

# 化合物半导体



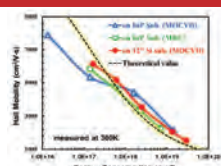
# • CHINA

季刊 2017年 第1期

## 快速刻蚀工艺



## III-V族CMOS晶体管



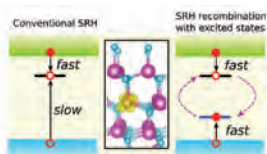
## GaN VCSEL



## 金属合金膜的沉积



## LED铁杂质研究



## 氮化镓 实现射频能量转换



**MACOM**  
Partners from RF to Light



您认为,

**AIXTRON**  
Our technology. Your future.

# 氮化镓功率器件的生产 需要高产能解决方案.

我们也这样认为.

**最新型 AIX G5+ C**



## 发现最新型 AIX G5+ C.

基于荣获最佳单晶片性能奖项的行星式反应技术,  
提供多晶片反应腔的产能优势,  
提供晶盒到晶盒晶片自动化放取技术,  
提供炉内原位清洁技术,  
提供已被验证的器件工艺制程.  
实现工艺流程全自动化,  
与现有的硅晶片产线无缝衔接.



# 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](http://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



## 封面故事 Cover Story

- 11 GaN是如何转换射频能量及其在烹饪中的应用**  
**How GaN is transforming RF energy and cooking applications**  
- Mike Ziehl, MACOM公司副总裁兼多种市场业务部总经理  
- Mark Murphy, MACOM公司射频功率市场与业务拓展高级总监

## 业界动态 Industry

- 5 用于射频器件的快速刻蚀工艺**  
**A faster etch for RF devices**  
**7 促进分子束外延技术的大规模应用**  
**Bringing MBE to the masses**

## 采访 Interview

- 9 硅氮化镓: 完美平衡性能、成本及供应链规模化**  
**GaN-on-Si: balancing performance, cost and scale supply chain perfectly**

## 技术 Technology

- 14 300mm硅晶圆上III-V族CMOS晶体管的逻辑应用**  
**III-V CMOS transistors on 300mm silicon for logic applications**  
- MAO-LIN HUNAG, SHANG-WEN CHANG, CHUN-HSIUNG LIN, HOWARD C.-H. WANG, CARLOS H. DIAZ; TSMC台积电公司  
**18 将GaN垂直腔面发射激光器推向市场**  
**Getting the GaN VCSEL to market**  
- TATSUSHI HAMAGUCHI, 索尼公司  
**22 用单源蒸发技术来优化金属合金膜的沉积**  
**Optimising metal alloy deposition with single-source evaporation**  
- Kuohsiung Li, Phil Greene; FERROTEC公司

## 科技前沿 Research Review

- 26 提高氮化物基LED的橙光发射性能**  
**Refining the orange-emitting nitride LED**  
**27 解决LED中铁杂质的难题**  
**LEDs: Resolving the iron conundrum**

## 4 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》中国版(CSC)是全球最重要和最权威的杂志Compound Semiconductor的“姐妹”杂志,亦是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/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



扫一扫  
免费下载电子书



网址: [www.iqep.com/indexchina/](http://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]

## 氮化镓时代来临

由于氮化镓 (GaN) 器件具有更小的外形、更好的热学性能以及更高的效率, 业界对其期待已久。近年, 随着 SiC 基 GaN (GaN-on-SiC) 器件开始投放市场, 硅基 GaN (GaN-on-Si) 器件的研究也日益深入, 并逐渐从研发阶段转入市场化生产。虽然这些产品尚未完全成熟, 但好消息是这些器件制造商正在完善器件的结构设计, 以及改良生产工艺, 硅基 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。IHS Research 预测, 从 2015 年到 2020 年间的功率器件的年均复合增长率将会达到 90% 左右。可以预料, 随着生产量的上升和生产成本下降, 不论是 GaN-on-SiC 还是 GaN-on-Si 器件的应用范围都会进一步得到扩展, 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。

牛津仪器公司等离子技术光电产品经理 Mark Dineen 说: “SiC 基 GaN 绝对是一个日益增长着的市场。” 牛津仪器公司为此推出了一套最新的 SiC 通孔刻蚀工艺技术, 解决了 SiC 刻蚀的难题, 并可以将其附加到该公司的 PlasmaPro100 Polaris 刻蚀系统中。PlasmaPro100 Polaris 是单晶圆刻蚀系统, 从一开始就是为了能在 GaN、蓝宝石和 SiC 等多种晶圆上进行快速刻蚀而设计的, 现在已经证明了它在 SiC 基 GaN 器件开发中的重要地位。详细内容请阅读本期刊登的“用于射频器件的快速刻蚀工艺”一文。

氮化镓的性能优势过去一度因其昂贵的成本而被抵消。那么, 与 GaN-on-SiC 竞争的 GaN-on-Si 情况又是怎样呢? 去年, GaN-on-Si 的代表 MACOM 公司庆祝它销售了超过一百万个 GaN-on-Si 射频器件, 同时声称其 100W 的射频晶体管在相等性能下最为便宜。最近, IMEC 推出了一项硅上 GaN 研究项目, 目的是生产八英寸的硅上 GaN 晶圆。

MACOM 公司凭借其 GaN-on-Si 技术脱颖而出, 在产品性能、成本和供应链规模化之间取得了最佳平衡, 成为大多数射频应用中可替代砷化镓和 LDMOS (横向扩散金属氧化物半导体) 的最具成本竞争优势的材料。

MACOM 无线产品中心资深总监成钢表示: MACOM 的 GaN-on-Si 秉承了氮化镓特有的射频性能优势, 平均效率比目前主流的 LDMOS 技术高 5% 左右, 这意味着对基站和射频能量应用的能量效率全面提升……以前制约氮化镓技术推广的高昂成本, 因为 GaN-on-Si 技术低廉的成本架构而打破。因此, 我们认为氮化镓技术在基站和射频能量应用的普遍推广必将因为 MACOM 的 GaN-on-Si 方案的积极推进而大大加速。

关于 GaN-on-Si 技术的发展和应用情况, 请阅读本期刊登的“硅基氮化镓: 完美平衡性能、成本及供应链规模化”和“GaN 是如何转换射频能量及其在烹饪中的应用”两篇文章。

赵雪芹

社长 Publisher

麦协林 Adonis Mak  
adonism@actintl.com.hk

主编 Editor in Chief

赵雪芹 Sunnie Zhao  
sunniez@actintl.com.hk

出版社 Publishing House

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

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200  
Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 25988571  
Fax: 86 755 25988567

武汉 Wuhan

Tel: 86 27 59233884

UK Office

Angel Business  
Communications Ltd.  
6 Bow Court,  
Fletchworth Gate,  
Burnsall Road, Coventry,  
CV56SP, UK  
Tel: +44 (0)1923 690200  
Chief Operating Officer  
Stephen Whitehurst  
stephen.whitehurst@angelbc.com  
Tel: +44 (0)2476 718970



# 用于射频器件的快速刻蚀工艺

据《Compound Semiconductor》杂志报道，随着 SiC 基 GaN 器件开始投放市场，牛津仪器公司已经开发出了一种新型的通孔刻蚀技术以降低该器件的制造难度。

对于射频器件行业来说，如能对 SiC 背面通孔进行平滑且快速的刻蚀，这对获得具有高性能和高性价比的半导体射频器件来说将是至关重要的。

**最**近，牛津仪器公司（Oxford Instruments）推出了一套最新的碳化硅（SiC）通孔刻蚀工艺技术，并可以将其附加到 PlasmaPro100 Polaris 刻蚀系统中。

PlasmaPro100 Polaris 这种单晶圆刻蚀系统从一开始就是为了能在 GaN、蓝宝石和 SiC 等多种晶圆上进行快速刻蚀而设计的。现在宽禁带材料已经证明了它在 SiC 基 GaN 器件开发中的重要地位，所以现在这种单晶圆刻蚀系统也增加了能快速、平滑地一次完成对 SiC 衬底的通孔刻蚀功能。

“这个系统已经推出好几年了，但是这种 SiC 通孔的刻蚀工艺是全新的”，牛津仪器公司等离子技术光电产品经理 Mark Dineen 说。

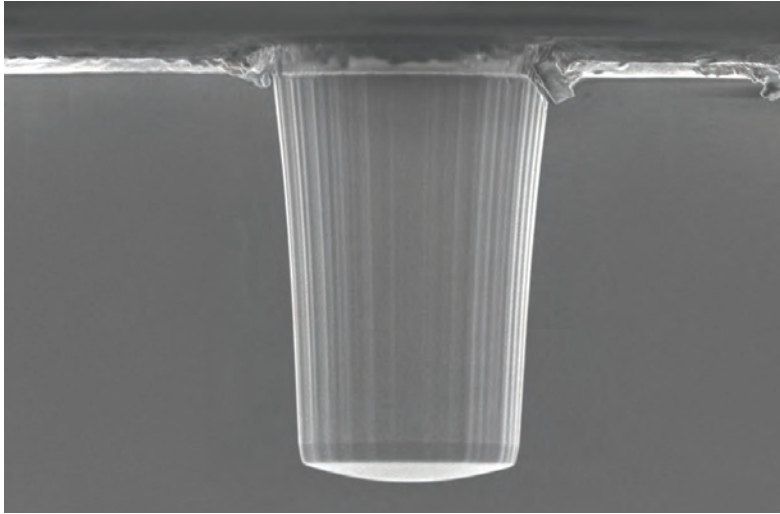
他补充道：“我们看到了市场在这方面的需求，因而开发了这种全新的工艺，我们相信现在是将它推向市场的时候了。SiC 上 GaN 绝对是一个日益增长着的市场，我们想要进入这个市场，成为其中的一份子”。

但是，在摸索 SiC 通孔刻蚀技术的前进道路上并不是一帆风顺的。在制作 SiC 上 GaN 晶体管时，SiC 背面的通孔刻蚀对形成电极接触起着非常关键的作用。但是，由于 SiC 材料极难进行刻蚀，全世界的研究人员都在努力如何来加工处理这个硬度接近金刚石的衬底材料。牛津仪器公司相信现在这个问题已经被我们解决了。

## 新的工艺技术

作为最新刻蚀工艺的一个组成部分，我们用石蜡把 SiC 晶圆黏结在蓝宝石载体上，然后利用等离子刻蚀工艺在晶圆上刻蚀出约 100 微米深的通孔。Dineen 强调，这种深度的通孔需要一种快速、猛烈的刻蚀过程，因此，在牛津仪器公司的工艺工程师所选择的刻蚀速率为 1.2 微米 / 分钟。

他说道：“我们需要通孔具有光滑的侧壁，如果我们刻



牛津仪器公司最新的通孔刻蚀技术能够形成一个高性能器件所需的光滑的、侧壁略微倾斜的通孔。

蚀太快，通孔就会产生锯齿状的侧壁，而且这样结构会产生局部加热效应而降低了器件的使用寿命”。“但一旦刻蚀速度过慢，会大幅降低刻蚀系统的效率，就会大幅增加系统的维持成本”。

许多研究人员在优化 SiC 衬底通孔刻蚀工艺中都会碰到一个问题，那就是在通孔中会形成一种所谓的“柱状”结构，它会妨碍形成良好的金属化。至于产生这种不寻常的柱状结构的原因，是在 SiC 生长时往往会在其微型管-空心管的末端产生结构变化，并且在相对较厚的 SiC 晶圆通过化学减薄到 100 微米时，这种柱状结构就会显现出来。

很多研究人员曾尝试采用预刻蚀清洗和预刻蚀过程来避免这种柱体的产生。但根据 Dineen 所说，牛津仪器公司引入了一个为时 30 秒的刻蚀过程来解决这一问题，它能平滑地去除顶层及其中所包含的缺陷，使得在进行 SiC 通孔刻蚀之前就能有一个干净的面。

所以，在去除缺陷之后，相对快速、猛烈的等离子体刻蚀就能迅速产生一个平滑的、侧壁略微倾斜的通孔，以用于随后的金属化工艺。然而，这个刻蚀过程也会在 SiC 晶圆和蓝宝石载体上产生升温，还有一个很严重的坏消息是石蜡粘结所能承受的最高温度不能超过 150℃。

为了保持石蜡粘结的完整性，我们将晶圆用静电夹持方法固定在下方的电极上，该电极内部具有液体冷却通道可以将晶圆上产生的热量通过电极散发出去。Dineen 强调，静电夹持已经广泛应用于硅产业，但是在 SiC 通孔刻蚀工艺中，在刻蚀的最后阶段，不导电的蓝宝石衬底将会被粘附在夹具上。

考虑到这一点，牛津仪器公司将过去在 GaN-on-sapphire LED 的部分研究成果应用到了这个系统中。

Dineen 解释道：“我们已经开发出一种静电夹持装置，能有效地夹持蓝宝石裸晶圆，它可以作为我们的蓝宝石衬底图形化工艺的一部分”。“由于我们开发的控制方法，使得我们可以出色地控制我们系统的温度，并且使得晶圆加工处理变得非常顺利”。

当牛津仪器公司将 LED 开发过程中的经验转移应用到 SiC 上 GaN 中时，他们也希望它在 SiC 上 GaN 射频器件市场中也能具有相同的增长潜力吗？Dineen 指出，如 wolfspeed，松下和富士通等一些公司都在研究 SiC 上 GaN 射频器件，并且他也强调中国制造商现在也正在向这个市场渗透。

然而，这个市场是无法达到 LED 所具有的市场规模，正如 Dineen 所说：“我们确实看到这个市场有着很多的上升空间，但我不认为我们会看到它会发展成 LED 一样大的市场”。

他补充说：“这是一个十分有趣的市场，它的体量正在不断变大，并且 SiC 在电力应用上也非常具有潜力”。“在这种充满商机的市场中，我们对 III-V 族材料的专业性将会使我们具有非常大的竞争力。”

那么其它竞争对手的硅上 GaN 器件情况又是怎样呢？例如，在去年的这个时候，MACOM 公司正在庆祝它销售了超过一百万个硅上 GaN 射频器件，同时声称其 100W 的射频晶体管在相等性能下最为便宜。最近，IMEC 推出了一项硅上 GaN 研究项目，目的是生产八英寸的硅上 GaN 晶圆。

他说：“对于 SiC 上 GaN 器件来说，其工艺成本将是一个很大的障碍，但它所具有的优异性能正在推动着需求的增长”，“如果你将硅上 GaN 的成本与其质量相比较，你就会发现 SiC 上 GaN 相对于硅上 GaN 来说还是很有优势的。当然硅上 GaN 肯定也还有着其本身的发展潜力，虽然它在性能上存在着不足之处”。

牛津仪器公司的 plasmapro100 polaris 刻蚀系统可以加工处理大至八英寸尺寸的晶圆。正如 Dineen 所总结的：“我不确定 SiC 晶圆的直径是否会达到那么大，但硅上 GaN 的尺寸正在接近这个数值，所以如果需要的话，我们可以在这种大尺寸晶圆上来刻蚀 GaN”。

# 促进分子束外延技术的大规模应用

《COMPOUND SEMICONDUCTOR》杂志向 Veeco 公司询问：Veeco 的外延生长研发系统被称为分子束外延（MBE）设备中的“瑞士军刀”，当 MBE 应用在迅速增加时，该系统是否还能继续抢占更大的市场份额？

Veeco 公司的分子束外延（MBE）研发系统“GENxplor”自三年前在中国首次展示以来，在全世界都获得了众多的好评。

已经交货的 25 台这种系统将很快在全球的大学和研究机构里开始运行，Veeco 公司的 MBE 产品副总裁 Gerry Blumenstock 预计，在未来的三年中公司将提供更多这种类型的设备。

他说道：“我们在中国 MBE 2013 上推出了这种设备，因为我们可以看到大量的资金正在投入中国的大学和技术研究中，而且在 MBE 行业领先的公司也纷纷迁到了中国”。

“最近，我们的业务在中国获得了发展，该系统在中国的应用已经十分广泛”，他补充说到：“每年我们设备的销售额与研发资金的投入都保持着稳定的增长态势”。

GENxplor 系统可在 3 英寸直径的衬底上沉积外延层，目前这套系统正大量使用在 III-V 基材料的许多应用中，包括高速晶体管、2D 材料研究和 UV-LED 制造中。

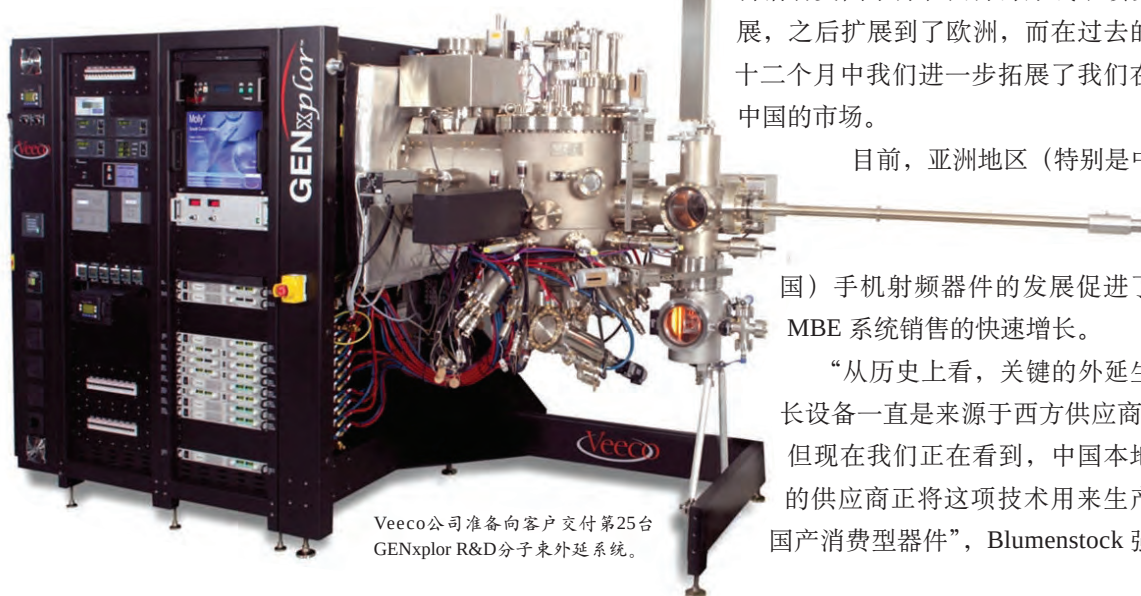
Veeco 公司自己还研制了一组 MBE 研发和生产设施，用在较大的 4 至 6 英寸的衬底上进行外延结构和器件的制作。但是正如 Blumenstock 所强调的，GENxplor 设备包含了真空硬件和机载电子设备的单一框架式设计，与其他公司的 MBE 系统相比在尺寸上要小 40%。他说：“这就像是我们做了一把‘瑞士军刀’式的 MBE 设备”。

Veeco 公司的第一台 MBE 设备采购是来自美国 Oklahoma 大学，该大学的研究人员利用它来开发激光器、光电探测器和太阳能电池的薄膜材料。从此开始，我们的销售沿着美国东部和西部海岸线继续发展，之后扩展到了欧洲，而在过去的十二个月中我们进一步拓展了我们在中国的市场。

目前，亚洲地区（特别是中

国）手机射频器件的发展促进了 MBE 系统销售的快速增长。

“从历史上看，关键的外延生长设备一直是来源于西方供应商，但现在我们正在看到，中国本地的供应商正将这项技术用来生产国产消费型器件”，Blumenstock 强



Veeco公司准备向客户交付第25台 GENxplor R&D分子束外延系统。

调说：“这是一个很大的转变。”

虽然 Veeco 公司副总裁强调，该公司的销售源于“在世界各地的无数应用”，但他依然对不断增长的 UV-LED 市场所带来的机遇感到兴奋。“我们有适用于 UV-LED 大规模生产可能需要的设备”，他还说：“现在仍然是 UV-LED 应用的早期发展阶段，许多公司正在兴起，但已经可以看到在某些终端市场中，如水体净化和紫外光固化等方面的实际应用”。

“这些都是重大的应用，而且 UV-LED 功耗低，总输出功率高；所以在我看来，这对我们行业来说可能是个巨大的机遇”，他补充说。

### 技术上的竞争

然而，相比于 MBE，许多器件制造商更偏好用 MOCVD 进行外延层的沉积，这并不是什么秘密。事实上，根据 Blumenstock 所言，MOCVD 能够用于大规模生产，这种设备的市场容量很大，例如在 GaN 器件的应用方面，MBE 设备就处于相形见绌的状态。

但是，他强调 Veeco 公司同时在开发 MBE

和 MOCVD 系统，因此，完全可以提供客户所需的这两种设备，“选择取决于终端客户以及他们正在寻求什么”。他说：“有些客户总是会找到一种方法使 MOCVD 能满足它们工作需求，而其他人员则会选择 MBE，因为他们觉得他们真的无法使用任何其他技术”。

“UV-LED 器件中的某些结构设计需要采用高的铝浓度，我们认为这更适合用 MBE 技术来制作，但我们同时拥有 MBE 和 MOCVD 这两种技术，并且能提供我们认为最为适合客户的系统”，他补充说。

随着第 25 台 GENxplor 销售完成，Veeco 公司下一步将做什么呢？Veeco 目前正在为其新型的 MBE 系统开发一套新的沉积源。Blumenstock 宣称，Veeco 公司研究人员在沉积源的稳定性和部件寿命方面已经取得了突破，且将很快实际应用到系统中。

他说：“这将使器件研究机构和制造商能够提高他们的生产良率，并能为高性能的光学和电子器件开发出更为复杂的器件及其薄膜叠层，对此我们感到无比的兴奋”。☞



## 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](http://www.evatecnet.com) or contact your local office.



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

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

[www.evatecnet.com](http://www.evatecnet.com)

# 硅基氮化镓：完美平衡性能、成本及供应链规模化

**作**为第三代半导体材料的代表,氮化镓(GaN)是当前非常热门的技术,随着技术不断发展和商业化应用的推进,其影响已经波及整个微波和射频行业。氮化镓为射频应用带来更优异的性能,并能实现利用传统半导体技术无法实现的系统级解决方案,因此,其市场潜力不容置疑。但是,氮化镓的性能优势过去一度因昂贵的成本而被抵消。最近,MACOM公司凭借其硅基氮化镓(GaN-on-Si)技术脱颖而出,在产品性能、成本和供应链规模化之间取得了最佳平衡,成为大多数射频应用中可替代砷化镓和LDMOS(横向扩散金属氧化物半导体)的最具成本竞争优势的材料。为此,《化合物半导体》专门采访了MACOM公司无线产品中心资深总监成钢先生,请他介绍公司硅基氮化镓技术的发展及市场情况。

**CSC:** MACOM公司在硅基氮化镓技术方面取得了业界瞩目的成绩,请您介绍一下MACOM硅基氮化镓技术及产品线的基本发展情况。

**MACOM:** MACOM的氮化镓产品线主要提供的是基于硅材质衬底的氮化镓产品,简称硅基氮化镓(GaN-on-Si)。这个产品的产权来源于MACOM对硅基氮化镓技术的发明者Nitronex的收购。Nitronex在氮化镓行业有超过15年以上的创新历史并拥有大于100万片针对军用通讯应用的发货历史,其可靠性经历海湾战争等一系列严酷环境检验。MACOM将Nitronex的硅基氮化镓技术针对基站和工业应用进行相应优化,把硅基氮化镓芯片的射频性能提高到和目前主流碳化硅氮化镓(GaN-on-SiC)同等的水平,并开发了一系列热性能优化的封装和工艺,结合行业领先的设计和应用支持,给客户提供了全系列低成本高性能射频功率器件解决方案。目前这些方案已得到主流客户的评估和认可,先导方案已进入量产阶段。

**CSC:** 无线基站及射频应用的半导体技术正在经历从砷化镓(GaAs)、横向扩散金属氧化物

半导体(LDMOS)向氮化镓的转变,MACOM公司的GaN-on-Si技术将会对于无线基站和射频应用带来哪些影响?

**MACOM:** 首先,MACOM的GaN-on-Si秉承了氮化镓特有的射频性能优势,平均效率比目前主流的LDMOS技术高5%左右,这意味着对基站和射频能量应用的能量效率全面提升,符合目前节能环保的潮流。氮化镓固有的对高频大带宽的支持,也符合未来大数据流量的5G系统升级的需求。另外,以前制约氮化镓技术推广的高昂成本,也因为MACOM GaN-on-Si技术低廉的成本架构而打破。因此,我们认为氮化镓技术在基站和射频能量应用的普遍推广必将因为MACOM的GaN-on-Si方案的积极推进而大大加速。

**CSC:** 与传统的LDMOS和GaN-on-SiC相比,MACOM的GaN-on-Si技术的优缺点有哪些?

**MACOM:** 与传统GaN-on-SiC相比,MACOM的GaN-on-Si技术主要是采用了业界最流行的硅衬底制作了氮化镓的载体,因此摆脱了碳化硅衬底生长困难,晶圆缺陷大,成本高昂等缺点,也带来了GaN-on-Si技术易于生产,缺陷小,规模效应明显等优点。当然硅衬底的散热性能在理论上确实是弱于碳化硅衬底,我们通过芯片和封装的优化设计克服了这些缺点,使GaN-on-Si器件的整体热阻达到和GaN-on-SiC同等的水平,并未给客户的应用体验上带来不好的感受。

**CSC:** MACOM如何实现硅基氮化镓技术的产品性能、成本控制及供应链生态系统方面的利弊权衡?

**MACOM:** MACOM一方面采用通用的氮化镓工艺尽力提高GaN-on-Si产品的射频性能,另一方面与主流的CMOS晶圆厂寻求合作,扩大GaN-on-Si的工业规模。为了保证客户的供应链安全,MACOM会考虑与不同的晶圆厂封装厂合作达成相互备份,形成GaN-on-Si健壮的供应链和利益共享的生态系统。



MACOM无线产品中心  
资深总监成钢

CSC : 目前 MACOM 硅基氮化镓器件的市场应用及反应情况如何?

MACOM : MACOM 硅基氮化镓器件目前的应用市场集中在无线基站和射频能量应用。在无线基站市场我们和主要的设备厂商都有接触, 我们的器件样品经过充分评估后得到广泛认可, MACOM 硅基氮化镓器件的性能和价格优势也切合当前基站厂商转移到氮化镓技术的需要, 因此这些基站厂商对 MACOM 硅基氮化镓器件的应用和量产正在积极进行。在射频能量的微波炉应用中, MACOM 硅基氮化镓器件取得了业界最高的连续波峰值效率的记录, 受到微波炉行业的瞩目, 目前这个应用的商业化也在稳步推进中。

CSC : 请您谈谈, 关于 GaN 器件, 特别是氮化镓功率放大器 (GaN PA), 未来的技术发展趋势和市场应用前景。

MACOM : 氮化镓器件作为第三代半导体材料的代表在未来的高速无线通信和物联网应用中有宽广的应用前景, 其技术发展趋势集中在更高的工作频率, 更大的功率密度, 更高的工作带宽和更大的集成度。它的应用范围也不再局限于基站雷达等高端应用, 会更大范围地应用在工业场

景, 如微波加热, 汽车点火, 医学消融等等。在通讯应用上, 氮化镓器件甚至可能应用到手机功率放大器, 这无疑是硅基氮化镓器件发挥成本优势和规模效应的一个重点方向。

CSC : 中国政府近年大力发展半导体产业, 包括投资建立一些新的 GaAs, GaN 的化合物半导体制造工厂, 这些是否会成为 MACOM 在中国市场的竞争对手? 或者给 MACOM 在中国的发展提供更多机会?

MACOM : MACOM 一直致力于深耕中国市场。我们相信中国鼓励创新产业升级的氛围, 更适合我们在中国市场寻找合作机会和市场突破。

CSC : 2017 年 MACOM 在氮化镓技术或者中国市场方面有什么发展计划?

MACOM : 在 2017 年 MACOM 会继续推进硅基氮化镓器件在中国无线基站和射频能量市场的应用, 争取在扩大在主流设备厂商实用案例和批量发货, 这会对 MACOM 现有的客户群和口碑形成积极影响并积累使用经验。另外, 我们也会关注氮化镓技术在通信, IoT 市场和射频能量的应用, 发挥 MACOM 在未来高频高功率应用中的领导作用。OSc



## Enjoy Infinite Possibilities.

Based on broad experience gathered over many years of developing, manufacturing and world-wide servicing field-proven electron-beam lithography systems, a team of highly-motivated employees, excellent researchers and creative engineers are constantly doing their best to fulfil our customers' requirements.

**We understand E-Beam.**



Vistec Electron Beam | [www.vistec-semi.com](http://www.vistec-semi.com)

# GaN 是如何转换射频能量及其在烹饪中的应用

Mike Ziehl, MACOM 公司副总裁兼多种市场业务部总经理  
Mark Murphy, MACOM 公司射频功率市场与业务拓展高级总监

在上世纪 70 年代早期，磁控管首先在微波炉中进入了广泛的商业应用，但整个射频能量市场的发展相对还比较缓慢。如今，已经有了各种各样的应用，包括在工业和消费的烹饪、干燥、照明、医疗和汽车等方面的射频能量应用。

最近，就磁控管作为加热源而言，固态器件的出现为之提供了一种可行的替代、提高技术，它具有几个关键性的优势：更长的使用寿命、增强了可靠性、可精确控制射频功率水平及其投射方向、提升了效率，以及具有更小的外形尺寸等优点。

## 价格和效率抑制了增长

射频能量市场普遍预计在未来五年里将会增长到 10 亿美金，但到目前为止，由于固态器件技术的局限制性抑制了该市场的进一步扩张。

为了降低能源损耗，需要高效率、较少冷却或功率耗散的热量散发，这是在所有射频能量应用设计中一个很重要的考虑因素。恶劣的工作环境以及加热元器件对工作负载的不可预知性，使得对它的在耐用性上有着苛刻的要求，还有对其功率一致性和长期寿命的需求，成为了现有磁控管技术的短板。

到目前为止，已能勉强接近该领域艰难成本目标的固态器件技术只有硅 LDMOS 器件。由于无线通讯基站的发展，LDMOS 器件技术已很好地建立了具有竞争力的成本结构和大批量的供应链。然而，其弱点是在于它的效率（尚缺 10%）、耐用性（它只有较低的击穿电压和较低的工作温度）和功率密度（只有 GaN 器件的 1/4~1/6）上。

碳化硅衬底上 GaN 器件能够满足这些必要的性能要求，但无法达到必需的生产规模和成本，与传统技术相比，其成本要高出 5 到 10 倍，碳化硅衬底的加工成本即使在其进入大规模生产阶段仍然会十分高昂。

然而，在新的一年里，当 GaN 器件从传统的 4 英寸化合物半导体工厂过渡到 6 英寸和 8 英寸晶圆厂进行生产时，硅基 GaN 器件就能开始突破制造成本的阈值，并向着由射频能量联盟（RF Energy Alliance, RFEA）所设定的每瓦 5 美分的最终目标前进。这意味着客户最终可以与主流技术的发展同步，例如，MACOM 公司已经能够提供 300W 塑料封装的硅基 GaN 器件，它有着大于 70% 的效率，售价约为 15 美元，这一价格/性能水平已处于当今射频能量器件领域的领先地位。

## 烹饪应用中的射频能量

当今射频能量的最大潜在市场之一是在烹饪和加热方面的应用。现在全球每年微波炉的制造产量远超 7000 万台，从低成本的消费类产品到高端的专业和工业加热炉，它的产品类型跨度很广。

射频功率晶体管在许多性能上要优于传统的

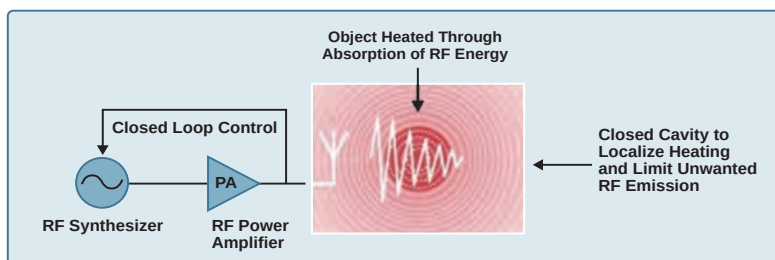


图 1. 射频功率固态器件的应用。

磁控管，包括在烹调过程中能对炉内的射频功率电平和射频能量投射方向进行更高的精度的控制。

而今的微波炉对其功率电平或射频能量的投射方向缺乏必要的有效控制能力，这将导致产生过度加热部位和过度烹饪的结果。

在固体器件中，射频的频率、振幅、相位、脉冲宽度和调制度全部可以进行精确的控制。通过对射频功率放大器和射频合成器之间的闭环控制，其反馈回路能够对射频发射和反射的功率水平进行评估，进而促进了对能量分布模式的准确控制及其优化。

这意味着，只要采用三个或四个固态晶体管以及天线部件，就可以对反射和吸收的射频辐射能量进行准确的测量，就能将射频能量直接、精确地送达到食品上需要加热的部位。由固态晶体

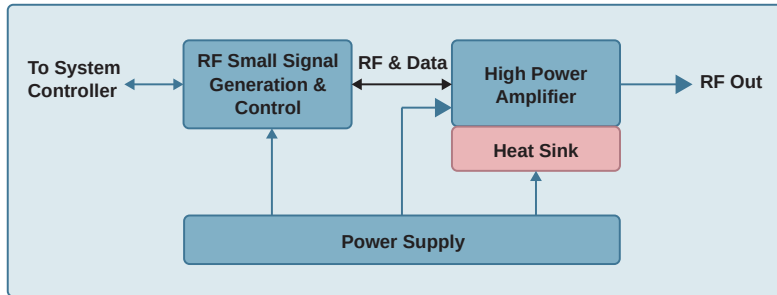


图 2. 固态射频发生系统的框图。

管组成的这种反馈回路及其精确控制性能能够确定如何精确地来烹饪食物，从而还能够获得具有重复性的烹饪结果。

改变多个天线间的相位就能够对炉内的电场分布进行智能化的控制，以获得均匀的加热效果。此外，通过改变频率和相位使之与炉内的食物相匹配，可以获得极高的射频能量传递效率，在较小负荷的情况下也能达到 90% 以上。

已经证明，在烤熟一块牛排时，与它位于同一烤盘上的冰淇淋并没有融化，显示了其精确的射频能量定向传输性能。在实践中，能对整块牛排内部的温度进行很好的控制，其公差可控制在一摄氏度之内。因此，如需对食物进行自动烹饪，只要简单地设定一块牛排成熟度的级别，例如中等偏生，烤炉将自动测量食物的性质并计算出所需的设置，无需手动调节输入射频功率的大小，烹饪结果将是可预测的，它还具有更为友好的用户界面。

而且它的使用还十分方便，精确的温度控制能保证所烹饪的食物更为健康，相比于传统的微波炉能保持更多营养成分，不会产生过度烹饪或

破坏食物营养成分和氨基酸链的过度加热部位。

## 固态子系统

在这种微波炉的应用中，其固态射频发生器这种子系统应包括以下组成单元

- 处于单片机同一位置的小信号发生器
- 附有热沉的大功率放大器
- 功率电源

此系统的框图如下所示。“射频输出”通过 RF 发射头进入一个腔室或是一个局限的环境，在其内部可放置吸收射频辐射的食物，并可提供所需的级别的 EMC 屏蔽。

## 可靠性和成本效益比

在烹饪和加热应用中，射频功率晶体管具有比磁控管长得多的工作寿命。磁控管典型的总工作寿命一般为 1500 小时左右，而 GaN 器件可达 100 万个小时。

对于家用的微波炉，由于其日常使用频率很低，磁控管可持续工作许多年，所以 GaN 器件的长工作寿命这一优点对它显得并不显眼。然而，GaN 器件这种可靠性优势在工业应用中会变得十分重要，例如在餐饮、快餐、餐馆或面包店中，它们的大批量食品加工系统可能会需要使用一个很大的磁控管阵列。

在这种生产性的环境中，加热系统需要每周运行 7 天，每天运行 24 小时，磁控管的有效寿命及其性能将会很快下降。这意味着，现今要经常，有时每周就需派出技术人员去更换磁控管，这将是一项费用昂贵的行为，所以将磁控管改用固态氮化镓晶体管将有很大的潜力来降低这种服务成本。

虽然 GaN 器件在名义上仍存有价格上的劣势，然而，它与磁控技术相比却可以节约一些系统成本。它的电源可以简化，无需采用回扫变压器，也不再需要用马达来旋转食物承载盘。随着 GaN 器件的价格在不断的下降，这些在系统成本上的优势将能越来越多地可以抵消 GaN 器件所需增加的额外成本。

随着 GaN 器件的可靠性和在服务成本上节省效应变得越来越令人信服，我们预计它的初始推动力将主要来自于高端工业、商业的烹饪和解冻市场。当人们认为可以花费 25000 美元来采购一台专业加热炉系统，那么很显然它在 GaN 组件上多花费一些就可以变得忽略不计。可以预计，传

统白色家电制造商在专业和消费市场中采用 GaN 组件的烤炉将会成为一种发展趋势。

### 能源效率及其小型化

能源效率是任何一种电器设备必须考虑的因素，微波炉也不例外。GaN 组件的优点是在于其效率要比 LDMOS 高 10%，更是远高于现今使用的需要烹饪不同食物量的磁控管烤炉。虽然碳化硅器件也有潜力来获得这种高效率，但它在成本因素上永远不可能具有足够的竞争力。

与传统微波炉相比，在使用的实用性上，固态组件由于具有精确的温度控制能力可使烹饪后的食物更为健康，并可保持更多的营养价值，不会产生过度烹饪或会破坏营养成分和氨基酸链的过度加热部位。

射频能量联盟 (RFEA) 是一个行业机构，致力于对固态组件的加热效率的规范做出定义，效率是指从电源插座获得的电能与送达到被加热食物上射频能量的比值，RFEA 对整体射频能量系统效率的推荐值为 60%。人们普遍认为，GaN 器件是能够实现这一目标的唯一途径，中国目前正在考虑采用将其作为能源效率的标准，这将是 个相当重要的决定，因为中国制造的微波炉已约占世界总产量的 80%。

除了在常规微波炉中应用以外，这种射频能量器件所具有的紧凑外形尺寸，将会产生大量创新应用的机遇。例如在亚洲，电饭煲具有无处不在需求，固体器件可以应用于较小外形尺寸的新型桌上型炊具中，其他具有创新性理念的应用还包括有车内使用的迷你型微波炉，或徒步旅行者和游客使用的紧凑型炊具等。

### 其他应用

除了烹饪行业之外，固态射频能量器件也将 在工业干燥、木材干燥、工业 制造、食品加工、农业和废弃物处理业中获得应用。

在医疗市场中，射频能量可应用于肿瘤消融和组织存储等方面。医疗消融系统的外形必须极其紧凑、可靠，且高效率，而固态射频能量技术能很好地满足这方面的需求。鉴于它具有对输出功率的微调能力，GaN 组件将能开拓出现有磁控技术所无法实现的在医疗方面的创新应用。

提高汽车点火系统的燃油效率是射频功率另一新兴应用领域，它可用来提高发动机的工作效率。相比于现今的标准火花塞技术，它能促进发

| Topic                                        | SS RF Energy                                   | Magnetron                  |
|----------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|
| Wall plug Efficiency (IEC standard test)     | 54% (LDMOS)<br>>64% (GaN)                      | 17%...54%                  |
| RF delivery efficiency                       | >90% always                                    | uncontrolled 0...90%       |
| Power level                                  | Low to very high                               | Fixed, high                |
| Power supply                                 | 28V                                            | 4kV                        |
| RF Power control                             | > 20dB, fast                                   | fixed                      |
| RF Energy control                            | > 40dB, fast                                   | Fixed (slow duty cycle)    |
| RF Frequency control                         | < 1MHz                                         | n.a.                       |
| RF Phase control (multiple coherent sources) | < few degrees                                  | n.a.                       |
| Reliability/lifetime                         | > 10 years, hardly any performance degradation | 5000hrs, some power droop! |

图 3. 工作频率为 2.45 GHz 的固态组件与磁控管的性能比较。

动机燃烧室中油气的更完全燃烧。这样做将有可能将燃油效率提高 10%，还可以减少氮氧化物和挥发性有机化合物气体的排放。

在所有这些应用中的射频能量器件必须能同时在性能、电源效率、紧凑尺寸和可靠性等方面取得恰当的平衡，在价格上能与 LDMOS 器件相媲美，才能进入到主流的市场应用中。

### 固态器件的优势

MACOM 公司的硅 上 GaN 技术是所有这些射频能量应用的理想选择，它能以与 LDMOS 相竞争的成本来提供其性能优势。MACOM 的硅基 GaN 器件能提供超过 70% 的能量效率，并在 900 MHz 和 2.45GHz 频率下均具有高的增益。这些频率都是工业、科学和医学应用的开放频带范围，使得射频能量在工作时不会对持有许可证的通信网络产生干扰。

硅基 GaN 器件的技术优势现在已经有了颇具竞争性的价格水平，这无疑将成为射频功率应用中的一个分支技术。特别是在工业应用领域，当前正在针对射频功率系统的更高可靠性和性能要求进行更大的初始投资。第一个固态微波炉的商业应用预计将在一年内出现，而在其他消费类应用预计将在随后的一、二年之后。

硅基 GaN 器件本身十分坚固耐用，适合于恶劣环境下工作，可在不确定的荷载量下工作，没有随着时间推移而产生工作性能退化。MACOM 公司的 GaN 器件工艺也可进行扩展，这是由于它具有硅基衬底的低成本结构，我们器件的产量及其可靠性将足以满足这一市场预期中的爆发式增长。OSc

# 300mm 硅晶圆上 III-V 族 CMOS 晶体管的逻辑应用

InGaAs MOSFET 一般是指在 300mm 硅晶圆上来制作 III-V 族晶体管，它具有未来技术应用所感兴趣的沟道材料。

MAO-LIN HUNAG, SHANG-WEN CHANG, CHUN-HSIUNG LIN, HOWARD C.-H. WANG, 和 CARLOS H. DIAZ; TSMC 台积电

过去五十年来半导体产业的成功得益于 MOSFET 的小型化，晶体管的尺寸还在不断地缩小，以满足应用所需求的器件高性能和低功耗。

今天，半导体产业正面临着许多严峻的挑战，以能在小于 10nm 技术节点时还能进一步扩展摩尔定律。这些挑战之一就是需要进一步提高晶体管的集成密度，同时又能通过降低工作电压来控制器件总的功率密度。不幸的是，降低工作电压会产生有害的后果，会影响到器件性能，也会降低开关的运行速度。

可以对 MOSFET 结构进行的一项修改是将高迁移率材料，如 III-V 族化合物来替换现有的硅基沟道材料。特别是在电源电压为 0.5V 或更低时，

这种替代有可能提高导通态的电流，这是由于在低电场下 III-V 族化合物材料的载流子具有更好的输运特性。这就使得 III-V 族沟道器件在低功耗、高性能的应用中显示出巨大的发展潜力。然而，在大尺寸的硅晶圆上进行 III-V 族沟道的单片集成还是一项重大的挑战。

最近，已经有几种方法能在硅衬底与 InGaAs 上进行成功地集成整合。其实例包括有：直接在 300 mm 硅晶圆上进行 III-V 族材料的外延，使用应变释放缓冲层或采用具有一定高宽比的陷阱结构，硅晶圆的直接键合，以及模板协助的选择性外延等技术。所有这些方法都有助于高质量硅上 III-V 族沟道晶体管的发展。

在台湾积体电路制造公司 (TSMC)，通过在 300mm 硅衬底上制造应用于低电压逻辑应用的 InGaAs 晶体管，我们在对 III-V MOSFET 的追求过程中要发挥作用。为此，我们研究了 InGaAs 沟道材料的外延生长，以及高 K 栅介质材料和源 / 漏接触电阻材料的沉积问题，而且我们还对这种晶体管的结构和特性进行了评估。

## InGaAs 沟道的外延

采用可释放应变的缓冲层技术，就可以在 (100) 晶向的 300 mm 硅晶圆上实现高质量 InGaAs 的外延生长。硅和 In<sub>0.53</sub>Ga<sub>0.47</sub>As 间 8% 的晶格失配度可以由两个变性缓冲层来加以补偿，以减少在 InGaAs 沟道顶部的晶体缺陷。

要形成应变释放层结构，首先是在硅衬底上直接生长 GaAs 层，之后用生长 InP 缓冲层来逐

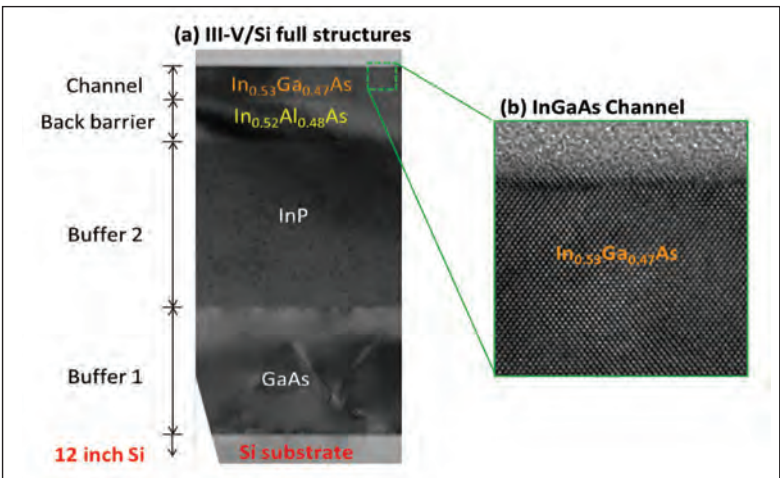


图1. 在300mm硅衬底生长III-V外延层的透射电子显微镜图像。(a) III-V/Si 的异质结构，包括有硅衬底、应变释放缓冲层、背面势垒层和沟道层。(b) InGaAs 沟道层的上部。(M.L. Huang 等，2015 年VLSI会议录)



步释放失配应变,再生长  $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$  背面阻挡层,然后是  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$  沟道层的生长,使它能与 InP 的晶格相匹配。

所有这些 III-V 族层的生长都是采用 MOCVD 技术,这是一种高产量的生产技术,并具有选择性区域的生长能力。

在 300mm 硅晶圆上生长完成外延结构的透射电子显微镜图像如图 1 所示,它也显示了高品质的 InGaAs 沟道外延层(见图 1)。不同硅掺杂浓度下材料的迁移率是由霍尔测量来获得(见图 2),测量显示,我们用 MOCVD 生长的 n 型硅上 InGaAs 的电子迁移率,足可与在晶格匹配 InP 衬底上用分子束外延或 MOCVD 生长 InGaAs 层的电子迁移率相媲美。

## 高 K 介质

由于氧化物和 III-V 间的界面态密度远高于

硅与其自然氧化层之间的界面态密度,这将成为一个问题,因为它会影响栅对沟道进行有效的控制。在过去十年中,由于采用了原子层沉积(ALD)技术来形成高 K 栅介质与 III-V 间的界面,使得这一问题已经有了显著的改善。具体而言,已经发现 ALD 反应前驱体会产生一种对存在于 III-V

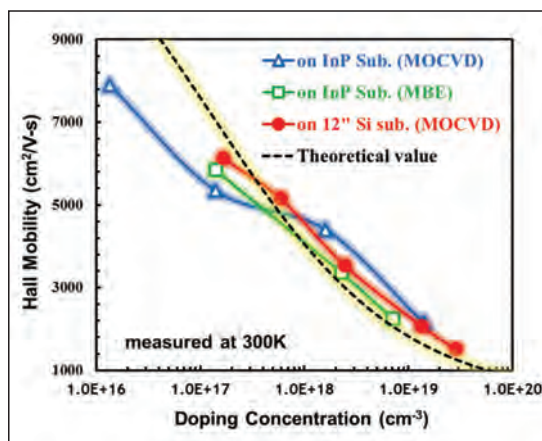
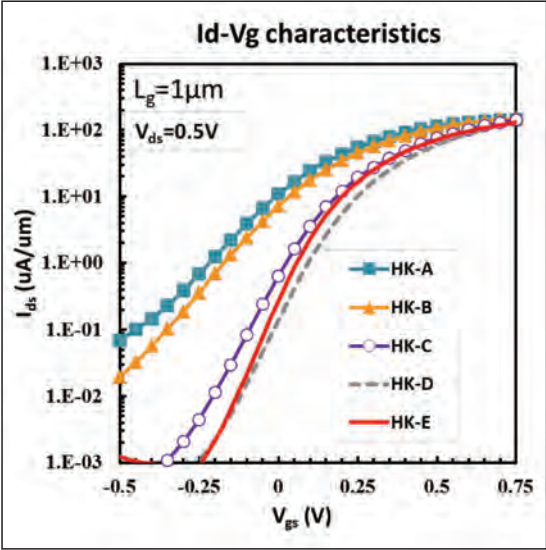


图2. 作为硅掺杂浓度函数的 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 霍尔迁移率(M.L. Huang 等, 2015 年VLSI会议录)。

图3. (a) 在源漏电压 ( $V_{ds}$ ) 为0.5 V时, 具有不同高K栅介质平面型 InGaAs MOSFET晶体管的亚阈值特性。高K栅介质材料E具有最低的亚阈值摆幅 (88 mV/dec)。(M.L. Huang 等, 2015 年VLSI会议录)



表面不受欢迎自然氧化层的“自清洁”效应, 通过配体交换和取代反应将其转换成高 K 金属氧化物, 这一过程是发生在 ALD 过程的初始阶段。

要获得高性能的 InGaAs MOSFET, 就需要进一步优化高 K 介质和 III-V 族材料之间的界面属性。MOSFET 的亚阈值特性能反映器件的栅控制能力及其界面态密度。一种具有陡峭的亚阈值斜率或较小的亚阈值摆幅, 也即具有较小的亚阈值斜率倒数的晶体管器件, 将具有更快的开启和关闭态之间的切换速度。

不同的前处理工艺和高 K 介质层的淀积条件会影响平面型超薄体 (UTB) InGaAs MOSFET 的转移特性的 (见图 3)。通过加入高 k 介质层和 InGaAs 之间的高质量界面可以优化栅叠层的性能, 使得在 0.5V 漏源电压下的亚阈值摆幅 (SS) 达到了 88mV/dec。由于采用了高质量、高 K 介质的栅叠层和低缺陷密度外延层的组合, 使得关态漏电流可小于 1 nA/ $\mu\text{m}$ 。

我们对高 K 介质 / InGaAs 间的界面进行了界

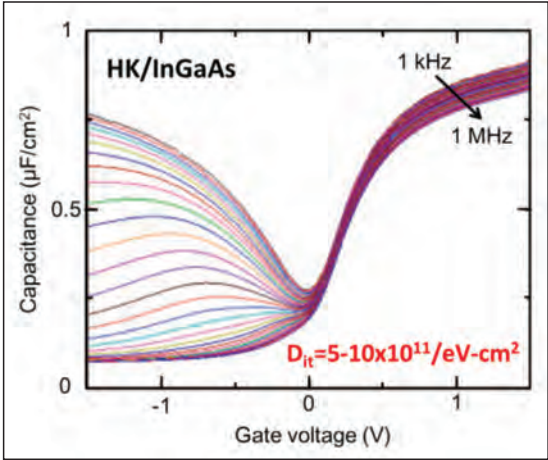


图4. 高K介质/InGaAs 电容器的多频电容-电压特性。

面陷阱密度的表征, 采用的是从 1kHz 到 1MHz 的多频率电容 - 电压 (CV) 测量 (见图 4)。测量曲线清楚地标明了从积累、耗尽到反型的转换。这表明, 栅极电压能很好地控制沟道中的载流子。请注意, InGaAs MOS 电容器在禁带中部附近的界面态密度为  $5-10 \times 10^{11} / \text{eV} \cdot \text{cm}^2$ 。

接触电阻

金属与源 / 漏的接触状态也会对晶体管的性能产生影响, 高性能的欧姆接触要求其具有低的肖特基势垒高度, 并且源区和漏区要求是重掺杂的半导体。虽然金属和 InGaAs 之间的接触要优于金属与硅之间的接触, 因为它具有较小的电子有效质量, 其肖特基势垒高度也较低, 约为 0.25 eV。InGaAs 的最大有效掺杂浓度要显著低于硅, 在 InGaAs 中, 与硅的  $5-10 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  相比, 它却最多只能达到  $1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 。这就提高了金属与 InGaAs 的接触电阻率, 其通常值为  $7-10 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 而先进的硅技术可以达到  $5 \times 10^{-9} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。要达到亚 10nm 技术所需的低接触电阻率, 一般的策略

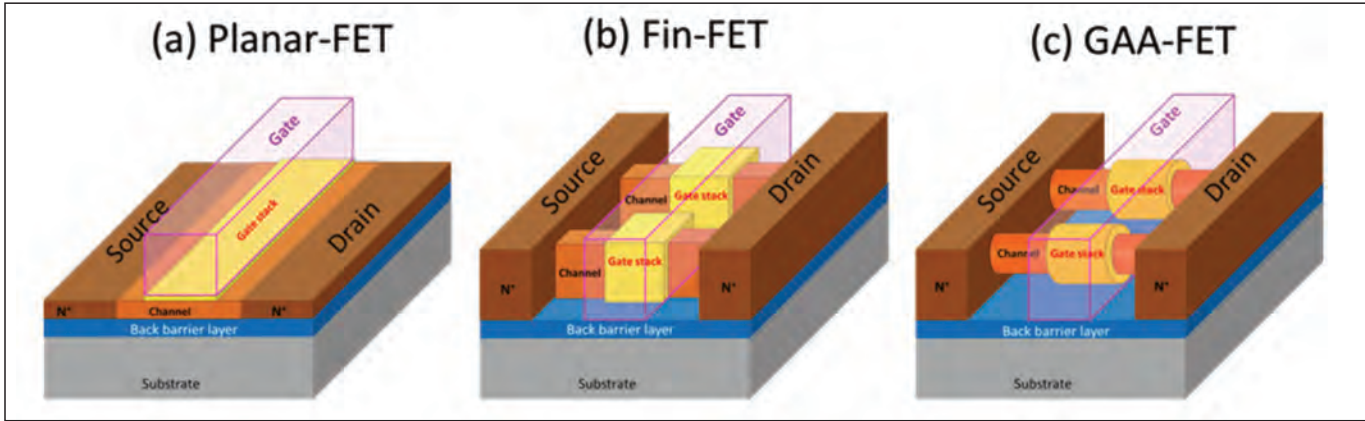


图5. 场效应晶体管从平面型到鳍型和全圆形栅 (GAA) 型在三维结构上的演变。

相对于平面型场效应晶体管而言，鳍型和全围绕栅(GAA)型 3D FET由于对沟道能进行多维度的栅极控制，使它具有优越的短沟道性能。改进后的栅极控制能力使得FET能够进一步缩小栅极的长度，从而可以改进器件的性能，如能进一步增加导通态电流或减小器件的工作电压。

要么是增加掺杂浓度，或者是通过对材料的选择来调节肖特基势垒高度。

## 晶体管结构

最近，硅晶体管已经从平面型转向 3D 立体结构，图 5 显示了平面型 FET、鳍型 FET 和全围绕栅 FET 的结构示意图。鳍型和全围绕栅 3D FET 相比于平面型 FET 的最大优势在于可实现对沟道的多维度栅级控制，而使 FET 具有极其优越的短沟道性能。改进栅控制能力还使得栅极长度可以进一步地缩小，从而提高了器件的性能，如可增加通态电流或减小工作电压。此外，3D 结构还可以通过形成垂直维度的沟道来进一步提高芯片的集成密度。

将我们自制的沟道厚度为 10 nm 的超薄体平面型 InGaAsFET 与我们鳍型 FET 和全围绕栅 FET 的传输特性进行了比较（见图 6）。所有器件均在 0.05 V 的源漏偏置电压下运行，超薄体 FET、鳍型 FET 和全围绕栅 FET 的亚阈值摆幅分别为 82 mV/dec、75 mV/dec 和 72mV/dec(见图 6)。鳍型 FET 和全围绕栅 FET 与平面型超薄体 FET 相比有着较小的亚阈值摆幅，这是由于它们对沟道有着更为优越的栅控制能力。

器件在 0.5V 电源电压下的最大的跨导和亚

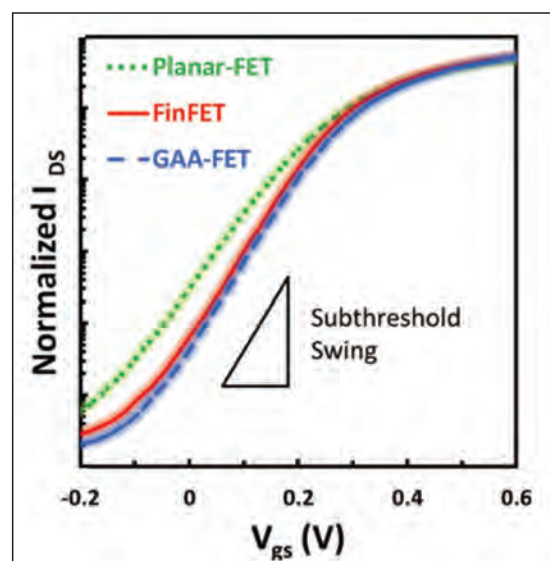
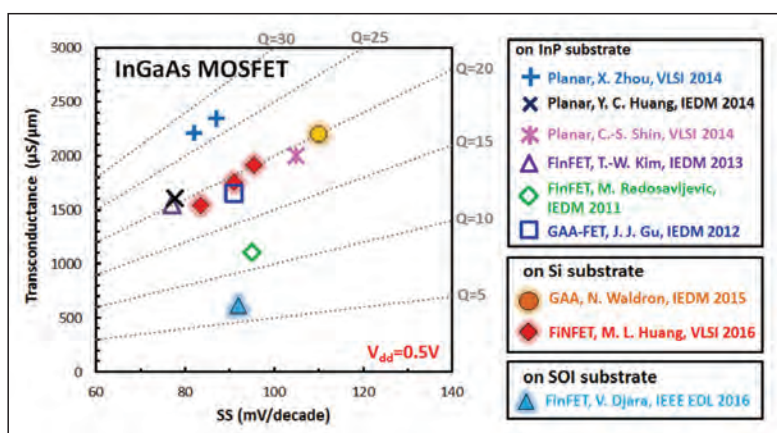


图6. 平面型、鳍型和全围绕栅 (GAA) 型InGaAs MOSFET的转移特性及其亚阈值摆幅。



阈值摆幅值已经被用来作为各种平面型和三维 InGaAs MOSFET 性能的衡量基准（参见图 7）。为了量化载流子运输性能和静电完整性，在图 7 中还标示了品质因数 Q，它被定义为是跨导与亚阈值摆动的比率。

我们在 300 mm 硅衬底上制作鳍型 InGaAs FET 的最大跨导在 1600-1800 $\mu$ S/ $\mu$ m 之间、其亚阈值摆幅为 80-90mV/dec，其 Q 值约为 20。这些数值足可与在晶格匹配的 InP 衬底上所制作的 InGaAs FET 器件的最佳性能数据相媲美。

## 结论

我们已经在 300 mm 晶圆上实现了高质量的平面型 InGaAs MOSFET 和鳍形 FET 的单片集成，对 MOCVD 外延生长、材料性能、高 K 栅介质、源 / 漏接触、器件结构和器件性能的研究表明，III-V 族将是未来高性能和低功耗应用中一种极具吸引力的 MOSFET 沟道材料。CS (朱己 翻译)

图7. 在 $V_{dd}$ 为 0.5 V 时，不同平面型和三维型 InGaAs MOSFET 的最大跨导 ( $g_m$ ) 和亚阈值摆幅 (SS) 基准比较。图中的参数 Q 是定义为  $g_m/SS$ 。

## 扩展阅读

- J. A. del Alamo et. al. IEDM Tech. Dig., p. 24 (2013)
- H. Riel et. al. MRS Bulletin 39 668 (2014)
- M. L. Huang et. al. VLSI Tech. Dig. , p. T204 (2015)
- X. Zhou et. al. IEDM Tech. Dig. p. 773 (2012)
- M. L. Huang et. al. Appl. Phys. Lett. 87 252104 (2005)
- Y. C. Lin et. al. Appl. Phys. Express 7 041202 (2014)
- A. Baraskar et. al. J. Appl. Phys. 114 154516 (2013)
- G. Doornbos et. al. IEEE Elec. Dev. Lett. 31 1110 (2010)

# 将 GaN 垂直腔面发射激光器推向市场

采用侧向蔓延外延生长技术可使 GaN 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的输出功率达到一个新的高度。

TATSUSHI HAMAGUCHI, 索尼公司

**G**aN 是一种用于制造光电子器件的极佳材料。基于 GaN 的蓝色、绿色和白光 LED 每年在全球的销售收入达到了数十亿美元，并且蓝色、蓝紫色和绿色的面发射激光器也有着很大的市场，这使得 GaN 垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 成为 GaN 光电子产品组合中的唯一明显短板。但是，如果 GaN VCSEL 可以依照 GaAs 器件的制造方法，它应该能够制作出一类具有非常低阈值电流、能在高频下工作并可构成发射器阵列的 GaN 激光器件。

具有这些属性，使得基于 GaN 的 VCSEL 注定会在许多应用中代替常规 LED 和激光器件作为一种光源，应用于如光存储、激光打印机、投影仪、显示器、固态照明、光通信和生物传感器中。如果将发射绿光、蓝光和红光的 GaAs VCSEL 结合在一起，则可以制成令人难以置信的、可穿戴的小型投影仪以及作为全色彩显示器的大功率光源。

然而，实现这一梦想并不容易。在浏览科学文献之后，你很快就会意识到，制造基于 GaN 的 VCSEL 远比制造基于 GaAs 的同种产品更为困难。

在反射镜和腔体的制造上会遇到许多障碍，并且难以在有源区中对电流产生足够约束来确保激光的发射。然而，业界也已经有了一些重大的突破，包括我们索尼的团队在内，在靠近反射镜区域利用侧向蔓延外延生长技术来制作高质量有源区，从而可将它的输出功率提升到一个新的高度。

与 GaAs VCSEL 制造相关的许多挑战在 GaAs 产品中并不存在，因为 GaAs 可与 AlGaAs 配对，AlGaAs 是一种晶格常数与 GaAs 非常接近的三元化合物。这些砷化物合金可以形成低缺陷密度的分布式布拉格反射器 (DBR)，它是位于有源区的两侧，具有足够的光学增益来保证产生激光发射。此外，因为这些材料可以通过掺杂而导电，因此可以在每个 DBR 上沉积电极来将载流子注入到有源区中。

GaAs 基材料体系的另一个特性是可以将 AlAs 部分氧化而将其从半导体材料转换成为绝缘体材料。因此，当将 AlAs 插入到有源区两侧时，可将其氧化来产生能约束电流的一个光阑孔径。这是一种必需的结构，因为它能增强诱导发射，

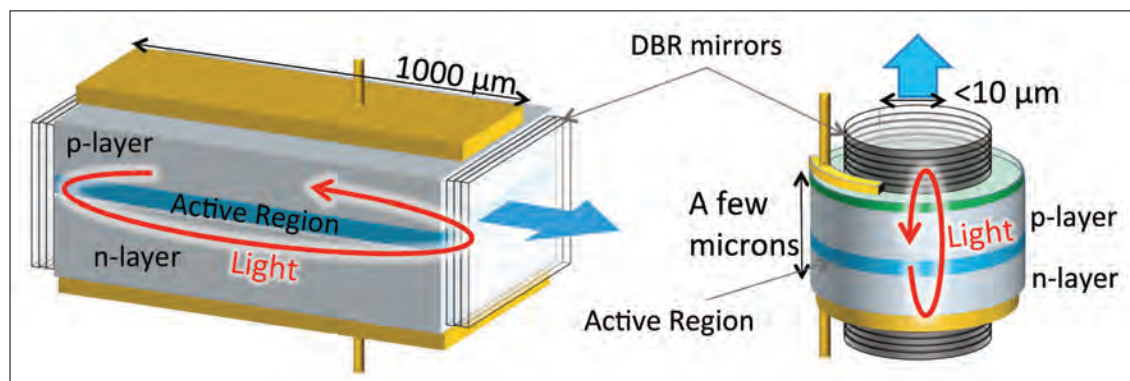


图1. 在VCSEL (右图) 中，光在有源区的垂直方向上传播，而在面发射激光二极管 (左图) 中，光是在与有源区平行方向上传播，产生这个关键性差异是源于它们的结构不同。在VCSEL中，所有的薄层、反射镜和有源区都彼此平行，使得光子的传播方向都垂直于这些薄层。

而这是产生激光发射的先决条件。

而对 GaN 来说情况则明显不同。首先, 最为重要的是要制造 GaN 半导体分布式布拉格反射器 (DBR) 是一件非常困难的事情。当 GaN 在与 AlGaIn 配对时 - 这种方法类似于在 GaAs 基 VCSEL 中采用的方法 - 由于铝化合物的成分变化会导致产生大的晶格失配而使反射镜层中出现裂纹缺陷。一个有希望的解决方案是将 GaN 与  $\text{Al}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{N}$  进行配对, 由于二者有着非常相似的晶格常数, 可以确保反射镜层不会产生裂纹。然而, 这样做的代价是会降低产量, 有报道表明, AlInN 的生长速率非常低, 以至于制作一个超过 99% 峰值反射率的 40 层 AlInN / GaN DBR 将需要 12 小时。这样长的时间还只是用来制作商业化器件中的一个小部件, 这是令人无法接受的。

即使是允许耗费这样长的生长时间, GaN 基 DBR 仍然还存在着一个重要问题: 需要严格控制好 DBR 层的厚度。AlInN 与 GaN 这两种合金之间存在微小的折射率差异会使其反射光谱成为尖峰状。这还、将令人十分尴尬, 因为 DBR 层仅  $\pm 3\%$  的厚度变化就会导致这一反射光谱峰值与激光发射波长产生偏离, 而无法产生激光发射。但在生长 GaN 所用的 MOCVD 反应器中, 其生长速率发生  $\pm 3\%$  波动是十分常见的。所以十分清楚的一点是, 即低的产额将会对采用 AlInN / GaN DBR 的 GaN VCSEL 大规模生产产生很大的限制作用。

基于以上的推理, 我们认为介质材料比宽带隙合金更适合用来制造 GaN 基的 VCSEL, 它可以通过常规的淀积方法, 例如电子束和溅射工艺来制作  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  和 SiN 等介质层, 并且不会在生长速率方面产生任何的问题。

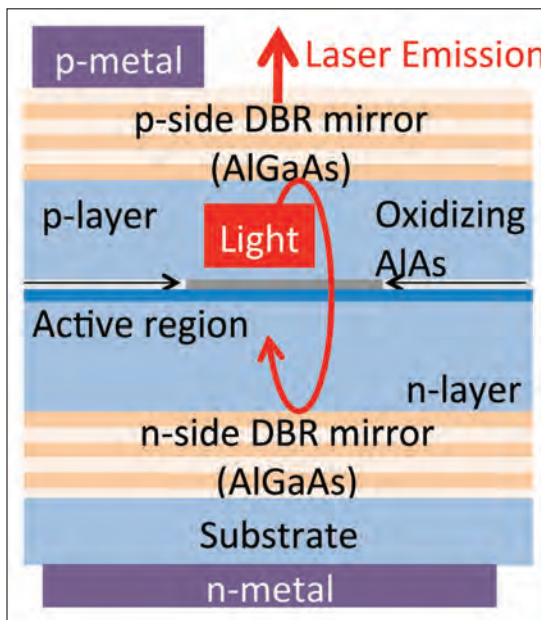


图2. 在GaAs基VCSEL中, 有源区被夹在两个DBR之间。所有的薄层都通过外延生长来形成, 使得两个DBR都可以处于有源区附近。AlAs可以进行部分氧化以形成能限制载流子的电流会聚点。

采用这种技术路线的优点是, 它可以将两种具有大折射率的材料进行配对, 来产生较为宽泛的反射光谱分布。这样就容许DBR有超过10%的厚度变化范围, 而这种要求是在上述那些常规沉积方法的工艺能力控制范围之内的。

Nichia 研究人员通过将包含了有源区的 GaN 晶圆减薄到仅有几微米厚, 然后把它夹在两层介质 DBR 之间来解决这一难题。由于这种超薄晶圆的力学强度不足以形成自我支撑, 所以在进行减薄处理之前要将其键合接合到一个支撑晶圆 (例如硅晶圆) 上。

这种制造方法的难点包括需要开发一种晶圆减薄的高度复杂技术, 并且同时要避免损坏有源区。根据来自 Nichia 的报告, 在器件工作仅仅 10 分钟之后就会在该有源区域出现损伤。我们认为这可能是经减薄后的器件有源区内存在机械应力所致。请注意, Nichia 自 2012 年以来还没有发表

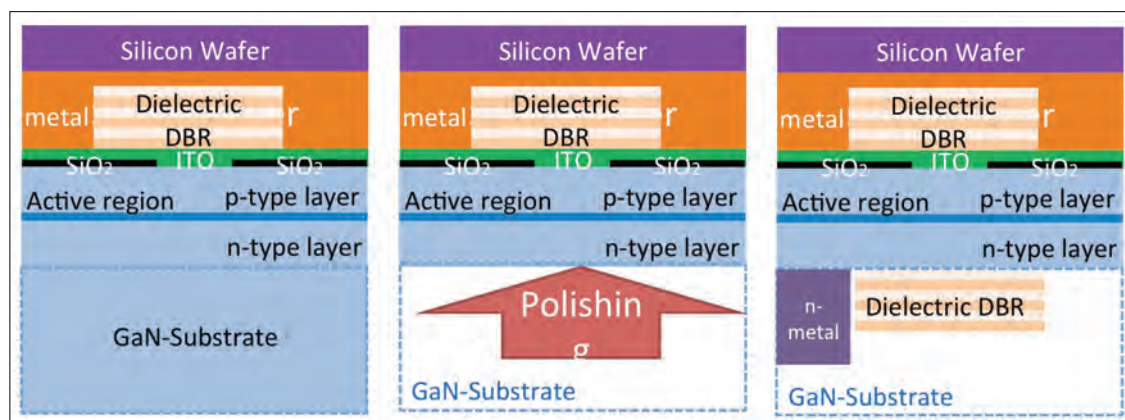
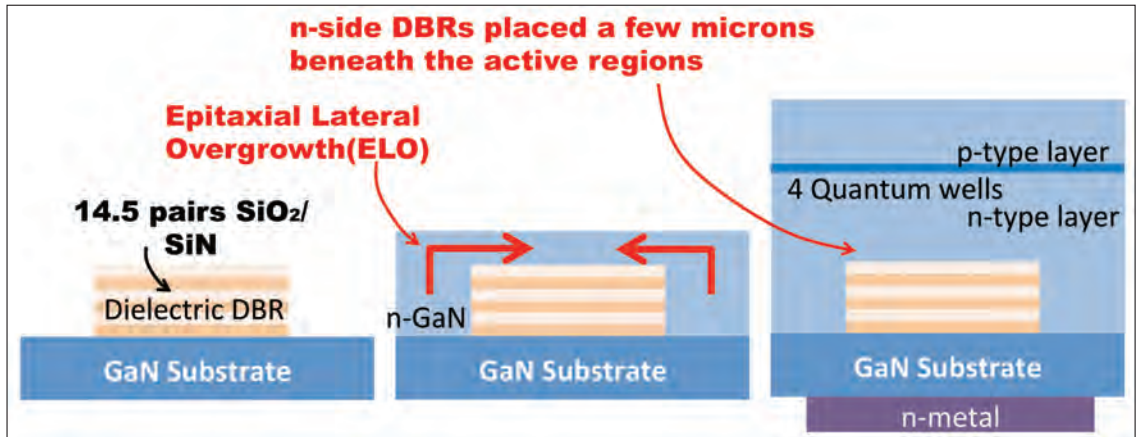


图3. 包括Nichia在内的几个研究团队所采用的工艺, 都是在进行n侧的DBR沉积之前, 通过把GaN衬底减薄到几微米的手段来制造GaInN基VCSEL。有几篇论文报道了这种类型VCSEL的研究, 其发射波长可覆盖紫外到绿光的范围。然而, 这些研究几乎都在2012年之前发表的, 说明该方法目前尚未取得商业上的成功, 其原因似乎与将GaN晶圆减薄到仅几微米厚时遇到的困难有关。

图4. 索尼团队在GaN基VCSEL的制造中采用了侧向蔓延外延技术, 有利于在有源区下方数微米处形成n侧DBR结构, 它并不涉及其他复杂的工艺技术。在此项技术获得突破之前, 类似的结构只能用精细的减薄工艺来进行制作。



过有关 GaN VCSEL 开发的任何论文, 这表明与 VCSEL 相关的此类问题对该开发项目起到了严重的抑制作用。

我们正在寻求另一种方法来减薄晶圆, 就是采用了侧向蔓延外延技术, 采用把介质 DBR 作为掩模来进行外延的选择性生长。该技术在开始时是直接在 GaN 衬底上沉积介质 DBR 岛, 这些岛在经侧向外延蔓延生长后会被包裹在 n 型 GaN 层中。

采用了这种方法, 可以在开窗区域中进行籽晶的生长, 而在 DBR 岛之间是裸露的 GaN 衬底。进行进一步的生长就可将 DBR 岛嵌入到 n 型 GaN 层中, 这样就为有源区、p 型 GaN 层和 p 侧 DBR 层的沉积提供了基础。

通过将 n 侧介质 DBR 层放置在有源区下方仅几微米位置来形成谐振腔, 就无需采用诸如精细抛光等工艺。这将大有益处, 因为在有源区中再也不会存在有害的机械应力, 在整个晶圆上的侧向蔓延外延生长过程将是均匀的, 十分适合于进行大规模生产。

### 控制电流

开发 GaN VCSEL 的另一项大的挑战是实现载流子进行限制, 以控制横向电流。对于 GaN VCSEL 而言这是十分重要的, 因为 GaN VCSEL 不像 GaAs VCSEL 那样存在着等效导电 DBR 层和 AlAs 层。有一个好消息是, 由台湾国立交通

大学的 Tien-Chang Lu 领导的团队已经证明, 可以使用  $\text{SiO}_2$  作为绝缘区, 借助一个由锡锡氧化物制成透明电极来控制对 GaN 基 VCSEL 的空穴注入。横向电流扩展是由在 p 侧介质 DBR 层和 p 型 GaN 层之间插入了 ITO 所致, 而在有源区对局部的电流进行限制是通过在 ITO 和 p-GaN 层之间部分插入  $\text{SiO}_2$  薄层来实现的。

但在采用这种方法时需要十分小心, 因为 ITO 会吸收大量的光而导致无法产生激光发射。解决这一问题的诀窍是通过改变器件的垂直结构来使 ITO 层正好位于谐振模式驻波的零点处, 从而可将这种吸收抑制效应降低到了可忽略的水平。

另一个问题是 ITO 与 p 型 GaN 界面处的电学稳定性问题。尽管 ITO 广泛用作 GaN 基 LED 中的 p 型接触, 但是这种 LED 器件中的电流密度要比 VCSEL 中的预期值要低数百倍。但我们已经证明, ITO 接触在老化试验中高达  $60 \text{ kA cm}^{-2}$  的电流密度下依然十分可靠。这表明 ITO 是适合用来制作 GaN VCSEL 的。

其他如美国加州大学 Santa Barbara 分校团队探索的是使用隧道结来注入空穴。这种结构是在 p-GaN 上沉积具有高导电性的透明 n-GaN 层, 这项技术的吸引人之处是它复制了在 GaAs 和 InP 中所使用的方法。然而, 因为 GaN 的带隙要比 GaAs 宽得多, 所以要降低 GaN 基隧道结的工作电压就显得较为困难。当 GaN VCSEL 在这种情况下工作时, 由于其隧道结存在较大的内建电场, 致使器件工作电压需要增加 1V 或更多。我们的理解是, 为了确保激光二极管工作的可靠性, 在工作电流密度下隧道结的电压降应当小于 0.1V。因此考虑利用这项技术来替代 GaN VCSEL 中的 ITO 层前, 隧道结本身的电压降必须先能降低一个数量级才行。

如果制作介质反射镜是可行的, 那么还需要它与 GaN 基 VCSEL 的制造工艺相结合。这就意味着这些反射镜层与有源区的距离必须控制在几微米范围以内。否则, 会因为激光在长度为  $10 \mu\text{m}$  或更大的腔体中产生相当大的衍射损耗和材料吸收而无法形成激光发射。

## 多元化的市场

有了这些最新的技术突破，现在已经可以考虑 GaN VCSEL 许多潜在的应用前景。因为这种器件的光谱可以覆盖紫外光到绿光之间的波长范围，这是 GaAs 基的 VCSEL 尚未能达到的光谱范围。在该范围中短波长端所对应的是 375nm VCSEL 激光器，它可以与铯离子配对从而能使芯片尺寸的原子钟具有更高的精度，目前在原子钟中使用的是 GaAs 基近红外光 VCSEL 和铷气体。在稍长的 405nm 波长处，GaN 基 VCSEL 可以替代激光打印机中的 GaAs 基 VCSEL，可以实现更为精细的分辨率；而在 488nm 波长处，VCSEL 可应用于生物传感方面；而在绿光波长领域它可以扩展塑料光纤中的光通信应用，因为在红光和红外光波段这种低成本波导中的光学损耗很高，但用绿光就不会存在这样的问题。

**我们的VCSEL光输出功率达到了一个新的基准，可超过1mW。这一结果非常令人鼓舞，更高的输出功率还可以通过优化蔓延外延生长过程来得以实现，原本开发的这一技术是为了减少在蓝宝石衬底上生长GaN层中的线位错，来制作GaN基的面发射激光器。这种外延蔓延生长技术还可以在更便宜的衬底（例如硅）上来进行GaN基VCSEL结构的生长，这样就可推动这种器件更为广泛的应用。**

更为令人兴奋的是将传统的红色 GaAs VCSEL 与蓝色和绿色 GaN VCSEL 进行组合，这些器件的协同工作将可用作显示器的全色彩的光源。采用阵列形式可以增加 VCSEL 光源的输出功率，能使红 - 绿 - 蓝模块的输出功率达到瓦级水平。

在超低功率应用方面，这种模块可应用于视网膜扫描的可穿戴显示产品中，由于 VCSEL 要比面发射器件更容易维持较小的峰值功率，所以这种形式的激光器可以保证视网膜投影系统对人眼是安全的。在使用平面发射激光器时，可以插入一个中性密度滤光片来保证人眼的安全，然而，这样配置会增加能耗，使得需要更高容量的电池。这是一个很不理想的做法，因为它增加了可穿戴显示产品的尺寸并降低了产品的可用性。进一步的应用机会是 GaN VCSEL 阵列可以替代目前所使用的面发射激光器的单光束扫描方式，来进一步增强电子产品的功能，例如 405nm VCSEL 阵列可以加快光学存储和 3D 打印的速度。

GaN VCSEL 的一些其他优点将有助于对目前应用的 445nm LED 性能进行改进，其中包括在可见光通信应用中，VCSEL 能在更高的频率下工

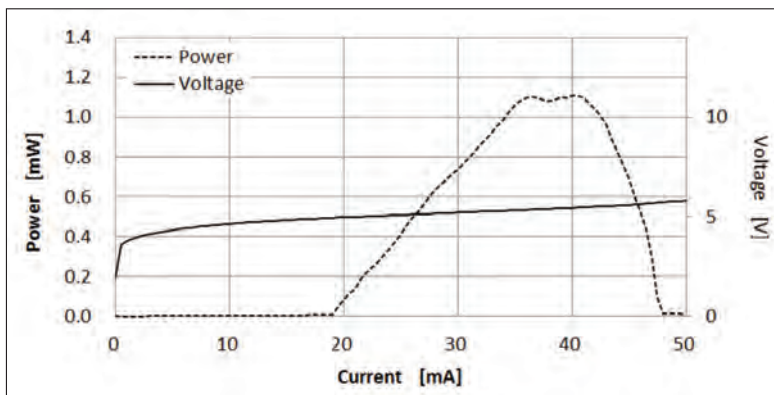
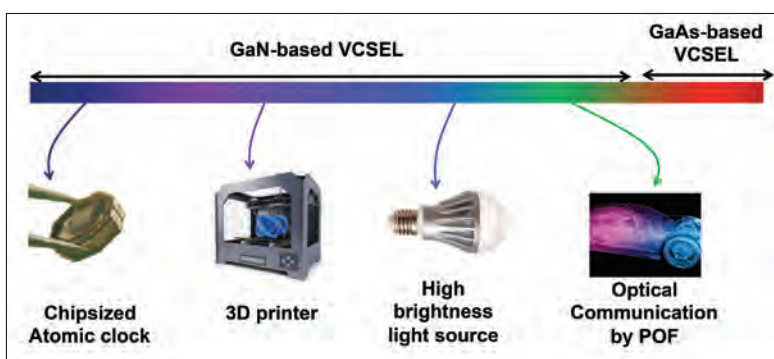


图5. 索尼的VCSEL在室温下的最大CW输出为1.1 mW，已经打破了GaN VCSEL功率输出的最高记录，这种波长为453.9nm的激光器具有8  $\mu$ m的光阑孔径。

作，可提供更宽的频带；它还可用作汽车的前照大灯，能在大电流注入下高效地工作，提高了大灯的亮度。

目前的 VCSEL 的市场已经达到了数亿美

元，分析师们预测这一市场还将会有进一步的增长。我们相信，在成功地解决影响充满发展前景的 GaN VCSEL 器件的性能问题之后，它的市场应用将会被进一步被拓宽。OSc



## 扩展阅读

- T. Hamaguchi et. al. Physica Status Solidi A 213 1170 (2016)
- Y. Kozuka et. al. "Growth of AlInN Single Layers and Distributed Bragg Reflectors for VCSELs." MRS Proceedings 1736 Cambridge University Press, (2015)
- Y. Higuchi et. al. Appl. Phys. Express 1 121102 (2008)
- T.-C. Lu et. al. Appl. Phys. Lett. 97 071114 (2010)
- J. T. Leonard et. al. Appl. Phys. Lett. 107 011102 (2015)

# 用单源蒸发技术来优化金属合金膜的沉积

在电子束蒸发中，通过调整蒸发源的位置以及源材料的再补充，可使沉积的金属合金膜具有高度均匀的化学计量比。

KUOHSIUNG LI, PHIL GREENE; FERROTEC 公司

智能手机使得我们可以打破空间距离上的限制，能让我们随时随地和远方的朋友或企业进行交流或合作。5G 移动网络将会在 2020 年得到推广，与如今大规模使用的 4GLTE 移动网络

相比，它能够让频谱的使用效率提高 1000 倍，在性能上也将有极大的改进。即使我们是在外旅行，这种新的移动通讯技术也能随时随地为我们提供即时的“虚拟存在”。5G 通信需要进行

进一步提高对频谱的利用率，这将推动移动设备中声滤波器件和谐振器件的大量应用，以减少这种紧密排布频带在扩展其范围时所产生的干扰问题。例如，在一些高端的智能手机中，现在通常就需采用 15-50 个不等的声波器件。

表面声波（SAW）器件作为大部分智能手机的关键组成元件，通常是由合金电极材料构成，来获得它所需的综合性能。

比如说铜铝合金就是 SAW 器件中叉指换能器的通用材料，在铝含量较高时，这种合金就所具有的较小的电阻和较低的密度等特性来获得最佳的频率响应。铜在合金中的重量比只有 2%，它在合金中的主要作用是作为铝晶粒之间的“粘合剂”，避免形成铝的小丘或者孔洞。这样就能通过抑制铝的电迁移现象来增加器件的可靠性，因为在高温或高功率下电迁移将会使铝晶界发生移动。2% 的 Cu 是最佳含量，铜的含量过高会增加电阻，过低（<1%）就会失去原有的对电迁移抑制效果。

Ferrotec 公司新一代的 Temescal 蒸发设备，具有 HULA 行星式拱顶结构，能够解决溅射或共蒸发沉积金属合金膜的历史性难题。双轴的行星式旋转的装载晶圆的拱顶，不论是单个晶圆内还是各个晶圆之间薄膜的厚度均匀性都十分出众（见图 1）。我们还进一步开发了可靠的加工工艺菜单，使得在单源电子束蒸发设备上能够精确地控制合金薄膜组份的化学计量比。

图1. Ferrotec公司的Temescal UEFC-4900电子束蒸发设备具有HULA行星式拱顶结构。



## 溅射的困境

单源蒸发是我们一直以来所提倡的沉积多种合金膜的方法，随着时间的推移它已经逐渐被溅射和共蒸发所取代。在硅集成电路器件领域，用溅射方法制备 AlCu 合金是最为普遍使用的方法。然而，与电子束蒸发相比，溅射没有方向性，使得它对化合物半导体和声波器件产业中通常使用的金属剥离工艺生来就不是个最佳的选择。没有方向性的最大缺陷就是会在光刻胶的侧壁覆盖金属物。在剥离工艺中随着光刻胶的去除，其侧翼残留的金属碎片就会疏松地粘着在金属图形的边缘。这种残留的金属“侧翼”碎片会造成电学短路或缺陷，会对声波器件中距离十分密集的换能器叉指金属图形产生严重的问题，从而会降低产品的良品率。

在整个溅射靶的生命周期中，工程师需要关注靶材的侵蚀问题。由于靶材表面形状会随着工艺的进程而改变。即使是对一个给定的工艺菜单，其溅射沉积速率也会随着时间而改变。这使得溅射工艺工程师在不同的晶圆加工批次之间，需要不断地通过调整溅射时间和 / 或溅射功率来控制其沉积速率（和薄膜厚度）。最近开发的自动调整沉积速率方法，可以降低手动调节引起的溅射设备停机时间过长、人员成本以及测试晶圆成本增加等缺点。然而，执行自动调整方式就必须首先监测几个靶材在整个生命周期中的厚度变化，而且对每种类型材料的靶材来说都要分别独立地进行监测才行。

与此相反，Ferrotec 公司的 Temescal 蒸发设备能够灵活且持续的监测沉积速率，以提高生产效率。这样用户就能够在工艺菜单中简单地来设置沉积速率，再采用自动工艺参数的反馈就能够让沉积速率保持在预先的设定值上。作为一种选配件，我们的电子束蒸发源还具有在高真空蒸发室中通过“喂线”来进行源材料的再补充功能。频繁的“喂线”或者蒸发源再补充能够让蒸发源始终保持在一个稳定的状态，从而具有很好的工艺稳定性和工艺循环可重复性。

## 共蒸发的困境

共蒸发偶尔会用来沉积两种不同的材料，它们来自两个分离的电子束蒸发源，而这自然就意味着在放置过程中至少有一至二个蒸发源或多或少地会偏离拱顶圆盘结构的理想中心轴。而这

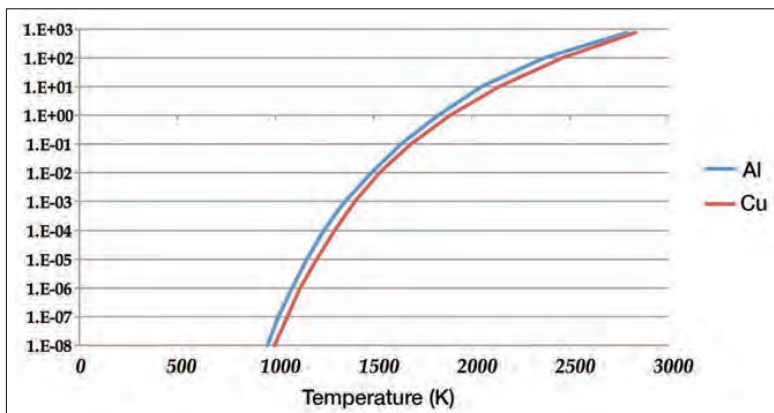


图2. 铝、铜两种元素的蒸汽压和温度之间的对数函数关系图。

种对中心轴偏离会破坏蒸发源到衬底之间的正交方向性，有可能会在金属剥离工艺中降低产品的良率。

共蒸发的另一个缺点就是难以进行工艺控制。在 AlCu（重量比 Al98%，Cu2%）的例子中，Al 的比例要比 Cu 高很多，意味着如果薄膜的总厚度为 200nm 时，所需的 Cu 有效厚度只有 1.2nm。如果 Al 的沉积速度是 1nm/s，那就意味着 Cu 的沉积速率就要非常之低，只有 0.006nm/s。这就让 AlCu 共蒸发的可靠性非常难以掌控。此外，为了让薄膜在任何区域都能保持其组份有着相同的化学计量比，沉积过程中沉积速率绝对不能够有所变化，否则，一旦一种蒸发源的速率发生改变，另一种蒸发源就必须随之做出对应的调整。

|                                        | Sputtering                        | Co-evaporation                           | Single-Source Evaporation using HULA |
|----------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>Lift-off Quality</i>                | Poor                              | Good<br>(Excellent for high ratio alloy) | Excellent                            |
| <i>Control of Feature Size</i>         | Poor                              | Good<br>(Excellent for high ratio alloy) | Excellent                            |
| <i>Repeatability of Process Recipe</i> | Adjustment throughout target life | Excellent                                | Excellent                            |
| <i>Stoichiometry Control</i>           | Excellent                         | Poor                                     | Excellent                            |
| <i>Batch Size</i>                      | 6                                 | 25                                       | 25                                   |
| <i>Throughput</i>                      | Poor                              | Excellent                                | Excellent                            |
| <i>System Cost</i>                     | 100%                              | 25%                                      | 25%                                  |
| <i>Cost of Ownership</i>               | Poor                              | Good                                     | Excellent                            |

表1. 剥离工艺应用的几种不同金属合金沉积设备的对比分析——六反应室晶圆溅射设备、Ferrotec公司的UEFC-4900共蒸发和单源蒸发设备。

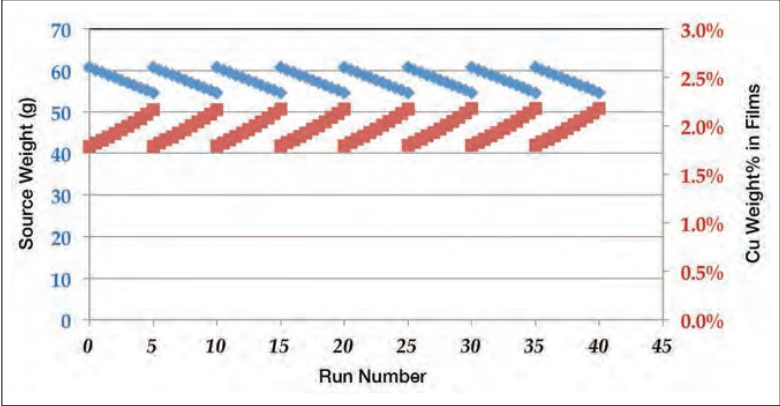


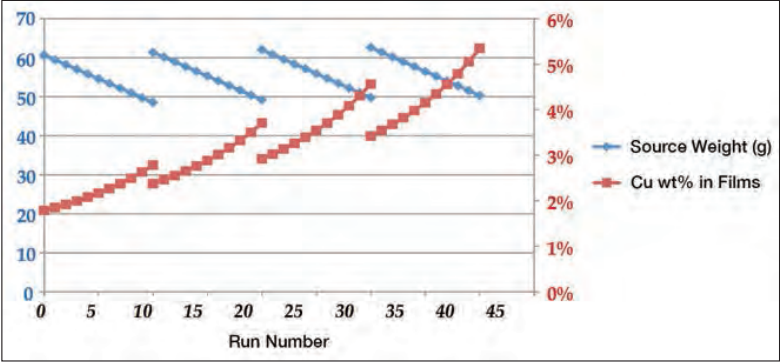
图3. 向坩埚中补充与初始组份比例相同的蒸发源材料会产生不希望产生的化学计量比失配现象。

新一代的 Temescal 蒸发设备避免了溅射和共蒸发可能出现的上述各种问题。Ferrotec 公司的 HULA 蒸发设备是在其行星式拱顶圆盘结构的中心轴线上放置单个 AlCu 蒸发源，既能保证沉积薄膜具有高度均匀的化学计量比，又能够保证蒸发源和衬底晶圆之间的正交性以及很高的产品良率。

一组行星式旋转晶圆载盘拱顶能够连续不断地改变在每个晶圆相对于坩埚中蒸发源的位置，它的非接触式磁驱动方式避免了微粒的生成，能保证不论是同一晶圆中还是不同晶圆间都具有高度均匀的膜层厚度和组分。行星式旋转的晶圆载盘拱顶在自转的同时还会绕着其中心轴公转，从而在整个蒸发过程中始终能保证晶圆与蒸发源具有相等的距离和角度。

设备的这些优势需要付出的成本是在可接受范围内。大约四分之一的成本来自于一个团粒式 (cluster) 溅射设备。Ferrotec 公司的 UEFC-4900 蒸发设备具有更好的剥离工艺和薄膜沉积操控性能。此外，它还可提供一种比单一晶圆加工产能要高得多的具有六个反应室的溅射设备。如果要使用高组份浓度比的 AlCu 合金，相比于共蒸发，单源蒸发的方法能够更好的控制沉积薄膜的化学计量比，并能够降低设备的总体拥有成本 (表 1 是溅射、共蒸发、单源蒸发优缺点的概述)。

图4. 用具有正确配比的 AlCu 材料对蒸发源进行多次补充可减小 AlCu 薄膜中 Cu 含量的变化。



### 单源蒸发的霸主地位

单源蒸发在沉积 NiCr 和 AuGe 方面已经应用了很多年。这种方法的主要缺点是合金中的各个元素在给定温度下的蒸汽压会有明显差异，使得所制备薄膜和初始蒸发源材料相比会有明显的组分比差异。这种差异来自于在同一蒸发温度下将两种蒸发物混合时，会造成系统分压上的差别，其压强甚至与这两种纯元素的分压都有很大不同。

幸运的是对于常见的蒸发合金，任一种元素的分压都不会与另一种元素有大的差别，或者说在可接受的薄膜组分比上有着较宽的容许范围

对于制备 AlCu 的好消息就是 Al 和 Cu 两种元素各自的蒸汽压在很大的温度范围内都十分接近 (如图 2 所示) 这些曲线表明，含 98%Al 和 2%Cu (重量比) 的 AlCu 蒸发源最初得到的薄膜成分应该是 99.3%Al 和 0.7%Cu，这与和实际获得的 99.6%Al 和 0.4%Cu 薄膜组份相比，差值很小。

很明显，如果想要获得 Cu 重量分数为 2% 的合金膜，蒸发源中的铜浓度就必须更高，而事实上确定其精确成分是可行的，利用一些经验性拟合手段，建立蒸汽压曲线和蒸发源行为之间的模型，就能够很好地预测蒸发源成分和实际形成薄膜成分之间的关系。

想要得到预期成分的薄膜，在初始阶段选择正确比例的蒸发源只是个开始。因为在实际蒸发过程中，蒸发源中的 Al 要比 Cu 更容易蒸发，所以蒸发源本身的化学计量比会逐渐发生变化。如果在蒸发源组份有了变化之后，还是向坩埚中补充初始 Cu 含量的材料，那么蒸发源组份的变化问题将愈加严重 (如图 3 的模拟结果所示)。

解决此问题的方法就是坩埚中补充的合金材料组份比例能保持薄膜所需的 Cu 含量。当蒸发源是用合适组份比的合金材料进行有规律的补充时，就可以建立薄膜和蒸发源之间的在 Cu 含量重量比上的关系 (如图 4 所示)。

只要薄膜材料是通过蒸发方法制备的，那么想要保持蒸发源 Cu 含量始终稳定是不可能实现的，但是只要能有规律地进行蒸发源的合金材料补充，我们就能把这种偏差控制在相对较小的范围内。

### 位置，位置，还是位置

Ferrotec 并不是第一家开发行星式蒸发设备的公司，当我们推出新一代具有 HULA 行星式旋转拱顶结构的蒸发设备时，已经有了一系列相关

产品早在 2011 年就投入了市场。

然而，我们仪器和其他上市产品最大的区别在于，我们设备中的蒸发源坩埚是放置在 HULA 蒸发设备 Knudsen 结构球的中心处，而不是其边缘处。Knudsen 结构球具有以下特征：只要能将蒸发源放在该结构球中的任意位置点上，那么沉积出来的薄膜的厚度一定是均匀的。在 HULA 蒸发设备中将蒸发源置于拱顶圆弧中心处的设计有利于实现正交沉积，同时又能提高剥离工艺良品率。

利用 Ferrotec 的 HULA 系统，工艺工程师就能使晶圆内的合金组份不均匀性降至 2%，不同晶圆间的不均匀性降至 1%。行星式 HULA 蒸发设备在沉积小于 5nm 的超薄膜时性能也十分突出，沉积铂、镍薄膜的不均匀性低于 0.5%，而应用在我们之前提到的 AlCu（重量百分数 98%Al，2%Cu 时）上，各晶圆加工批次间 Cu 含量的标准偏差值为 0.2%，而同一晶圆内和各加工批次间的厚度不均匀性也只有 1%（如图 5 所示）。

能获得成分和厚度上的高度均匀性都是源于 HULA 拱形圆顶的行星式旋转运动。合金蒸发源的两种元素在蒸发时有不同的角度分布，在 AlCu 蒸发过程中，Cu 元素随角度的变化要比铝元素要大。合金的单源蒸发无法对每种元素都使用不同的均匀性遮挡板。与此相反，传统的单轴系统只能在一定的沉积角范围内保持铝铜比例的稳定（详见图 6），这就大大限制了一次能够沉积晶圆的数量。

HULA 系统最大的优势就是拱形圆顶的行星式旋转运动。原来在单轴系统中，晶圆只能位于富铜或者贫铜的区域，而在 HULA 系统中晶圆可以同时出现在这两个区域。这种位置平均化方式的优点就是能将晶圆内的合金成分差异降至最低。基于“蒸汽云”模型的仿真进一步说明这种差异将会小于 0.1%。

AuSn 共晶合金的成分的模拟结果也显示了 Ferrotec 公司的 Temescal 蒸发设备的优势。根据我们的计算，即使不使用均匀性遮挡板，在单片晶圆内沉积 AuSn（Au80 %/Sn20%）薄膜的均匀性标准偏差值将低于 0.02%。薄膜在厚度上差异也很小。各个晶圆间在组份上的差异，不论是 Au 还是 Sn 都只有 0.3% 左右，从而很好地保证薄膜在化学计量比的一致性。这种属性是非常重要的，因为 Sn 含量降低 0.75% 就会让合金的共晶熔点上升 30℃。利用 Ferrotec 公司的 HULA 系统，将薄膜组份上的变化降至最小化可以保证共晶熔点

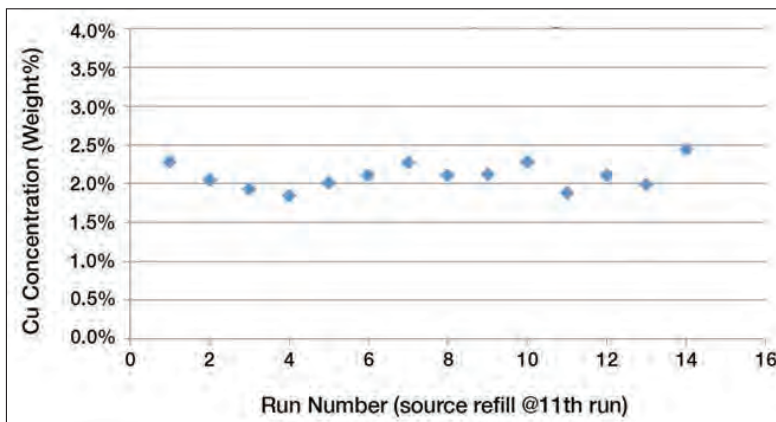


图5. 采用补充蒸发源材料方法在各晶圆加工批次间AlCu合金化学计量比的控制（第11批以前）。

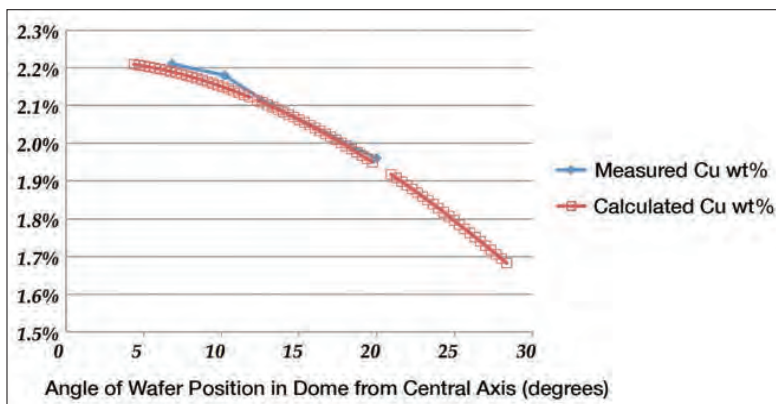


图6. 在单轴拱形圆顶结构中，随着蒸发角度增加AlCu合金（98%Al/2%Cu）中Cu含量的降低。

温度的均匀性，这对于实现高质量的键合是非常有帮助的。

总而言之，两种关键性的技术创新都完美地融入到 Ferrotec 公司的 Temescal 电子束蒸发设备中。第一项专利技术就是双轴行星式旋转拱顶结构，蒸发源坩埚是放置在 Knudsen 结构球的中心，来保证蒸发方向的正交性。

第二项专利技术就是考虑到“蒸发云”形状而采用的圆锥形反应室腔体结构，它减少了原来反应室腔体的体积和表面积，可以减少抽真空所需要的时间。对 Temescal UEFC-4900 设备而言，一个批次包含有 25 片 6 英寸晶圆，它抽真空至  $1 \times 10^{-6}$  Torr 的典型时间为 18min，而对一次能沉积 42 片 6 英寸晶圆的 Temescal UEFC-5700 设备而言，它的抽真空至  $1 \times 10^{-6}$  Torr 的时间为 11 分钟。所以在剥离工艺中，采用 Ferrotec 公司的 Temescal 设备系统来沉积合金薄膜将是一种最佳的选择。

#### 扩展阅读

C. Weng et. al. 2015 CS MANTECH Conference

H. Lichtenberger et. al. 2012 CS MANTECH Conference

# 提高氮化物基 LED 的橙光发射性能

在 LED 发射橙光的活性区下方设置一个蓝 - 绿光量子阱，可以产生更为明亮、谱峰更窄的橙光发射。

日本的研究人员采用了多量子阱的混合结构来提高橙光 InGaN 基 LED 的电致发光性能。由于加入了一个蓝 - 绿光单量子阱，并将它作为一个应力释放层，使得这种新型 LED 器件能产生亮度更高，谱峰更窄的橙光发射。

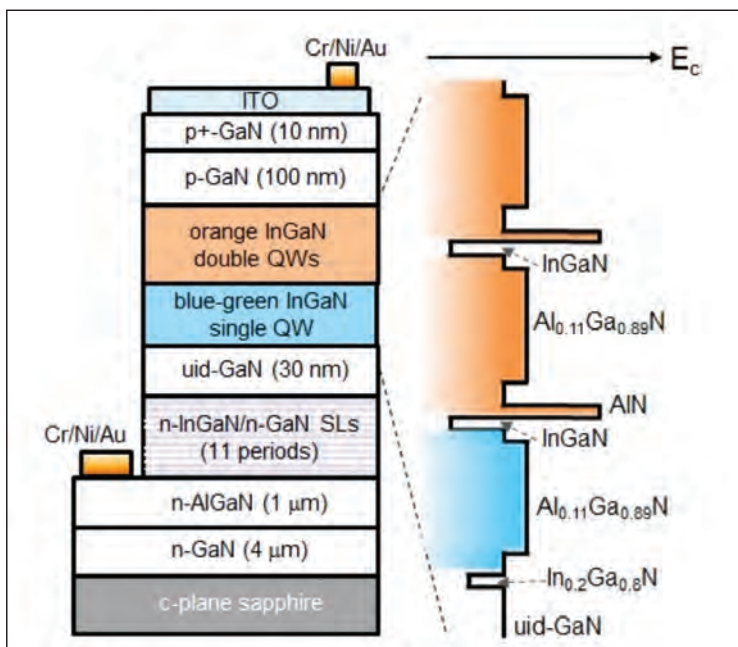
日本的研究人员希望这一里程碑式的发明将能够促进全色域发光氮基 LED 的发展，在这一方向上的进展也将能推进激光二极管在显示、照明和通信中的进一步应用。

根据论文的通讯作

者，来自东京科技大学的 Daisuke Iida 表示，这种具有混合结构器件的一个重要特性在于它的发光光谱纯度，要提高光谱纯度的关键是能避免空穴向蓝 - 绿光量子阱的注入效应。它的同一院系合作者通过电致发光测量已经证实了这一点，因为他们并未观察到蓝 - 绿光的发射。

由该研究团队制作的混合型量子阱结构包括有：一个 4mm 厚的生长在蓝宝石衬底上的硅掺杂 GaN 底层，一个具有 11 个周期的超晶格结构层，一个 2nm 厚的蓝光发射单量子阱和铝含量为 0.34-0.36 的橙光发射双量子阱(关于结构更多细节参见附图)。该研究团队还制作了一个供对比用的参照 LED 器件，这两组 LED 器件的不同点在于是否包含有蓝光发射的单量子阱。

混合型 LED 的特征之一是加入了一个 AlN 中间层，它的作用是可以抑



在橙光发射双量子阱下方插入一个蓝光发射单量子阱，有助于 LED 产生亮度更高、谱峰更窄的橙光发射。

制橙光发射双量子阱的热分解。该芯片还包含有一个 AlGaIn 势垒层，其铝含量要高于该团队早期研发的橙光发射 LED 中所采用的铝含量。采用上述方式对器件进行了调整，通过应变补偿改进了 InGaIn 量子阱的材料质量，

该 LED 制作完成后的尺寸是 370mm × 370mm，它加入了一个 100nm 厚的氧化铟锡膜层来作为 p 型接触电极，然后以面朝上的典型方式来安装芯片，没有使用环氧树脂。对两种类型的 LED 器件进行时间分辨的光致发光测量，发现混合型结构的 LED 具有更长的载流子寿命，这应该是橙光发射量子阱中晶体质量的改善所致。

与此同时，还在室温下进行电致发光测量，结果显示混合型器件相比于对照器件具有更高亮度、更窄谱峰的光发射，这被认为是由于它们在缺陷密度上的差异所致。根据扫描电子

显微镜的图像显示，混合型器件中的 V 形小坑的密度为  $8 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ ，而在对照器件组中该缺陷密度约为它的 8 倍。

高缺陷密度引起的另一种结果是会产生二次发射峰，这会降低器件的效率。在混合型器件中，仅在 620nm 处存在一个发射峰，在 20mA 下该峰的半高宽为 51nm。

将混合型 LED 的工作电流从 4mA 增加到 50mA，它的波长为 25.3nm 发射峰将会发生蓝移。这可归因于压电

场的屏蔽效应，这是由于相干生长会在橙色发射阱中形成内部应力，而产生压电场。与对照器件组相比，混合型 LED 的输出功率要高 120%，在 20 mA 时可产生 0.23 mW 的光发射，然而，其外量子效率仍然只有 0.6%。

提高 InGaIn 量子阱的质量，可进一步提高发光效率。然而为了提高效率，研究团队还需解决由量子阱约束 Stark 效应 (QCSE) 所产生的内建电场问题，这可通过采用更好的应力释放技术结构来得以实现。

该研究团队工作的下一个目标是计划将能释放应力的厚 InGaIn 层加入到 LED 器件结构中。

D. Iida et. al. Appl. Phys. Express 9 111003 (2016)

# 解决 LED 中铁杂质的难题

在包含了激发态的情况下,可以通过模拟计算来对 GaN 中铁杂质较高的非辐射复合率进行解释。

研究者们都明白,铁杂质会降低 GaN 基材料的光发射效率。然而,对其机理的了解却还有些含糊不清:认为铁杂质的能级与导带十分接近,导致其捕获空穴过程十分缓慢,从而会降低它的非辐射复合率。

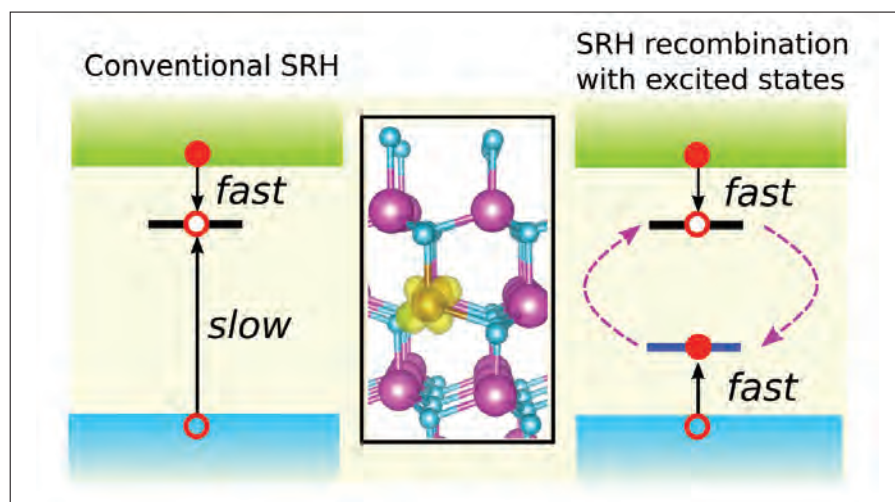
然而根据美国加州大学 Santa Barbara 分校 Chris Van de Walle 团队的精密模拟计算,表明这一结论并不完全正确。该团队与 Rutgers 大学、Vienna 大学和瑞典 KTH 皇家理工学院和立陶宛物理科学与技术中心的科学家保持着合作关系。

论文的主要作者 Darshana Wickramaratne 向我们这样解释它们团队的工作:“我们的工作表明,铁杂质激发态在转化成为抑制中心的过程中起着十分重要的作用”。

Wickramaratne 及其合作者的发现强调了减少 LED 中铁杂质的重要性,以保证这些器件能以最高可能的效率下工作。避免铁杂质的污染并非小事,因为氨会与生长室中的不锈钢进行反应,而将铁杂质污染引入到生长环境中。铁杂质污染还可能来自生长系统中所含有二氧化硅和氧化铝组分的部件,而氧化铁是这些材料的主要污染物。

值得注意的是,减少晶体管 GaN 基外延层中的铁污染也是重要的,可以防止在这些器件中产生电流崩溃效应。

该团队使用混合密度函数理论评估了氮化物材料复合过程中激发态的重要性,提供了有关 GaN 中替位铁的基态和激发态的详细信息。铁在 GaN 中的激发态已经是众所周知,人们已经在含有铁杂质的 GaN 的光发射和光



传统的Shockley-Read-Hall (SRH) 复合(左侧图)的发生机制是:从导带捕获电子到铁的缺陷能级(示为黑线),但是因为缺陷能级远离价带,捕获空穴的速率缓慢,使得总的复合效率受到了限制(蓝色)。激发态的存在提高了空穴捕获速率(右侧图),使得整个SRH复合过程变得更加有效。

吸收中对其进行了研究。

Wickramaratne 及其合作者的工作是确定了 GaN 中铁原子的结合机制。他们发现,在镓位置上的替位铁原子要比在氮位置上的替位铁原子或在间隙构型中填隙铁原子具有低得多的形成能。研究者的结论是:在镓位置上的替位铁原子具有较高的非辐射复合率。

在考虑了  $\text{Fe}^{3+}$  和  $\text{Fe}^{2+}$  两种铁的价态后所进行的模拟计算结果表明,它们具有很高的非辐射复合率,而这一现象的产生是建立在一种包含激发态在内的循环过程所致(参见图)。

Wickramaratne 及其合作者模拟计算了电子和空穴的捕获系数。值得高兴的是,他们的结果接近于采用时间分辨的光致发光测量所得到的数值。计算结果还表明,对于浓度为  $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  的铁——相当于约 10ppb 的铁,其 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合系数为  $1 \times 10^7 \text{s}^{-1}$ 。

“这将会导致 LED 的发光效率降低 20%,这是绝对不能接受的”,Van de Walle 说道,“我认为铁的含量不应超过 1ppb”。

该研究团队的计划还包括有,使用他们的模拟方法来研究由其他杂质和点缺陷所引发的发光效率衰减效应,他们还计划将他们的工作范围扩展至超宽带隙的材料上。

“众所周知,缺陷会增加 Shockley-Read-Hall 间接复合,尤其是在带隙大于 GaN 的材料中,但是其微观机制还是一个谜团”,Van de Walle 还说道,“现在我们已经发现激发态起着至关重要的作用,由此我们就可以描绘出非辐射复合在这种材料中是如何进行的”。

D. Wickramaratne et. al. Appl. Phys. Lett. 109

| 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 | 电子设计创新大会    | www.mwjournallchina.com/edicon | IBC       |
| Evatec Ltd.   |             | www.evatecnet.com              | 8         |
| IQEP          |             | www.iqep.com/indexchina/       | 3         |
| M/A Comm      |             | www.macom.cn.com/gan           | FC, 11-13 |
| Vistec        |             | www.vistec-semi.com            | 10        |

## 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)  
 Sunnie Zhao (赵雪芹)  
 sunniez@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)  
 jennyl@actintl.com.hk  
 Tel: 86-755-2598 8571

Shanghai (上海)  
 Hatter Yao (姚丽莹)  
 hatterya@actintl.com.hk  
 Amber Li (李歆)  
 amberl@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

EDI CON China  
首度登陆上海

EDI  
CON  
2017

Electronic Design **Innovation** Conference

## 电子设计**创新**大会

立刻预订展位，向中国的射频、微波和高速  
数字设计工程师展示您的产品和方案

2017年4月25-27日

上海跨国采购会展中心

# 中国上海



**会议包括：**技术报告会、研习会、座谈会、短期课程和全体会议。

**合作伙伴：**

中国电工学会(CES)的中国电磁兼容大会与展览(EMC China)  
中国雷达行业协会(CRIA)的新体制雷达应用与发展研讨会

**赞助形式：**金牌赞助、银牌赞助、铜牌赞助和参展赞助。



**2017年是第5届会议**

**EDI CON China 2016  
参会者增加了35%**

**100多家公司参展**

立刻签约选择展位：[www.mwjournalchina.com/edicon](http://www.mwjournalchina.com/edicon)

首席赞助商：



钻石赞助商：



企业赞助商：



主办单位：



**EDI CON China 2018, 4月17-19日, 北京**

# 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

