

• CHINA

SiC 超高压器件

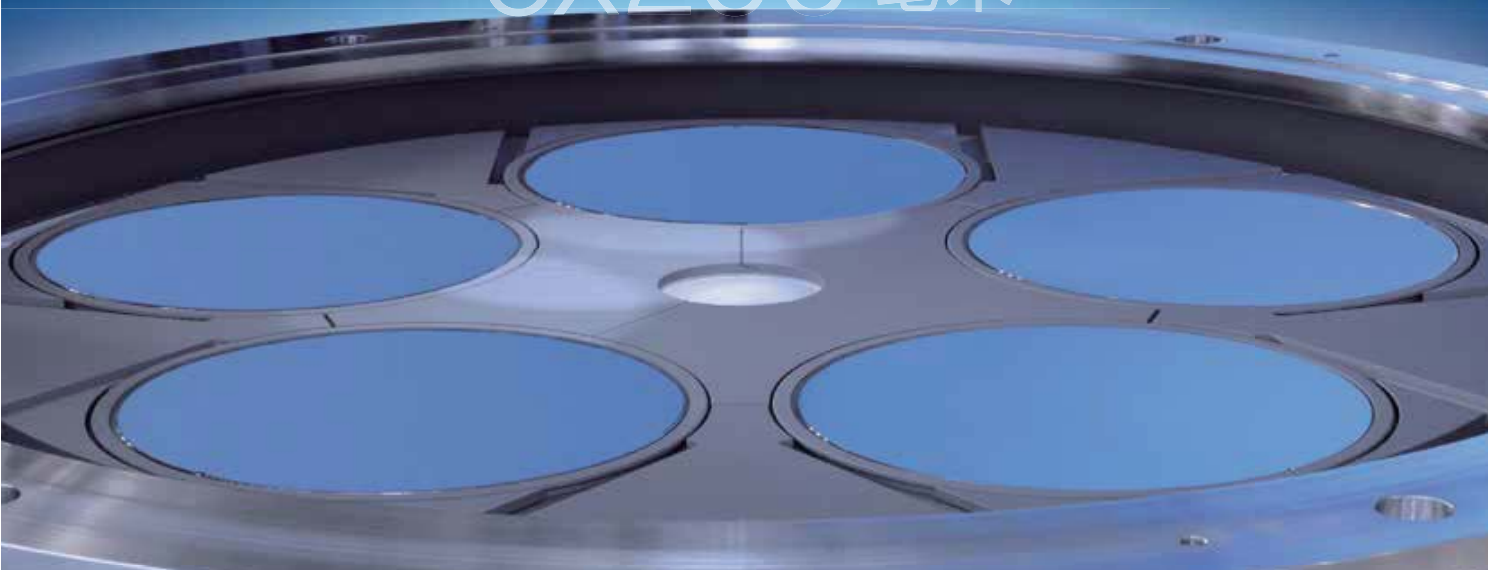


ACT

AIXTRON

200 毫米批处理式硅基氮化镓反应器

5x200 毫米



AIX G5+



硅基氮化镓设备 AIX G5+

- 硅基氮化镓生长专用设备
- 与 AIX G5 HT 平台兼容
- 实现硅基产品的规模化生产
- 行星转盘式技术：
卓越的对称均匀性，
晶圆弯曲度精准可控，
采用标准的硅基材。

AIXTRON China Ltd.: 艾强（上海）贸易有限公司
chinainfo@aixtron.com · www.aixtron.com

ALWAYS **ONE** **STEP** **AHEAD**

第十三届 洁净室研讨会暨产品展示

The 13th CleanRooms China Conference & Products Display

www.crcevent.com.cn

2014
CleanRooms China
Conference & Products Display
洁净室研讨会暨产品展示

2014年9月17-18
上海·浦东龙东商务酒店

洁净技术是一门高科技、高投入、高产出，而又高耗能和高耗材的行业。行业同仁致力于在建筑的规划、设计、施工、运营、回收等全寿命周期内，通过多种手段，最大限度地节约资源(节能、节地、节水、节材)、提高产能，保护环境和减少污染，力争为社会提供健康、适用和高效的“绿色”空间。

为期两天的会议，演讲人和展商将与洁净室技术及污染控制领域的专业人士分享半导体、LED和FPD及生物制药行业的新技术和前沿信息；分析目前技术和行业现状及未来趋势。给洁净室行业的相关人员提供一个深入交流与探讨的平台。

创发商机

参与这个年度盛会，届时您将可：

- 与各家公司的决策者直接会面
- 与生物医药及半导体、平板显示、LED等光电高科技制造行业的使用者零距离接触
- 直接向使用者展示、介绍你的技术和产品
- 与使用者共同探讨你的产品在污染控制中的应用
- 培养与客户的良好关系，拓展销售渠道
- 搭建与行业专业人员沟通的稳固桥梁

主办单位



大会媒体



2014 赞助

KEYENCE 基恩士

VAISALA

KIMO
INSTRUMENTS

Leica
MICROSYSTEMS

M

testo

ASYS 苏州蓝群净化科技有限公司

setra

EE
ELEKTRONIK

ZOGLAB

rotronic
MEASUREMENT SOLUTIONS

言兴

MD
测量仪器

Vialtrade
测量仪器

测量仪器
CAMPBILL

Lunray®

LUYOR

持续更新中.....

赞助咨询 上海 86-21-62511200 北京 86-10-64187252 深圳 86-755-25988571 香港/国际 852-28386298



化合物半导体



目录

季刊 2014年第3期 2014年08月26日出版
Quarterly 2014 - Issue 3 26 August 2014

Contents

封面故事 Cover Story

7

用于未来电力基础设施的超高压器件

Ultra-high voltage devices for future power infrastructure

经过了40多年的研究，如今SiC功率器件的出货量已经相当可观，且增长十分迅速。具有最大销售量的两种产品是Schottky势垒二极管（SBD）和功率MOSFET，它们正越来越多地替代同类型的硅器件，并且能使功率转换器和逆变器变得更为小型化和高效率。正因如此，SiC芯片将能成功地应用于电力供应、引擎控制、光伏转换、通讯设备、加热设备、机器人、电力/混合动力汽车、电力牵引机车和电力传输系统中。高质量SiC外延层的快速生长技术为制造阻断电压大于20kV的功率器件铺平了道路。根据相关研究机构的报告：到2025年，SiC功率器件在综合能源消耗方面所节省的电力将会超过10GW——这大致相当于10座核电站所发出的电量。



- Tsunenobu Kimoto, 日本京都大学

技术 Technology

12

GaN基VCSEL的发展之路

The evolving GaN VCSEL

垂直腔面发射激光器（Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL）与边发射激光器相比具有多种优势，其中包括较低的阈值电流，高速状态下的直接调制，以及圆周对称的输出光束，晶圆级的测试，以及可制备成密排的二维阵列等。正是由于VCSEL激光器的几何特性，使其大批量的单片加工工艺成为了可能，并且不需要裂片、端面镀膜和带条处理等。因此，VCSEL能同时具有相对较低的制造成本和优异性能。GaN基VCSEL的制备比GaAs基VCSEL困难得多，但通过创新，包括引入不同类型的反射层，替代性的电流注入机制，以及新的晶向等，上述情况正在不断得到改善。



- Daniel Feezell, 美国新墨西哥大学

关于维时国际资讯

ACT国际成立于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——为跨国公司和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、电子设计、电子制造、污染控制、激光/光子学、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。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, 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, electronic design, electronic manufacturing, contamination control, laser/photonics, optical communications, LED technology and RF/microwave. 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

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.



化合物半导体



目录

季刊 2014年第3期 2014年08月26日出版
Quarterly 2014 - Issue 3 26 August 2014

Contents

21 将电源转换器件集成到LED芯片上
Bringing the inverter onto the chip
LED的驱动条件与民用供电电源的输出存在着差异，驱动LED仅需要几伏的直流电，而民用电源在不同的国家则为110V到250V的交流电。为了解决这种在供电电源上的差异问题，固态照明灯含有一个AC到DC的电源转换器，来将民用电源的AC供电转变为可以驱动LED灯的DC供电形式。电子驱动器实际上还有着多重作用，包括可以在LED芯片温度发生变化时仍能维持一个稳定的光输出强度，以及能提供诸如调节其发光强度及其发光色温等功能。
将LED和晶体管进行单芯片集成，也就是将光发射器件与其控制电路整合在一个单芯片上，使固态光源技术进入一个全新的发展领域。来自美国伦斯勒理工学院（Rensselaer Polytechnic Institute, RPI）的智能照明工程技术研究中心（SLERC）的Zhongda Li和他的同事们共同完成了这项工作。
- Zhongda Li等，美国伦斯勒理工学院智能照明工程技术研究中心

24 石墨烯：形成禁带
Graphene: Opening The Bandgap

25 纳米棒阵列大大提升绿光LED的发光效率
Green emission rockets with nanorod array

26 双异质结构能增加FET的击穿电压并降低成本
FETs: Double heterostructure boosts breakdown, cuts costs

27 采用高温CVD工艺来降低SiC的成本
High-temperature CVD to cut SiC costs

28 气隙设计提高了LED的光萃取效率
Air gap boosts LED extraction efficiency

4 编者话 Editorial

5 产业要闻 Industry News

3 广告索引 Advertisement Index

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
CS International Conference		www.cs-international.net	16,17,19,27
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	13
The 13th CleanRooms China Conference & Products Display	洁净室研讨会暨产品展示	www.crcevent.com.cn	1

GaN 器件正成为射频市场新宠

新一代宽禁带半导体材料氮化镓（GaN）与传统半导体材料硅和砷化镓相比更加耐压，并具有高热导率、高漏极效率、更大带宽等优良特性，是制作高温、高频和大功率电力电子器件的理想半导体材料。GaN 正在成为射频市场的新宠，Cree、RFMD、NXP、Macom、Eudyna 和 Nitronex 等公司都推出针对这一市场的 GaN 产品。

根据 Yole Development 最新的市场研究报告“RF GaN Technology & Market Analysis: Applications, Players, Devices & Substrates 2010-2020（2010-2020 年射频 GaN 技术和市场分析：应用、主要厂商、器件和衬底）”，虽然基于 GaN 的 RF 器件在性能和良率方面已经有很大提高，但是由于成本较高，GaN-on-SiC（碳化硅衬底上 GaN）器件要进入像无线电信基站或者有线电视（CATV）这样的主流应用仍然还存在障碍。

该报告分析了 RF GaN 应用和技术挑战，以及实现 RF GaN 大批量生产的战略方案。报告作者们说，在低于 3.5GHz 范围应用时，GaN-on-SiC 与 Si-LDMOS（横向扩散金属氧化物硅半导体）相比不具有成本效益，从而导致低市场渗透率。然而，业界期盼在未来两年时间，Macom 公司和 IQE 公司能够使用 6 英寸和 8 英寸的 GaN-on-Si（硅衬底上 GaN）实现大批量生产。报告分析显示：未来 2-5 年，GaN-on-Si 将被应用于电信基站、军用通信和有线电视。报告乐观地认为，RF GaN 器件将进一步增长，到 2020 年将超过整个 RF 器件市场 20% 的份额。2013-2020 年期间 RF GaN 将以 9% 的复合年增长率增长。

过去几年间，Si-LDMOS 在高于 2GHz 的高功率 RF 放大器方面的应用已经从 92% 减少到 76%；余下的 24% 市场份额主要被 GaAs pHEMT 或者 GaN HEMT 所占有。GaN HEMT 在无线电信领域提供了更高功率和更高频率的选择。从系统的角度来看，GaN 在超过 3.5GHz 的应用中具有成本竞争力。GaN 器件继续挑战硅在工业领域的统治地位，预计该领域功率放大器市场规模在 2020 年将超过 16 亿美元。

GaN 在过去五年中取得了显著的进展，数千种器件已经开发并投入各种应用，比如国防、雷达、CATV、航天应用的卫星通信、简易反爆炸装置、干扰发射台、CATV 模块、3G/4G 基站、WIMAX/LTE 放大器和一些其他应用。包括 CREE，Triquint/RFMD，Sumitomo，RFHIC，MACOM/Nitronex，Mitsubishi，NXP，Microsem 等公司已经拥有了满足众多应用的广泛的 GaN 器件产品。据 iSuppli 预测，GaN-on-Si 器件与基于传统硅材料的 MOSFET、IGBT 或整流器将在 2019 年实现平价和同等性能。

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

编辑 Editor
李晓玲 Greta Lee
gretal@actintl.com.hk

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

北京 Beijing
Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai
Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen
Tel: 86 755 25988571
Fax: 86 755 25988567

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



中国首批 6 英寸碳化硅外延晶片在厦门投产

国内首批产业化 6 英寸碳化硅外延晶片近期在位于厦门火炬高新区的瀚天天成电子科技（厦门）有限公司投产，并交付第一笔商业订单产品，成为国内首家提供商业化 6 英寸碳化硅外延晶片的生产商。

碳化硅是继第一代硅、锗和第二代砷化镓等材料之后的第三代新型半导体材料。碳化硅半导体具有大禁带宽度、高临界场强和高热导率等优良特性，成为制作高温、高频和大功率电力电子器件的理想半导体材料。

瀚天天成电子科技（厦门）有限公司总经理郑忠惠介绍，6 英寸碳化硅外延晶片相对于 4 英寸碳化硅外延晶片具有巨大的成本优势。以 $2 \times 2\text{mm}^2$ 尺寸的管芯制作为例，4 英寸碳化硅外延晶片只可产出 1625 个管芯，而 6 英寸外延晶片可产出 3917 管芯，是 4 英寸外延晶片的 2.4 倍。6 英寸碳化硅外延晶片的顺利投产必将快速推进形成绿色节能的碳化硅半导体产业链，为电力芯片产品的升级提供核心保证，推进太阳能光伏、风力发电、混合和纯电动汽车、高铁及轨道交通、智能电网、航空航天以及电机和节能家电等众多产业发展。

上海集成电路行业资本直通平台成立

近日，“上海集成电路行业资本直通平台（简称 ICI）”成立大会暨“ICI 推介大会暨集成电路行业投融资双方线下交流会”在上海华亭宾馆召开。中国半导体行业协会集成电路分会副理事长暨上海 ICC 主任张力天，中国半导体行业协会集成电路分会副秘书长陈天宝，上海市集成电路行业协会副秘书长徐秀法等行业部门领导出席了本次会议。

参加此次会议的有 80 多家集成电路企业代表，10 多家银行、金融机构代表，以及复兴创富、华平、华登国际、英飞尼迪等业界主流基金和个人投资者代表。

张力天主任在致辞中着重阐述了在国家大力支持集成电路产业这个大环境下，资本市场将会顺应国家的引导性进行投入。ICC 基于多年对企业服务和行业分析所积累的信息资源渠道优势和对 IC 产业的深入的理解，以及在业内已建立起较为强大的影响力和信任感，创建了这个资本直通平台，一方面是为了解决集成电路行业的中小微企业融资难的问题，另一方面也是帮助资本找到合适的企业。这个平台将以诚信为本，持续保证平台的公正性和高效性。

苏州晶湛半导体制造 200 毫米硅基高压氮化镓 HEMT 结构材料

苏州晶湛半导体有限公司利用 AIXTRON 爱思强反应器，成功在 200 毫米的硅基上生产高压氮化镓 HEMT（高电子迁移率晶体管）结构材料。

硅基氮化镓材料凭借其在功率电子方面的潜在应用，最近引起业界的广泛关注。由于硅芯片上异质外延生长氮化镓技术存在缺陷干扰性，所以硅基氮化镓功率器件存在高缓冲漏电问题。苏州晶湛半导体公司在 200 毫米的硅基片上制造出的高压氮化镓 HEMT 材料具有良好的均匀性和低缓冲漏电性能，以及 $<0.5\%$ 的理想厚度均匀性（不排除边缘区域）。在特殊条件下，可实现均匀值的进一步改善。

大尺寸的硅基氮化镓已被公认为是实现氮化镓功率器件大批量生产的最具成本效益的方法。然而，迄今为止，晶圆翘曲度大加上高缓冲漏电妨碍了硅基氮化镓技术的进一步发展。苏州晶湛半导体公司通过对 200 毫米硅基板的处理，使得低漏电的高击穿电压（低于 1600 伏）氮化镓功率器件可在 4 微米相对较薄的缓冲层实现。他们简化了生成过程，尽可能降低了晶圆的翘曲度，并能显著减少外延片成本。采用基于 AIXTRON 爱思强系统的流程后，硅基氮化镓器件或许在不久之后就能实现更高压的性能。

中国首条 8 英寸 IGBT 芯片生产线建成

6 月 20 日，中国首条 8 英寸 IGBT 专业芯片线在中国南车株洲电力机车研究所有限公司建成，中国首片 8 英寸 IGBT 芯片同时下线。此举打破了国外在高端 IGBT 芯片技术上的垄断，对保障国民经济安全和推动两型建设具有重大战略意义。

IGBT 即“绝缘栅双极型晶体管”，主要应用于船舶、高压电网、轨道交通等大功率电力驱动设备中。过去，全球 IGBT 技术主要掌握在欧洲和日本等少数几个国家手中。中国的 IGBT 芯片及其相关产品 99% 以上依赖进口，国内在芯片、封装、系统应用上还没有形成独立、完整的技术体系和产业体系。

为了实现“IGBT”国产化之梦，中国南车累计投入超过 30 亿元，上百位专家攻克了 30 多项重大难题，终于掌握了该器件的成套技术，建立了完整的 IGBT 规模化、专业化生产工业体系，成功研制出从 650 伏到 6500 伏高功率密度 IGBT 芯片及模块，形成了 IGBT 的完整产业链。这条投资近 15 亿元的生产线，首期将实现年产 12 万片 8 英寸 IGBT 芯片，配套生产 100 万只 IGBT 模块，真正实现 IGBT 的国产化。

欧洲为军事应用建立完整的氮化镓供应链

据报道，在欧洲防务局领导下，由欧洲多国联合开展的“可制造的基于碳化硅衬底的氮化镓器件和氮化镓外延层晶圆供应链”（MANGA）项目，已经成功为欧洲氮化镓基功率电子器件的实现建立了完整的供应链。

业界要闻 | Industry News

MANGA 项目的合作方表示，为实现军事应用所需的氮化镓基电子器件的独立生产，需要在欧洲境内建立完整的供应链，包括有可用的氮化镓外延生长用碳化硅衬底，以及高电子迁移率晶体管（HEMT）的工业化生产。在该项目研究范畴内，氮化镓基晶体管层是外延生长在新研发的碳化硅衬底上。通过采用已有的代工工艺，这些晶体管层用于制造完全欧洲产的 HEMT。碳化硅衬底的质量和 HEMT 的性能均可与美国制造的对应器件相媲美。

MIT 研究人员开发 THz 级石墨烯芯片

美国麻省理工学院（MIT）的研究人员们通过在两层铁电材料之间夹进高迁移率的石墨烯薄膜，从而实现可直接在光讯号上操作的太赫兹（THz）级频率晶片。

MIT 宣称，这种新材料堆叠可望带来比当今密度高 10 倍的记忆体，并打造出能直接在光讯号上操作的电子元件。这项研究是由 Dafei Jin、Nicholas Fang、Jun Xu、Kin-Hung Fung（目前在香港理工大学）等人共同合作。研究人员的灵感来自于铁电闸极记忆体与电晶体，他们在夹层中加入石墨烯材料以提高性能。在研究中，他们发现石墨烯中形成 2D 等离子体结构并与铁电材料中的声子极化耦合，最后产生的元件能够在 THz 级频率下工作，并且具有极低功耗。

“SMT China 一步步新技术研讨会 - 成都”圆满落幕

“SMT China 一步步新技术研讨会”（SbSTC 系列会议）于 2014 年 6 月 25 日在成都世纪城新国际会展中心成功举行。SbSTC 系列会议由 ACT 雅时国际商讯主办，得到励展博览集团和相关各级领导的支持，《SMT China 表面组装技术》杂志为会议正式媒体。

《表面组装技术》杂志报道解决表面组装印制电路板在组装中出现的问题、提高生产力、提高可靠性、降低成本的办法，表面组装行业的发展和趋势，提供用于表面组装的方法、工艺、材料、工具发展的最新信息。为提高“中国制造”在性价比、质量和可靠性各方面的竞争力，促进国际国内以及不同地区之间的行业交流，从 2012 年 12 月起，《表面组装技术》杂志社每年在全国各地举办多次《SMT China——Step by Step 电子制造新技术系列研讨会》，累计参与人数千余人。

本次会议由来自印刷技术、回流焊、SMT 贴片、设备检测、摄像模组分析等方面的五位演讲人探讨了电子组装技术及其进展，并结合国内外最新的组装技术，以理论联系实际的方式，与听众面对面交流 SMT 技术和方法，介绍应用实例。

道康宁推出电力电子行业碳化硅晶圆分级结构

道康宁公司近日推出全新碳化硅（SiC）晶体分级结构，为碳化硅晶体创立了行业新标准。新分级结构对相关致命性产品缺陷，如微管位错（MPD）、螺纹螺位错（TSD）、和基面位错（BPD）等，具有更严格的容忍度。这一开创性分级结构旨在优化使用道康宁高品质 Prime Grade 系列 100 mm 碳化硅晶片设计和制造的新一代电力电子器件的设计自由度、性能和成本。道康宁公司目前向市场提供 Prime Standard、Prime select 和 Prime Ultra 的三种不同品质的新型碳化硅衬底。

这种全新碳化硅晶体分级结构是道康宁公司为行业带来的又一项首创，也是与全球电力电子器件领先制造商密切合作的成果，不同的选择有助于帮助他们以最优的成本，快速实现其不断发展和创新的设计目标。

德国科学家以 SiGe 芯片开发低成本气体分析仪

德国微电子技术研究机构 IHP-Leibniz Institute 及德国航太研究中心合作开发了一种尺寸小巧、具成本效益的气体质谱分析感测系统，工作于 245GHz 频率。该系统也是全球第一套以 SiGe 晶片制作的发送与接收系统。

IHP-Leibniz 表示，该机构开发了一种具成本效益的方法来制造所需的 SiGe 半导体元件——也就是整合了天线的发送器与接收器晶片，工作频率在 238-252GHz；由于那些元件是采用标准的硅制程技术，可利用现有半导体设备，因此能降低生产成本，为气体感测器建立一个迄今无法达成的低价格技术基础。

新研发的气体感测器应用潜力巨大，包括用以侦测有毒气体，或是运用在半导体产业的化学制程控制，以及应用在医疗保健领域，例如藉由分析病患所呼出的气体来协助侦测肺部疾病。

美国阿肯色大学设计工作温度超过 350℃ 的 SiC 基集成电路

美国阿肯色大学研究人员已经设计出可在温度高于 350℃ 时工作的集成电路。该研究由美国国家科学基金（NSF）提供资助，研究成果可以提高用于电力电子设备、汽车和航空航天领域的处理器、驱动器、控制器和其他模拟与数字电路的功能，因为所有这些应用场合的电子设备都必须在高温甚至经常在极限温度下运行。

由 Mantooth 教授和计算机工程系教授 Jia Di 领导的团队通过将 SiC 与宽温度设计技术相结合实现了高性能。在电力电子技术和集成电路中，该研究被认为代表了许多基本模拟、数字和混合信号模块的第一次高温实现。🔗

用于未来电力基础设施的超高压器件

高质量 SiC 外延层的快速生长技术为制造阻断电压大于 20kV 的功率器件铺平了道路。

Tsunenobu Kimoto, 日本京都大学

经过了 40 多年的研究，如今 SiC 功率器件的出货量已经相当可观，且增长十分迅速。具有最大销售量的两种产品是 Schottky（肖特基）势垒二极管（SBD）和功率 MOSFET，它们正越来越多地替代同类型的硅器件，并且能使功率转换器和逆变器变得更为小型化和高效率。正因如此，SiC 芯片将能成功地应用于电力供应、引擎控制、光伏转换、通讯设备、加热设备、机器人、电力 / 混合动力汽车、电力牵引机车和电力传输系统中(见图 1)。根据一些研究机构的报告，这种发展趋势所产生的影响：到 2025 年，SiC 功率器件在综合能源消耗方面所节省的电力将会超过 10GW——这大致相当于 10 座核电站所发出的电量。

现在，功率电子领域的这个革新浪潮仍然还处于初期阶段。商用 SiC 二极管和晶体管的工作电压大多数都在 600V 到 1.7kV 范围内，但这决不是它所能达到的性能极限。最近在实验室的研究进展已经证明该类器件可以获得超过 20kV 的阻断电压，这就开启了一种可在电力基础设施、先进电力牵引机车和粒子（如电子或者质子）加速器中进行硬件创新的可能性。

具备超高阻断电压和很低能耗特性的器件同样可以在未来的电力传输 / 配电基础设施和智能电网中扮演十分重要的角色。它们可以装备在工作电压为 6.6-7.2kV 的电力配电线路上，也可以用作构建单级转换器所需的 13-15kV 功率器件。超高压 SiC 器件的另一个吸引人之处是它在固态变压器中的应用（见图 2）。在超高压直流电力传

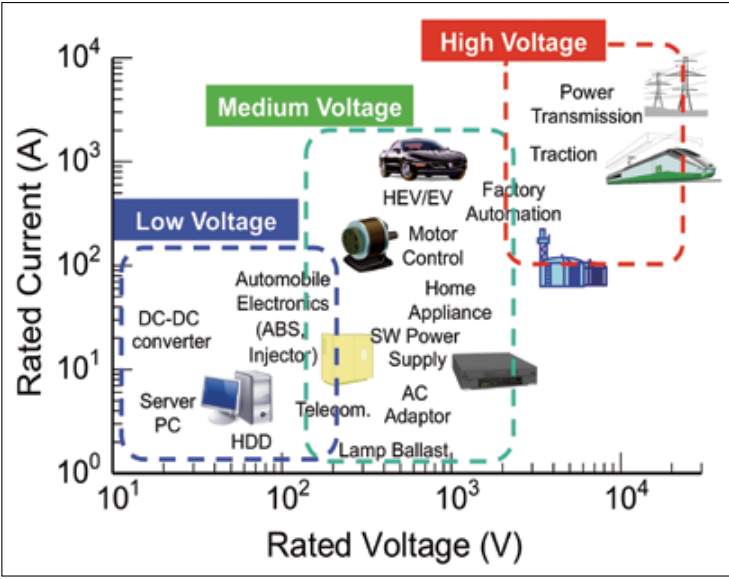
输中，其电压可以高达 150-250kV。如今是采用多个堆叠串联的 6-8kV 硅晶闸管来进行如此高电压的电力转换，但是它有着能量损耗大和发热量高等缺点。如果能用超高压 SiC 芯片来替代这些硅器件就可以节约可观的电能。

为了帮助这个梦想能成为现实，我们京都大学的研究团队已经开发的 SiC 器件为超高电压下工作的器件设立了一个新的技术标杆，这种芯片的制造采用了大规模量产所需的高速率外延生长技术，所制作的器件可以承受近 27kV 的高压。

为什么选择 SiC 材料？

人们对于碳化硅（SiC）的兴趣主要是源于它的宽禁带（wide band-gap）——4H 多型材料的

图 1. 不同的应用领域需要不同的额定电源电压。



封面故事 | Cover Story - SiC功率电子

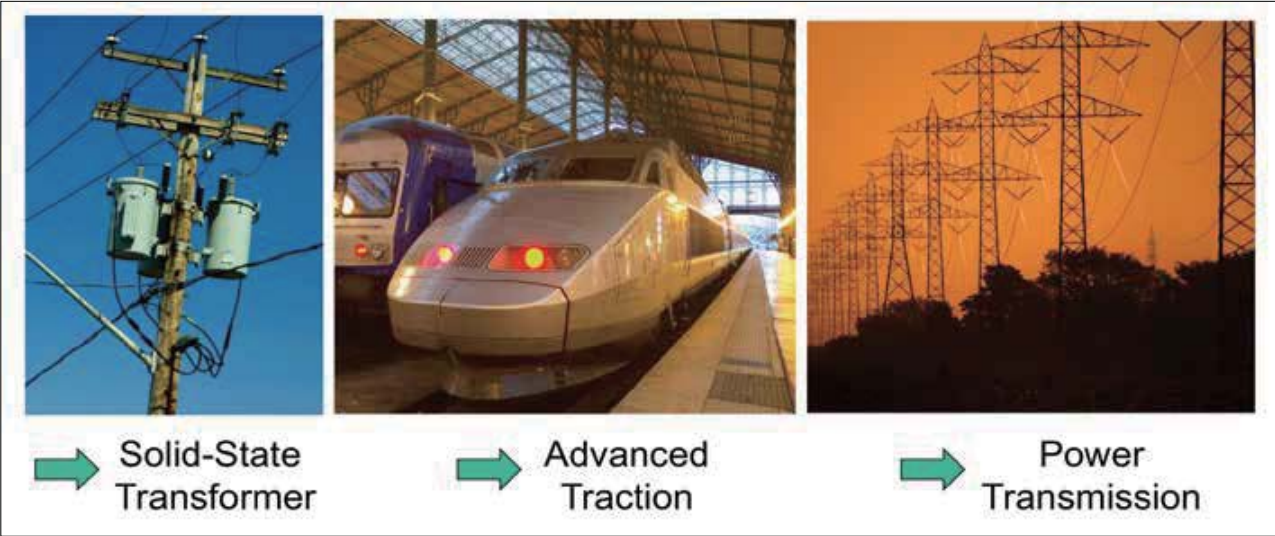


图2. 超高压SiC功率器件可以显著地减少电力转换器的尺寸和重量。

带隙为 3.26 eV，通常用于制作功率器件。这种宽禁带 SiC 的击穿电场强度要比硅高十倍，并且它的热导率要比硅大三倍。不仅如此，SiC 还是一种超乎寻常的宽禁带半导体，它可以在一个相当大的范围内来调节它的带隙（n 型： 10^{14} - 10^{19} cm⁻³，p 型： 10^{14} - 10^{20} cm⁻³）。另外，SiC 器件可以在超过 250℃ 的高温下工作。上述所有这些优势加在一起，可以使体积庞大的冷却单元得到简约化，这通常在硅基功率转换器中是必需的。

在 SiC 基器件的设计中，可以采用更高的电场强度。它的阻塞层厚度与硅相比可以减小数十倍至多，同时也可以将其中的掺杂浓度提高两个数量级以上（见图 3）。由于这些因素，可以大幅度地减少电压阻塞区的电阻，使其最终具有低能耗。

提高任何半导体材料阻断电压的途径是需要增加其材料层的厚度以及降低电压阻塞区的掺杂浓度。通过简单的模拟可以计算出这些改变所产生的影响，可以来指导器件的设计，即必须要考虑到材料中掺杂浓度变化与其击穿电场强度间的关系（见表 1）。

这些并不复杂的计算结果同时也揭示了为什么硅材料是不可能用来构建 20kV 器件的原因：在室温下，硅的掺杂浓度就必须要与其本征载流子浓度相接近，同时在厚度上的要求对于硅材料而言也是不切实际的。而幸运的是，对于 SiC 材料情况就完全不一样了，一个具有 20kV 击穿电压的器件是很容易制造的，因为该电压要求就是在它可能达到的性能范围之内。

Blocking Voltage	Silicon		SiC	
	Thickness	Doping	Thickness	Doping
1 kV	80 μm	2×10^{14} cm ⁻³	8 μm	2×10^{16} cm ⁻³
5 kV	500 μm	2×10^{13} cm ⁻³	40 μm	2×10^{15} cm ⁻³
10 kV	1100 μm	8×10^{12} cm ⁻³	90 μm	1×10^{15} cm ⁻³
20 kV	2300 μm	3×10^{12} cm ⁻³	170 μm	4×10^{14} cm ⁻³
30 kV	3500 μm	1×10^{12} cm ⁻³	250 μm	2×10^{14} cm ⁻³

表1. 硅和SiC器件中特定阻断电压所需的典型材料层厚度及其掺杂浓度，在计算中考虑了材料层与掺杂相关的击穿电场强度。

对这类器件实现大批量生产也已具可行性，SiC 块体材料的生长工艺有了快速的进步，已经可以制造出质量令人满意的 100 mm 和 150 mm 的 SiC 单晶晶圆。在 SiC 的外延生长和器件工艺技术中，例如离子注入和金属化等方面也有着显著的进步。凭借着这些技术基础，就有可能开发

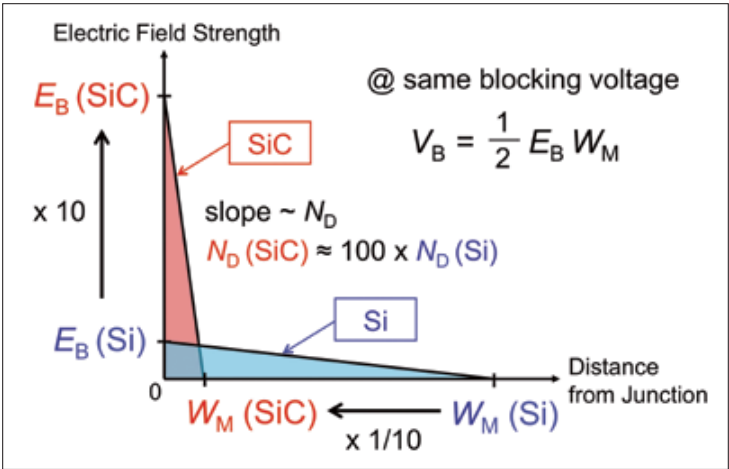


图3. 即使有着相同的击穿电压，SiC和硅的单边突变结中有着显著不同的电场分布。这是因为SiC的击穿电场强度是硅的十倍，所以SiC功率器件电压阻塞层的厚度相比于硅器件可以减小到它的十分之一，并且SiC器件的掺杂浓度可以比对应的硅器件高两个数量级。

在较低电压下工作的器件。在 1991 年 NASA 报道了业界第一个 1 kV SiC PiN 二极管，而我们研究团队在两年之后报导了业界第一个具有相同电压的 SiC Schottky 势垒二极管。从那时候起，世界各地的研究者们就开始开发高压 SiC 功率器件（图 4 展示了 SiC 器件阻断电压增长的概览）。

为什么选择双极型？

功率电子系统及其组件的设计师们正面临着一个选择：是使用如 SBD 或 FET 等类型的单极型器件，还是使用如 PiN 二极管、晶闸管或绝缘栅双极型晶体管（IGBT）等类型的双极型器件。决定这个选择的部分因素是由阻断电压所决定，如在 1kV 这种较低的阻断电压下，SBD 是一个很有吸引力的器件类型选项，这是由于在这个电压区间下它具有非常好的开态特性。然而，当需要将电压增加到 20kV 时，SBD 的开态电阻将会增大到一个令人不可接受的数值（见图 5）。而在此种超高电压下，SiC PiN 二极管的注入载流子将具有很长的寿命，由此它将是一个更好的器件类型选择。这种长载流子寿命是由于它的间接带隙和高晶体质量所决定的，并且这也是获得电导率调制效应的关键性要素。

但是，SiC 器件本身并不一定能保证它一定具有长的载流子寿命。回到 2007 年，我们在这种宽禁带材料中发现了一个称之为载流子寿命的

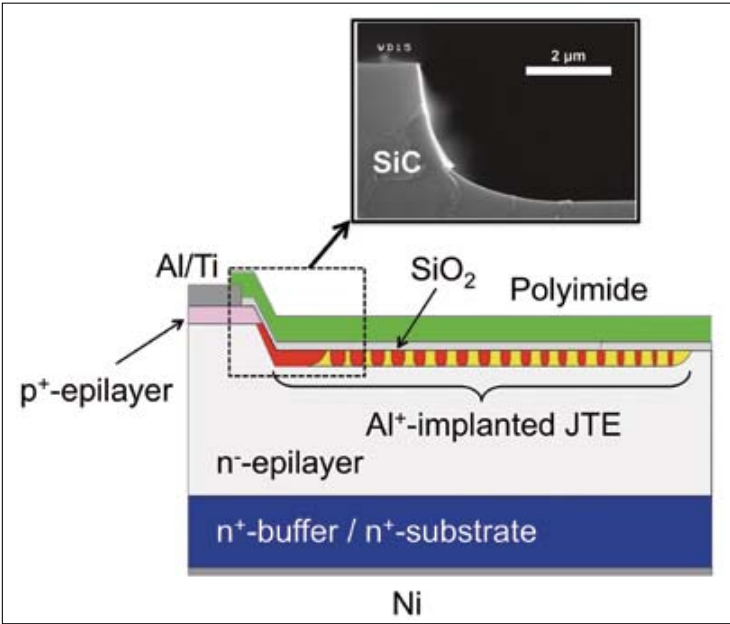


图7. SiC PiN二极管制造包括外延生长很厚的n型电压阻塞层以及作为二极管正板的重掺P型发射极层，之后是制作二极管的绝缘层，它是一种经改进后的具有圆形底部的倾斜台面结构，这样可以减轻结区边缘的电力线集中效应。

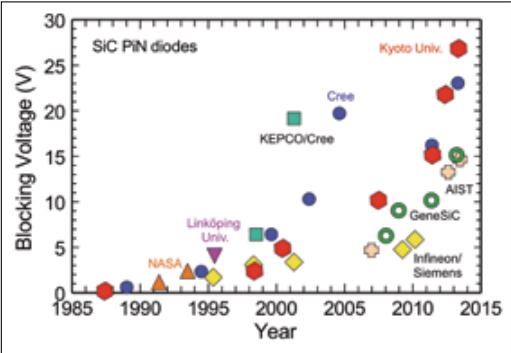


图4. 过去十年中SiC PiN二极管的阻断电压有了显著的增加。

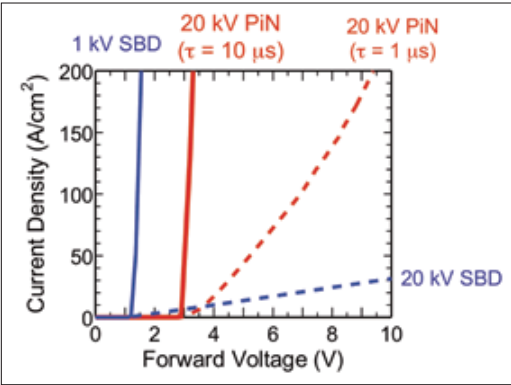


图5. 一个1kV SiC SBD 以及分别具有不同载流子寿命（模拟值）的一个20 kV SiC SBD和一个20 kV PiN 二极管的正向特征。对于20kV的应用，具有足够长载流子寿命的PiN二极管是最具应用前景。

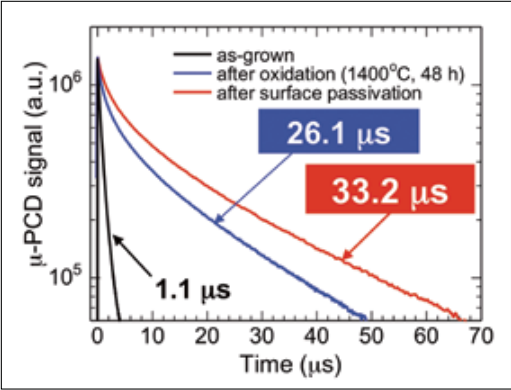


图6. 清除缺陷能增加SiC中载流子的寿命。寿命是用微波探测光电导衰减测试方法得到的，测量结果展示了经缺陷清除工艺处理后在220 μm厚外延层中载流子寿命的增加情况。

“杀手”，它是一个处于深能级的缺陷，即 $Z_{1/2}$ 中心，它的能级是位于导带底以下 0.62eV 处。在 2009 年我们就利用了热氧化方法成功地清除了这种缺陷，它是由碳原子空位所产生的一个受主能级。

上述的热氧化过程会导致在 SiC 表面上形成一层 SiO_2 ，它对于碳原子而言又会产生什么影响呢？这是一个目前尚无定论而需要进行长期研究的问题。不过在我们看来，大部分的碳原子可能是以 CO 分子形式向外扩散，同时还有一小部分

封面故事 | Cover Story - SiC功率电子

碳原子留在了 SiO₂/SiC 界面附近。位于这个区域的碳原子甚至可以发射进入 SiC 一侧，随后又会进一步扩散进入 SiC 体内区域，使得碳空位被扩散进来的填隙碳原子所填充，保证了从外延层表面到其深层的载流子寿命“杀手”都能被清除掉。

利用这项创新的缺陷清除技术，我们实现了大于 30 μs 的载流子寿命（见图 6）。现在阻碍载流子寿命进一步延长的障碍就是表面复合的影响，否则载流子寿命将可以超过 50 μs。但是即使在我们现在可以达到的载流子寿命水平下，我们也已经可以实现 20kV 器件的电导率调制。

面向超高压

制造 20 kV SiC 器件需要生长一个厚度至少为 150 μm 的电压阻塞层，并且它掺杂形成的载流子浓度不能高于 10¹⁴ cm⁻³ 的水平。这种薄膜可以在低阻 n 型 SiC (0001) 的衬底上，以 1650℃ 温度进行 CVD 的同质外延生长来得到。对于如此厚的膜层，能进行快速生长的外延工艺是极具有吸引力的。我们的研究团队已经成功地将 SiC 的生长速率从 10 μm/h 提升到了 50 μm/h，能做到这样是由于我们成功地避免了氮施主原子的沾污，减少了生长时的气压或增加了前驱体气体中的碳 / 硅比。这些改进使得 SiC 外延层的背景掺杂浓度能低于 1 × 10¹³ cm⁻³，这对于超高压器件的开发来说已经是足够低的浓度了。

我们 SiC PiN 二极管的制造包括了：外延生长很厚的 n 型电压阻塞层以及作为二极管正极的重掺 p 型发射极层；然后是制作二极管的绝缘结构，它具有一种经改进的具有圆形底部的倾斜台面结构。为了减小在 PN 结的边缘产生电力线的密集效应——这将会引起二极管在远低于应有击穿电压值（由其厚度和掺杂水平而计算出得到）时就会提前产生击穿——我们引入了 Al⁺ 离子注入工艺，随后进行热激活退火来制作出一个适当的 PN 结终止结构（见图 7）。在此之后，我们对二极管的 P 型正极和 n 型负极分别制作欧姆接触，它是用 Al/Ti 层和 Ni 层在 1000℃ 温度下烧结形成。用热氧化层和 4μm 厚的聚酰亚胺膜对表面进行钝化处理，并可消除表面的起伏不平。要加以注意的是，制造过程还包括了一个基于热氧化的提升载流子寿命的工艺步骤，这是在 n 型电压阻塞层的外延生长之后进行的。

电力线集中是制造超高压 SiC 器件中所面临

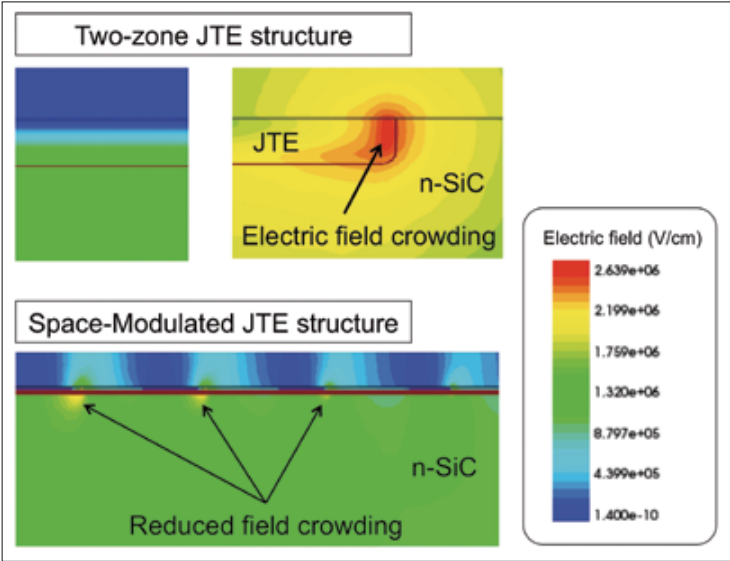


图8. 器件模拟可以通过对高反向电压（18kV）下在接近PiN二极管边缘区电场强度分布的分析，来对PN结的终止结构进行优化和改进。带有多个空间调制的环形结构可以减小边缘区附近电力线的集中效应。



图9. 正在进行高压测试的二极管

的最大挑战之一。为了防止它对器件性能的不良影响，Al⁺ 注入形成的结终止延伸结构（JTE）及其掺杂分布都必须得到仔细的设计和优化。如果铝的掺杂浓度过低，在 JTE 区的外侧边缘就会发生电力线的过份集中现象。

我们利用“空间调制”的 JTE 结构来解决这一问题，它是在一个 JTE 区内部形成多个 Al⁺ 注入圆环来降低其表面电场。通过调节每一圆环的宽度和间距，有效的 JTE 掺杂浓度将会随着其向外扩展而逐步地降低。这样做就能使电力线的集

封面故事 | Cover Story - SiC功率电子

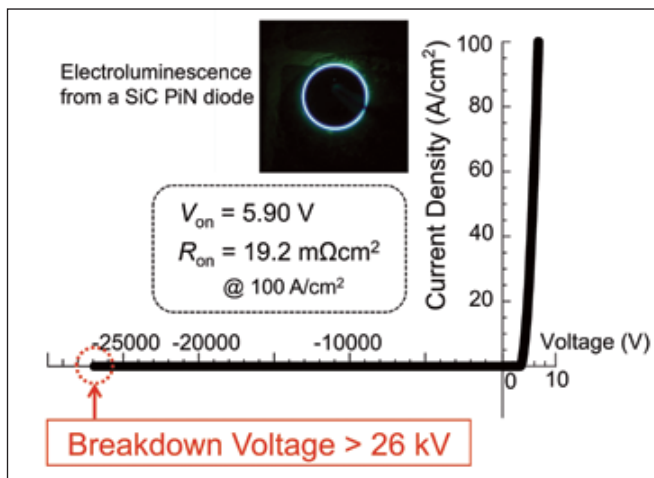


图10. 具有空间调制JTE结构 (JTE总长度为1050mm) 的圆形台面PiN SiC二极管的电流密度-电压特性。电压阻塞层的厚度为260 μm ，其掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 。在26.9kV (我们测试装置的电压极限) 的电压下，这个二极管仍然没有被击穿。

中达到最小化，并且能提供一个较宽的 JTE 掺杂浓度优化范围。器件模拟能够提供 JET 区最为优化的结构及其掺杂浓度分布 (见图 8)。

我们最近制造的一个 PiN 二极管具有 260 μm 厚的电压阻塞层。圆形台面的直径和 JTE 长度分别仅有 300 μm 和 1050 μm ——这是因为制造这种二极管的目的就是为了证明这一技术概念，而不是制造一个能承受很大电流的功率器件。

器件测试包括了把二极管浸入到全氟三丁胺介质液体中并在晶圆上进行直流电压扫描 (见图 9)。测定器件的性能并不是一件容易的事情，因为目前还没有一个合适的商用超高真空 (UHV) 测试系统，因此我们不得不在电缆连接和探针结构上采取了一些技术手段来防止发生空气的击穿和放电现象。

我们的器件可以承受高达 26.9kV 的电压 (见图 10)，这已经是我们的测试设备的极限电压，这种器件已经为固态高压器件树立了一个新的技术标杆。我们估计它的真正击穿电压会超过 30kV，不过这只只有在把我们的测试设备进行升级之后才能够给予证实。这种二极管的开态电阻仅有 19 $\text{m}\Omega \text{ cm}^2$ ，与此相比，在同一片晶圆上制作的无 p 型正极 SBD (没有载流子注入) 来说，其开态电阻却高达 430 $\text{m}\Omega \text{ cm}^2$ 。这两个阻值结果所凸显的效果，说明电导率调制效应能使如此之厚的轻掺杂层可以具有很小的电阻数值。由我们所原创的可提升载流子寿命的技术，能够帮助我们的器件获得低的开态电阻。利用我们元件组的测试表征工具所得到的电阻元件分析表明，正电极的接触电阻约为 4–5 $\text{m}\Omega \text{ cm}^2$ ，这说明还可

以通过增加正电极顶层的受主浓度和优化工艺来进一步降低器件的开态电阻。

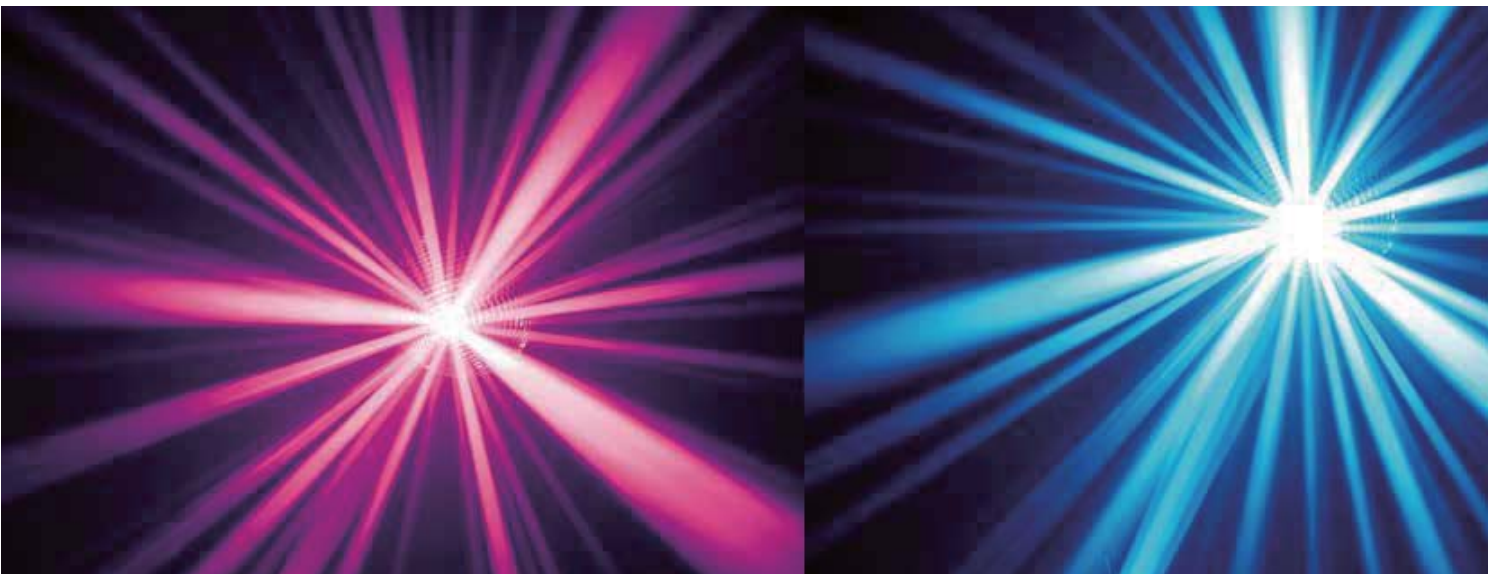
我们接下来的一个目标是要消除 SiC 的底面位错，这些缺陷可以引起载流子复合所导致的位错滑移，随之会发展成为 Shockley 型的堆叠层错，使得器件性能发生退化，同时又会使开态电阻和漏电流增加。在我们最新的器件当中，包括终止层在内的器件面积通常其直径约为 2-3 mm。但是如果此类器件要达到电力基础设施的应用级别，器件的面积将会增加到大于 1 cm^2 ，这样才能承受大于 100A 的电流。在我们最新 SiC 外延

层中，其底面位错密度在 0.1–3 cm^{-2} 范围。如果要进行大规模、高良率地制造这种具有如此大电流承受能力的器件，其位错密度必须被要化大力气减少到 0.01 cm^{-2} 以下。

我们的另一个目标是开发 20 kV 级别的功率开关器件，例如晶闸管、IGBT 和双极型晶体管 (BJT) 等。我们从 UHV BJT 的初步研究开始，已经获得了具有 63 倍电流增益的 21kV BJT。我们将会继续提升此类器件的性能，同时也将致力于试制其他类型的 UHV 功率开关器件。CS

扩展阅读

1. Jun Wang et. al. IEEE Industrial Electronics Magazine, June, 16 (2009)
2. Shuhei Ichikawa et. al. Appl. Phys. Express 5 101301 (2012)
3. Hiroki Niwa et. al. Appl. Phys. Express 5 064001 (2012)
4. Hiroki Miyake et. al. IEEE Electron Device Lett. 33 1598 (2012)
5. Naoki Kaji et. al. Ext. Abstr. Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2013, p.86.
6. Lin Cheng et. al. Ext. Abstr. Int. Conf. on Silicon Carbide and Related Materials 2013, p.85.



GaN 基 VCSEL 的发展之路

GaN 基 VCSEL 的制备比 GaAs 基 VCSEL 困难得多，但通过创新，包括引入不同类型的反射层，替代性的电流注入机制，以及新的晶向等，上述情况正在不断得到改善。

Daniel Feezell, 美国新墨西哥大学

垂直腔面发射激光器（Vertical-cavity surface-emitting laser, VCSEL）与边发射激光器相比具有多种优势，其中包括较低的阈值电流，高速状态下的直接调制，以及圆周对称的输出光束，晶圆级的测试，以及可制备成密排的二维阵列等。正是由于 VCSEL 激光器的几何特性，使其大批量的单片加工工艺成为了可能，并且不需要裂片、端面镀膜和带条处理等。因此，VCSEL 能同时具有相对较低的制造成本和优异性能。

VCSEL 器件的起源可以追溯到 1977 年，东京工业大学（Tokyo Institute of Technology）的伊贺健一（Kenichi Iga）首次提出了此类激光器的雏形，并在上世纪 90 年代实现了商业化。现在 VCSEL 已广泛应用于包括光纤通信网络、光互连、数据存储、传感和激光打印等在内的众多领域。

随着 VCSEL 的不断发展，研究人员大大拓展了可用于制备此类器件的材料体系范围，将阈值

电流降低至毫安量级，并提高输出功率。目前单横模器件的输出功率已超过 7 mW，并且已经超过多横模器件的功率值。无差错串行数据传输速率也提高明显，最近的演示系统已经超过 50 Gbit/s。

上述令人印象深刻的数字表明 VCSEL 似乎只有优点没有缺点，可事实并非如此。虽然该器件的芯片已能在一定标准波长范围（850 nm 至 980 nm）内具有优异的输出性能，但若发光波长扩展至 1310 nm 或 1550 nm 时则会遇到较大挑战，而后两个波长则是在长距离光纤数据传输中所使用的。将输出移至更短的波长范围也不容易，这也阻碍了 VCSEL 在高分辨率打印、高密度光数据存储、平视显示、背光照明和化学 / 生物传感等领域的应用（如图 1）。

本文将梳理 VCSEL 制备所面临的主要挑战，这里主要指的是基于 III 族氮化物材料体系，并且发光波长区间为 400 nm 至 550 nm 的



VCSEL。制备该种器件的困难之处与 InP 基长波长 VCSEL 有很多相似之处：缺乏晶格匹配的材料体系来制备高反射率反射镜；实现高效率电流扩散层困难；高质量的电流和光约束实现也极具挑战。而且，氮化物还具有其他额外的、显著的复合型挑战。

VCSEL 的挑战

为了理解为什么 GaN 基 VCSEL 的制备如此困难，我们必须首先理解该种器件的工作原理。其主要结构为一个非常薄的有源层堆叠在互相平行的反射镜层中间，形成一个尺寸为若干微米的谐振腔，比边发射激光器要小几百倍。



先进工艺控制— 近距离观察 您的薄膜沉积过程



从“实时”电性及应力测量到光学高温测量和宽波段光学监控，EVAtec针对蒸发及溅射过程的先进工艺控制（APC）技术，能有效提升产能及良率水平，从而实现金属膜、透明导电薄膜和介质膜制备的运营成本最小化。

想了解更多关于先进工艺控制在我们BAK 蒸发设备和Radiance 溅射设备上的应用信息，请访问我们的网页(www.evatecnet.com), 或联系本地代表机构 +86 21 20246072 / +86 18017760181



MORE INFO

LEDs • POWER DEVICES • TELECOMS • PHOTOVOLTAICS • MEMS • EVAtec - THE THIN FILM POWERHOUSE

www.evatecnet.com

技术 | Technology – VCSEL



图1. GaN基VCSEL的应用包括大密度光数据存储、显示、高分辨率打印和化学/生物传感等。

较短的谐振腔尺寸可以进行高速直接调制，也因为光子的数量较少。然而，在这样的谐振腔中每个来回的增益要比边发射激光器小得多。为了进行补偿，腔损失需要非常小，也就是说腔体两端的分布式布拉格反射镜（Distributed Bragg Reflector, DBR）的反射率要非常高，达到 99% 的量级。

对于 GaAs 基的 VCSEL，达到如此高的反射率还相对容易。工程师们只需要制备晶格匹配，且厚度为四分之一波长（ $1/4$ ）的 GaAs 和 AlGaAs 交替堆叠层，二者也都能进行掺杂，从而能实现对谐振腔的电注入。可要在 III 族氮化物上复制此方法已被证明是不可行的，起码到目前为止是如此，因为没有直接的方法来制备出晶格匹配且具有高反射率的导电反射镜层。这使得多个研究小组引入了新的器件结构类型，在一侧或双侧的 DBR 反射镜中加入介电层（如图 2）。

VCSEL 较短的谐振腔所带来的另一后果是复杂的驻波分布与电场强度关系。为了优化激光器

的性能，需要将有源区层的位置置于驻波的波腹（振幅峰值）区域，同时将有损层（例如重掺杂层）置于驻波的波节（振幅为零）处。要实现以上目标需要对谐振腔的尺寸进行精确控制。这一点在全外延制备结构中已能实现，但对于具有双介电 DBR 结构并包括衬底剥离或减薄工艺的器件来说则相当具有挑战性。

GaN 基 VCSEL 的反射镜缺少导电性，使得对有源区的均匀电流注入和最终实现高增益变得较为困难。载流子通过复杂的电流注入机制被引入到有源区，例如单个或双谐振腔内电极。以这种方法使电流在注入有源区之前能在一个高导电率层内水平地扩散。

III 族氮化物由于其低导电率并不适于电流扩散。而半透明的铟锡氧化物（Indium Tin Oxide, ITO）的导电率则更高一些，但是当器件的孔径直径尺寸大于 $10\ \mu\text{m}$ 时，ITO 的导电率也不足以避免电流扩散问题。除此以外，ITO 还会在可见光波段有显著的光损失，因此 ITO 层的布置对器

件性能至关重要。

GaN 基 VCSEL 的更深层次挑战还包括电流约束。其实现手段主要为选择性氧化，这对于 GaAs 基 VCSEL 来说是可重复并且可靠的工艺，但对 GaN 基来说则较为困难。故而研究人员们讲目光投向了其他的电流约束机制，包括 SiO₂ 或 Si₃N₄ 的图形层，或通过对 p 型 GaN 层进行反应离子刻蚀而实现的选择区域表面钝化。

GaN 独有的挑战

除了以上讨论到的诸项挑战，III 族氮化物还有其自身的材料问题。器件大多生长在最常见的晶面 c 面上，由此引发的有源区内的极化电场降低了增益，提高了阈值电流。同质衬底对于外延成长低缺陷密度的外延层一般来说是必需的。器件进步的脚步也由于高质量同质衬底的高成本及稀缺性受到了阻碍。但即使使用了同质衬底，要生长出高质量的外延层也比较困难，因为在不同 III 族氮化物之间不同材料的晶格和热膨胀系数也是不匹配的（GaN 和 AlInN 是一个例外）。这对外延生长带来了限制，也使材料容易具有裂纹和其他缺陷。而它们都会降低反射镜的反射率，增加散射损失，并形成漏电路径。

最后，InGaN 发光源还会在驱动电流较高和发光波长较长时发生内量子效率（Internal Quantum Efficiency）下降的现象，分别被称为“光效衰退”（droop）和“绿光缺口”（green gap）。光效衰退是一个非辐射过程，通常在激光二极管超过阈值后发生，而且它还会增加阈值电流。同时绿光缺口使得制备波长超过 500 nm 的 VCSEL 成为一项困难的任务。

最早的突破

2008 年 4 月，在日本中村修二（Shuji Nakamura）报道首个电注入 GaN 基边发射激光器的十多年后，台湾国立交通大学（National Chiao Tung University, NCTU）首次宣告了电注入 GaN 基 VCSEL 的诞生。该发射波长为 462.8 nm 的器件孔径直径为 10 μm，在温度为 77K 的条件下能连续进行输出，能清晰地显示出从自发到受激激发的过渡，并且其阈值电流及阈值电流密度分别为 1.4 mA 和 1.8 kA cm⁻²。文献的作者当时并没有提及芯片的输出功率，但公布了发散角为 11.7°，激化比为 80%，达到阈值后在孔径处的输出分布

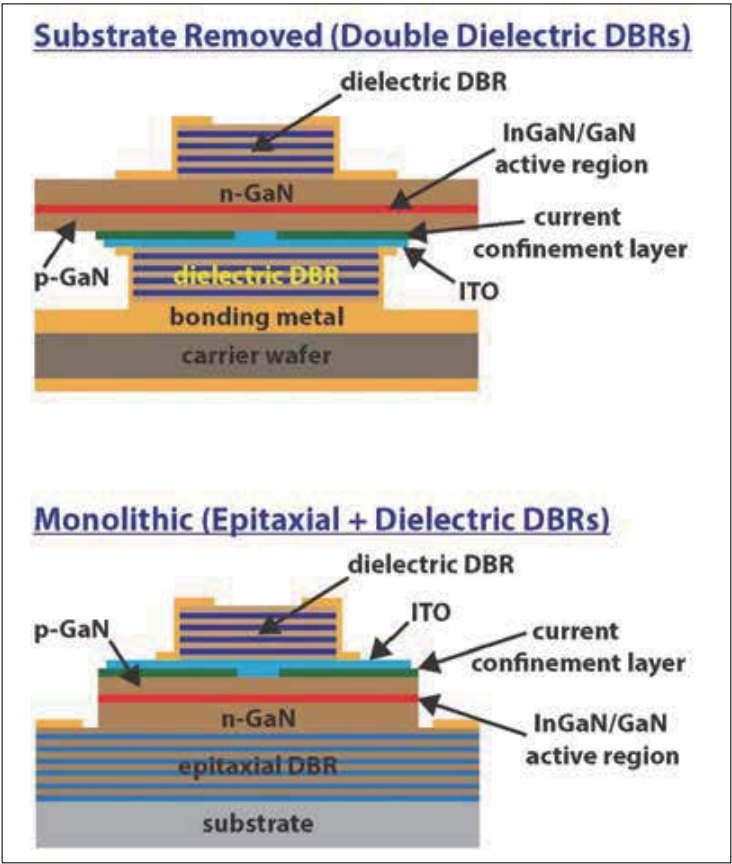


图2. GaN基VCSEL结构示意图。上方结构需要晶圆键合，并通过减薄或刻蚀实现衬底剥离。下方结构使用晶格匹配的底部外延生长DBR和顶部介电DBR。

并不均匀，有若干明显的亮点。

高质量底部外延 DBR 的制备（反射率达 99.4%，并且无裂纹）对于首个电注入 GaN 基 VCSEL 器件的成功至关重要。在这个由 29 组 AlN/GaN 交替外延层组成的底部 DBR 的基础上，研究人员制备了 10 组 In_{0.2}Ga_{0.8}N (2.5 nm)/GaN (7.5 nm) 量子阱和量子势垒堆叠层，以及 8 组 Ta₂O₅/SiO₂ 顶部介电 DBR 结构。并在其中插入总光程长为 1/2 的 5 对半 AlN/GaN 超晶格来减少 DBR 中的双轴向应变。通过一个横向伸入谐振腔的双电流注入机制，由 SiN_x 开孔实现，载流子进入到有源区。ITO 层的厚度为 240 nm 等于 1，覆盖其上并改善电流扩散。

该设计的限制可能包括：ITO 层相对较厚，为谐振腔带来了显著的光损失；在谐振腔电极附近会有电流拥塞；蓝宝石衬底的导热率较差等。还有点阻挡层的缺失也可能会影响到载流子约束。

在 NCTU 工作的基础上，众多研究小组纷纷对器件提出了改进（详见图 3）。2008 年日本日亚公司（Nichia）报道了首个室温下的电注入激光器，



5th CS International Conference 2015



CS International 2015 will provide timely, comprehensive coverage of every important sector within the compound semiconductor industry.

The 5th CS International conference will be held at the Sheraton Frankfurt Airport Hotel, in Germany on Wednesday 11th & Thursday 12th March 2015. The conference will build on the success of its predecessors, with industry-leading insiders delivering more than 30 presentations spanning six sectors.

Please visit www.cs-international.net for further information on this event.

Book your place NOW

Please visit www.cs-international.net/register.php to secure your place

Sponsors

Platinum



Gold



CS INTERNATIONAL
CONFERENCE

Connecting, informing and inspiring the compound semiconductor industry

All speakers and presentations are subject to change.

A selection of the 30+ presentations over two days covering six themes

SOLID-STATE LIGHTING

KEYNOTE	Presentation TBC Jon Wierer - Sandia National Laboratories
ANALYST	How will the solid-state lighting evolution unfold, and what will it mean for the LED chipmakers? Stewart Shinkwin - IHS Technology
SPEAKER	Commercialising the GaN-on-silicon LED and ramping its production Keith Strickland - Plessey Semi

FRONT-END MOBILES

KEYNOTE	How a CMOS front-end will wrestle share from the GaAs PA Jim Cable - Peregrine
ANALYST	Are we shooting ourselves in the foot with the multi - mode, multi - band PA? Eric Higham - Strategy Analytics
SPEAKER	Skyworks' system level integration and overall efficiency roadmap Dr. Peter Gammel - Skyworks Inc.
SPEAKER	LTE is driving complexity in smartphone design TBC - TriQuint

III-V CMOS

KEYNOTE	Heterogeneous integration of III-V's and CMOS Daniel Green - DARPA
ANALYST	When will III-Vs make an impact in the silicon foundries? And will it last for long? Mike Corbett - Linx Consulting
SPEAKER	III-V FETs for future logic applications Jesus A del Alamo - MIT
SPEAKER	Opportunities and challenges of III-Vs in Si-based nanoelectronics industry Matthias Passlack - Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC)

POWER ELECTRONICS

KEYNOTE	Ditching the package to drive down GaN transistor costs Alex Lidow - Efficient Power Conversion (EPC)
ANALYST	When can WBG power electronics truly take off? Remaining technical and economic barriers to overcome Philippe Roussel - Yole Développement
SPEAKER	SiC Advances for Power Electronic Applications Markus Behet - Dow Corning Corporation
SPEAKER	High Performance GaN-on-Si Power Epiwafers Employing Rare Earth Oxide Buffer Layers David Williams - Translucent

OPTOELECTRONICS

KEYNOTE	Topic TBC TBC - SOITEC
ANALYST	Where the CPV industry is heading, and what it needs to do to increase its market share? Karl Melkonyan - IHS Technology
SPEAKER	Mid infrared light emitting diodes enable portable, battery powered gas sensing Des Gibson - Gas Sensing Solution

RF-ELECTRONICS

KEYNOTE	GaN for radar applications Takahisa Kawai - SEDI (Sumitomo Electric Device Innovations, Inc.)
ANALYST	The Future for GaN, SiC, InP and GaAs in Defense/Military Applications Asif Anwar - Strategy Analytics

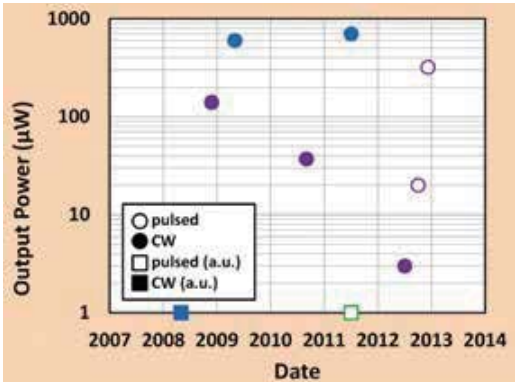


图3. 电注入GaN基VCSEL输出功率与时间关系。实心圆为连续波，空心圆为脉冲，方块为引用的输出功率值，单位为任意单位（arbitrary units, a.u.）。数据颜色代表发射波长。

器件使用的是倒装芯片几何结构。使用竖直方向的电极布置，并将具有双侧介电 DBR 的芯片贴装载具有高导热率的硅衬底上，藉此研究人员解决了三个问题：电流拥塞，蓝宝石沉底的低导热率，并避免了由严重电流拥塞引起工作电压陡升和产生的大量热。由于高反射率的 DBR，器件的光损达到了最低。

为了制备 VCSEL 芯片，研究人员首先在蓝宝石 c 面上生长外延片，其中有源区由两组 9 nm 厚的量子阱和 13 nm 后的量子势垒交替堆叠构成。电流通过直径为 8 μm 的 SiO₂ 开孔进行注入，覆盖以 50 nm 厚的 ITO 层，加上金属电极形成 p 型接触。测量结果显示 ITO 在激光波长附近的光损约为 0.5%，为了将之减少到最低，团队加入了一个厚度为 1/8 的 Nb₂O₅ 层，以此将 ITO 的中心置于驻波的波节处。

最后的制备步骤包括在部分电注入区域上沉积 11.5 个周期的 SiO₂/Nb₂O₅ 底部 DBR 结构，在平面化结构上增加键合金属片，并且倒装到硅衬底上，接下来通过激光玻璃移除原始的蓝宝石沉底。通过化学机械抛光将 n 型外延层减薄到 1.1 μm，然后加上 n 型接触和 7 个周期的 SiO₂/Nb₂O₅ 顶部 DBR。

波长为 414.4 nm 的 VCSEL 能在室温下进行连续输出，阈值电流为 7.0 mA，阈值电流密度为 13.9 kA cm⁻²，输出峰值功率为 0.14 mW。器件的阈值电压为相对较低的 4.1 V，仅为 NCTU 所制备 VCSEL 的一半，很可能是归功于竖直方向电流注入。

尽管激光的发射输出为线性极化的，但其方向性与晶轴的关系还不清楚，也有可能是随机的。这并不令人意外，因为 VCSEL 谐振腔的圆柱对称性以及量子阱平面相对各向同性的增益。器件

的开发人员还注意到激光斑在电流开孔处的非均匀性。其原因可能为腔体尺寸的不均一，表面形貌或有源区质量的差异。

通过两侧都使用介电反射镜，研究人员绕过了生长高反射率、无裂纹 DBR 的挑战，并从良好的散热和电注入性能中受益。但他们也为此付出了代价：复杂的工艺。制备双侧介电 VCSEL 包含键合、激光剥离和精确控制的减薄等工艺。谐振腔尺寸的控制也相当严苛，因为对大面积衬底进行均匀的抛光并将其厚度减至亚微米级是相当困难的。

更好的衬底

跟随 GaN 基边发射激光器研发人员的脚步，日亚的研究者转向使用独立自支撑（free-standing）GaN 衬底。这一举措几乎将他们的室温连续输出 VCSEL 的功率提高了 5 倍，达到 0.62 mW。性能提高的根本原因来自外延层中缺陷密度降低了三个数量级，低至每平方厘米只有几百万的水平。

研究团队将其 VCSEL 的高功率输出归功于对激光输出光窗更均匀和完全地填充，尽管其制备工艺和器件结构与之前均一致，只是减少了衬底移除的步骤。纵模间距表明谐振腔的尺寸为 4 μm，这对于支持若干纵模是足够的。多种模式也可能导致器件更高的阈值电流。

将衬底从蓝宝石改为同质材料可以显著延长工作寿命。但即使使用了如此高品质的衬底，阈值电流也仍然会在器件工作 10 分钟之后上升。同时，谐振腔尺寸的偏差变化也比制备在蓝宝石衬底上的 VCSEL 要更大，因为需要研磨和抛光来去除原生 GaN 衬底。

日亚和 NCTU 的研究人员们在过去的几年时间里仍在不断地完善他们的 GaN 基 VCSEL，其他

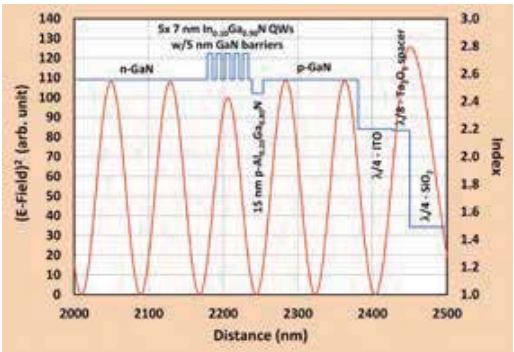


图4. 典型GaN基VCSEL谐振腔区域内的驻波分布，显示将增益区置于波腹处，而将会造成光损的ITO层置于驻波波节处。



的研究小组也为该器件的进展贡献了力量。NCTU 在 2010 年夏天报告了他们室温连续波激光器，生长在蓝宝石衬底上，使用混合 DBR 设计。通过以下改进提高了性能：将 ITO 层的厚度减少至 30 nm 以降低光损；增加 AlGaIn 电子阻挡层来解决载流子拥挤；并且在 p 型 GaN 和 ITO 之间引入一个 2 nm 厚的重掺杂的 p 型 InGaIn 层来改善 p 型接触。

使用和之前相似的制备工艺、器件几何以及底部外延 DBR，但也做出一些调整改进，包括 10 个周期的 InGaIn (2.5 nm)/GaN (12.5 nm) 量子阱/量子势垒堆叠结构，并将 Ta₂O₅ 和 SiO₂ 交替堆叠层从 8 对增至 10 对，从而帮助提高了器件性能。第二代发光波长为 410 nm 的 VCSEL 具有更低的 6 V 阈值电压，并且输出功率为 37 μW。阈值电流击阈值电流密度分别为 9.7 mA 和 12.4 kA cm⁻²，极化比在这个较低波长下仅为 55%。

日亚的研究人员取得了新的进展，将制备紫光 VCSEL 的工艺成功应用到了蓝光和绿光 VCSEL 上。蓝光发射器能够产生 0.7 mW 的连续输出功率，而绿光发射器还只能进行脉冲输出（功率值未透漏）。根据研究团队的说法，电流注入开孔内发射光斑的均匀性对于达到更高的性能至关重要。这也强调了有效的水平电流扩散层的重要性。

松下公司也对 VCSEL 的进展做出了贡献，他们使用与日亚类似的工艺制备出了能够连续输出的紫光 VCSEL。该团队正在开发 GaN 基 VCSEL 阵列，并试图增长谐振腔的尺寸至约 6 μm，从而在增益光谱范围内得到多个纵模。该方法的优点不包括降低器件的热敏感度，并提高阵列单元间的均匀性。

非极性结构

提高 VCSEL 性能的另一条途径是使用非极性结构，能提高光学增益以及通过消除量子束缚史塔克效应（Quantum Confined Stark Effect, QCSE）降低阈值电流密度。美国加州大学圣巴巴拉分校的一个团队就是采用上述方法。我们首次在非极性 m 面衬底上制出了 GaN 基 VCSEL。

通过转向非极性或半极性量子阱，以及能避免或减少量子束缚史塔克效应，我们可以确保激光模式的极化方向总是与给定晶向一致。这对传统 VCSEL 来说是办不到的，其极化方向通常是随机的。

我们的 VCSEL 器件采用的是自支撑 m 面

GaN 衬底。制备工艺包括对一个植入谐振腔的 InGaIn 牺牲层进行带隙选择性的光电化学底部刻蚀。这使得外延层可以从衬底移除并进行键合。由于上述方法的使用，我们可以实现对谐振腔尺寸的精确控制，同时在双侧采用介电 DBR，并且对昂贵的自支撑 GaN 衬底进行回收再利用。为了提高电流扩散，我们在谐振腔中处加入了一个 1/4 厚度的 ITO 层，但其位置在驻波波节处以尽量减少光损（见图 4）。

如此制备的紫光 VCSEL 输出功率为 19 μW，阈值电流为 70 mA。阈值较高的原因可能由于 ITO 的吸收损失，或者在键合工艺过程中出现了裂纹。所有受测的器件中观测到的激光模式的极化方向都是沿着 a 晶向。

上述器件的极化比接近 1（如图 5 所示的极化方向图）。由于这些非极性 VCSEL 的极化锁定，将来能用于制成具有相同极化方向的大型阵列，它们的用途将相当广泛。

可供替代的反射镜

电注入 GaN 基 VCSEL 更新的进展由 EPFL 团队报道于 2012 年。他们制备的单片集成器件

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



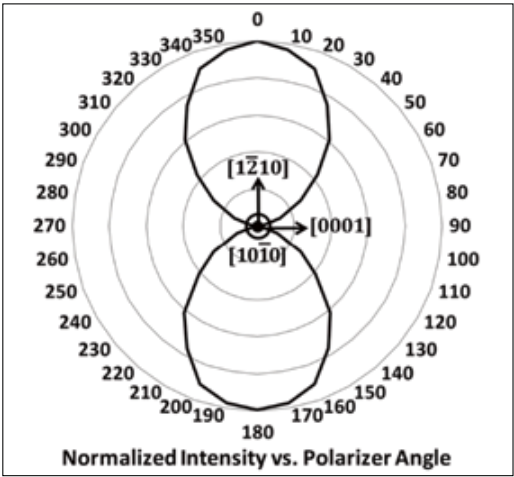


图5. 非极性GaN基VCSEL的发射极化方向一致为[1210]（a方向）。极化比接近1。

采用高反射率、无缺陷且组分为 $\text{Al}_{0.18}\text{In}_{0.82}\text{N}$ 的 DBR，其晶格与 GaN 是相匹配的。衬底采用的是自支撑 c 面 GaN，底部为外延 DBR，顶部为介电 DBR。此结构设计避免了其他方法中较难控制的制备工艺，例如衬底移除或衬底减薄等。而代价是更具有挑战性的外延结构。无论如何，利用发展已经相当成熟的外延 DBR 技术，上述单片集成结构设计不失为 GaN 基 VCSEL 大规模生产的一条可行路径。

EPFL 团队还率先开发出了一种简单的电流开工制备工艺，使用反应离子刻蚀和等离子处理对部分 p 型 GaN 进行钝化。将 ITO 作为电流扩散层，就有可能得到均匀的光输出。器件的发射波长为 420 nm，脉冲输出功率大于 300 μW ，阈值电流为 70 mA。研究人员认为高阈值电流与 ITO 的吸收损失以及顶部 DBR 的反射率不足有关。可望降低阈值电流的方法包括降低 ITO 层的厚度，以及调整其位置。

前进的道路？

在过去的几年里，GaN 基 VCSEL 取得了长足的进展，但仍然必须先攻克关键的挑战才能获得商业成功。研究人员必须要么推出新的 DBR 技术，要么找出方法能制成自支撑的谐振腔，而且能精确控制其尺寸并与介电 DBR 相连使用。如果能通过带隙选择性光电化学刻蚀方法每隔 1/4 的厚度选择性部分移除基材，那么就能得到空气间隙底部 DBR，从而至需要几个周期的典型 DBR 来获得超高的反射率。但上述结构的制备工艺太困难。因此可能 EPFL 研发出的基于 AlInN 的 DBR

方案经过进一步优化后能成为首个可工业制造的 GaN 基 VCSEL。

可以确定的是，如果将来通过背部晶圆减薄来移除衬底的方法在商业上成为可行，那么对谐振腔尺寸的精确度控制要求也会更高。其手段可能需结合使用减薄和带隙选择性光电化学刻蚀，二者可以将谐振腔平面化，并通过置入特定位置的刻蚀停止层来控制其尺寸。使用光电化学刻蚀完全移除衬底也具有挑战性。然而，该方法的确能控制谐振腔尺寸并回收重复使用昂贵的自支撑 GaN 衬底。

另一个需要改进之处是电流扩散层。要实现大功率输出的大面积 VCSEL 器件，必须先解决这一问题。目前广泛使用的 ITO 技术已到达其性能极限，因此新的进展也有待于引入新的电流注入机制和新的材料。或在 GaN 中引入可靠、低电阻的隧穿结（Tunnel Junctions）。有了上述措施，工程师们就将不再需要担忧电流扩散问题，因为可以将 p 型 GaN 替换为具有更高导电率的 n 型 GaN。另外，GaN 基 VCSEL 的开发者们还能通过使用具有更高透明度和以及横向导电率的新型二维材料来增进电流扩散。

最后，必须对非极性和半极性器件设计进行系统性的梳理，挖掘其潜力来提高光增益并降低阈值电流。增加每单趟来回光增益能允许 DBR 具有更低的反射率，扩展设计空间。半极性晶面上绿光边发射激光器的成功激发了在此晶面上制作绿光 VCSEL 的探索热情。非极性和半极性设计的还可能有助于实现具有一致极化发射特性的大功率 VCSEL 阵列。

扩展阅读

1. T. C. Lu et. al. Appl. Phys. Lett. 92141102 (2008)
2. Y. Higuchi et. al. Appl. Phys. Express 1121102 (2008)
3. K. Omae et. al. Appl. Phys. Express 2052101 (2009)
4. T. C. Lu et. al. Appl. Phys. Lett. 97071114 (2010)
5. D. Kasahara et. al. Appl. Phys. Express 4072103 (2011)
6. T. Onishi et. al. IEEE J. Quant. Electron. 481107 (2012)
7. C. Holder et. al. Appl. Phys. Express 5092104 (2012)
8. G. Cosendey et. al. Appl. Phys. Lett. 101151113 (2012).

将电源转换器件集成到 LED 芯片上

将 LED 和晶体管进行单芯片集成，也就是将光发射器件与其控制电路整合在一个单芯片上，使固态光源技术进入一个全新的发展领域。来自美国伦斯勒理工学院（Rensselaer Polytechnic Institute, RPI）的智能照明工程技术研究中心（SLERC）的 Zhongda Li 和他的同事们共同完成了这项工作。

LED 的驱动条件与民用供电电源的输出存在着差异，驱动 LED 仅需要几伏的直流电，而民用电源在不同的国家则为 110V 到 250V 的交流电。

为了解决这种在供电电源上的差异问题，固态照明灯含有一个 AC 到 DC 的电源转换器，来将民用电源的 AC 供电转变为可以驱动 LED 灯的 DC 供电形式。电子驱动器实际上还有着多重作用，包括可以在 LED 芯片温度发生变化时仍能维持一个稳定的光输出强度，以及能提供诸如调节其发光强度及其发光色温等功能。

现在，LED 灯的驱动电路是由用各种分立元件组装而成，如功率晶体管、电容器和逻辑控制 IC 等。在印刷电路板（PCB）上将它们组装连接

在一起，由于通常的 PCB 板体积较大，它会像 LED 灯一样需要占据相当的空间。

对于未来固态照明完美的解决方案是在单个芯片上将 LED 器件、功率晶体管和控制器 IC 进行单片集成。由于固态照明灯中的 LED 器件是基于 GaN 材料，所以其他全部器件也都必须采用宽禁带的半导体材料来进行制造。

采用这种方法将可以消除驱动电路板和 LED 芯片之间互连的寄生的电感、电容和电阻，从而使整个照明系统可以在更高的开关速度下运行。这样做可以提高整个照明系统的效率，并且可以缩小无源元件的尺寸，而小尺寸的电感器和电容器就能够工作在更高的频率下。所有这些结果就能够形成一个比当前 PCB 解决方案外形尺寸更为

技术 | Technology – LED

图1. LED单片集成中的GaN功率晶体管和逻辑IC。

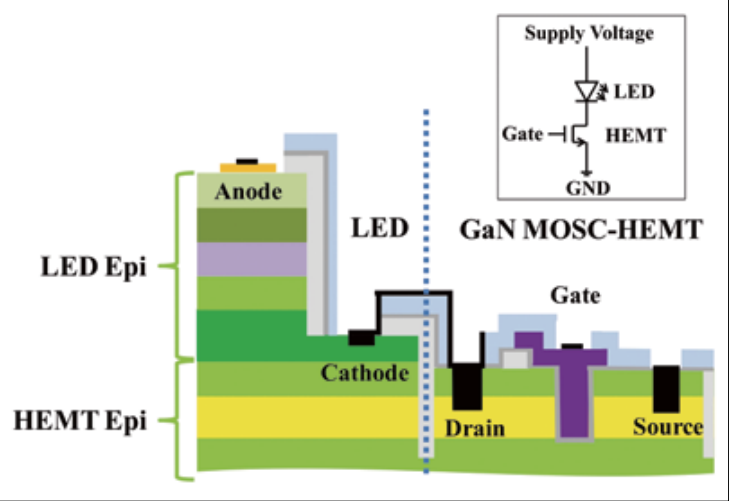


图2. 采用选择性去除外延层的方法进行GaN LED和MOS沟道HEMT器件集成的工艺流程。

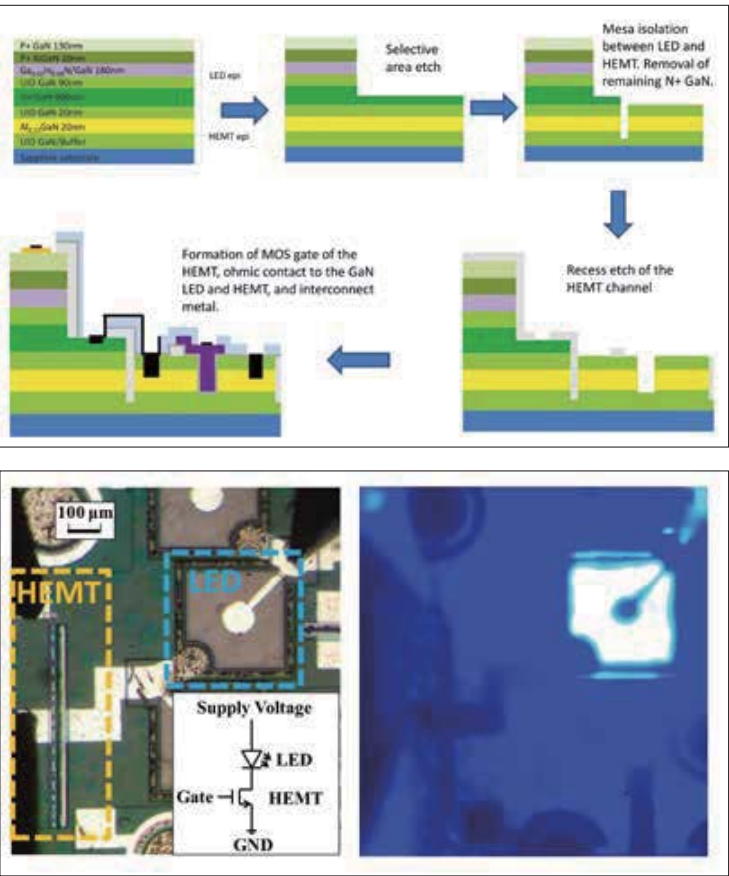


图3. GaN LED/HEMT集成器件在关闭状态（左）和LED灯点亮状态（右）下的光学图像，左图中的插图为其电路结构示意图。

精巧、性能更好的驱动器电路。

由于近期在 GaN 功率器件技术方面的突破，采用这种材料体系来制作电子驱动电路的技术已经成熟。功率开关晶体管是 LED 驱动电路中

阻和更高的工作频率。这些宽禁带材料除了在性能上要优于 Si 材料以外，GaN 还可以用来制造 HEMT 器件，它是利用了异质结的二维量子约束来提高电子传导性能。最为重要的是，通过将一个 GaN HEMT 结构与金属氧化物半导体（MOS）栅极相结合，就可以制作出一个称之为 MOS 沟道 HEMT 的混合集成器件结构，它具有正的阈值电压和极低的栅极漏电流，具有很高的驱动性能。

在伦斯勒理工学院的智能照明工程技术研究中心（SLERC），我们利用上述这些器件技术制作了世界上第一个单片集成的 GaN LED 和 MOS 沟道 HEMT 器件（见图 1）。这种技术是在蓝宝石基 GaN 晶圆上采用同一种工艺来制作这两种类型的器件，它是在单个芯片上同时形成 LED 发光器件和电子控制电路，已经成为 LED 灯单片集成技术的重要的前进基石。

我们在一种商用的蓝宝石基衬底 HEMT 外延晶圆上用 MOCVD 生长法的制作了 GaN LED 器件结构。LED 器件的生长过程包括有：先沉积一层 0.5μm 厚的 n 型 GaN 薄膜，然后沉积多量子阱结构，最后是 p 型 GaN 层的沉积。

我们器件的制作过程如下：首先是用一个氯（Cl）基电感耦合等离子体（ICP）的反应离子刻蚀（RIE）对 LED 器件结构中的选定区域进行刻蚀，以暴露出 n 型掺杂的 GaN 层；随后进行的刻蚀是在 GaN LED 和 HEMT 之间形成沟槽，以实现对这些器件的隔离；然后去除位于 HEMT 器件上方残留的 n 型 GaN 层，这个部位正是用来制造 MOS 沟道 HEMT 的区域；接着，用电子束光刻形成 MOS 沟道 HEMT 器件中亚微米尺寸凹槽的沟道图形；经过这些刻蚀之后，后续的湿法化学工艺是用来去除所有对器件的刻蚀损伤。

在对上述器件结构进行清洗后，我们沉积了一层 SiO₂ 作为栅介质层，然后是沉积多晶硅作为栅电极层。MOS 沟道 HEMT 器件的欧姆接触和 LED 器件的阴极接触将会同时形成。接着是制作 GaN LED 的阳极接触，最后是将 LED 的阴极与 MOS 沟道 HEMT 器件的漏极实现互连。

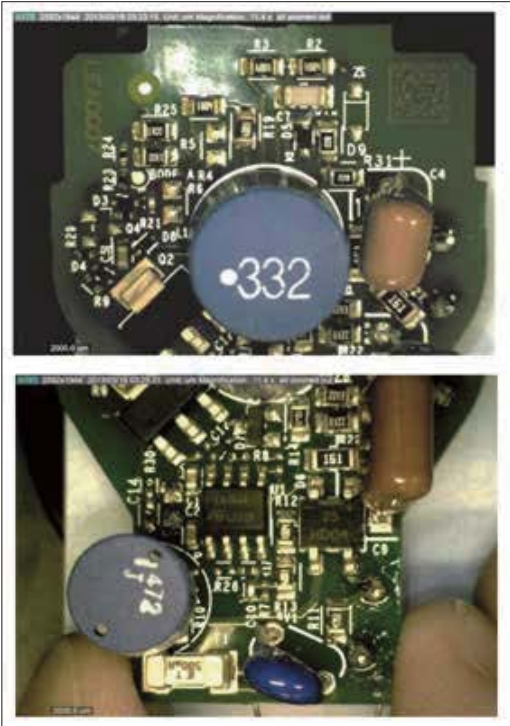
蓝光 LED 的发光主峰波长为 459nm，其半峰宽（FWHM）只有 22nm，而且其光输出强度增加与驱动电流的增加有着一个相对线性的关系（见图 3 和图 4），这些特征表明把 GaN LED 和 GaN MOS 沟道 HEMT 器件进行集成是可行的。集成后 LED 和 HEMT 器件的伏安特性与串联的晶体管和

二极管所具有的预期特性是一致的：在 LED 开启之前，电流由 LED 本身所限制，而开启后则是由晶体管的饱和电流所限制。LED 灯的发光强度可完全由 MOS-HEMT 的栅极电压来进行控制，具有良好的线性度（见图 5）。集成了 GaN LED/ 晶体管的器件具有高达 225℃ 的工作温度。

我们的这种单片集成技术具有与 GaN LED 和 GaN 晶体管工艺的兼容性，特别来说，它是一种对 GaN 晶体管和 MOS 晶体管栅极的一体化集成方法。这是一个令人值得关注的成就，因为与 GaN HEMT 中所采用的肖特基栅极工艺相比，MOS 晶体管的栅极工艺通常需要有更高的热预算值。

MOS 晶体管的栅极不仅仅是功率晶体管中的一个重要组成部件，它也是开启通向未来 GaN CMOS IC 技术平台的大门钥匙。对 GaN LED 和 MOS 晶体管进行集成将是通往制造光发射功率 IC（LEPIC）技术平台的第一步，在这一技术平台上，在单个芯片里就将包含 LED 器件、功率晶体管和逻辑 IC。

实现构建光发射功率 IC（LEPIC）器件将能够彻底改变固态照明的现状，因为这一技术平台将会在 LED 控制技术上、以及在新兴固态照明应用所需增加的功能方面发挥重要的作用。在这方面的一个实例就是可见光通信（VLC），它也被称为 Li-Fi，



商用LED灯的驱动电路板（由伦斯勒理工学院SLERC的Casey Goodwin提供图片）

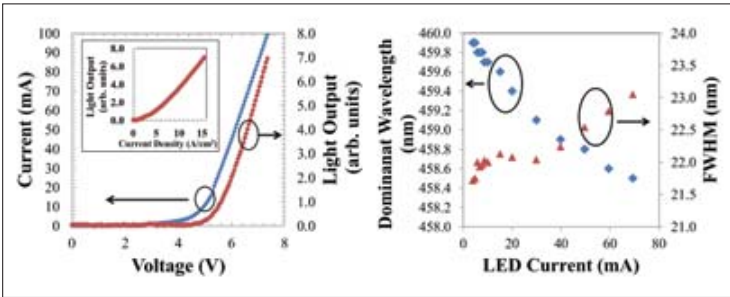


图4. GaN LED集成器件的特性。

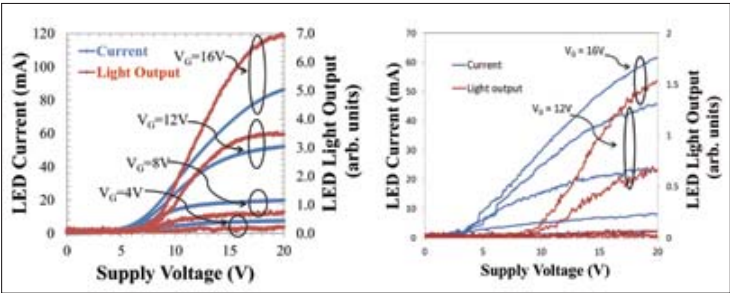


图5. 在室温（左图）和225℃（右图）下，LED电流及其光输出强度与电源电压和GaN MOS沟道HEMT器件栅极电压之间的函数关系。

即可采用可见光谱来进行自由空间的光通信。

这项技术非常适合在办公室和家庭中进行局部区域的高容量数据传输。可见光的频率是在数百太赫兹（THz）范围，与常规的无线 RF 网络相比，可见光通信（VLC）可以具有高得多的数据传输容量。发光光源的闪烁波动将不再会是一个问题，因为它所提供数据传输的开、关调制速度将比人眼的感知要高得多。与此同时，光发射功率 IC（LEPIC）器件的外形尺寸很小，使得它们很适用于分布式照明，此时每个光源都可作为一个独立的数据传输通道。生活在这样的世界里，LED 灯不光体现了最前沿的现代照明技术，它们也将成为无线数据传输技术领域中起非常重要作用的部件。CS_C

扩展阅读

1. R. Karlicek, “Smart lighting – beyond simple illumination,” in IEEE Photonics Soc. Summer Topical Meeting Series, Seattle, WA, 2012, pp. 147-148.
2. T. P. Chow and Z. Li, “Recent advances in high-voltage GaN MOS-gated transistors for power electronics applications,” in GaN and ZnO-based Materials and Devices. Berlin, Germany: Springer, 2012, pp. 239-250.
3. Z. Li et. al. Appl. Phys. Lett. 102192107 (2013)



石墨烯：形成禁带

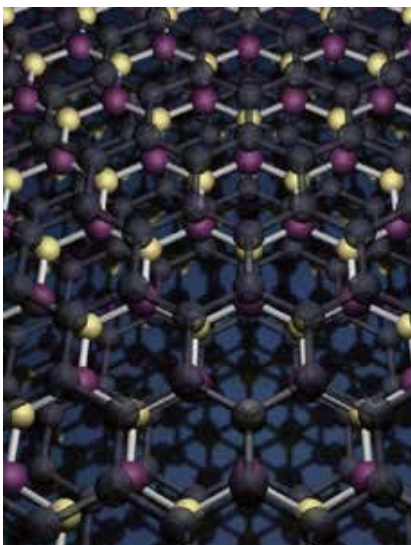
据 Rebecca Pool 报道：许多较为罕见的化合物半导体正被用来开发石墨烯的电子学性能。

十多年前，英国曼彻斯特大学的研究人员 Kostya Novoselov 和 Andre Geim 发表了具有深远科学意义的有关石墨烯的论文。这些英国物理学家采用透明胶带在石墨块体上进行层层剥离，然后溶解掉胶带的方法来获得超薄片状的石墨烯，这种片状石墨烯可以用来制作氧化硅基晶体管的基本结构。

这一切都已成为了历史，但给我们留下了只有一个原子层厚度的石墨烯所形成的完美晶体点阵，因没有空位和位错缺陷而具有的优异性能。Geim 和 Novoselov 的研究发现，石墨烯材料的导电电子具有一种准粒子属性，其行为更像是中微子，以接近光速的速度运动，他们由此而获得了诺贝尔物理学奖。由他们所研制的第一个应用弹道输运机理的晶体管，显现出了的很好的电流 - 电压线性关系以及良好的大电流承载性能。研究者由此得出了这样的结论：“在金属性晶体管的应用中，石墨烯有可能是性能最好的金属材料”。

然而，要用石墨烯来取代硅来制作电子器件还存在着一个很大的障碍，即石墨烯材料本身不存在禁带，使得电子在某一能量状态下流动时，在关闭状态下要具有低的功耗将是非常困难的事情。考虑到这点，全世界的研究工作者正在寻找多种方法，例如通过施加电场、改变石墨烯的结构，或者掺杂等方法来人工形成禁带，但是其器件性能尚不能达到禁带材料所具有的本质属性。Novoselov 及其团队采用的是一条与众不同的研发路线来制备基于单层石墨烯和新型化合物半导体的异质结构，这是一种由石墨烯和绝缘材料交替形成的二维晶体结构，将其进行堆叠就可形成器

件。就像 Novoselov 所说：“对异质结构的研究正在迅速兴起，而能够控制好异质结构的特性对其未来的应用将是十分有益的”。



曼彻斯特大学 Novoselov 和他的团队主要的关注是用密排六方晶格的氮化硼 (hBN) 二维晶体来制备石墨烯异质结构。就在两年之前，他们研发了一种基于石墨烯层和具有原子级厚度氮化硼层的双极场效应晶体管，其开关比率与平面型石墨烯场效应晶体管相比要高出一个数量级。与此同时，其他研究者制作的这种类型器件的迁移率也几乎比基于二氧化硅的器件要高一个数量级。

正如 Novoselov 的同事 Colin Woods 所解释，六方氮化硼 (hBN) 晶体具有与石墨烯相类似的晶体结构，使得它能够在构建石墨烯的异质结构方面有着非常吸引人的发展潜力。他还补充道：“hBN 是一种宽禁带半导体材料，具有很高的晶体纯度，因此我们可以利用这种异质结构来获得很好的结果”。令人感到振奋的是，最近发表在《Nature Physics》的研究论文表明，

在六方氮化硼 (hBN) 上长石墨烯可以改变其晶体结构，可在石墨烯的电子能带间形成禁带。

Novoselov、Woods 及其同事们还发现，当两个晶格点阵结构相互具有特定方式的取向时，石墨烯中碳原子的间距会变大，因此其晶格结构可以与六方氮化硼相 (hBN) 相匹配而形成禁带。如果取向错开的话，碳原子会恢复到初始位置，随之禁带也就消失。

Woods 说道：“只要简单地将这两种晶体相互扭转一个小的角度，就可以看到石墨烯的性能会发生如此大的改变，这是一件令人极其兴奋的事情”，“我们至今还不能确定禁带的形成是否是由晶格应变所造成，但显然的是在石墨烯中能形成禁带是人们所十分希望发生的事情”。

他还说道：“这是一个很小的发现，你不可能知道它未来将会走向何方”，就像研究者所提出的，其关键点是：“这个发现为控制石墨烯异质结构的性能方面提供了一种新的途径，并非所有的问题都得到了解答，但毫无疑问这是一个值得人们深入探究的现象”。

但他们的研究并没有局限在六方氮化硼 (hBN) 晶体上，Novoselov 团队还正在寻找其他的二维晶体材料，如二硫化钼和二硒化铌，它们在形成石墨烯的禁带上都具有很大的发展潜力。

Woods 还说到：“每种材料都有它本身的性质组合，很难来挑选出一种晶体材料，随着你改变其异质结构的层数时，它们的性能也会随之改变，然后你就能肯定：对，它的性能正在变好”，“但是对石墨烯来说，这却是一个令人感到振奋的时刻，虽然人们确实不清楚接下来会发生什么，只有做了以后才会真正明白”。



纳米棒阵列大大提升绿光 LED 的发光效率

把平面型 LED 结构改换成纳米棒阵列 LED 结构可将其内量子效率提高 88 倍。

英国 Sheffield 大学的工程师们制作出了一种新颖的纳米棒阵列，通过一种“相干的”纳米腔效应实现了 LED 发光效率的大幅度提升。

采用这种纳米结构可以将其内量子效率提升 88 倍，这将有用来提高绿光 LED 的性能。

由于量子局限 Stark 效应 (Quantum Confined Stark Effect, QCSE)，如今的绿光 LED 的发光效率已经远低于对应的蓝光 LED。绿光 LED 的核心是一个高 In 含量的 InGaN 量子阱，其周边是一个 GaN 势垒层。由于它们之间存在显著的晶格失配，这些在原子间距上的不同会在异质结构中造成应变，将会产生一个很强的内建电场，使得电子和空穴产生分离而降低了 LED 的发光效率。

Tao Wang 说道：“我们先前的研究工作已经证实了纳米棒结构可以实现明显的应变释放作用，减少 QCSE 效

应并提升 LED 器件的发光性能”。他还说明了最近通过引入一种相干的纳米腔效应，在绿光光谱区量子效率的提升上获得了突破性的进展。

为了实现这个设想，该研究团队仔细地选择了纳米棒的直径及其阵列的几何形状。这样做的原因是：如果这些直径小于 300nm 的纳米棒被相互隔离开，或者它们的排列方式不能激发出相干纳米腔效应，那么这种效应将仅会出现在深紫外的光谱区中。

用于形成纳米棒阵列的多量子阱结构是由五个 2 nm 厚的 InGaN 量子阱夹在两个 9 nm 厚的 InGaN 势垒层中间，在其表面淀积氧化硅纳米球，再对此结构进行选择刻蚀来制作出高度为 350nm 的纳米棒阵列（见图）。

纳米棒阵列是由以下步骤制备：沉积二氧化硅层、旋涂纳米球、刻蚀样品以及之后用氢氟酸去除纳米球。

该研究团队利用这种方法制作了一系列的结构。在所有的样品结构中，各个纳米盘之间的间距皆为 274nm，但是纳米球具有不同的直径，分别是 270 nm、250 nm、235 nm、205 nm、160 nm 和 145 nm。

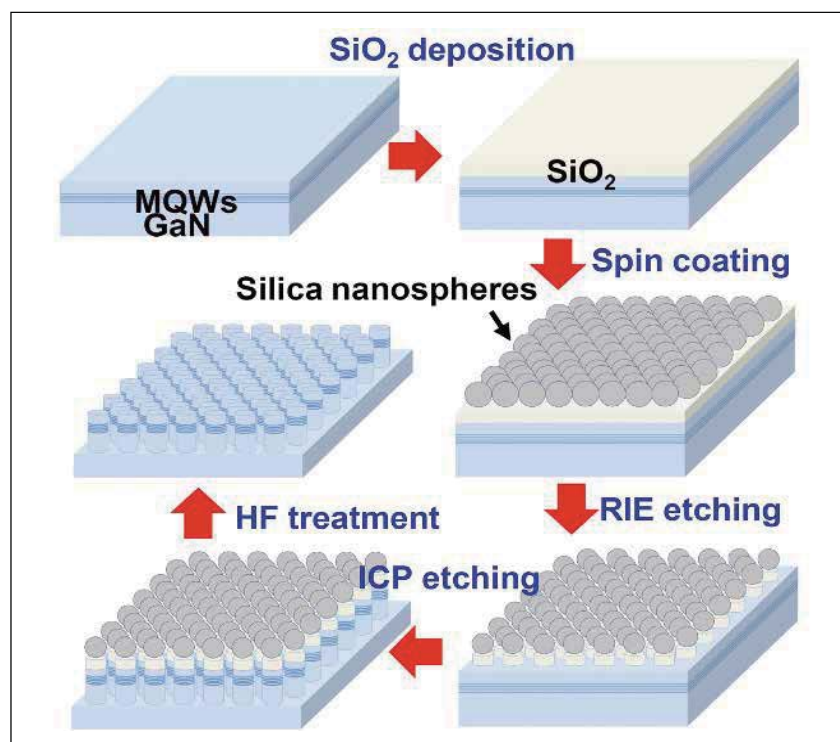
采用 375nm 激光来激发这些纳米棒结构以产生光致发光现象，直径为 205nm 的纳米棒样品具有最大的光荧光强度。增强因子是定义为纳米棒样品和原始生长样品之间在内量子效率上的比率，在 12K 温度下的该增强因子的测量值为 88。利用具有时间分辨的荧光光度法来对这些样品结构进行了仔细研究，直径为 205nm 的纳米棒样品具有最短的发射寿命和最高的自发发射率，这些结果验证了在这个样品结构中确实存在着纳米腔效应。

为了获得效率更高的商用绿光 LED，该团队还需开发一种新方法，以在纳米结构的表面上形成高质量的 p 型接触。然而，根据 Wang 的说法，他们还需要采用一种新的方法来制备纳米棒阵列，以在整个晶圆范围内都能保持其高度的一致性，他说道：“纳米压印和电子束光刻都可能是备选工艺方案，但是两者的成本都太高”。

绿光 LED 制造商可能会追求更高的增强因子，但是这种可能并不大，因为这还依赖于外延片本身的质量。

Wang 表示：“如果初始晶圆本身的光学性能就很优异，那么其增强因子就不会这么高”，“因此这项技术特别适用于绿光发射 LED 的制造，因为绿光 LED 现在的光学性能还远未能令人感到满意”。

T. Kim et. al. Appl. Phys. Lett. 104 161108 (2014)



双异质结构能增加 FET 的击穿电压并降低成本

将传统的 FET 结构转换成一种 AlGa_N/Ga_N/AlGa_N 结构可以在增加器件击穿电压的同时又能减小其缓冲层的厚度。

来自台湾交通大学的研究者宣布，他们首次对制作在 150 mm 硅衬底上的传统和双异质结构 GaN FET 进行的对比。

论文的通讯作者 Edward Yi Chang 宣称，这项工作一个关键性发现是：由于加入了一个 Al_{0.1}Ga_{0.9}N 背势垒层而形成双异质结构，该器件的击穿电压得到了显著的提升。

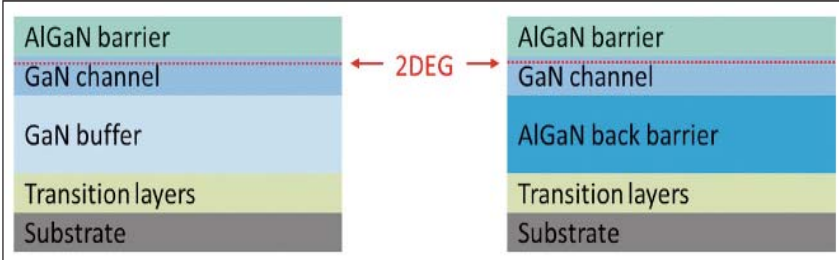
Chang 还说道：“不仅如此，这种双异质结构 FET 还大大减小了 GaN 功率器件中所必须有的缓冲层的厚度”。

缓冲层的变薄可以减小应变，对晶圆翘曲的控制也变得更为容易，这将有助于硅基 GaN FET 的制造。Chang 说道：“最近有一项研究表明，要在六英寸的硅衬底上来持续生长 GaN 是件很困难的事情，这是因为厚的缓冲层会在六英寸晶圆上产生很大的应变”。

插入一个双异质结构层并不会影响对增加击穿电压的措施选择，这些选择通常包括有对器件进行不同的设计或者对其外延结构进行改进等。

Chang 强调说：“从器件制造的角度来看，场板、离子注入和局部硅衬底去除等工艺都很复杂”，由于外延结构已成为决定器件性能的主要因素，所以应该对它实现进一步的优化。

同其他一些研究团队一样，这个台湾团队研究了更厚的外延结构和进行缓冲层的碳掺杂，Chang 表示：“由于存在很大的张应力，很难生长出厚度更大的无裂纹膜层”，“尽管进行碳掺杂的 GaN 缓冲层可以很大程度上提升器件的击穿电压，但器件开态电阻会随之明显增加又成为了另一个严重问题”。



双异质结构具有与单异质结构相同的 AlGa_N 势垒层，但是它用一个 1.4 μm 厚的 Al_{0.2}Ga_{0.8}N 背势垒层和一个 55 nm 厚的 GaN 沟道层取代了后者的 2.6 μm 厚 GaN 层。

为了评估他们新的设计方案，该研究团队在 675 μm 厚、直径为 150mm 的硅衬底上采用外延生长制作了传统的单异质结构和双异质结构 FET 器件，所用外延设备为 Thomas Swan MOCVD 生长炉，该设备上还装备了 Laytec EpiCurve TT 系统来测量晶圆的曲率和温度。

这两种类型的器件具有相同的衬底结构：一个 200 nm 厚的 AlN 成核层，一个 600 nm 厚的变组分 AlGa_N 过渡层。传统的单异质 FET 结构还在此基础上沉积了一层 2.6 μm 厚的 GaN，接着是 27 nm 的 Al_{0.2}Ga_{0.8}N 势垒层；另一方面，双异质 FET 结构包括有一个 1.4 μm 厚的 Al_{0.2}Ga_{0.8}N 背势垒层，一个 55 nm 厚的 GaN 沟道层和一个 27nm 厚的 Al_{0.2}Ga_{0.8}N 势垒层。

双异质结构具有与单异质结构相同的 AlGa_N 势垒层，但是它用一个 1.4 μm 厚的 Al_{0.2}Ga_{0.8}N 背势垒层和一个 55 nm 厚的 GaN 沟道层取代了后者的 2.6 μm 厚 GaN 层。

室温霍尔效应测试显示对照样品的迁移率为 1270 cm² V⁻¹ s⁻¹，薄层载流子浓度为 8.5 × 10¹² cm⁻²，而双异质结构器件的迁移率为 1110 cm² V⁻¹ s⁻¹，薄层载流子浓度为 8.7 × 10¹² cm⁻²。

用电感耦合等离子体在外延片表面刻蚀出器件的台面结构，用 Ti/Al/

Ni/Au 叠层制作源和漏的接触，用 Ni 和 Au 来形成 Schottky 栅极接触。晶体管的栅极宽度为 100 μm，长度为 1 μm，栅 - 漏间距和栅 - 源间距分别为 4.5 μm 和 1.5 μm，采用了 5 μm 间距的器件隔离图形。定义击穿电压为漏电电流密度超过 1 mA/mm 时的电压。研究团队在单异质结构 FET 上测得的击穿电压为 170V，作为对照，双异质结构 FET 的击穿电压则超过了 200V。

将隔离图形的间距调整为 20 μm 后，就能在 200V 电压下来比较两种器件的漏电流，双异质结构 FET 的漏电流密度为 9.2 × 10⁻⁵ mA/mm，而对照样品的漏电流密度为 6 × 10⁻³ mA/mm。

这种双异质结构 FET 的一个缺点是它的漏极电流密度仅为 475 mA/mm，与对照组相比要低 20% 以上，研究团队认为这可能是由于前者的载流子浓度较低所导致。

Chang 和他的合作者们正在计划进一步提高晶圆的均匀性，以制作具有 80nm 栅极宽度的双异质结构器件来提供更高的输出电流，并对传统单异质结构和双异质结构 FET 的器件可靠性进行比较。

Y. -L. Hsiao et. al. Appl. Phys. Express 7 055501 (2014)

采用高温 CVD 工艺来降低 SiC 的成本

研究人员能以高于 2mm/ 小时的生长速率来沉积高质量的 4H-SiC 层。

一个日本的研发合作团队采用高温化学气相沉积 (CVD) 工艺, 显著地提高了高质量 SiC 层的生长速率。

采用这种沉积工艺 SiC 层的生长速率能达到 2mm/ 小时以上, 与形成这种 SiC 人造刚玉的标准方法, 即物理气相转移 (physical vapour transport) 工艺相比, 它已成为一种十分具有吸引力的替代方法。采用物理气相转移技术的 SiC 层生长速率仅仅只能达到约 0.5mm/ 小时。由于该工艺使用了封闭型的坩埚, 使得对生长源材料的更换显得非常棘手, 限制了所形成 SiC 晶锭的长度。上述这些缺点在一定程度上造成了 SiC 衬底的高成本, 同时也阻碍了 SiC 功率电子产业的发展。

为了降低 SiC 的生产成本, 一些研究团队已经研究出了生长 SiC 晶锭的替代

方法, 例如使用硅 - 金属溶液的液相方法, 它可以实现高于 2mm/ 小时的生长速率。

但是另一种替代方法——高温 CVD 工艺则是一种更佳的选择, 它能对生长源材料进行持续的供给, 而且通过使用高纯度的气体源材料还可减少金属杂质的污染问题。

然而, 在日本 CRIEPI、FUPET 和 Denso 三家公司进行合作研发之前, 高温 CVD 工艺的缺点就是: 它的生长速率只有不到 1mm/ 小时。

在该日本合作团队的立式 CVD 反应炉中可以获得更高的生长速率, 在该反应炉的底部配置了一个气体喷口来产生向上流动的反应气流, 而在反应炉的中部还配置了由石墨圆柱体包围形成的加热区。

在该合作研发团队的较小反应炉中, 采用了 H_2 、 SiH_4 、 C_3H_8 和气流速

率为 2m/s 的 HCl 这种混合反应气体, 能够在 2200℃ 温度下以 1.4mm/ 小时的生长速率来沉积 4H 多晶型 SiC。而在 2350℃ 的温度下, 不用 HCl 气体就可以使其生长速率增加到 2.1mm/ 小时, 并能在生长层中能保持籽晶所具有的较低密度的线螺旋位错缺陷密度。

在获得这一成功经验以后, 研究人员对这种生长工艺进行了按比例地放大, 将该工艺转移到一个更大的反应炉和一个 3 英寸直径的籽晶上。在这个大的反应炉中, 在使用 HCl 气体、生长温度为 2230℃ 时, 位于籽晶中心位置的生长速率可以达到 1.3mm/ 小时。而在不使用 HCl 气体、温度为 2300℃ 时, 其生长速率则可达 2.4mm/ 小时。

N. Hoshino et. al. Appl. Phys. Express 7052101 (2014)

Book your place at the CS International Conference

NOW Open
SAVE €100

CS INTERNATIONAL
CONFERENCE

Wednesday 11 - Thursday 12 March 2015
Sheraton Frankfurt Airport Hotel, Germany

Register: www.cs-international.net

Contact: Stephen Whitehurst

T: +44 (0)24 7671 8970

E: stephen.whitehurst@angelbc.com

Connecting, informing and
inspiring the compound
semiconductor industry



Early Bird
Offer

气隙设计提高了 LED 的光萃取效率

在芯片和微型荧光体之间插入一个气隙层可以提高 LED 的光输出功率。

韩国 Yonsei 大学的工程师已经证明，插入一个气隙层可以显著提高白光 LED 的光萃取效率。

该团队设计了两种类型的器件——一种是相对较为常规的 LED 结构，在芯片和量子点荧光体之间为环氧树脂层。另一种为更加先进的结构设计，用一个气隙层来取代上述的环氧树脂层，采用后一种设计制造的 LED 具有比常规 LED 高出 33% 的光萃取效率。

这两种微型荧光体的设计与更为常见的“罩杯中荧光体”结构相比具有诸多优点，而常见结构中荧光体是分散在液态环氧树脂中并直接与芯片相接触。

这种设计在工业上被广泛采用，但是由于荧光体的各向同性发射特性及其相对较窄的再发射光谱范围，降

低了 LED 的光萃取效率及其颜色质量。而由该韩国团队设计的气隙结构可以大幅度地减少在微型荧光体 LED 荧光层中的光损失。

在他们的设计中，光在量子点荧光体中进行散射或再发射返回芯片，由于存在着折射率上的巨大差异，光就更有可能在与空气相接触的界面上产生全反射。这个由背向散射或再发射所产生的光经全反射后就可从器件的优选方向上出射。该团队的计算结果显示，当量子点荧光体被嵌埋在折射率为 1.53 的聚合物树脂中时，约有 45% 的再发射和散射光将会在空气和聚合物界面上产生反射。

通过在 LED 器件表面增加一个穹顶形的聚合物树脂透镜还可以进一步提升器件的光萃取效率，因为这样可以增大芯片发射光线的锥形发散角。

该团队通过将发射波长为 452nm 的 InGaN 基 LED 结构和包含发射波长为 597nm 和 530nm 的双量子点的聚合物树脂层相结合，设计出了白光 LED 器件。在 2.8V、6mA 的驱动条件下，这个带有气隙设计的 LED 器件可以产生 1.66mW 的输出功率，而采用环氧树脂的 LED 器件其输出功率只有 1.28mW。与对照结构的显色指数为 80.7 相比，具有气隙设计结构显色指数为 81.8，要稍微高一些。

为了确定 LED 上聚合物透镜所起的作用，该团队设计了一个没有配置这种光学透镜的器件。其发光效率与对照结构相比只提高了 19.5%，这意味着气隙结构和聚合物透镜对提升光萃取效率的相对贡献率分别为 66% 和 34%。

M.-H. Shin et. al. Appl. Phys. Express 7052101 (2014)

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)
Michael Tsui (徐旭升)
michaelt@actintl.com.hk
Tel: 86-755-25988571

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

Beijing (北京)
Oasis Guo (郭镜园)
Oasisg@actintl.com.hk
Tel: 86-10-64187252

Taiwan (台湾地区)
Monica Liu (刘方美)
monica@arco.com.tw
Tel: 886-223965128 x 204

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

SMTChina

表面组装技术

电子书(eMagazine)
smtchinamag.com



直接连结
广告商网站

一点即开
想看的文章

推荐朋友下载
免费的电子书

申请成为免费印刷
版或电子书的读者

上页、下页，
放大/缩小文章



广告索引
Ad Index

目录 Contents

P.6-24 P.26-47

推荐朋友

Refer a friend

免费赠阅

Subscribe

◀ 🔍 + ▶

ACT

中国电子制造专业人士的刊物

2014年8/9月
ISSN: 1997-0870

SMTChina

表面组装技术

www.smtchinamag.com

第二十一页
电路在线测试经

第二十九页
组装高速PCB的问题

第四十二页
用于高温产品的组装

第四十七页
非传统的解决方案会



免费索阅

国际知名的机器视觉及影像处理杂志
《Vision Systems Design》的中文版

国际及中国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动态。
2014年季度出版，印刷版超过8,000册，电子书发行数以倍数
网站及电子快讯亦将为读者提供及时资讯

欢迎垂询

www.vision-systems-china.com



ACT Media Group

www.actintl.com.hk

电话：香港 852-28386298

深圳 86-755-25988571

上海 86-21-62511200

北京 86-10-64187252