大批量的生产。这种系统的拥有成本将会低于批量加工设备，而且具有很大的灵活性，能适应未来 10 到 12 年产业发展的需求。

优异的结果

单晶圆外延系统的优越性体现在所生长的外延层具有高度的均匀性，这得益于它独特的晶圆加热和气体注入子系统的设计。

在多层结构均匀性上的改进是一项十分重要的技术突破，因为它可以提升器件的性能及其可靠性。AlGaIn 势垒层的厚度和组分决定了 AlGaIn 和 GaN 界面形成二维电子气的性质，它会影响到晶体管的阈值电压、导通电阻和漏极电流，因此 AlGaIn 势垒层在成分和厚度上是否具有高度均匀性将是器件能达到高良率的重要保障。

对 8 英寸晶圆上平均 Al 含量为 23.7% 的 AlGaIn 层进行特性分析可以展示单晶圆外延系统的工作性能。光致发光谱测量显示，所测得的厚度均匀偏差 1σ 仅为 0.29%（见图 1），而用高分辨率 X 射线衍射测量得到 AlGaIn 势垒层上 27 个测量点的平均厚度值为 21.4nm，上下变化范围为 1.2nm（见图 2）。上述测量结果都要优于目前的批量式外延设备两到三倍。

测试结果诚然喜人，但是进行大规模量产工厂中的工艺工程师们知道，他们想要的不仅仅是偶尔出现的高质量晶圆片，而会要求每个生产批次的产品质量都得过硬。

我们的单晶圆外延系统定然不会让你感到失望。作为 Turbodisc 产品系列中的一员，它具备

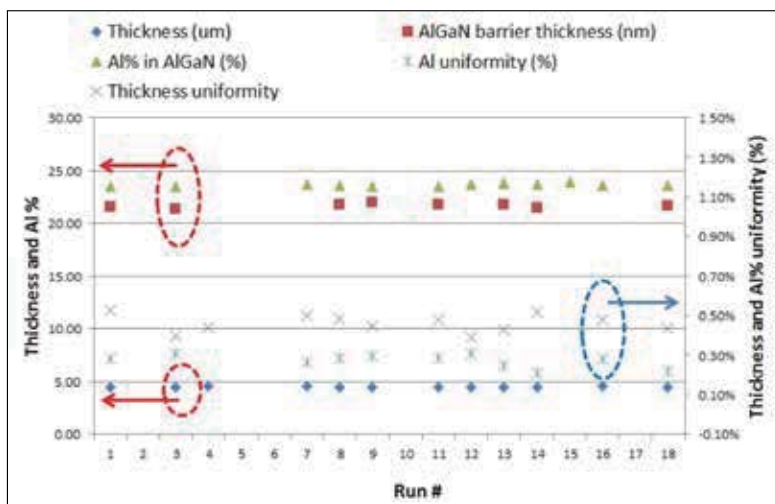


图3. 不同加工批次间整个HEMT结构参数的稳定性，包括有：堆叠层的厚度，AlGaIn势垒层厚度和Al含量，及其厚度/组分的均匀性。

独特的架构设计和稳定的、宽裕的操作空间，具有优异的加工批次间重复性的超净操作功能。在每两次预防性维护之间可以进行 150 个批次的加工，而普通的批量式多晶圆系统在这一期间只能承担 20 个加工批次。

在不进行腔室调整或打开的条件下，对整个 HEMT 结构层的厚度进行多次重复测量，结果说明此系统在各加工批次间具有出众的工艺重复性（见图 3）。叠层总厚度、AlGaIn 势垒层厚度和 Al 含量等参数在各个加工批次间的差值分别为 0.27%、1.0% 和 0.55%，叠层总厚度和 Al 含量的 1σ 平均值分别为 0.46% 和 0.27%。对于批量式外延设备而言，这些差值一般都在 2% 以上。

除了上述优势之外，我们单晶圆外延系统的运行速度更快，这样就能使工程师有了更多时间来对集成电路（IC）的设计和工艺菜单进行完善。

为推动硅上 GaN 功率电子器件技术的发展，我们与其它的行业组织及其领先者联手推出 Propel 外延反应器、外延片和我们在 MOCVD 方面的专业服务。

我们在工业界的伙伴仍在努力提升外延层的质量，以改善器件性能和提高良品率，同时他们还将开发先进的垂直结构器件以及能提升集成度的新型绝缘模块作为新的发展方向。

我们希望通过我们以及业界合作伙伴的共同努力，希望在 2016 年能将 GaN 基功率器件投入到试制阶段，而在 2017 年能顺利走向大批量生产。在理想情况下 GaN 基器件可承受 600V 到 900V 的工作电压，我们预计它将可以满足消费和工业领域对于功率电子器件的巨大需求。OSc



硅衬底 GaN 晶体管 突破广泛应用的障碍

硅上 GaN 生长技术的性价比已经得到提升，因而使其应用已从国防领域扩展到了主流商业市场。

Tom Kole, MACOM

功率放大器的设计者在设计大功率宽带放大器时会面临一些挑战：低的负载阻抗以及会影响器件性能的寄生效应等难题。

第一项挑战是源于器件的输入负载阻抗本身就比较低，并且会随着功率的增加而持续下降。为了应对这个问题，设计者设计了一种匹配电路可以对接晶体管的 50Ω 输入阻抗。但是设计带宽、效率和复杂性都会受到这晶体管 50Ω 阻抗系数的制约。对于这项挑战的一个解决方案是使用本身具有高阻抗的小尺寸器件，例如在高工作电压下工作的晶体管。举个例子，在 $100W$ 的功率下，将电压从 $12V$ 增加到 $48V$ 将会显著地增加负载电阻，也即可以从 1Ω 增加到 12Ω 。这二者是一个平方关系，因此工作电压增加 4 倍将会使负载阻抗增加 16 倍。这种更高的阻抗不仅允许更加简单的匹配网络，并且也提供了更宽带宽的设计潜力。

第二项挑战是寄生效应，这在设计宽带功率放大器时是个特别棘手的问题。在低频率下，FET 等效电路是电阻性元件占主导作用；然而在高频率下，在栅和源之间的输入静态电容以及源和漏之间的输出静态电容将会起到主导作用，在它们的共同作用下会使阻抗下降，并增加了品质因数 Q 。换句话说，阻抗将具有更大的易变性，并且在史密斯图（Smithchart）中旋转，即它会随着频率的变化而变化。

有了一种很有吸引力的技术可以同时解决这两项挑战，那就是转用 GaN 晶体管来制造功率放大器。与目前使用的高频 GaAs 技术和低频硅

LDMOS 技术相比，GaN 本身就支持在更高电压下工作，同时在更高频率下也允许有更大的功率。除此之外，GaN 的高功率密度可以使它比传统的竞争器件有着更小的体积外形，这也导致它具有更小的本征高频效应和更低的输入/输出电容，使得 GaN 器件具有更低的 Q 值。先前宽带放大器的设计无法获得在很高功率水平下覆盖很宽频率范围的工作性能，而 GaN 使其变得可以实现。

GaN 功率放大器的优势不仅仅局限于具有更宽的带宽，还包括它有着超过百分之七十的效率，具有突破性的高功率密度，以及高温环境下比其他半导体器件有着更高的可靠性，这同时也有助于制成尺寸更小的器件。这些优势集中在一起，再加上 GaN 与 GaAs 有着相近的电子迁移率，使得它能在很高频率下进行大功率运行，并且其寄生效应要远小于竞争器件。

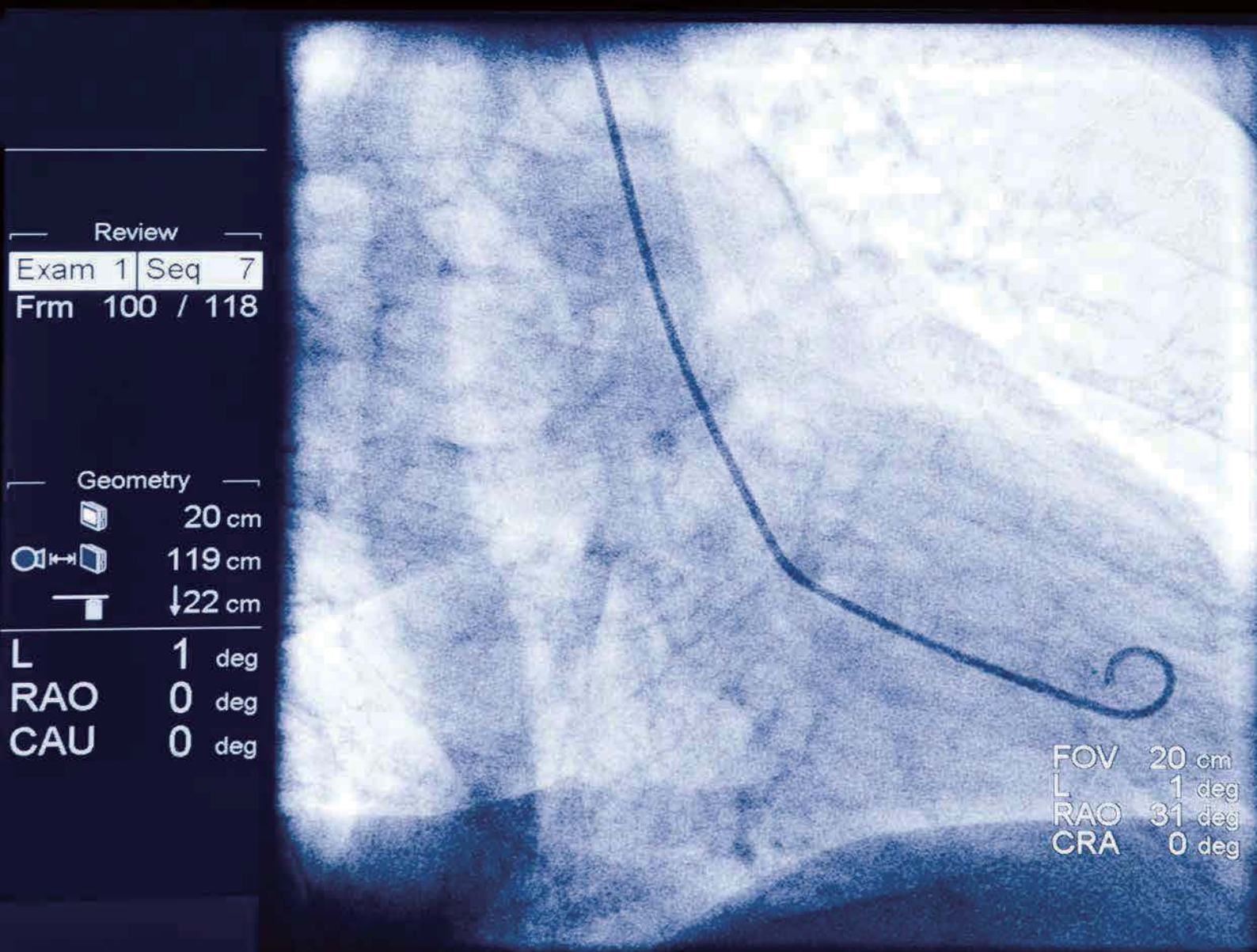
由于这些在性能上的优势，GaN 自然而然地在很多不同市场中都被认为是其主流应用的最佳选择。使得采用这种宽禁带半导体材料制造的功率放大器有望在商用和消费类射频（RF）功率市场得到广泛的应用。

扩展应用范围

在国防通讯和电子战应用中，主要看重的是器件的性能，使得 GaN 已经迅速地替代了 LDMOS。这就解释了为什么在这个领域过去的十年中，在要求高效率和高带宽半导体器件的场合中，是 GaN 引领了器件的潮流。这里，一个需



固态RF功率器件可提供很多其他器件所没有的优势，
能为例如医疗消融切除等应用提供强有力的支持。





GaN器件可以实现恒定的功率输出和区域可控的加热，使微波炉的工作寿命能增加10倍。

求是使用单个 GaN 宽带器件来替代多个窄带宽的 LDMOS 通道，并且能提供相近或者更好的增益、功率和效率。借助于 GaN 器件的这些优秀特性，设计者可以构建出更小、更有效率的系统。在手持对讲机当中，对电池更低的要求减轻了机身的重量，这对于单兵作战装备而言是非常重要的。

然而 GaN 将要征服的下一个市场就是家庭中的应用，商用电信系统需要高度线性的功率放大器及其效率，但由于一系列的现实因素，使得这种需求已经成为了关键性的问题。通信基础设施使用了复杂的 OFDM 架构来将尽可能多的数据塞进给定的带宽中，并且必须在信道中保持其能量以防止干扰。在过去的二十年以来，功率放大器设计者使用了多种线性增强技术，从带有简单补偿 (backoff) 的单载波到 GSM 网络中的前馈多载波。如今，最优化的解决方案是将 Doherty 合并技术与数字预失真 (DPD) 技术结合起来。Doherty 技术能提供高功率效率和高的峰值对平均值比 (PAR) 的波形，而 DPD 能减少矢量误差和邻近信道间的干扰。

所以，GaN 在这个现有系统结构中表现如何，其答案要从 GaN 和 LDMOS 在一个关键基础性能的差别上说起。LDMOS 具有一个所谓的硬压缩特性，亦即它在接近 P1 dB 时具有极好的线性度，

但这是一个极限值，压缩水平稍有超越，其线性度就会有急剧地下降。换句话说，PSAT 是一个硬性限制，它会突然发生，使得在线性和非线性之间的转化区几乎只是一个点。而 GaN 器件具有一个“软的”压缩点，使得 P1 dB 区和 PSAT 区之间可能会存在几个 dB 的隔开区域。并且，如果你继续增大功率驱动，器件随之会输出更多的功率。

这对于数字预失真 (DPD) 线性化功率放大器是一个理想的选择，因为 Pin 对 Pout 关系是相对连续的，在接近压缩区的线性度要比 LDMOS 更好，并且对于温度、电压或者负载等可能会改变 P1dB 的因素变化不敏感。GaN 的压缩点是连续的、圆形的，并且从数学的角度来看地，它在工作区域的上部表现得更好，在这个区域中功率和效率都是最高的。从实际应用的角度来看，这就意味着如果放大器匹配恰当，其瞬时功率可以大幅度地超过规定的连续波 (CW) 的功率容量，这对于再现具有高的峰值对平均值比 (PAR) 波形是十分有利的。

当进行数字校正后，GaN 在系统层面上树立了新的技术标杆。与 LDMOS 相比，在其他条件相同的情况下，采用 GaN 的系统效率会提高 5 到 7 个百分点。在初始效率的比较上 GaN 具有明显的优势：在 2.5GHz 和 100W 功率等级、甲乙类放大模式的 GaN 器件具有超过 70% 的效率，相比之下，如今最好的 LDMOS 器件只能勉强达到 60%。在商业应用中如果能对 GaN 器件加以正确地使用，它在这种效率上的优越性能在系统层面上带来显著的性能改进。

在马萨诸塞州 Lowell 的 MACOM 公司，我们正在用我们的硅上 GaN 技术来促进其商业应用。现在它已经发展到第四代，可以为 GaN 的商业应用及其市场提供具有优异的性能、效率和带宽的器件，并且其成本结构已经可以与 LDMOS 相差无几。要加速 GaN 在商业应用中的普及进程，就需要进一步降低其成本，我们正在使用更大尺寸的晶圆来扩大我们的 GaN 器件生产。

微波炉……

另一个 GaN 应用的重大机会是将它作为微波炉的辐射源。现在已经出现了用来替代磁控管的 LDMOS 原型器件，但是低效率成为了它的短板。如果使用 GaN 器件，则情况就大不相同了。目前 LDMOS 组件在效率上要低于实际需求值约 10%，

而利用 GaN 材料制造的器件,就可填补上这一差距。

我们的 GaN 器件技术是替代磁控管的理想选择,因为它同时具有 GaN 的高效率——在 2.45GHz 时效率为 70%,并具有与硅基器件可相比拟的成本。相对于可以溯到二十世纪 40 年代的磁控管技术, GaN 器件是一种极具吸引力的选择,因为可以具有恒定的输出功率、区域可控的加热,还能使微波炉的使用寿命增加 10 倍。



……以及照明

等离子体照明则为 GaN 提供了另一个应用机遇。这种照明形式包括有一个 RF 功率激发源,其目前大多是由 LDMOS 提供。它通常使用了相对较低的频率,比如几百兆赫兹。尽管等离子体照明在进入主流照明市场的进程中还相当缓慢,但是它在农作物生长的照明领域找到了最佳突破口,由于它在色温上非常接近太阳光,它是这个领域的一种理想的光源。

目前等离子体照明技术正在向着将频率提升到 6 GHz 和效率超过 70% 的方向发展,这些要求对于 LDMOS 而言是不可能达到的,而对于 GaN 来说则能轻松胜任。它所具有更高的功率密度性能能使晶体管的尺寸得以进一步的缩减,这使得这种器件对于供应商而言十分具有吸引力,将会推动等离子体照明在室内照明市场中的应用,来作为 LED 的替代者。

GaN 同样可以助力无线功率传输技术,它已经实现在低功率、用于手持设备上的消费级无线功率传输上的应用,然而在大功率的无线功率

发射和接收上它还处于原型器件的开发阶段。随着需要传输功率将会以千瓦计,对效率的高要求严格地限制了传输单元的尺寸——传输的功率越高,其天线的物理尺寸就越小——GaN 显然是 RF 功率传输应用的上佳选择。由这种宽带隙半导体材料所制造的器件,其天线尺寸在针对频率进行优化后,2.45GHz 频率下的效率要比 LDMOS 高出 10%。

随着在等离子体照明、微波炉、医疗等领域中的发展机遇, GaN 无疑会在很多的主流市场获得应用。它的高效率展现出令人兴奋的发展前景,它还能进一步削减器件的总成本,使得它能够进入商业市场中对价格敏感的大规模应用领域。

我们坚信 GaN 器件拥有极其巨大的发展潜力,我们已经准备好对其整个产业链的支持,以推动这种类型器件的普及。通过投资、借贷和生产协议,我们已经准备扩大 GaN 器件的生产能力,使它能以较低的成本进入到广泛的商业应用中,以造福我们的客户。OSc



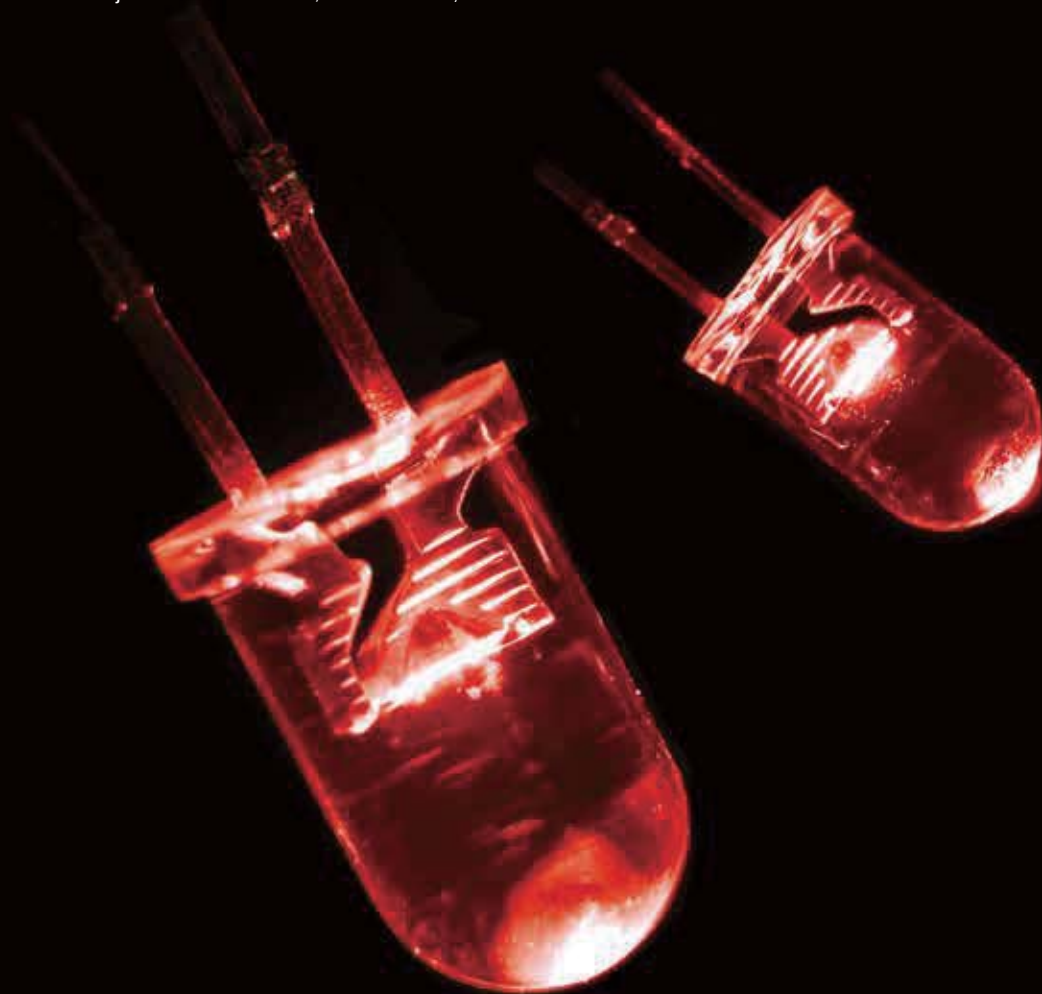
正在开发中的等离子体照明要求能将其工作频率提高到 6 GHz、效率超过 70%。

铟掺杂 GaN 推进了 红光 LED 的发展

铟掺杂 GaN 材料可用来制作红光 LED，将其与绿光和蓝光 LED 相结合就可以形成单一芯片的全色彩发光器件。

Yasufumi Fujiwara, OSAKA UNIVERSITY

Wojciech Jadwisieniczak, Faiz Rahman; OHIO UNIVERSITY



LED 具有很多极佳的属性，这种体积小、效率高且全能的芯片目前从照明到通信、气体探测以及各种显示应用中正在扮演众多方面的角色。随着生产商致力于高性能和低成本 LED 的开发，它的性能还在继续提升，而学术界和工业界的研究人员正在针对新一代的 LED 器件进行新材料和新结构的研发工作。

随着 LED 的出现，研究人员的工作目标之一就是让它能够发出波长更短或者更长的光。历史上曾经有通过改变固态发光器件合金材料的成分配比来实现这一点，但在最近采用的是改变其厚度或改变其量子阱材料化学计量比的方法。

在过去的十多年时间中，上述后一种调节量子阱成分配比、也即我们所熟知的能带工程技术，已经成功地将 III-N LED 的发光波段扩展至紫外和近绿色区域。这种方法已经取得了极大的成功，有好几个课题组陆续报道了深紫外以及绿光 III-N LED 的研发成果，而其中的绿色激光二极管已经完成了开发并推向了市场。但这些成果还面临着挑战：我们能不能把光发射延伸至更长的波长区域——比如红光甚至近红外光波段？

开发红光 III-N LED 所获得的报偿也是巨大的。尽管红光 LED 已经可以在 AlInGaP 材料体系中实现，但是采用 III-N 材料可以将三种基础色发光集成在同一芯片中，这样的器件将会对显示业产生根本性的变革，它也能作为紧凑型的全色照明光源而获得应用。

制造一种发红光的 III-N LED 并不复杂，然而要将其发射光谱向波长更长的区域拓展则需要增加其量子阱中铟的成分，但这样做的后果是会使其结晶质量发生退化以及会增加合金的分凝，而使器件效率产生急剧的下降。

上述这个问题的核心是富铟 InGaN 层生长过程对温度的要求遇到了两难性问题，为了确保在生长过程中能够从铵中裂解出足够多的氮原子，其温度需要达到 1000℃ 以上，但是为了防止合金材料的分解，又必须将温度控制在 600℃ 以下。

然而，采用灵巧的外延生长工艺就有可能避免产生这些问题。东京理科大学 (TUS) 的 Kazuhiro Ohkawa 及其同事们最先开发了这种方法。在 2011 年，他们小组已经证明了在改变 MOCVD 反应器的设计后，就可以进行富铟 InGaN 的沉积：基片放置在一个特定的位置，加热到一个较高的温度并通入氨气。研究人员同样

改进了器件活性区的设计，将量子阱的数目从 5 个增加到了 10 个，整整翻了一倍，这样可使外延晶体结构获得弛豫，有利于铟掺杂原子的加入。

对 LED 在生长工艺和结构上的改进，可用来来制造深红色光 LED。然而，这种 740nm 器件的输出功率只有 2μW。所以显而易见的是，对于高性能红光 III-N LED 的制造来说，降低其外延生长温度并不是一个行之有效的方法。



图1. 红色GaN LED在室温下工作，采用铟掺杂GaN材料作为LED有源层。

来自东芝公司研发中心 (TCRDC) 的研究小组首先选择了一种更有发展潜力的方法。他们的器件结构是在每个 GaN/InGaN 量子阱中加入一层较薄的 AlGaIn 中间层，使其在 629nm 波长有着 1.1 mW 的光输出功率。尽管这一输出功率已经远远高于其他研究小组之前报告的器件结果，但是和实用器件要求相比还有很大的差距，其外量子效率依然过低，只有 2.9% 左右。

还有多个研究小组提出了另一种方法，就是在纳米圆柱上来制备 LED，这样做可以大大降低铟掺杂的难度，但会降低器件的效率，并会使生长和制造过程复杂化。

还有一种完全不同的红光 LED 制备方法是采用三价铕离子 (Eu^{3+}) 进行掺杂。这种铕离子的应用已经很广泛，它可作为红色荧光材料的发光中心，比如铕掺杂 Y_2O_3 ，它可以应用于阴极射线管和等离子体平板显示器中。在这些应用中铕离子是被掺杂到绝缘体中，带电粒子和光学激发都可以发出红光。

作为我们团队的一员，大阪大学的 Yasufumi Fujiwara 很认可这种方法，但是他做了一个小小的调整，也就是直接在 GaN 中掺铕。这种方式很有效，由于稀有元素具有特殊的光谱特性，铕掺杂的 GaN 在红光光谱区有着极好的发光特性。伴

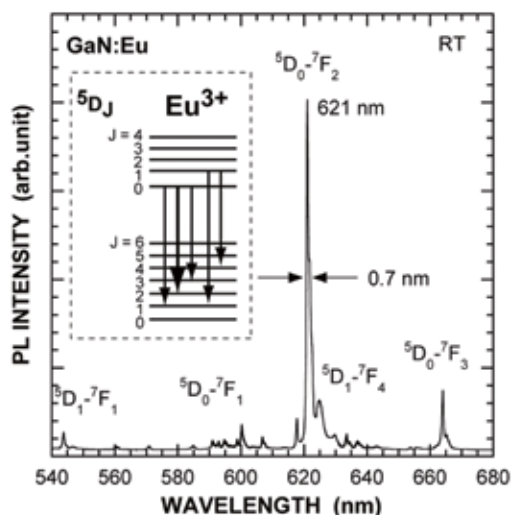


图2. 铕掺杂GaN的光致发光光谱，其中的发射峰对应的是Eu³⁺离子4f壳层间的电子跃迁。

随着 4f 壳层间的电子跃迁，就会产生尖锐的、高强度的、与温度无关的红光发射谱峰。

使用稀土元素激发的一大缺点，就是它对半导体晶体和所掺入稀土离子之间的能量失配问题十分敏感。因此选择具有合适能带结构的半导体晶体材料是十分重要的。通常说来，宽禁带材料更受青睐，因为它们可为稀土元素离子的激发提供更多的能量迁移通道。事实上，由于稀土元素和半导体材料原子之间在化学和物理性质上的巨大差异，稀土元素直接取代了半导体原子将使其在离子半径及其负电性上发生变化，因此就必须把掺杂稀土离子与它们在半导体晶体中所产生的禁带能级同时给予考虑，就是要考虑 4f 壳层电子的激发和退激发过程。总体来说，半导体材料中的稀土元素多以三价离子 (3+) 态存在，为了形

成离子键，稀土离子会失去所有 5d 和 6s 电子，而为了实现能量的迁移，部分填充的 4fⁿ 壳层则会形成多重电子能级，在这些能级之间会发生辐射跃迁。当 GaN 经稀土元素掺杂后，会形成光学活性中心，可产生不受温度影响的、窄宽度的“类原子”发射谱线，这些发射线的光谱位置是由稀土离子中部分填充 4f 壳层电子态的自旋轨道分裂所确定。

GaN 是一种很好的半导体晶体材料，因为它具有一个直接禁带，并具有高的光学活性，即使其材料中存在着较高的缺陷密度，也不会像其他一些重要的窄禁带 III-V 和 II-VI 化合物半导体一样由此而产生光激发的淬灭现象。III-N 材料的另一个优势是，热淬灭效应对由光学活性稀土离子所产生的辐射发射只会有着微弱的影响。

当 Eu³⁺ 离子掺杂进入 GaN 之后，将会取代金属正离子 Ga³⁺，占据它的位置并降低了体系的对称性。晶体场的奇价态分量并不会对状态能量产生影响，但是由于相反价态波长的混入而产生了多重态，因此还是会存在 4fⁿ 状态之间的电偶极子跃迁。

我们并不是首次制造铕掺杂 GaN 材料的课题组，在上世纪 90 年代的后期和本世纪的早期，来自 Tsukuba 大学和 Cincinnati 大学的课题组，以及来自 Ohio 大学、Sandia 国家实验室和 Lawrence Berkley 国家实验室的联合研究小组都通过 MBE 或对注入离子进行热退火的方法制备了这种结构。光致激发导致铕离子激发和电致发光具有两种不同的器件结构：前者为在 p 型硅上生长铕掺杂 GaN，并用铟锡氧化物包覆；后者为用铟、铕掺杂 GaN 以及 n 型硅衬底组成的金属-氧化物-半导体结构。

这些器件只有在很高的工作电压下才会产生红光发射。由于有铟锡氧化物包覆的器件，其热载流子碰撞 Eu³⁺ 产生激发的效率很低，因此即使加载了 46V 的高电压，其产生的光发射依然十分微弱。其中一个能降低工作电压的方法是在器件结构中引入一个 pn 结，它可以向活性层中注入电流，并可将半导体晶体的能量转移到 Eu³⁺ 离子上。Osaka 大学的研究小组利用 MOCVD 来研究如何在 III-V 族半导体中进行稀土原子掺杂时实现自动控制，但他们报道的只是我们在 2009 年的初步成果，当时在我们所生长的铕掺杂 GaN 层具有高的结晶质量，具有低的工作电压和电流注入，该

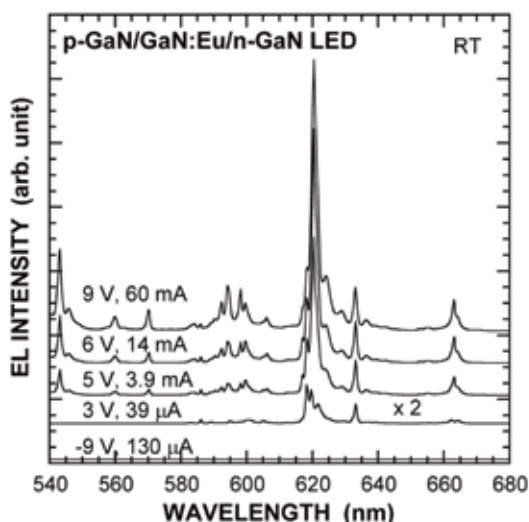


图3. 铕掺杂GaN LED在不同工作电压下的电致发光光谱。

红光发射器件是一种 p 型 GaN/GaN:Eu/n 型 GaN LED 结构 (详见图 1)。

我们已经研究了铕掺杂 GaN 在室温条件下的光致发光现象,它可以在整个 2 英寸晶圆上发射出明亮的红光,在 4f 电子壳层间的 $^5D_1-^7F_1$ 、 $^5D_0-^7F_1$ 、 $^5D_0-^7F_2$ 、 $^5D_1-^7F_4$ 和 $^5D_0-^7F_3$ 跃迁所对应的发射谱峰分别为 543 nm、600 nm、621 nm、633 nm 和 663 nm (如图 2 所示)。在这些谱峰中的最强峰位于 621nm,其半高宽是 1nm。没有证据表明这是能带边发射峰,因为对未经掺杂 GaN 的这种发射峰应该为 361nm,也无法证明它是与缺陷相关的蓝/黄能带发射峰。这表明还存在着一种十分高效的从 GaN 晶体到 Eu^{3+} 离子激发能量的转移方式,使得它可以发出很强的红光。

由铕掺杂 GaN 材料制作的器件结构与蓝光 LED 相似,并且在 3V 正向偏压下就可以发光 (见图 3)。与光致发光类似,它的主发射峰位于 621nm 左右。一个关键的现象是在施加负向偏压时并没有产生电致发光现象,这表明器件在正向偏压下所有的发光都产生于由 GaN 晶体到 Eu^{3+} 离子间的能量转移过程,并没有因碰撞激励或热载流子电离所产生的发光。

然而,这种类型 LED 所发出的光还很弱,在 20mA 的驱动电流下,即使考虑了波长 621nm 的全部 $^5D_0-^7F_2$ 跃迁,其输出功率依然也只有 1.3 μW ,它的外量子效率也只有 0.001%

通过优化生长条件和器件结构,我们一直在稳定地提高 LED 的输出功率。我们采用了常压下的生长来增加铕离子的特征发射,这是由于增加了具有光学活性铕离子中心的数量,提高了能量迁移的效率,以及进一步降低了 GaN 晶体中非辐射过程。这使得在 20mA 的驱动电流下,将全部 $^5D_0-^7F_2$ 跃迁的输出功率提高到了 17 μW ,对应的外量子效率也提高到了 0.04%

另一个提高 LED 输出功率的方法就是增加活性层的厚度。输出功率会随着活性层厚度的增加而增加,这是由于厚度的增加会使得铕离子数量的增加,当活性层厚度达到 900nm 时,20mA 的驱动电流下 LED 的输出功率可达到 50 μW ,对应的外量子效率达到了 0.12%。

后续其他的手段将 LED 在 20mA 电流时的输出功率提高到了 93 μW ,这在目前已发表成果中是最高的,其对应的外量子效率达到 0.23%。如果把这种器件在同一球场上作为绿色光源,其商



图4. 在同一LED晶圆上蓝光和红光发射区域的单片集成。

业价值已经可与氮掺杂 GaP LED 相当。

当注入电流较低时 LED 将具有较高的工作效率,这说明具有光学活性铕掺杂离子的数量可能是一个瓶颈因素。从一项我们最近对于铕元素发光的研究发现,至少存在着 8 种不同的铕发光中心,具有不同的共存性局域结构,而来自 GaN 晶体的能量跃迁主要取决于局部结构类型。根据这个研究结果,我们努力去选择具有高效率能量迁移发光中心的形成方法,这将涉及到铕元素与其他杂质元素的共掺杂工艺。

这种能够发红光的氮化物 LED 的最大优势就是能和发蓝光和绿光的 LED 器件集成在同一衬底上制作成一个单芯片,该芯片将能够发出三种基础色光。我们在这方面已经取得了很好的成果,成功地在芯片的相邻区域选择性地生长了红光和蓝光发射单元。我们未来可以实现现在单一全色芯片上同时发射红、绿、蓝三色光,从而可以用于显示屏以及投影显示中。这种低成本、易于系统集成,以及拥有更佳色彩混合能力的 LED 技术,要远远超过现有的混合型 LED 所具有的性能水平。□

扩展阅读

- B. Henderson et. al. Crystal-Field Engineering of Solid-State Laser Materials, Cambridge Studies in Modern Optics, Cambridge University Press 2000
- Photonic Applications of Rare Earth Doped Materials, MRS Bulletin 24 (1999)
- J. Heikenfeld et. al. Appl. Phys. Lett. 75 1189 (1999)
- S. Morishima et. al. Phys. Status Solidi A 176 113 (1999)
- H. J. Lozykowski et. al. Appl. Phys. Lett. 77 767 (2000)
- J. H. Park et. al. J. Appl. Phys. 98 056108 (2005)
- A. Nishikawa et. al. Appl. Phys. Express 2 071004 (2009)
- Y. Fujiwara et. al. Jpn. J. Appl. Phys. 53 05FA13 (2014)

纵向 GaN 晶体管： 提高功率开关效率的途径

为了满足未来 20 年对能源的需求，需要具有更高效率的功率开关器件。

Bryan Bothwell, David Drummond, Manyam Pilla; QORVO 公司
Huili Grace Xing, Debdeep Jena; 康奈尔大学

功率半导体器件在世界能源基础建设中起着至关重要的作用，据预测，到 2030 年，从发电到消费过程中，所生产的电能中有 80%（从当今的 30% 将逐年增加）需要经过一个或多个电能转换阶段。这将会促进功率开关器件的发展，目前它已经占据了很重要的地位，而在今后其地位还会有进一步的提高。

随着硅基功率 MOSFET 开关器件的发展，使得近代高效率开关电能转换技术得以实现。功率开关器件的开关性能及其导通电阻是能否获得最高转换效率的两个关键性因素，在高电压、大电流的情况下，这两个因素的影响还会变得更大。

在这里我们要特别强调的是，这种高效率、低损耗开关器件的应用涵盖了马达驱动、电动汽车、发电和输配电等市场，这些市场不仅需要产品有着更好的性能，也要有合适的成本。

在效率上的提高并不是来自于在硅器件性能

上的改进，因为硅器件的性能已经接近了硅材料的极限。因此工业上已经转向研究其它性能更为优异的材料，采用宽禁带（WBG）半导体材料的 GaN 和 SiC 器件能够满足未来高效率、低损耗电能转换系统的需求。

采用 SiC 和 GaN 材料的功率器件已经商业应用了好多年，但是相比于目前广泛应用的硅器件而言，由于受到高成本和缺失可靠性证明的影响，阻碍着这种新材料器件的进一步广泛应用。但是在预期的性能表现方面，宽禁带材料将具有更加明显的优势（如图 1 所示）。

在大多数电能转换应用中，相比于 SiC 而言，GaN 凭借其优异的介电强度和电子迁移率使它具有更高的品质因数（FOM），只有在极高温的工作环境中 SiC 才能表现出优于其它材料的性能。目前已经使用了多种不同的品质因数来评估这两种材料的应用前景，最有名的就是来自 Baliga，他考虑了纵向 FET 中特定漂移区域的导通电阻这个因素，另外两个关键因数是具有双极结构器件的开关速度及其功率处理能力，如图 2 所示。

如果利用在 Si 衬底上生长 GaN 的外延片来生产横向 GaN HEMT，那么其生产成本很可能会与生产硅器件相当，但是其工作电压将会被限制在 650V 以下。对于更高工作电压的应用，用 SiC 衬底代替硅衬底就能够克服在工作电压上的限制，但是由于 SiC 衬底的成本较高，因而会增加器件成本，而在提高电压时还需要增加器件的横向尺寸。

一种更佳的选择是转为在器件构造上的创新：采用一种纵向器件结构。类似于超 PN 结 MOSFET 的结构，这种纵向器件由于大大减小了芯片的尺寸，能同时满足对器件高性能和低成本

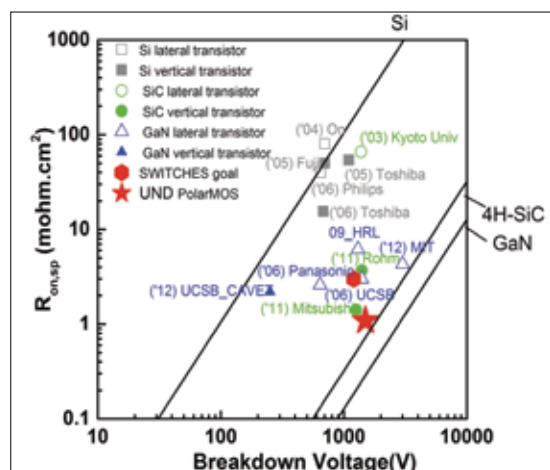


图1. 制备功率开关器件的理想材料必须具有较高的击穿电压和较小的导通电阻，硅是制备这类器件最为常用的材料，但是许多研究已经证实宽禁带材料制作的器件能够克服硅材料的技术瓶颈。不论是从实验角度还是理论角度来看，GaN的优势要比SiC更大一些。

宽禁带器件与硅器件品质因数(FOM)对比

FOM	Si	GaAs	6H-SiC	4H-SiC	GaN	Diamond
JFM	1	1.8	277.8	215.1	215.1	81000
BFM	1	14.8	125.3	223.1	186.7	25106
FSFM	1	11.4	30.5	61.2	65	3595
BSFM	1	1.6	13.1	12.9	52.5	2402
FPFM	1	3.6	48.3	56	30.4	1476
FTFM	1	40.7	1470.5	3424.8	1973.6	5304459
BPFM	1	0.9	57.3	35.4	10.7	594
BTFM	1	1.4	748.9	458.1	560.5	1426711

◦ FOM derived from intrinsic material properties

- JFM – Johnson's FOM is measure of ultimate high frequency capability of the material
- BFM – Baliga's FOM is a measure of the specific on resistance of the drift region of vertical FET
- FSFM – FET Switching speed FOM
- BSFM – Bipolar switching speed FOM
- FPFM – FET power Handling capacity FOM
- FTFM – FET power switching product
- BPFM- Bipolar power handling capacity FOM
- BTFM – Bipolar power switching product

图2. 宽禁带器件特别是GaN基器件的发展机遇，相比于以Si基和GaAs基器件，它的品质因数明显要更加优异。

的要求，但是需要采用同质外延的 GaN 衬底来保证纵向电流的正常通过。

这就是目前纵向 GaN 功率开关器件所面临的巨大挑战，如果能够解决这个问题，就能够开启通向新型的具有高的效益 / 成本比的高效电能转换器件的大门

新一代纵向 GaN 器件能够提升电能转换效率和减少碳足迹的优点已经引起了美国 ARPA-E 部门的关注。为了能够将这一计划变为现实，已经成立了一个为期三年、共计 2700 万美金投入的名为 SWITCHES 的开发项目，这是一个用于高效控制系统的低价宽禁带晶体管的研发策略（简称为 SWITCHES）。SWITCHES 的目标是最终实现对宽禁带材料的转换，新器件的结构设计及其制造，以生产出工作电压超过 1200V、工作电流超过 100A 的单芯片功率器件。目前已经有 14 个 SWITCHES 的子项目得到了该基金的资金资助。

从横向器件到纵向器件

GaN 衬底上 GaN 器件的核心优势就是能够实现纵向晶体管结构，横向器件中的 AlGaIn/GaN 界面处会形成一个二维电子气 (2DEG) 层，电流就在这一靠近表面的二维电子气层中流动，而纵向器件的电流传导方式就比它要好（如图 3 所示）。横向晶体管结构的缺点是如果要维持一个较高电压和较大电流，其横向尺寸就必须放大。由于硅衬底较差的热学性能以及具有明显的电流崩塌效应（即在二维电子气沟道的传导电流中陷阱电荷的记忆效应），使得在开关转换过程中它的漏极电流会减小。总而言之，这些因素使得大规模生产高电压 / 电流但成本又低的横向器件遇到了障碍。

来自美国加州大学 Santa Barbara 分校的研究小组，在采用同质外延纵向 GaN 器件来克服这些问题的研发过程中走在了前沿。在这种器件中，其纵向电流流过 GaN 衬底，使得其大部分电压降

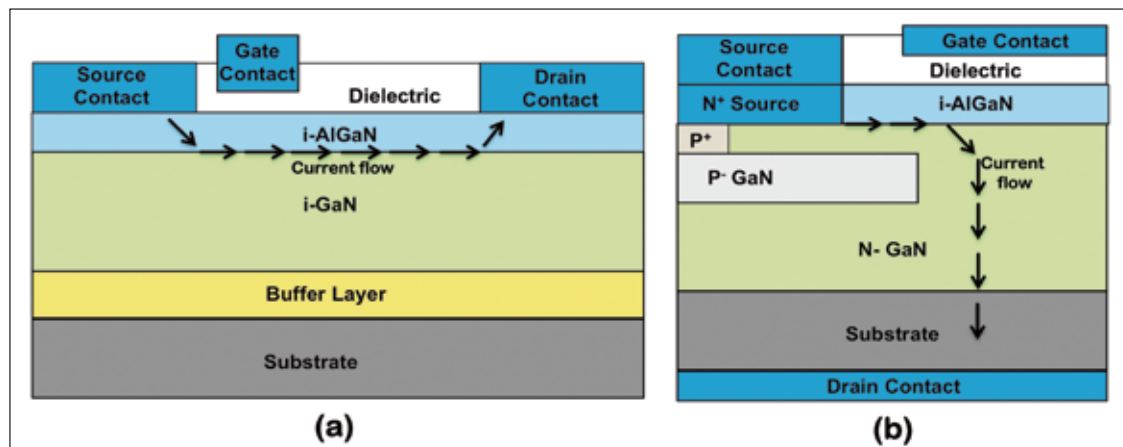
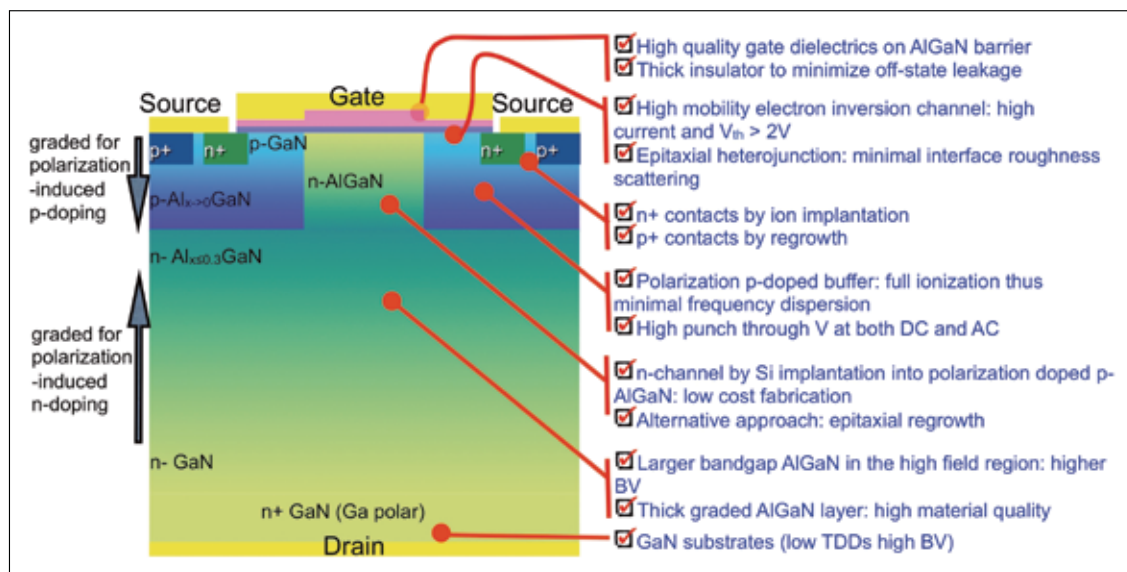


图3. (a) 传统横向GaN晶体管是一种横向结构，这种结构的缺点是：在高功率容量时芯片的尺寸要增大，其热学性能差以及存在电流崩溃效应。(b) 而采用纵向晶体管结构能够全面解决这些问题。

图4. PolarMOS技术结合了pn结器件、MOSH和JFET技术。



都产生在垂直方向上。随之，在横向维度上就不必考虑工作电压与其尺寸的比例关系。正是因为这一点，纵向器件芯片的尺寸要比横向器件小5倍以上。此外，纵向器件结构还能够消除电流崩塌效应，这样就能够提升器件的开关速率及其对热量的处理能力。但是这里我们依然要指出纵向器件所面临的挑战：它需要一个极性PN结来形成二极管和晶体管，而且由于众所周知的在材料上的限制性问题，目前在制造P掺杂GaN器件上还存在着困难。

为了解决这些技术问题，Notre Dame大学(UND)和Cornell大学联合研究小组的负责人Huili Grace Xing和Debdeep Jena开发了极化掺杂(polarization-doped)的p型和n型层以及相关的PN结。由于在掺杂技术上的突破，现在已经能够用来制备高击穿电压、反型沟道的高迁移率和低导通电阻的晶体管结构。另一项关键技术是在极化掺杂的p区采用低成本的硅离子注入方法来转变成n型沟道(见图4)。

除了上述的挑战之外，如果纵向GaN器件要在商业上得到普及，还必须克服技术成熟性以及供应链等问题。这种类型的GaN器件在马达驱动、光伏逆变器、电动汽车充电、电信应用中的DC-DC转换以及军工领域将存在大显身手的机会。它能否取得成功还取决于其它方面的多种因素，但其中器件的性能永远是最为重要的因素，需要这种纵向GaN器件能够在高频和高温工作环境下进行高效率开关操作。如果能够做到这一点，并能够满足在工业可靠性上的要求，这种技术就能在系统级层面上来减小器件的尺寸并降低成本。

一种双管齐下的方法

我们队伍中的Qorvo公司是SWITCHES两个子项目的承包商，第一个子项目是由Huili Grace Xing和Debdeep Jena负责，还包括有IQE和联合技术研究中心(UTRC)两家机构(详见图5)。第二个子项目由Microlink公司负责，Microlink是一家专门从事外延层剥离技术的公司，他们能够通过对GaN衬底基体的重复利用，来大幅度降低器件的生产成本。由于GaN衬底具有尺寸小却成本高的特点，不论是工业界还是学术界的研发先驱者都对这种需要使用GaN衬底基体的GaN-GaN器件兴趣寥寥，但是Microlink公司的工作却解决了这一问题。

UND/Cornell大学至今为止所做出的贡献是振奋人心的，他们已经成功利用了IQE公司根据SWITCHES项目要求开发的外延片，设计并制造出了阻塞电压为1200V的GaN衬底上GaN p-n结二极管，以及阻塞电压超过3000V的p-n结二极管。这种在GaN衬底上GaN的p-n极性二极管有近乎完美的I-V曲线和雪崩特性。PolarMOSH器件已被测量证实其阈值电压为1.3V，最大电流为250 mA/mm，最高栅压超过15V。除此之外，Qorvo公司最近还发现，采用分子束外延再生工艺制备的JFET的阻塞电压可以达到700V，同时计划在2015年将其制造转换到4英寸晶圆工艺平台上，以解决在工业生产上的成熟性问题，同时来进一步地降低成本。SWITCHES项目的关键性目标在不断地实现，使人对此项目的核心技术增添了信心。

目前来讲我们仍然面临着许多挑战。一个近期目标就是要在衬底和外延片的改进上取得成

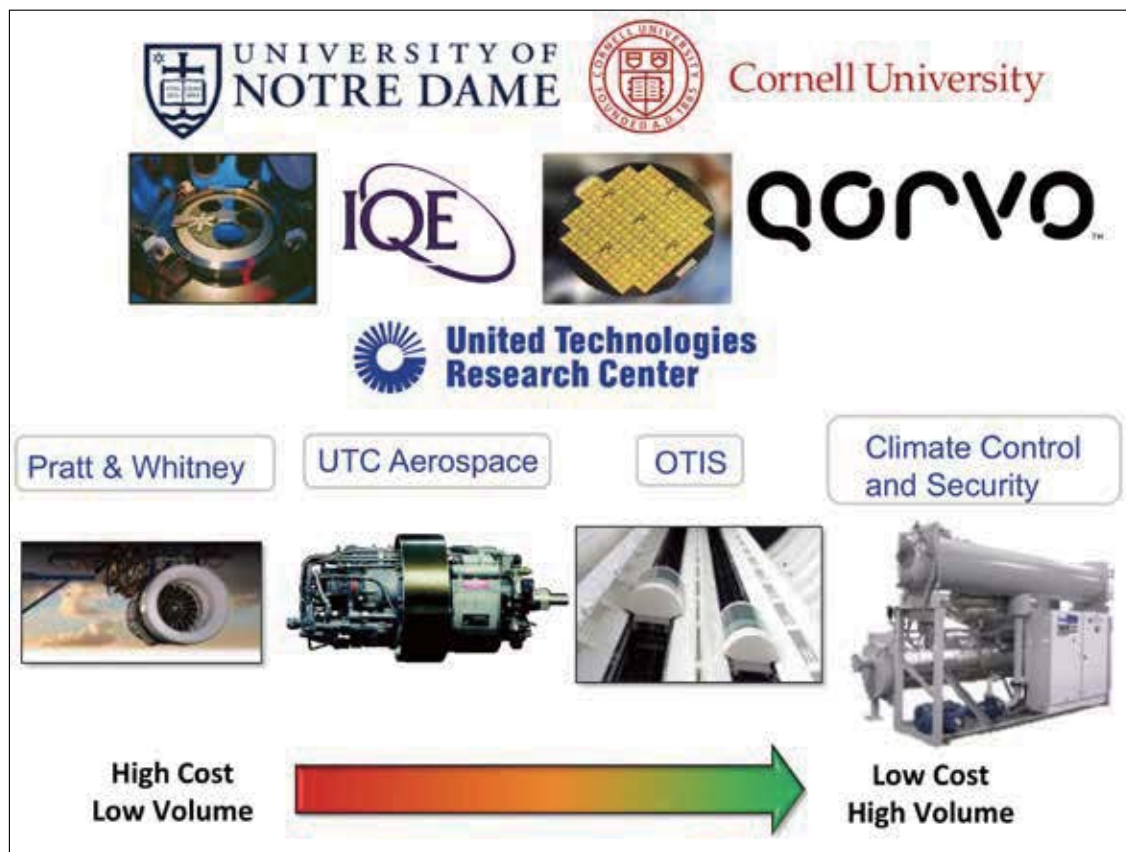


图5. 由Huili Grace Xing 和 Debdeep Jena 共同领导的SWITCHES研究团队前不久刚从Notre Dame大学搬到了Cornell大学，该团队科研实力强劲，其优势有着高度的互补性。Xing 和 Jena是差分型器件结构基础IP的发明人，该器件设计解决了纵向GaN器件的掺杂难题。IQE是III-V族半导体行业外延片的主要供应商，它不仅拥有世界级的工程研究背景，也具有能长期提升其生产容量的商业成本结构。UTRC是美国联合技术公司（UTC）的研究中心，承担着该企业技术孵化器的角色，它在航空航天、国防和商业应用中的功率系统设计上有着丰富的经验。Qorvo是世界射频器件领域的领先供应商，它在移动通讯、基础设施和国防领域的GaN器件制造和开发应用上有着超过15年的经验。UTRC不仅可为SWITCHES项目开发的产品提供商业化的通路，同时也是该项目的一个重要合作伙伴，它在确定产品性能、规格以及整个系统层面的需求上能够提供很大的帮助。

功，并需要证明纵向极性 JFET 的工作电压和工作电流要能够分别达到 300V 和 10A。这项工作芯片加工时能够降低多种风险，当前的工作主要是集中在对工艺的控制和校准上。

另一个挑战是要生产更大尺寸的 JFET，使它能够在 10A 甚至更高的电流下工作，要能够在 4 英寸晶圆厂的大尺寸 GaN 衬底基体上进行加工。已经制订了一个更具进取性的计划来推动衬底供应商提供 4 英寸晶圆的衬底，这将能使我们在 Qorvo 4/6 英寸工厂中加速工艺的开发和成熟进程。

我们下一步的计划是推进 polarMOSH 工艺和 polarJFET 工艺的整合集成工作，来生产极性 MOSHET- PolarMOS 器件。尽管我们已经证明所生长的材料已经能够获得超过 1200V 的阻塞电压，但是这一结果需要在再生长或离子注入沟道中得到重复。有一个好消息是我们已经开发和获得了具有更高阻塞电压、兼具更高可靠性的新技术及其知识产权。除此之外，将外延层的剥离技术与新型器件结构进行整合的工作也已提上了日程。

最后的挑战就是要在系统级层面上来开发封装技术，来制造兼具元件集成的小尺寸外形的大功率器件，Qorvo 正与和其他两个子项目成员合作进行封装技术的开发，使之能够在系统级层面

上来最大程度的发挥纵向 GaN 衬底上 GaN 器件的性能，这种新型器件的性能能够满足实现低成本、高效率开关的要求，对它的需求也正在与日俱增，这将有助于在全球范围内来削减电能的损耗和加速替代能源的广泛应用。

由于我们的努力而获得的成果包括有：一种完全不同于以往的新器件核心技术，一种世界级的供应链和系统合作伙伴，一种能实现大批量制造的基础设施及其对应的平行技术，包括通过对衬底基体的重复利用来降低成本，上述成果使得我们 Qorvo 公司已成为了业界关注的焦点。通过开发这些面向市场的技术解决方案，去除了阻碍宽禁带功率器件全面发展的绊脚石，使得整个电能转换领域将拥有令人振奋的未来。☞

扩展阅读

H. G. Xing et. al. "Unique opportunity to harness polarization in GaN to override the conventional power electronics figure-of-merits". Device Research Conference, June 2015, <http://arxiv.org/abs/1505.04651>

ARPA-E. "Strategies for Wide-BandGap, Inexpensive Transistors for Controlling High Efficiency Systems (SWITCHES)", 2013

S. Chowdhury et. al. Semicond. Sci. Technol. 28 074014 (2013)

J. Simon et. al. Science 327 60 (2010)

D. Jena et. al. Phys. Stat. Solidi. 208 1511 (2011)

新型照明用激光器件

一种新型的纳米激光器具有宽的工作电流范围和高发光效率。

一种多用途、高性能的固态光源需要在大范围的工作电流下始终能保持高的量子效率，很显然发光二极管是无法达到这种要求的。随着电流的增加，发光二极管的量子效率会呈现下降态势，而激光器在低于阈值电压下的工作性能也不尽如人意。

根据最近来自 Sandia 国家实验室的 Weng Chow 和 Mary Crawford 的报告，有一种器件可以在大范围的工作电流下始终保持良好的性能。根据他们的计算，这种纳米激光器阵列在低电流密度时几乎能与发光二极管的量子效率相媲美，而在高电流密度下它同样可与激光器的量子效率十分接近。

Chow 和 Crawford 开发了唯一可适用于描述发光二极管和激光器工作在其阈值电压上下时的理论，并据此得出了上述结论。目前这一理论可应用于三类器件的研究：一是没有光学谐振腔的发光二极管器件，二是以分布式布拉格反射器为主导的垂直谐振腔表面发射激光器（VCSEL），三是具有更小线度光学振荡腔的纳米激光器，它具有更好的对自发发射过程的控制性能。

用于模拟计算发光二极管效率的器件结构是由一个 2nm 厚的 $\text{In}_{0.37}\text{Ga}_{0.63}\text{N}$ 量子阱层，并与两层 GaN 阻挡层形成三明治结构。Sandia 的两名科学家之所以采用如此简单的器件结构，是因为可以避免产生由于载流子非均匀分布所引发的复杂性问题，还可以避免由于 Stark 量子约束效应所产生的屏蔽作用。在他们的计算中还引入一个条件，即是效率下降始于 10A cm^{-2} 左右。他们认为这一数值是合理的，因为这个数值与来自加州大学 Santa Barbara 分校的 Chris van de Walle 团队的工作符合得很好，该团队以第一性原理计算了声子作用下的俄歇散射问题。

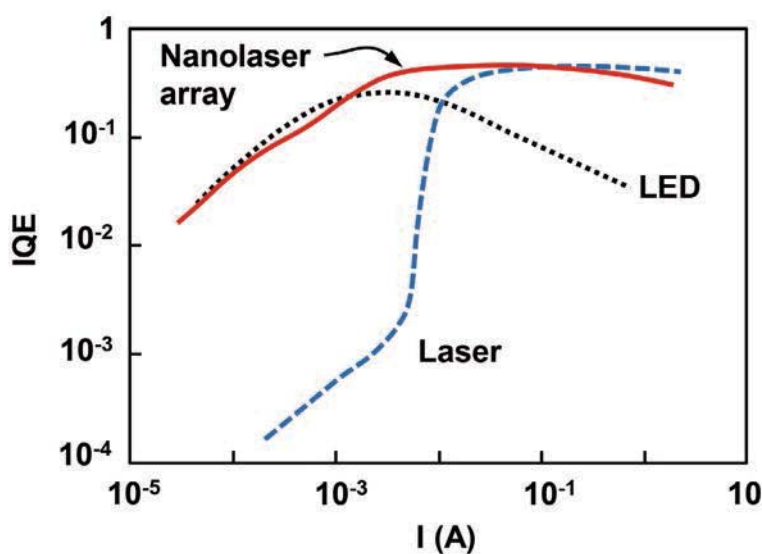
Sandia 团队的模拟工作针对的是在 300K 温度下工作、尺寸为 $100\mu\text{m}$ 见方的器件。通过假设该器件具有 100% 的光获取效率、均匀的载流子注入以及在高激发态时不受费米能

级限制等条件来确定这种器件的性能极限。

与此同时，对于垂直谐振腔表面发射激光器（VCSEL）的模型采用的是 3×3 器件阵列，具有 $5.6\mu\text{m}$ 见方的光发射截面。选择了具有 3% 填充因数的结构，可使其工作电流为

1A 时输出功率可达到 1W。

将垂直谐振腔表面发射激光器（VCSEL）器件的量子效率看作是随工作电流而变化的函数，可以看到，一旦激光器件的工作电流达到其阈值，其量子效率将会高于 LED 器件（见图）。然而，VCSEL 可能是大功率照明应用中更为理想器件，它并不太适合普通的照明应用，这是因为此时为了



与LED和VCSEL不同，新型纳米激光器具有宽的工作电流范围和高的量子效率。

节能而需要采用较低亮度的照明。

能够解决这一问题的是一种新型的纳米激光器，它可以由光子晶体或者等离子谐振腔构成，它的主要特点是能够将光的自发发射高效率地转化成为激光发射模式。当进行一个高阶自发发射时（自发发射因子 β 设置为 1），器件的光输出功率几乎将会一直随工作电流的增加而持续增加。

这种输出功率随电流线性变化的特性是十分重要的，但需要指出的是，当纳米激光器无法发射激光时会导致器件性能的下降，这是受到 InGaN 和 GaN 材料体系内部自身的高吸收率影响。

对于激光器在照明应用中的另外一种可行的方法是 VCSEL 阵列在低功率应用时只需启动部分器件单元即可。

Chow 说道：“我们现在可以通过控制发光二极管的开启数量来实现 LED 照明高低亮度的调节模式”。他还指出：采用纳米激光器要比采用单一的 VCSEL 更为节能，器件结构更为简单，因为纳米激光器不需要大的电流注入。

Chow 目前正致力于将他的模拟计算研究成果向纳米激光器的多模运行方面扩展。

W. Chow et. al. Appl. Phys. Lett. 107 141107 (2015)

功率器件 GaN 衬底的优化

采用氢化物气相外延 (HVPE) 方法在热氨籽晶上生长具有低电阻率、低缺陷密度的非极性 GaN 衬底材料。

一个日本团队宣布已经制作出了一种具有最佳性能的衬底，可用于制作垂直结构的 GaN 功率器件。作为论文通讯作者的日本 Tohoku 大学 Kazunobu Kojima 向 Compound Semiconductor 杂志介绍了他们的工作，他们采用独立式 (free-standing) 氢化物气相外延 (HVPE) 方法来生长 GaN 衬底，具有制作器件所需的高晶体质量和优良的电学性能，可在两个重要应用领域具有突出的表现。

在这种衬底上制作垂直 GaN 器件的性能将优于传统的横向 GaN 器件。传统横向 GaN 器件性能会受到以下因素的影响：大的芯片尺寸带来的成本增加、电流崩塌（在开关转换时漏极电流发生锐减）效应等问题的制约。

通过氧掺杂实现了低的电阻率，并采用了非极性 m 面取向，使得这种衬底拥有良好的电学性能，可以满足制作垂直 GaN 器件的要求。

“因为 m 面没有压电效应和自发极化问题，异质结界面应当没有载流子”，Kojima 解释道。利用掺杂来控制二维电子气的浓度，就可以制作常关态晶体管，而这种常关态器件比那些常开态的晶体管在应用中更受欢迎。

这种可以满足器件制作晶体质量要求的 GaN 衬底是由 Tohoku 大学、三菱化学公司和 Tsukuba 大学共同研发，该衬底材料的螺旋位错密度低于 10^4 cm^{-2} 。

为了确保良好的器件质量，衬底材料的螺旋位错密度需要控制在这一水平上。这是因为这种类型的缺陷可以螺旋侵入到外延层，使得位错会贯穿整个器件，作为一种导电通路，使它成为器件在高电压下产生电流崩塌的主要原因。

Kojima 和他的同事们在一个具有 GaN 籽晶、几乎无弯曲的晶圆块体上利用氢化物气相外延 (HVPE) 生长 GaN 薄膜来制作这种衬底。晶圆上的籽晶层是在超临界氨气气氛中用酸性矿化剂进行氨热生长制得的。

在 GaN 薄膜生长完成后将其从籽晶层上剥离，并进行



具有高晶体质量的低电阻率GaN衬底可以促进垂直型功率器件的生产，可以提升电力供应的效率。

X 射线衍射分析，发现沿着 c 轴和 a 轴上分别有 18 弧秒和 25 弧秒的衍射峰。这些衍射峰值已接近于这套分析系统的极限分辨率，因此不能使用这种方法来估计由螺旋位错或刃位错分量所组成螺旋位错的密度。

为了测得这种螺旋位错的密度，研发团队改为采用一种空间分辨阴极荧光光谱的测量方法，估算得出了它的螺旋位错密度为 10^4 cm^{-2} ，以及在基面上的堆垛缺陷密度小于 1 cm^{-2} 。

在氢化物气相外延生长薄膜的过程中，所控制的氧掺杂浓度

为 $4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ，之后用范德堡方法来评估生长薄膜的电学性质。结果表明在温度低于 70K 时，材料的迁移率达到 $85 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。而在更高的温度下，迁移率会随温度升高而增加，在室温时可达 $300 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

研究人员指出，在较低螺旋位错密度时，迁移率还会受到杂质散射的影响。基于这一发现并考虑到掺杂剂的能量，他们判定费米能级已经进入了导带。

在 300 K 下使用 3.5 keV 的低强度电子束来获得近能带边缘的阴极荧光光谱，发现在 3.382 eV 处有一个谱峰。与无应变 GaN 块体材料的自由激发峰能量相比，这个谱峰值要比其小 30 meV，这说明他们所使用的样品受到了由施主引起的能带尾部的影响。

近能带边缘的阴极荧光的内量子效率为 1.4%，这个数值与该团队其它成员所报道的 c 面高质量独立式 (free-standing) GaN 样品的 2.3% 内量子效率数值相接近。

室温下的时间分辨光致荧光光谱发现其快速分量的寿命 (fast component lifetime) 达到了创纪录的 2.07 ns，这表明材料中具有浓度较低的非辐射复合中心，而正电子湮灭谱表明在 n 型 GaN 中具有较低的镓空位浓度。

K. Kojima et. al. Appl. Phys. Express 8 095501 (2015)

采用量子点 - 阱组合结构来增加绿光 LED 的效率

具有量子阱上量子点结构的 LED 能够发出更强的绿光。

中国清华大学的研究人员通过在绿色发光量子点下方加入了一个量子阱，使得其内量子效率提高了至少两倍，量子点效率得以提高的原因是改进了载流子的传输方式，使得电子能够从阱中隧穿进入量子点中。

论文的通讯作者 Lai Wang 说：“据我了解，这是首次报道这种结构所具有改进性能。”

这个位于北京的研究团队的成果将有助于推动高效率、高色温白光光源的发展，这种光源是由红、绿、蓝三种颜色 LED 所组成。以往白色光源的性能主要是由内量子效率相对较低的传

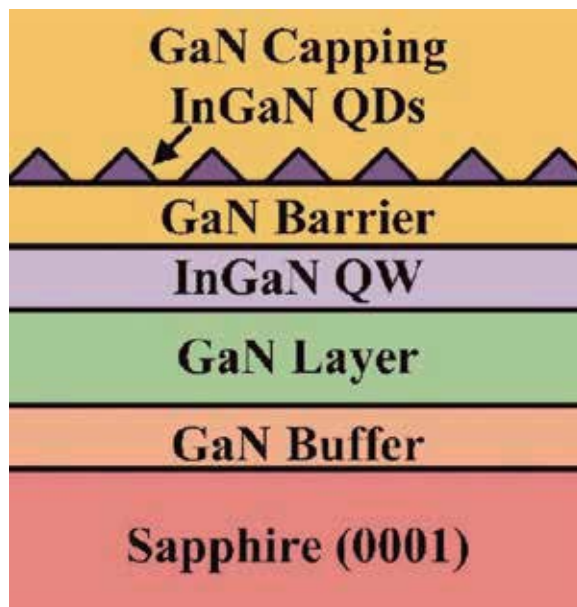
统量子阱型绿色 LED 所决定，而这种绿光发射器件的效率主要受到两个因素的限制：在功能活性区，由于热学和晶格失配导致的高强度应变会产生光猝灭型缺陷；在阱结构中，较强的压电极化场能将电子和空穴分离，会降低它们辐射复合的可能性。

用量子点来代替阱结构能够通过降低应变和内部电场的方式来同时解决这两个问题。但是加入这些三维岛状结构后会减少载流子的俘获截面。在器件中，这意味着注入到活性区中的很多载流子会向外泄漏，从而降低了量子效率。

最初，来自清华大学的研究团队尝试在他们的 LED 结构中加入 5-10 层量子点来提高对载流子的俘获能力。Wang 解释道：“然而，载流子的泄漏现象依然存在”。他指出，具有更多层量子点的较厚活性层会产生更多的缺陷，比如由于应变弛豫而产生的 V 形凹坑或者位错等，这些不完整性对器件性能都会造成伤害。”

为了不降低活性区的质量而又能增加对载流子的俘获能力，研究团队转而采用调整器件的结构，也就是在制作量子点层之前增加了一个 InGaN 量子阱。通过对一系列不同结构的尝试努力，确定了该量子阱的理想厚度和成分，以及将之与量子点层分隔的阻挡层厚度。

实现这个目标的可选方法之一就是建模来对器件结构进行优化。然而，这种方法后来被排除了，因为要对量子



在发射绿光的量子点下方加入一个阱结构能将其内量子效率提升到45%

点的生长动力学进行模拟是件十分困难的事情。

为了找到可以替代的方法，研究人员在经图形化的蓝宝石衬底 C 面上用 MOCVD 的生长方法制备了 8 个量子阱 - 量子点耦合样品。每个样品都包含有 30nm 厚的低温 GaN 缓冲层、一个 2μm 厚的未掺杂 GaN 层、一个活性层和一个 9nm 厚的 GaN 覆盖层。

为了制备一系列不同的样品，研究团队制备了不同厚度 (3.5nm、4.5nm 或 5.5nm) 不同镓含量 (6%、12% 或 24%) 以及不同阻挡层厚度 (2nm-8.5nm) 的带有 InGaN 量子阱的异质结构。

量子点的生长分为两个步骤，先在阻挡层上沉积 1.5nm 厚的 $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ 薄膜，紧接是 20s 的生长中断过程，在这期间薄膜会进行重整而形成岛状的量子点。

在 300K 和 13K 的温度下来测量光致发光强度，并比较这两种温度下的测量结果，为所有样品的内量子效率提供数据。发现成分为 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ ，厚度为 4.5nm 的量子阱并具有一个 4.5nm 厚阻挡层所构成的异质结构具有最高的内量子效率，可以达到 45%。相比之下，没有量子点活性区、4.5nm 厚的 $\text{In}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{N}$ 量子阱结构的对照样品，其内量子效率只有 21%。

Wang 相信，还可以对这种结构进行进一步的优化。“我们的优化结果只对这种 InGaN 量子点有效，这种量子点是通过 MOCVD ‘两步’ 生长中断方法来制备，名义上它应该有 1.5nm 高，镓含量为 30%”。对于不同的量子点来说，它的量子阱宽度、阻挡层厚度和量子点成分应该有不同的最优值。

Wang 还说道：“除此之外，我们的结构还只有一个耦合周期的量子阱和量子点，如果我们增加量子阱 - 量子点结构的耦合周期，其内量子效率还可能会有进一步增加”。最近，我们研究团队正在采用三至五个量子阱 - 量子点的耦合周期来制备新型激光二极管，“目前，我们正在进行这种器件的工艺流程”。

J. Yu et. al. Appl. Phys. Express 8 094001 (2015)

降低栅极中陷阱的密度

低温退火能降低新一代 MOSFET 栅极界面陷阱的密度。

来自中国的一个工程团队宣称，他们已经制备出了具有最低界面陷阱密度的 Al_2O_3 和 InP 薄膜堆叠结构。

他们利用了一种新型的低温热处理工艺来制备这种薄膜堆叠结构，这将有助于 III-V MOSFET 的发展，是一项很有发展潜力的技术，有望在未来五年甚至更长时间内来保持摩尔定律的前进步伐。

研究团队的工作是在 III-V 族 MOSFET 中制作具有更高质量的栅极。在化合物半导体表面用原子层沉积技术来生长高 K 介质层会导致在其界面处出现高密度的界面缺陷。为了克服这一缺点，研究团队尝试在介质和沟道层之间插入一个阻挡层，尽管这样做有助于提升沟道的质量，但是在阻挡层和介质层间的界面依然会出现缺陷。但是利用他们的工艺开发成果就能够有效地降低这种缺陷的密度，该成果由中国科学院和桂林电子科技大学合作完成。

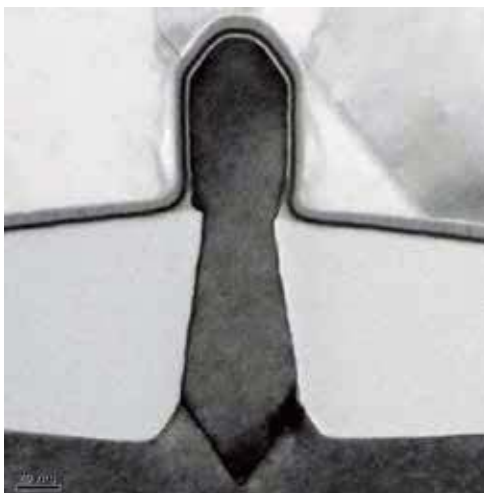
根据文章通讯作者中国科学院 Sheng-Kai Wang 对他们工作的描述，他们工艺的创新之处就在于放弃了在沉积后进行非原位的高温退火工艺。

Wang 说道：“总体来说，沉积后的退火一般需要相对较高的温度，比如采用超过 400°C 的 Celcius 退火工艺以形成高质量的介质层”。“然而，我们通过对样品进行气体热脱附谱 (TDS) 和 X 射线光电子能谱 (XPS) 表征后发现，高温退火工艺对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InP}$ 界面会产生损伤的”。

Wang 和他的合作者通过表征在 n 型 InP 衬底上 MOS 电容的性能，证明了他们工艺的优势。为了制备这种器件，他们首先利用化学清洗方法来去除衬底表面的天然氧化层，并使表面产生钝化，然后用原子层沉积方法在该表面沉积一个 3nm 厚的 Al_2O_3 层，再用电子束蒸发来沉积厚度为 200nm、面积为 $7.85 \times 10^{-5} \text{ cm}^2$ 的 Al 层，最后在真空环境中 200°C 温度下进行 10min 左右的沉积后的退火处理。

为了确认在金属化后进行退火的影响，并不是所有的样品都按照上述工艺进行处理，有一些样品则是氮气环境中在 250°C - 350°C 温度范围内来退火 30 秒。

工程师们在 10Hz-1MHz 频率范围内来测量样品的电容 -



在8英寸硅衬底上利用低温退火工艺制备宽度为20nm、具有高质量埋沟道的InGaAs-Fin结构。

电压 (CV) 关系曲线，来研究所有 MOS 电容的质量。

根据 Wang 的观点，结果说明对于 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{InP}$ 堆叠结构的电容 - 电压 (CV) 关系曲线来说，用他们工艺制作的电容器在积累状态时具有最小的频率离散。

这些 CV 曲线是用来确定电容器中的界面陷阱密度。

如果在金属化完成后没有进行退火，器件陷阱密度的 CV 测量结果为 $1.5\text{-}2.5 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 。在进行退火之后，这种陷阱密度会降低。如果一个 MOS 电容器在 300°C 温度下进行金属

化后的退火处理，可以得到最低数值的陷阱缺陷密度，为 $1.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ，

Wang 和他的同事们也测量了电容器栅极的漏电流密度，发现在 300°C 温度下进行退火的器件这一性能也最佳。

为了确认为何在 300°C 温度下退火的电容器具有最佳的性能，研究团队进一步利用 TDA 和 XPS 对他们的器件样品进行了仔细的分析，发现如果在沉积 Al_2O_3 膜后立刻进行温度为 200°C 的退火，并不能去除样品中残留的水，但是当金属化后退火温度达到 300°C 时，样品中的水就能全部除去。

然而，电容器在退火温度上的进一步提升实际上是对其性能是有害的。当退火温度升高至 350°C 时，由于 InP 衬底会发生分解而导致其中磷的析出。

根据他们的研究成果，研究团队建议将热退火处理温度控制在 350°C 以下，以防止产生衬底中磷原子的析出。而由于碳元素污染和残余磷的氧化所导致的界面缺陷、在积累区电容频率的离散以及栅极漏电等问题都能够通过 300°C 温度下的退火给以消除。

研究团队正在用这种极具发展潜力的工艺来制作栅极，还要攻克在大尺寸硅晶圆上制备的难题，以及能在 InGaAs-FinFET 上生长高 K 介质 / InP 层的堆叠结构。

Wang 总结说道：“我们现在已经在 8 英寸硅衬底上成功地制作出了宽度为 20nm、具有高质量埋沟道的 InGaAs-Fin 结构，其中还包含了等效氧化层厚度约为 1nm 的介质层”。

S.-K. Wang et. al. Appl. Phys. Express 8 091201 (2015)

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	5

欢迎投稿

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

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

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

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

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

文章投稿指南

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

图表编号一致;

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

新产品投稿指南

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

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

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。



www.compoundsemiconductorchina.net

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

Editor in China(中国版编辑)
Sunnies Zhao (赵雪芹)
sunnies@actintl.com.hk

Sales Director (销售总监)
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

