

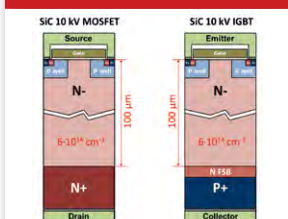
# 化合物半导体



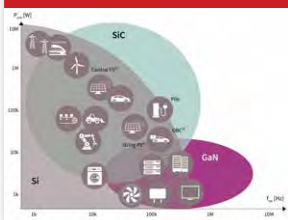
# • CHINA

2021年 2/3月

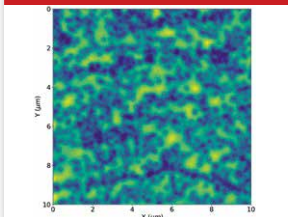
## 评估MOSFET和IGBT



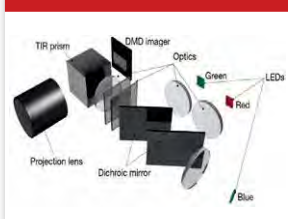
## 新开关技术的评估



## 使用定量阴极射线 荧光技术研究氮化镓HEMT



## LED 投影的新水平

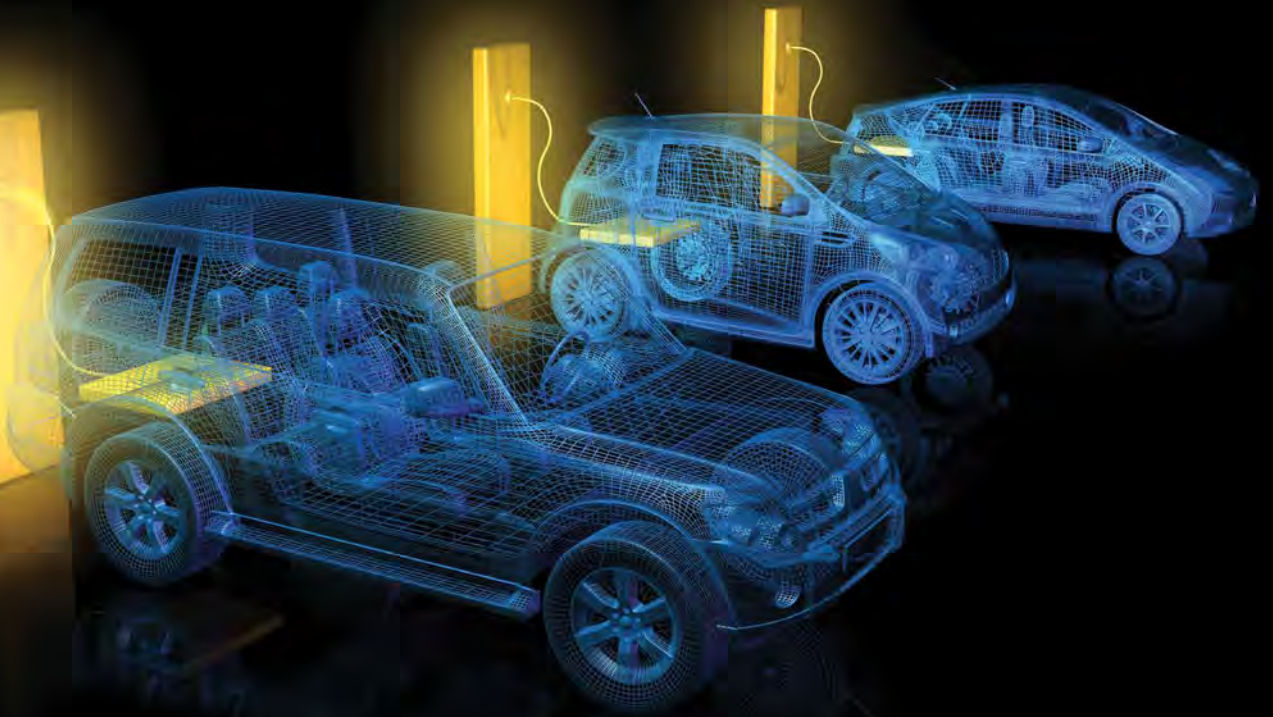


## 激光： 加速可见光通信



**SEMICON  
CHINA**

3月17-19日·上海新国际博览中心  
欢迎莅临 E7馆/7753



实现下一代碳化硅功率器件最佳的性能  
为全球大趋势提供新的解决方案

## AIX G5 WW C

- 电动汽车：车载充电器，逆变器
- 基础设施：充电桩
- 再生能源：太阳能和风能
- 工业应用：马达驱动器，电源
- 配电管理：HVDC

发现全新碳化硅外延量产工具  
实现单片机的性能和多片机的成本



Made  
in  
Germany



**AIXTRON**

info@aixtron.com  
www.aixtron.com



# 北京华卓精科科技股份有限公司

## 北京华卓精科科技股份有限公司

成立时间2012年5月9日，总部位于北京经济技术开发区，并在杭州、上海、美国等地设有全资子公司。主营业务为集成电路制造装备及关键零部件的研发和产业化。目前产品包括光刻机双工件台及其衍生产品超精密运动平台、激光退火设备、晶圆键合设备、晶圆传输系统、主被动隔振器、静电卡盘、精密测量系统等整机设备及半导体关键零部件，主要应用于集成电路芯片制造、先进封装、功率器件制造等产线，并在电子制造、激光加工等高端技术领域实现广泛应用。

### ► 激光退火设备 / Laser Annealing Equipment



面向功率器件IGBT  
背面激光退火



面向功率器件SiC  
激光退火

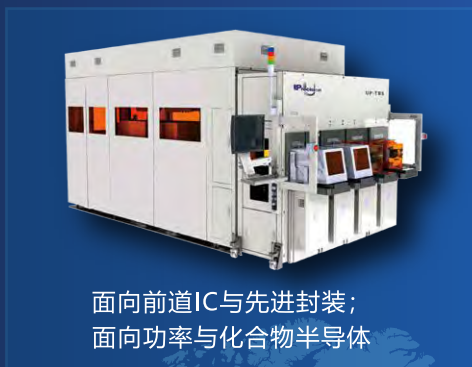


面向前道IC SILICIDE  
表面动态退火(DSA)



面向超浅结激光尖峰退火  
(LSA)

### ► 晶圆键合设备 / Wafer Bonding Equipment



面向前道IC与先进封装；  
面向功率与化合物半导体



面向前道IC、CIS和  
Micro-LED



IP 洛杉矶



IP 北京  
上海-杭州 IP



地址：北京市北京经济技术开发区经海路与科创十街交叉口（华卓园区）

电话：86-10-62780929

邮箱：info@u-precision.com

网址：www.u-precision.com

## 封面故事 Cover Story

### 09 激光：加速可见光通信 Lasers: Accelerating visible light communication

将光用于无线通信是个好生意。频带宽度比移动设备所使用的标准无线电频段宽千倍以上，而且没有限制。但上述优点还不足以称为一项技术。更好的未来是看到基于光的无线通信与在无线电波和毫米波范围内运行的现有技术融合，从而产生一个协同方案，从而推动新通信时代的到来。

- MEIWEI KONG, JORGE HOLGUIN-LERMA, TIEN KHEE NG AND BOON S. OOI,  
阿卜杜拉国王科技大学

## 编者话 Editor's Note

### 04 第三代半导体电力电子产业瓶颈 The third generation semiconductor power electronics industry bottleneck

- 陆敏

## 业界动态 Industry

### 05 10亿！中科钢研半导体项目预计年内投产 One billion Investment Semiconductor Project of Zhongke Energy Conservation And Technology Co.,Ltd is expected to be put into production within this year

### 05 苏州纳维总部大楼建设正式启动 The construction of Suzhou Nanowin headquarters building officially started

### 06 安徽造77GHz毫米波芯片问世，刷新国际纪录！ Anhui-made 77GHz millimeter-wave chip came out, breaking an international record!

### 06 30多亿元半导体项目同日签约苏州高新区 More than 3 billion yuan of semiconductor projects signed on the same day in Suzhou High-tech Zone

### 07 台积电扩大投资化合物半导体！购16台氮化镓相关设备 It is reported that TSMC expands investment in compound semiconductors! Purchase 16 GaN related equipment

### 08 GaN Systems推出新型GaN功率级别 GaN Systems launches new GaN power level

#### 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，亦是国内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，以及相关市场分析和动态。

#### 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.



扫一扫  
免费下载电子书



FLUKE  
Process  
Instruments



## 福禄克过程仪器

FLUKE PROCESS INSTRUMENT

福禄克测试仪器(FPI)，以定制化测温控温解决方案助力中国半导体行业腾飞。FPI定制化测温方案完美覆盖氮化镓，碳化硅，金刚石等多种半导体新材料从晶体生长，外延沉积到研磨切割的全工艺流程。

SEMICON® 欢迎莅临  
CHINA 展位T3-T3316



扫描二维码关注公众号  
获取技术咨询电话

- 08 宽禁带半导体国家工程中心常州分中心将落地常州武进**  
**Changzhou branch of the National Engineering Center for Wide BandGap Semiconductors will land in Wujin, Changzhou**

### 技术Technology

- 14 评估SiC MOSFET和SiC IGBT**  
**Evaluating the SiC MOSFET and the SiC IGBT**  
- EDWARD VAN BRUNT, 科锐公司 WOLFSPEED
- 18 LED投影的新水平**  
**A new level of LED projection**  
- ALEXANDER MARTIN, 欧司朗光电半导体公司 (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS)
- 21 新开关技术的评估**  
**Evaluating new switching technologies**  
- STEFAN OBERSRIEBNIG, 英飞凌
- 28 使用定量阴极射线荧光技术研究氮化镓 HEMT**  
**Scrutinising GaN HEMTs by quantitative cathodoluminescence**  
- MATTHEW DAVIES 和 CHRISTIAN MONACHON, ATTOLIGHT

### 圆桌论坛 Roundtable Forum

- 33 国内巨大应用市场引爆VCSEL产业契机**  
**The huge domestic application market detonates the opportunity of the VCSEL industry**

### 科技前沿 Research Review

- 37 高效、价格合理的半极性GaN**  
**Efficient, affordable semi-polar GaN**
- 38 双重溅射提升AlN结晶质量**  
**Double sputtering enhances AlN**
- 39 开拓性的AlInN功率二极管**  
**Pioneering AlInN power diodes**
- 40 广告索引 Advertisement Index**

关于雅时国际商讯 (ACT International)

**ACT** 雅时国际商讯 (ACT International) 成立于1998年, 为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品 - 包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动时 - 为跨国公司与中国企业架设了拓展中国市场的桥梁。ACT的产品包括多种技术杂志和相关的网站, 以及各种技术会议, 服务于机器视觉设计、电子制造、激光/光电子、射频/微波、化合物半导体、半导体制造、洁净及污染控制、电磁兼容等领域的约二十多万专业读者及与会者。ACT亦是若干世界领先技术出版社及展会的销售代表。ACT总部在香港, 在北京、上海、深圳和武汉设有联络处。www.actintl.com.hk

About ACT International Media Group

ACT International, established 1998, serves a wide range of high technology sectors in the high-growth China market. Through its range of products -- including magazines and online publishing, training, conferences and events -- ACT delivers proven access to the China market for international marketing companies and local enterprises. ACT's portfolio includes multiple technical magazine titles and related websites plus a range of conferences serving more than 200,000 professional readers and audiences in fields of electronic manufacturing, machine vision system design, laser/photonics, RF/microwave, cleanroom and contamination control, compound semiconductor, semiconductor manufacturing and electromagnetic compatibility. ACT International is also the sales representative for a number of world leading technical publishers and event organizers. ACT is headquartered in Hong Kong and operates liaison offices in Beijing, Shanghai, Shenzhen and Wuhan. www.actintl.com.hk

**TSD 特思迪**  
Beijing TSD Semiconductor Co., Ltd.

用心做设备 助力中国芯

减薄·抛光·CMP

**SEMICON<sup>®</sup> CHINA**  
跨界全球·心芯相联  
2021.03.17-19 上海新国际博览中心  
**N2馆2327号**

010-64778430  
www.tsd-semicon.com  
北京市顺义区顺强路1号  
北京特思迪半导体设备有限公司

## 第三代半导体电力电子产业瓶颈

第三代半导体其实在光电领域，具体讲在半导体照明及显示领域早已取得了辉煌的成就，这其中包括缔造了2014年的诺贝尔物理学奖，以及每年实现数千亿美元的产值。当然现今我们提到第三代半导体主要指微电子或功率应用领域，包括电力电子和微波射频。2001年英飞凌推出的SiC肖特基势垒二极管，这是第一款上市的宽禁带电力电子产品，开启了碳化硅电力电子产业的开始。2010年碳化硅MOSFET开始批量生产，加速了碳化硅电力电子产业的发展。硅基氮化镓功率应用相对滞后些，2012年Transphorm推出业内首个符合JEDEC标准的600V GaN FET，氮化镓电力电子器件增强了市场的信任。

现今由于碳化硅材料质量远高于氮化镓，碳化硅占据了近90%的第三代半导体电力电子器件市场。虽然第三代半导体器件性能优越，但在电力电子应用市场的总体渗透率还不到5%，这有诸如终端应用习惯、电路拓扑结构、开关器件驱动、封装技术等问题，但最核心的问题，或者说产业瓶颈在于：对碳化硅而言是衬底价格太高，虽然近几年随着市场需求的大幅提升及碳化硅衬底制造技术发展促进良率的提升，碳化硅衬底价格都在逐年下降，但还是很高，价格大概是相同尺寸硅衬底的60倍以上，器件成本中碳化硅衬底占比高达50%左右，从而最终导致碳化硅器件价格居高不下。对氮化镓而言是器件可靠性问题，硅基异质外延导致氮化镓中高缺陷密度，以及器件横向结构导致器件反向耐压及漏电流特性受限，虽然价格比较亲民，但是暂时主要在消费电子的快充领域暂露头角。

如何有效快速的降低碳化硅衬底成本，将是实现第三代半导体电力电子产业高速腾飞的关键所在。方法有四，一是增加产能规模，通过规模效应摊薄研发成本及人力成本；二是引入智能制造手段，通过高效的数据及流程管理，增加生产效率；三是继续提高并优化现有PVT（物理气相传输）长晶技术，改善切磨抛工艺，提高碳化硅衬底综合良率；四是开发颠覆性创新技术（如液相熔体长晶技术、激光切割技术、Grinding技术等），突破现有传统技术的极限瓶颈，实现成本的显著下降。方法一及二属于非技术手段，改善空间有限，方法三由于PVT技术的固有秉性（生长速度慢、扩径难、长厚难等）导致改善空间也受限，估计通过前三个方法，碳化硅衬底价格能降到硅衬底20倍左右。再进一步降低就必须依靠方法四了，这也正是技术创新的魅力，其实在很多领域都是如此，产业问题及瓶颈孕育着技术创新，技术创新又推动着产业的发展和变革。第三代半导体电力电子产业瓶颈也必将被创新技术所突破，成就第三代半导体产业的辉煌！



社长 **Publisher**

麦协林 Adonis Mak  
adonism@actintl.com.hk

主编 **Editor in Chief**

陆敏 Min Lu  
MinL@actintl.com.hk

出版社 **Publishing House**

雅时国际通讯 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 25988573  
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



## 10 亿！中科钢研半导体项目预计年内投产

近日，山东莱西中科钢研碳化硅集成电路产业园项目传来新进展。

据握得莱西报道，该项目总投资 10 亿元，占地 83 亩，建筑面积 5.5 万平方米，主要产品为 4 英寸、6 英寸碳化硅晶体衬底片，预计年内投产。

该项目于 2018 年 5 月开工，目前一期主体竣工，正在进行内部洁净车间施工。该项目全部达产后，预计可实现年产 5 万片 4 英寸碳化硅晶体衬底片、5000 片 4 英寸高纯度半绝缘型碳化硅晶体衬底片。

据集微网 1 月份报道，中科钢研集成电路产业园项目一期工程已完工，二期生产车间和机修车间共计 1.8 万平方米，钢结构正在吊装，预计 6 月份主体竣工。

据悉，中科钢研集成电路产业园生产的碳化硅材料，是国家重点支持的战略新兴产业之一，业务将覆盖国家级



碳化硅实验室、生晶、切片加工、集成电路等领域。项目建成后，能使我国摆脱碳化硅晶体衬底片依赖进口的尴尬局面，产品国产化后，成本将大幅降低，能在通信、高铁、新能源汽车等方面广泛应用，将引领碳化硅材料行业出现爆发式发展。

## 苏州纳维总部大楼建设正式启动

2021 年 1 月 24 日上午，苏州纳维科技有限公司总部大楼建设项目在苏州工业园区正式奠基。园区党工委副书记、管委会主任丁立新，中科院苏州纳米所书记、副所长（主持工作）邓强，苏州市科技局原党组书记吴伟澎，园区党工委委员、管委会副主任倪乾，独墅湖科教创新区党工委书记许文清，独墅湖科教创新区管委会主任潘瑜，园区投资促进局局长蒋卫明，园区科技创新委员会主任徐积明以及苏州工业园区管委会相关部门、中科院苏州纳米所、苏州纳米科技发展有限公司、中新创投、苏州科技创投、浦发银行、建设银行等其他领导，以及长期关注和支持苏州纳维发展的投资方、客户、合作单位、员工代表等 90 余人齐聚一堂，共同见证苏州纳维发展史上这一里程碑意义的历史性时刻。

仪式伊始，苏州纳维科技创始人兼董事长徐科回顾了公司的创业、发展历程，并向长期关心和支持纳维发展的领导、股东和朋友致以最诚挚的谢意。据徐科先生介绍，纳维总部建设项目位于苏州纳米城，总建筑面积约 34000 平方米，未来将建设成为国际氮化物单晶材料研发基地与高端产品生产基地，预计年产氮化镓单晶衬底及外延片 5 万片。他表示，苏州纳维能够快速发展，完全得益于苏州这片沃土，纳维总部大楼的建设标志着纳维科技将在市场、生产、研发全面发力。

苏州工业园区党工委委员、管委会副主任倪乾做了热情洋溢致辞并对纳维的发展提出了殷切期望。他感谢纳维科技十多年来，扎根园区的坚守与付出。他表示，此次开工奠基，



标志着纳维科技的发展再迈上新台阶。园区也将始终坚持创新引领，推动包括第三代半导体在内的新兴产业创新发展，一如既往做好亲商服务，助力纳维科技在内的优秀企业加速成长，为创新企业提供更广阔的舞台，帮助其尽快做大做强。

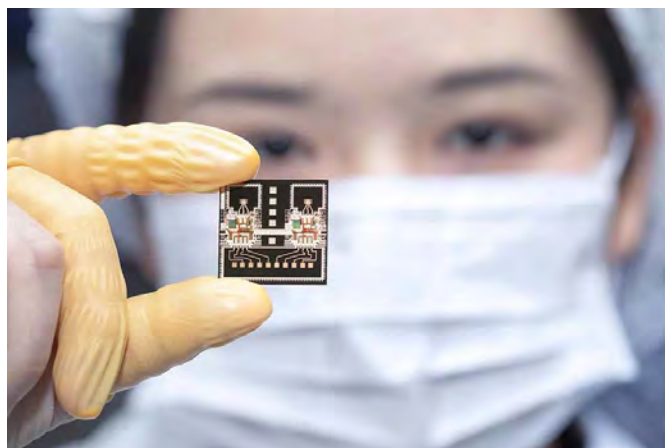
目前，第三代半导体正在为多个产业带来变革性的发展动力，而高质量的单晶衬底的重要性越来越明晰。历经十多年的不断探索与实践，纳维科技掌握了氮化镓单晶衬底产业化的成套核心技术，产品供不应求。此次奠基的总部大楼将重点承担纳维科技在生产、研发等方面的需求，在未来的总部基地，全体纳维人将一如既往、继续深耕细作，努力实践每亩 200 万元税收的先行先试，打造出国际有影响力的第三代半导体研发基地与高端产品生产基地！

## 安徽造 77GHz 毫米波芯片问世，刷新国际纪录！

近日，中国电科 38 所发布了一款高性能 77GHz 毫米波芯片及模组，在国际上首次实现两颗 3 发 4 收毫米波芯片及 10 路毫米波天线单封装集成，探测距离达到 38.5 米，刷新了当前全球毫米波封装天线最远探测距离的新纪录。受疫情影响，发布会在线上举行。

此次发布的封装天线模组包含两颗 38 所自研 77GHz 毫米波雷达芯片，该芯片面向智能驾驶领域对核心毫米波传感器需求，采用低成本 CMOS（互补金属氧化物半导体工艺），单片集成 3 个发射通道、4 个接收通道及雷达波形产生等，主要性能指标达到国际先进水平，在快速宽带雷达信号产生等方面具有特别优势，芯片支持多片级联并构建更大规模的雷达阵列。

据专家介绍，该款毫米波雷达芯片在 24mm×24mm 空间里实现了多路毫米波雷达收发前端的功能，为近距离智能感知提供了一种小体积和低成本解决方案，有望拉动智能感



知技术领域的又一次突破。

下一步，中国电科 38 所将对毫米波雷达芯片进一步优化并根据应用需求的扩展以及技术的进步而改变，根据具体应用场景提供一站式解决方案。CS

## 30 多亿元半导体项目同日签约苏州高新区

近日，苏州高新区举行了 2021 年春季重大项目集中开工签约仪式，总投资 712 亿元的 105 个项目集中开工签约。

据悉，此次苏州高新区集中开工项目 48 个、总投资 452 亿元，集中签约项目 57 个、总投资 260 亿元，涵盖半导体、高端装备制造、新一代信息技术等战略性新兴产业。

其中，新签约项目包括投资 30 亿元的半导体研发生产总部项目、总投资 2.5 亿元的识光芯科激光雷达芯片项目、爱思微红外传感器研发中心等。

半导体研发生产总部项目总投资 30 亿元，全方位覆盖化合物半导体外延业务，提供全套的外延产品代工服务。

该半导体研发生产总部项目投资方是全球仅有的三家可提供大规模商业化生产的 MBE 外延供应商之一，填补了国内高性能化合物半导体外延材料的产业空白，实现此类关键材料的国产替代，促进我国化合物半导体产业的发展。目前公司股改进行中，计划 2021 年报科创板上市。

识光芯科激光雷达芯片项目总投资 2.5 亿元，计划 5 年内打造具备技术领先优势的世界一流三维感知独角兽企业。项目核心产品为基于专利核心技术的 ToF 三维感知片上系统，ToF 激光雷达芯片是未来主流的 3D 传感解决方案，可应用于自动驾驶、安防识别、消费电子、3D 实时建模等诸

多应用场景。

识光芯科公司致力于国际领先的三维感知激光雷达芯片的研发、制造及整体系统方案设计，具备核心技术自主创新能力。公司核心团队来自于北美欧洲著名三维感知实验室及明星企业，各子系统研发负责人均拥有 10 年以上芯片研发经验积累。

此外，新开工项目包括投资 7 亿元的安捷利电子二期项目，总投资 2 亿元的启航电子智能制造生产基地等。

安捷利电子二期项目购置激光镭射钻孔机、RTR 高速多功能工具冲孔机等先进设备，新增年产 120 万平方米集成电路封装基板及 HDI 高密度互连积层板产能，总投资 7 亿元。

安捷利电子科技（苏州）有限公司成立于 2005 年，由香港安捷利实业有限公司投资，隶属于中国北方工业集团，是一家专业从事高密度挠性印制电路及刚挠结合电路、表面贴装（SMT）、COF 模组等设计与制造的高新技术企业。

启航电子智能制造生产基地总投资 2 亿元，项目位于苏州科技城，占地 30 亩，总建筑面积 4.1 万平方米。产品涵盖工业零部件自动化生产、成品自动化组装测试、精密检测、光学测量、工业控制、机器人应用、软件开发、质量追溯和相关数据统计、存储等大型工业系统的集成能力。CS



## 传台积电扩大投资化合物半导体！ 购 16 台氮化镓相关设备

近日，台媒报道，在半导体界传出台积电扩大投资化合物半导体的传闻。据称，台积电购买氮化镓（GaN）相关设备达 16 台，比既有的六寸厂内的 6 台增加 2 倍多，这相当于产能将增达逾万片左右，显示客户端下单需求扩大。

据了解，客户包括纳微半导体—全球最大的氮化镓（GaN）功率 IC 公司。台积电尚未回应有关客户与订单的问题。

2020 年 2 月，台积电发布新闻稿，宣布与国际功率半导体 IDM 大厂意法半导体携手合作开发氮化镓制程技术。这项举动象征着台积电未来的发展将借由 GaN 技术加速布局车用电子与电动车应用。

可以说，台积电是非常看好未来的氮化镓功率电子市场和应用的。

进入 5G 时代后，科技发展逐渐走向高频，硅与砷化镓开始无法负荷通讯设备高涨的频率，而这也正好符合氮化镓高工作频率的特性，氮化镓产业迅速起飞。

氮化镓是一种宽能隙半导体材料，也是下一代功率半导体—化合物半导体。业界指出，氮化镓运转速度比既有的硅（Si）元件快 20 倍，功率提高 3 倍，代表充电速度也快 3 倍，但尺寸与重量却只有原来的一半。油电混合车的转换器与充电器，还有工业、电信及特定消费性电子应用产品都可适用。

值得注意的是，台积电的大客户纳微半导体于日前宣布，其出货量创下最新纪录，已向市场成功交付超过 1300 万颗氮化镓（GaN）功率 IC，实现产品零故障，反应了全球移动消费电子市场正加速采用氮化镓芯片，实现移动设备和相关设备的快速充电。

而纳微半导体专有的氮化镓（GaN）工艺设计套件（PDK）是基于台积电 GaN-on-Si 平台开发的。纳微与台积电强强联手，以重要的知识产权优势和创新速度为基础，发挥先发优势和持续的市场领导地位，在 GaN 器件、封装、应用和系统的所有方面已发布或正在申请的专利达到 120 多项。CS。

# EVATEC

## 薄膜科技 塑造未来

**SEMICON<sup>®</sup>  
CHINA** 欢迎莅临我们的展位3231





Evatec 薄膜技术已经改变了我们的世界 70 年，如今，Evatec 专有技术将推动我们生活和工作方式的革命。

我们生产的机台能让 5G 通信技术运行更快，电子消费产品更节能，同时传感器让无人驾驶成为可能

了解更多 Evatec 薄膜生产机台及工艺请联系本地销售办公室  
[www.evatecnet.com/about-us/contact-us/](http://www.evatecnet.com/about-us/contact-us/)



ADVANCED PACKAGING • SEMICONDUCTOR • OPTOELECTRONICS • PHOTONICS • THE THIN FILM POWERHOUSE

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

## GaN Systems 推出新型 GaN 功率级别

GaN Systems 发布了两款 650V 半桥子卡 (30A 和 60A)，为评估 GaN 驱动器和晶体管提供了一个多功能平台。该评估卡提供两种功率级，最高 3kW (GS-EVB-HB-66508B-RN) 和最高 6kW (GS-EVB-HB-66516T-RN)，并包括 Renesas RAA226110 低侧 GaN FET 驱动电路。

这些卡被认为是业界首款提供具有可调阈值和可编程源电流的可编程过流保护，以实现可调开关回转速度的产品。

“GaN 晶体管已将自己确立为电力电子技术的基本组成部分。Renesas 推出具有同类最佳功能和性能的低侧 GaN FET 驱动电路，证实了 GaN 晶体管已成为电源设计工程师的首选工具。” GaN 战略营销副总裁 Paul Wiener 表示。



650V 半桥子卡 (30A 和 60A) 率先提供具有可调阈值和可编程源电流的可编程过流保护

“Renesas 致力于开发支持 GaN 晶体管的创新电源产品。” Renesas 工业和通信业务部副总裁 Philip Chesley 说，“我们的新型 RAA226110 低侧 GaN FET 驱动电路就是一个例子，它提供了客户在高性能驱动电路中想要的所有功能。”

这些功率级设计可广泛应用于企业 1U 电源 (最高 5kW)、高功率密度无桥图腾柱 PFC、光伏逆变器、储能系统、电机驱动器以及汽车 DC/DC 转换器和板载充电器。

该评估卡与 GaN Systems 的主板一起使用，可轻松设置和即插即用。该评估卡还具有在 2MHz f<sub>SW</sub> 下集成 VGS 的功能和一些独一无二的功能，如可编程过电流保护，阈值为 40mV/80mV/120mV，差分电流感应，以及可编程源电流，可调节开关回转速 (0.3A、0.75A 或 2A)。

## 宽禁带半导体国家工程中心常州分中心将落地常州武进

2月22日上午，2021年常州武进区重点项目集中开工暨常州芯创天地项目开工仪式在武进国家高新区举行，55个项目集中开工，计划总投资505亿元，年度计划投资137.7亿元。

其中，现场开工的常州芯创天地项目总投资68亿元，总建筑面积57万平方米，其中项目一期用地150亩，建筑面积35万平方米，致力于打造创新驱动、产城融合、校企共研、开放现代的长三角集成电路产业基地。

该项目建成后，将落地由国家重大基础研究计划项目首席科学家郝跃院士领衔的宽禁带半导体国家工程中心常州分中心，西安电子科技大学与常州大学共建的微电子学院研究生院及其他创新创业平台。

据悉，宽禁带半导体国家工程中心常州分中心由武进国家高新区与西安电子科技大学于去年9月份正式签约成立，根据协议，西安电子科技大学将为常州分中心提供技术支持，并协助本地高校一起，联合培养微电子技术专业人才，为常州分中心建设发展提供人才支持。

此外，据当地媒体报道，今年年内，常州武进区力争引进5-7个技术含量高、成长性大、带动作用强的重大项目，



集成电路产业产值突破50亿元；加快推进常州集成电路生态产业园、常州芯天地、西电化合物半导体创新中心建设，搭建化合物半导体制造代工、研发孵化、人才培养及公共服务四大专业平台。到“十四五”期末，全区集成电路产业销售收入力争突破300亿元，产业链企业达50家以上，其中销售收入超过10亿元的骨干企业5家以上，集成电路研发能力达到国内先进水平，产业链部分环节达到国际先进水平。

# 激光： 加速可见光通信

## GaN 基单模激光器将彻底改变通信

MEIWEI KONG, JORGE HOLGUIN-LERMA, TIEN KHEE NG AND BOON S. OOI, 阿卜杜拉国王科技大学

**将**光用于无线通信是个好生意。频带宽度比移动设备所使用的标准无线电频段宽千倍以上，而且没有限制。但上述优点还不足以称为一项技术。更好的未来是看到基于光的无线通信与在无线电波和毫米波范围内运行的现有技术融合，从而产生一个协同方案，从而推动新通信时代的到来。

通信光源利用的通常是紫外线或红外线，若是也能适用于可见光将更好，因为这样可以在照明的同时进行通讯。可见光通信技术具有高速传输数据的能力、大规模集成的兼容性以及免受电磁干扰等优点，已经引发了大量的商业关注。

可见光通信的常规光源是 LED，通常为白色发射器形式，通过在蓝色 GaN 基芯片上涂覆变色磷光体而制成。这些器件推动了可见光通信的突飞猛进，同时构筑了“使用路灯为路人提供互联

网”的愿景。

通过采用先进的调制技术，研究人员已经能使单个 LED 的数据速率突破数个 Gbit/s。Micro-LED 器件的小型化带来了更快的速度和更大的调制带宽。但是，速度是以输出功率为代价的。传统的 LED 让您享受高光功率和适宜的照明亮度，但调制速度有限；若替换为 micro LED，您将获得可观的调制速度，但照明亮度不足。

幸运的是，有一个无需折衷的方案可供选择：激光二极管。但这真的是一个好的解决方案吗？阿卜杜拉国王科技大学的研究小组告诉我们，绝对是！我们在分布式反馈激光器（DFB）开发者的基础上继续研究，这些器件拥有比 micro LED 更快的数据速率，同时还能兼顾照明水平。

高速无线传输数据的市场需求很大。对虚拟现实，增强现实和自动驾驶等新兴应用来说都是

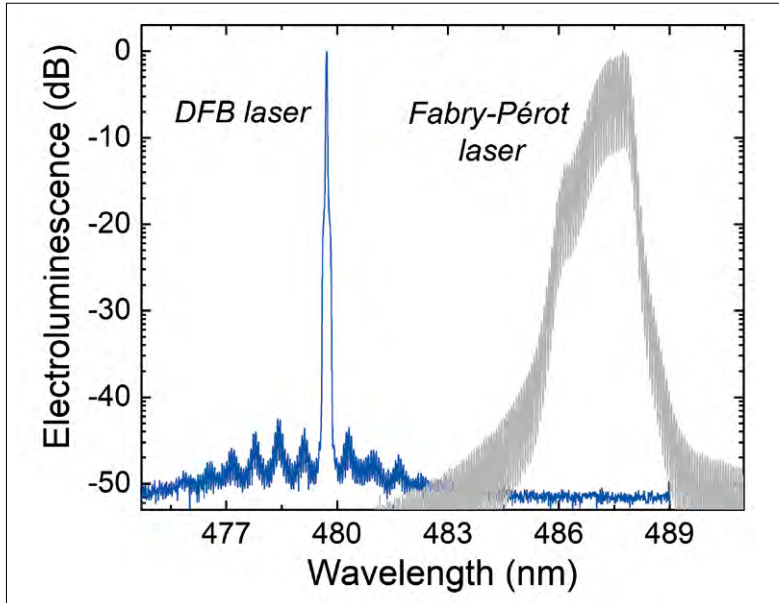


图1.通过添加DFB光栅可以将F-P激光器的多腔模降低为单模。图1显示了GaN基的天蓝色激光。

刚需。不仅催生了新兴企业和投资，如 SpaceX 开发的激光互连卫星星座 Starlink，而且推动了新一代通信网络 LiFi 的构建。而实现这一切的前提非常明确：建立一个无处不在的，不受基础设施限制的无线网络。不久之后，无线数据就会被拥挤的无线电频谱所拖累。但运行于红外，可见光和紫外线中的光无线通信则解决了这一问题，并为 5G 网络的建设做出宝贵的贡献。

### 激光证书

把激光二极管运用至适当位置将对市场产生冲击。这种节能光源兼顾了高亮度照明与超高速数据传输的功能，并有可能在超高速可见光通信应用中替代 LED，例如智能工厂，智能运输和大容量广播等，其数据速率需要达到 10 Gbit/s 以上。

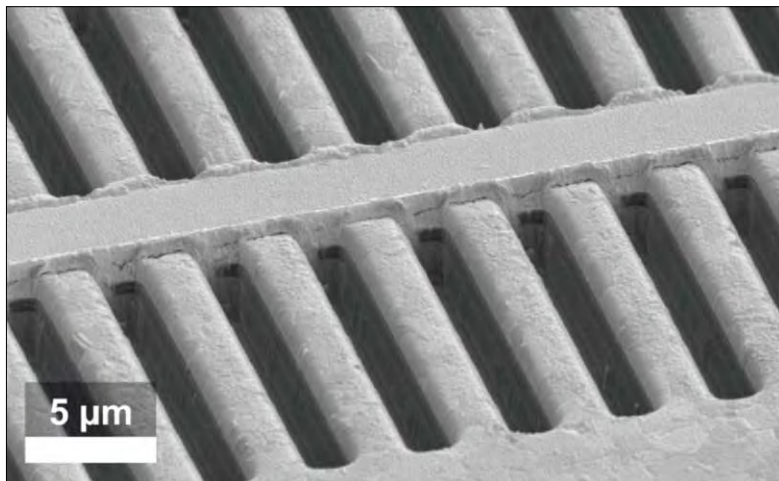


图2.在KAUST的激光二极管表面上制成的DFB光栅。使用表面光栅可实现单模输出，无需面对GaN激光器中过生长的问题。

SaNoor Technologies 和 SLD Laser 等公司推出了包含蓝色 GaN 激光器的白光光源，这是目前市场上的亮点。其变体也被嵌入至汽车中，由欧司朗芯片提供的激光头灯已经应用于宝马和奥迪的某些车型中。如果您浏览一下科学文献，您会读到许多篇有关激光特性的报告，这样特性令人印象深刻并且打破了可见光通信的纪录，让人不禁幻想未来要做的事情。

切换至另一种激光结构也是我们正在探索的方向，我们将会收获远高于迄今已知的数据速率。传统的 GaN 激光二极管有 F-P 谐振腔，会产生被称为 F-P 谐振腔模式的纵向模式。这种模式会导致发射一系列间隔紧密的波长，这在一些应用中是可以接受的。但是，这种激光结构没有使用在电信行业中，该行业采用波分复用，将光纤的数据传输能力提高了数百倍。波长复用的关键是单频或单模激光器。这是我们对可见光通信出路的探寻。

通过修改法 F-P 激光器（如图 1 所示），可以产生具有单纵模的单频光源。单模操作可以通过以下几种方式实现。可以引入外部元件和外部激光腔，例如安装在光具座上的棱镜，光栅和反射镜。但是最好避免移动部件，一定要实现在单个芯片上的单模自包含的技术而创建一个不受振动影响的紧凑型信号源。这种带有单片集成分布式反馈 (DFB) 光栅的器件利用衍射来确保是以特定频率反射至激光腔中的。激光器中使用的材料和光栅的几何形状决定了主导模式的频率。

InP 基 DFB 激光器被广泛用于长波长通信中，但在可见光谱中，尤其是在蓝光和绿光（使用 GaN 材料才能达到的范围），该激光器基本属于未开发的状态。实际上，GaN 基 DFB 激光器暂未商业化。

DFB 激光器的历史可以追溯到 1996 年。在其亮相一年后，德国斯图加特大学的研究人员要感谢这一突破，但不是为了实现单模激光而感谢，相反，他们引入了 DFB 解决激光腔中反射镜质量差的问题。当时，GaN 的硬度及其晶体特性使得研究人员无法劈开和蚀刻腔镜。

反射镜的制造问题已经解决，但是在处理 GaN 方面仍然存在困难。为了理解用于创建现代 GaN DFB 激光器的最新方法，需要理解这些问题。

为了生产 InP 激光器中发现的经典 DFB 光栅，工程师们将光栅嵌入了器件内部。这些埋入式光

栅是在刻蚀和第二层材料生长之前，由激光初始层形成的，其后的生长过程称为过生长。

这种制备光栅的复杂方法对 GaN 基材料有特殊的要求。日亚公司于 2006 年表示，即使在首次使用 GaN DFB 激光二极管产生连续波的过程中使用了埋入式光栅，但加工难度和过生长问题仍是巨大挑战。十年来没有进一步相关报告也可以佐证这一观点。

## 表面光栅

对光栅的重新设计要归功于 GaN DFB 激光器开启的新纪元。从埋入式光栅转换为表面光栅，为使用技术成熟度的材料打开了大门，这种材料被用于制造最新的紧凑型单频 DFB 激光器，其波长分别为紫色和蓝色（见图 2）。与埋入式光栅不同，表面光栅仅在激光器顶部形成，无需过生长，因此更易于制造。当您回顾 1996 年起那些详细介绍 DFB 激光器的论文，您会发现这就是当时使用的方法。但是直到最近才将制造和材料生长技术融为一体，探寻制造 GaN 基的单频激光器的可能。

单频可见光 DFB 激光器的用途超出了人们认为的超高速可见光的通信范围。例子一是即将实现的原子钟的小型化。其二是水下无线互联网，因为蓝绿色光谱域与海水透射窗口重叠。为了提高水下，地面和太空中的数据速率，可以建立一个系统，将 DFB 发射的激光与阳光的低强度波长，Fraunhofer 线相匹配，可以提高通信通道和环境传感器的信噪比。早在 1986 年，喷气推进实验室的研究人员就评估了 Fraunhofer 通道在空间数据传输中的应用。到 1992 年，美国海军指挥，控制和海洋监视中心的科学家们正在尝试将单频可见光 DFB 激光器应用于水下通信。在 2013 年，中国海洋大学报告了使用 Fraunhofer 线改善环境感知的实验结果。

可见光 DFB 激光器会在蓝色和绿色的未利用波长上产生单频发射，通过研究可见光 DFB 激光器来评估 450 nm 至 520 nm 的域（请见图 3）。在此光谱范围内制作激光二极管并不容易，因为材料质量下降，效率降低，通过增加器件关键层中的镓含量将发射光从紫色推向绿色。材料上的局限性解释了为什么 GaN DFB 激光器的工作波长至今还未超过 450 nm。

为了开辟新天地，我们已经将探索方向转向了适合原型设计的微加工技术。我们使用聚焦离

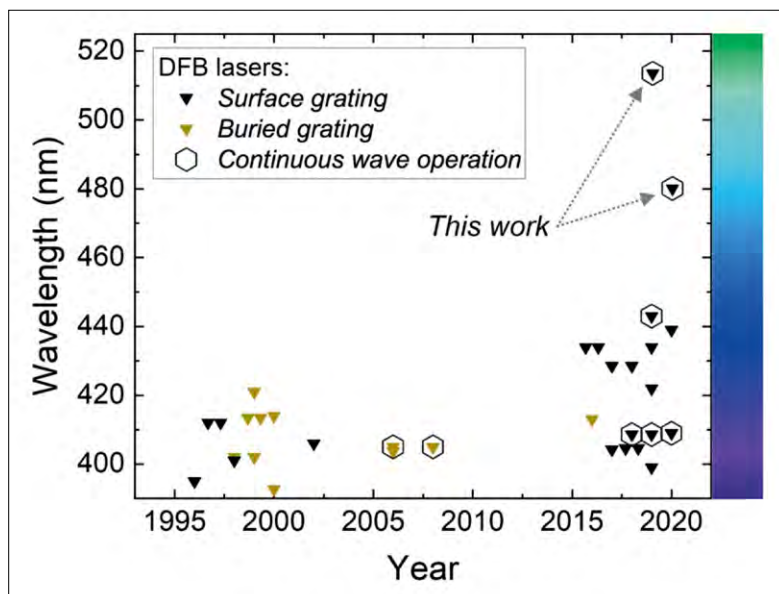


图3.随着表面光栅的增加，不同波长的GaN基DFB激光器的发展历史，包括KAUST在蓝绿色范围内对未探索波长的贡献。

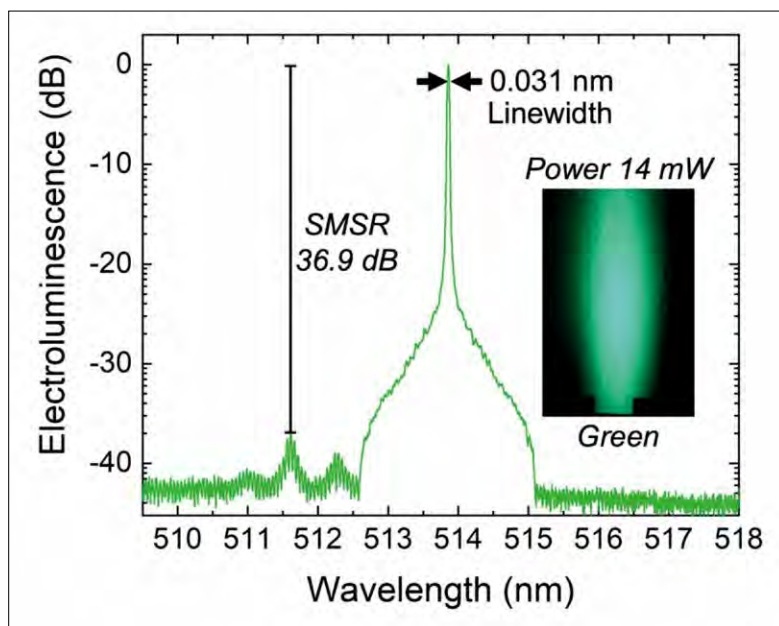


图4.绿色DFB激光发射在514 nm附近显示了分辨率受限的单模。插图显示了激光远场图案的真彩色图像。侧模抑制比 (SMSR)，线宽和光功率有助于评估DFB激光器的质量。

子束在新上市的激光二极管的顶部制作表面光栅。这些激光器的工作波长在 480 nm（天蓝色）和 520 nm（绿色）左右，对水下 LiFi 和低背景噪声系统也能适应。因为它们位于 Fraunhofer 谱线附近，特别是在 486.13 nm 处的 Hydrogen-beta 线和在 518.36 nm 处的 Magnesium-b1 线。

由于我们激光器中的光栅是基于高阶布拉格条件，因此间距相对较远，降低了制造的复杂性。如果将一阶光栅用于可见光激光器，则将需要高端电子束光刻，昂贵且耗时。

尽管高阶光栅有可能引起衍射损耗，但我

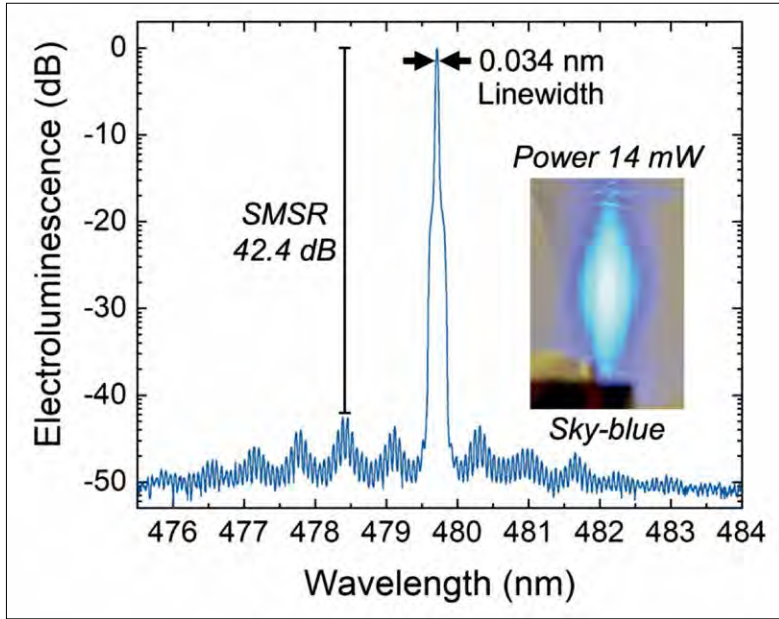


图5.天蓝色DFB激光发射在约480 nm处显示了分辨率受限的单模。插图显示了激光远场图案的彩色图像。侧模抑制比 (SMSR)，线宽和光功率有助于评估DFB激光器的质量。

们的器件仍然能够产生激光。我们展示了一款 513.85 nm 激光器，在室温下的输出功率为 14 mW，线宽为 0.031 nm，副模抑制比为 36.9 dB (图 4)。相比之下，经典的多模 F-P GaN 基绿色激光器，线宽为 0.540 nm，侧模抑制比为 0.2 dB。在

引入高阶 DFB 表面光栅之后，单模选择性提高了约 5000 倍，线宽降低了近 20 倍，成果喜人。

我们还打造了带有高阶光栅的天蓝色变体。这个 479.7 nm 激光器在稍冷的 16°C 室温下产生约 14 mW 的连续波光功率，线宽为 0.034 nm，侧模抑制比高达 42.4 dB (见图 5)。该线宽窄到足够在波长窗口中实现 25 至 30 个通信通道，而同等波长窗口仅能被单个传统激光器占用，而旁模抑制比意味着模式选择性约为 17,000，即单模激光比激光腔中的任意一种模式强数千倍。与它的绿色表亲相比，这种天蓝色激光器无疑是更好的选择，制造工艺更加优化，并且脊形波导宽度从 4 μm 减小到 2 μm。

在上述成功的基础上，我们研究了单模激光器在可见光中的通信能力，测试它们是否可以以超过 10 Gbit/s 的速度运行，这是 5G 以后网络的要求。我们使用的概念验证测试平台仅由最少的组件组成 (参见图 6)，我们首先考虑的是激光被打开和关闭的速度究竟能有多快。我们为天蓝色 DFB 激光器记录了一个相对平坦的调制响应，在 1.1 GHz 和高达 2.6 GHz 的情况下，其值分别为 -3 dB 带宽和 -10 dB 带宽 (见图 7)。

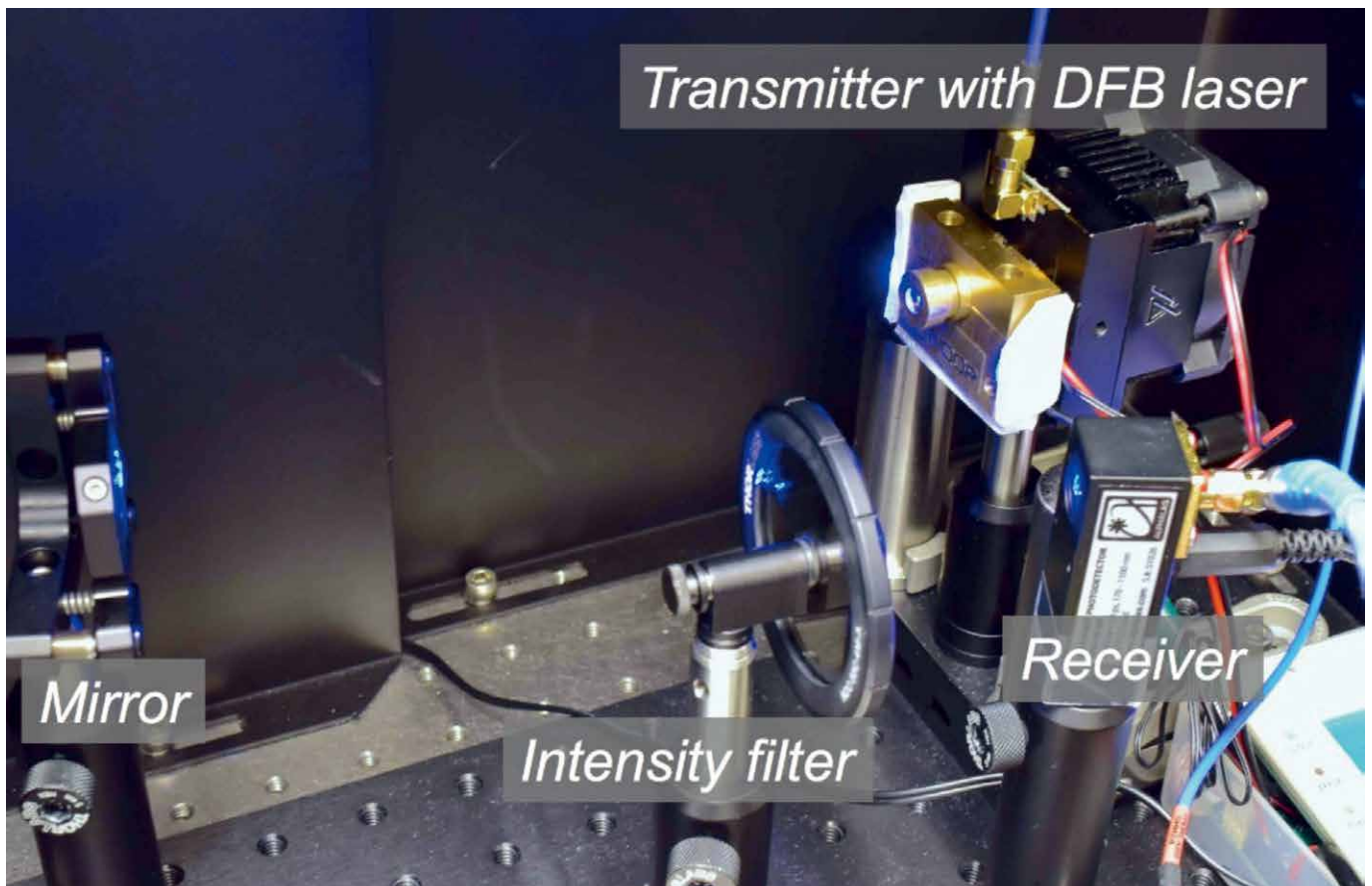


图6. KAUST的概念验证测试平台。使用GaN基DFB激光器的目标是超过10 Gbit/s。

这些数字表明我们的单模激光器为通信提供了大量实用带宽。与之形成鲜明对比的是，典型LED的带宽仅为几兆赫兹至数百兆赫兹。鉴于性能上的巨大差距，激光在可见光通信中的全速发展一点也不让人惊讶。

利用简单的不归零开关控调制技术，我们的DFB激光器达到了5 Gbit/s的传输速度。通过这种调制形式，开和关的状态提供了二进制信息。我们使用称为眼图的图表来可视化接收到的信号（请参见图8）。在此图中，上方和下方的色阶代表数据的二进制性质，清晰度越高，无线通信的质量越高。

为了充分利用调制带宽，我们将目光转向了一种称为16正交幅度调制（QAM）正交频复用（OFDM）的调制技术。OFDM技术采用正交和重叠的子载波，这些子载波采用16-QAM OFDM来提高频谱效率和传输速率。

我们使用星座图来评估接收到的16-QAM OFDM信号的质量（参见图8）。明显分开的数据点代表接收到的数据几乎没有错误。我们的DFB激光器就是这种情况，它提供高达10.5 Gbit/s的数据传输。相关的误码率为 $2.3 \times 10^{-3}$ ，低于前向纠错极限 $3.8 \times 10^{-3}$ ，这是数字通信领域的既定标准。

这一成功代表了应用在光学通信的可见DFB激光器的最新技术。为实现多个紧密相邻的波长提供了一个小而关键的步骤，但这仅仅是开始。通过模仿光纤通信中采用的方法，我们有可能将当今的10 Gbit/s传输速率多路复用十倍或更多。

我们在前进的过程中可以看到，可以看到单频DFB激光器阵列为水下传感器和机器人，耐日光卫星通信和智能自动化工厂中的无线互联网提供了多种信息通道。

下一步是将这些成果从概念验证阶段落实到批量制造阶段，这也是工业应用的前提。令人鼓舞的是，制造材料的联合工艺已经被商业化广泛接受，但可能需要更强的市场推动力。

另一个考虑因素是验证GaN基DFB激光器的线宽。在我们的研究及其他科学文献的报告中，是使用光谱分析仪测量线宽。但是该设备的分辨率有限，无法真正反映出激光的线宽。

尽管如此，GaN基DFB激光器正在变得越来越成熟，并且很快就可以部署到原子钟和环境传感器等应用中。不仅如此，专注于Fraunhofer线，就有机会进行新的尝试。我们的本地测量结果表

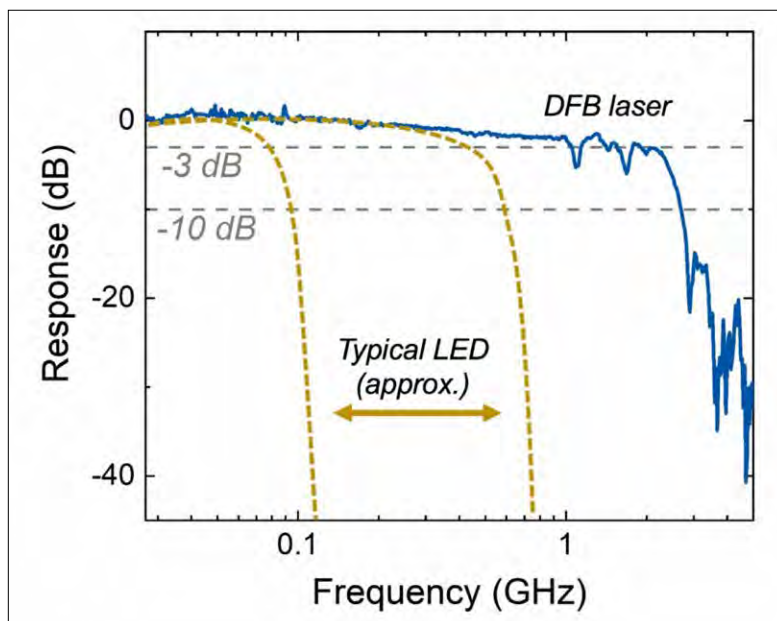


图7.天蓝色DFB激光器的高速调制带宽与典型LED的近似带宽的比较结果（范围从大功率LED到更快的micro LED）

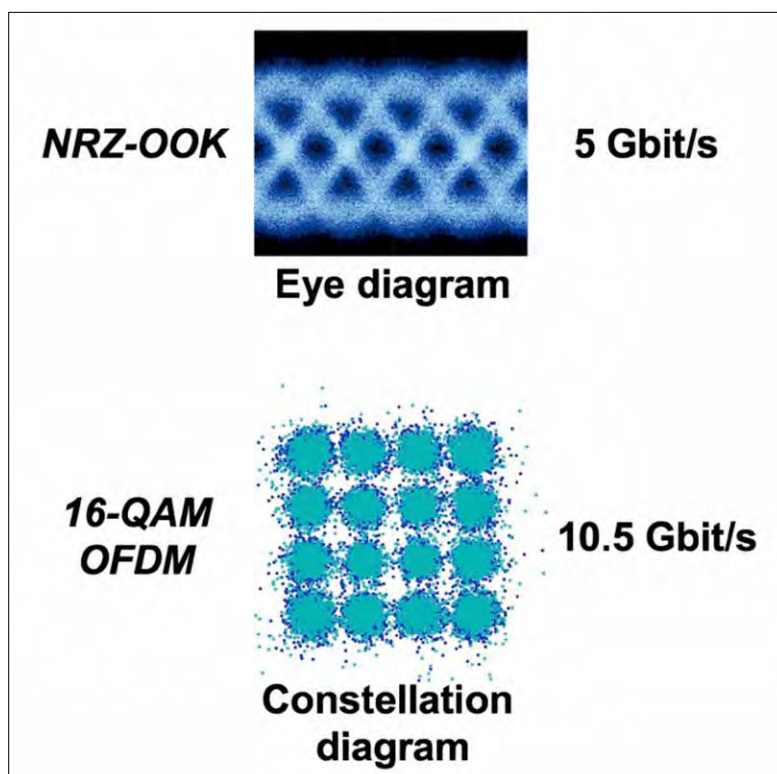


图8.数字通信可以根据其调制格式直观地表示出来。该图显示了DFB激光产生的眼图和星座图。

明，在这些波长下从背景辐射中消除了数个dB。在天蓝色和绿色区域附近也存在未开发的DFB波长，可以增强各类工具，例如应用于水深测量和水下光学无线通信的工具。此外，窄线GaN基DFB激光器有望为基于Förster共振能量转移的生物传感器提供活细胞成像。显然，这种可见的单模激光器的未来一片光明。☞



## 评估 SiC MOSFET 和 SiC IGBT

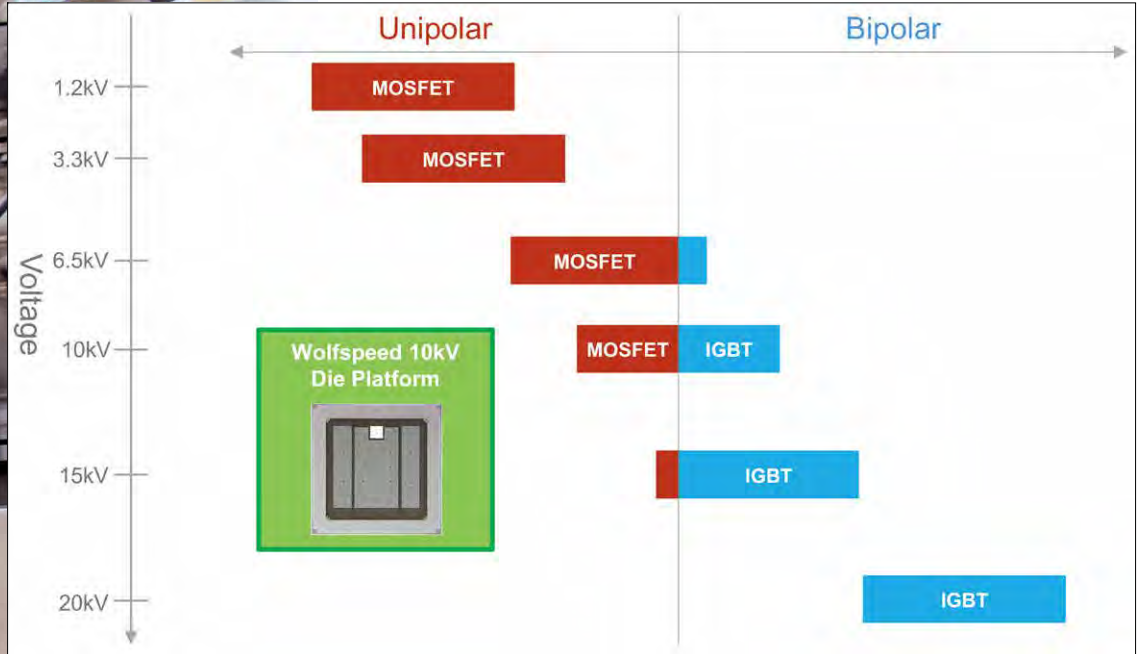
SiC IGBT 的电流比 SiC MOSFET 高，但需要与结势垒二极管配对，它是否会在中压应用中得到重要部署？

EDWARD VAN BRUNT, 科锐公司 WOLFSPEED

**研**究人员对 4H-SiC 高压功率器件的痴迷程度几乎与高品质单晶材料在市场上出现的时间一样长。虽然电力行业倾向于关注需要额定阻断电压为 1200V 及以下的器件的应用，但高效的 4H-SiC 中压功率器件（大致在 3.3kV 至 10kV 范围内）的前景正在继续推动这一电压区间器件的发展。

中压电机驱动、铁路电力传输和可再生资源直接并网等应用，对在这一电压区间内工作的 4H-SiC 器件的兴趣越来越大。一个良性循环正在进行，这种兴趣推动了对 4H-SiC 中压晶体管的更多研究，重点是提高采用这些新型功率器件模块的额定电流。





### 向双极性转换

在 4H-SiC 中切换到双极性功率器件的过渡电压并不是基于一个特定的数字或截止标志。相反，它取决于性能，以及对成熟的单极、双极 SiC 器件相关优缺点的综合考虑。MOSFET 的速度很快，所以对于低压应用来说，它们将一直是最佳选择。但在超高电压下，IGBT 则是首选，因为其较低的传导损耗盖过了他们慢速的缺点。因此，在频谱的两端，理想的解决方案是明确的。但中间区域在 IGBT 和 MOSFET 之间做选择则复杂得多，那该怎么办呢？

如果我们进行“包络线计算”来确定 4H-SiC 单极 MOSFET 和双极 IGBT 之间的分界线的额定电压，并且从硅中获取一点，我们得到的数字是 6.5kV，这是硅功率器件开始从 IGBT 中获益的电压的 10 倍。不过，6.5kV 可能还有点低。SiC 的单极电阻比硅低 200 倍，而不是低 100 倍；SiC 结电位为 2.7V，而硅为 0.7V；并且技术成熟度也大不相同——硅 IGBT 现已进入第七代，而 SiC IGBT 仍是一项在研发中的技术。因此是存在许多干扰因素的，这也说明需要更深入的分析来了解哪里是边界。为了搞清这一点，我们选择了一种经验法，制造了一个 10 kV 4H-SiC IGBT，并将其性能与我们现有的 10 kV 4H-SiC MOSFET 进行了比较。

我们的 10 kV SiC IGBT 是同类产品中的第一个。设计该晶体管时，除了漏极 / 集电极以外，我们使用与 10 kV MOSFET 完全相同的掩模布局

图1.随着阻断电压的增加，SiC IGBT 提供了比 SiC MOSFET 更合适的特性。

众所周知，在硅世界中，提高功率半导体器件额定电流的一种选择是从单极功率器件转换到双极功率器件。这种转换就是从 MOSFET 到 IGBT 的转变，SiC 正在经历这一过程，而其成功所需的时间比硅更长。早在 2014 年，我们 Wolfspeed 的团队就率先推出了稳定的双极 4H-SiC 功率器件，并在 2018 年获得了 3.3 kV 和 10 kV MOSFET 的双极漂移的鉴定结果，从而清除了中压 4H-SiC 功率器件商业化的最后一道门槛。

在扫清了所有的技术和可靠性障碍后，剩下的主要问题是：哪种器件结构更适合中压应用，是 MOSFET 还是 IGBT？事实证明，答案并不那么明确，就像硅功率器件一样。

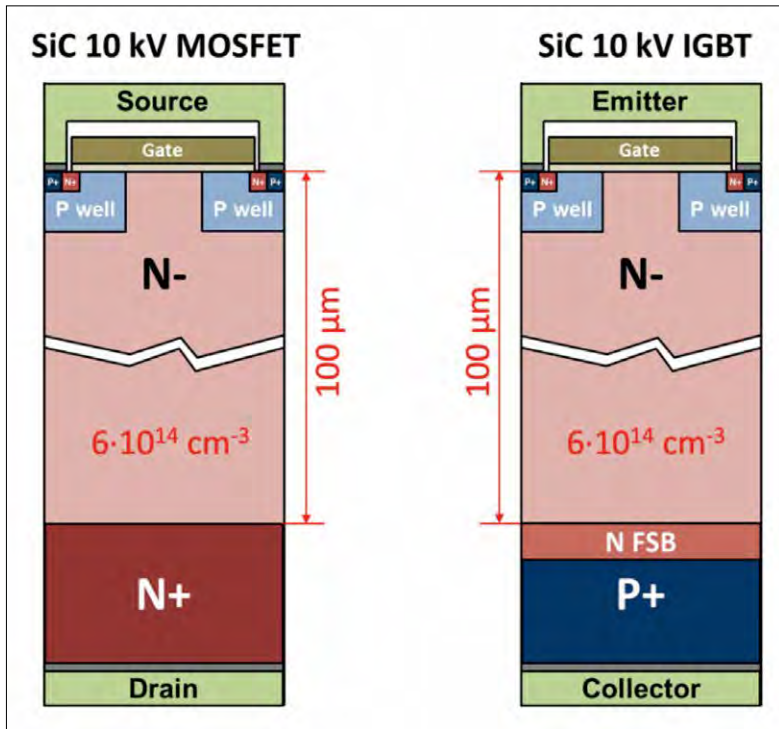


图 2. Wolfspeed 的 10 kV IGBT 采用与 10 kV MOSFET 完全相同的掩模布局和阻断层生产，但漏极 / 集电极除外。

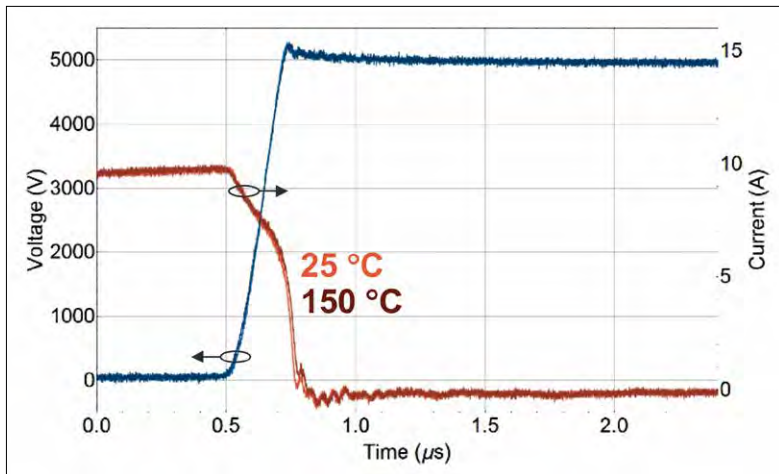


图 3. 开通 (红色) 和关断 (蓝色) 的速度由与 SiC IGBT 一起使用的反并联二极管的电容决定。

和阻挡层。如预期的一样，它产生了同样的阻塞性能；但与 10kV MOSFET 相比，10 kV IGBT 温度系数略为负并且有着高得多的直流电流容量，它能传递  $220 \text{ A cm}^{-2}$  的电流，而 MOSFET 仅为  $70 \text{ A cm}^{-2}$ 。此外，正如预期的那样，IGBT 的开关损耗较高，几乎增加了 15 倍，这主要是由于大量存储电荷和高发射极效率。值得注意的是，IGBT 的电压随时间变化非常可控 ( $dV/dt$  约为  $12 \text{ kV}/\mu\text{s}$ )。以这种方式操作，消除了高压 SiC 器件由于速度极快而诱发不可控制的电磁干扰的问题。另一个关键的考虑因素是，IGBT 不像 MOSFET 那样内置反并联二极管，因此在评估这些器件时，必须

考虑的不仅仅是开关本身。

### 看看反并联二极管

4H-SiC MOSFET 体二极管的特点之一是它的发射极注入系数很弱，这在开关损耗方面是一种优势。这意味着 4H-SiC MOSFET 具有高质量的内置反并联二极管，可以用作开关，而不像硅超结 MOSFET 那样存在很高的开关损耗。

4H-SiC IGBT 没有内置反并联二极管。因此，必须增加一个额外的反并联二极管，这就是 4H-SiC JBS 二极管的作用。我们制造的 JBS 二极管具有与 MOSFET 相同的漂移区，但有效面积稍大一点，并通过完全的单极机制传导电流。

4H-SiC MOSFET 的内置反并联二极管和 4H-SiC JBS 二极管都能提供高速和低开关损耗。JBS 二极管的开关速度快得惊人，MOSFET 只能排在其后，由于发射极较弱，其存储电荷略高；并且 JBS 二极管的导通损耗为  $11.3 \text{ mJ}$ ，而 MOSFET 体二极管为  $13.5 \text{ mJ}$ 。但是，在额定电流较高的情况下，MOSFET 体二极管则更胜一筹。基于这些特性，MOSFET 体二极管应该被看作是大功率二极管，它将高额定电流与开关性能相结合，而该开关性能对 IGBT 的贡献很小。

### 哪个更好?

上述特性 (孤立地看) 能让人有一个大致的了解。然而，要想更全面地了解情况，需要一个模型应用来确定 10 kV 4H-SiC IGBT 可能比 10 kV MOSFET 更有优势的标准。

10 kV 4H-SiC 器件的一个领先应用是中压电机驱动器，特别是在  $4160 \text{ V}$  下运行的系统。这些中压电机驱动器的用途包括能源生产、工业制造和运输中的执行重要任务。基于 10 kV 4H-SiC 器件的电机驱动器有望在减小尺寸和重量的同时提高这些系统的效率。鉴于这些机会，我们选择了一个三相逆变器来为我们的 4H-SiC MOSFET 和 IGBT 器件损耗建模。

如果你有一个模型应用，它拥有  $5 \text{ kV}$  母线电压在不同工作电流下的各种开关数据，你就可以使用这些数据点连同电流 - 电压曲线，为一个应用中的整体损耗建模。值得注意的是，MOSFET 自带二极管。尽管 IGBT 会让有源开关输出更高的电流，但根据这个特定模型的数据，它需要额外的  $0.64 \text{ mm}^2$  二极管 (设计人员将需要一个

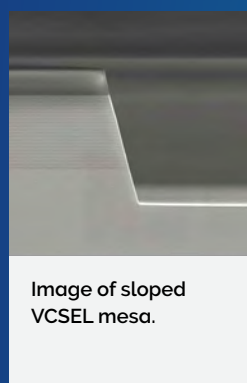
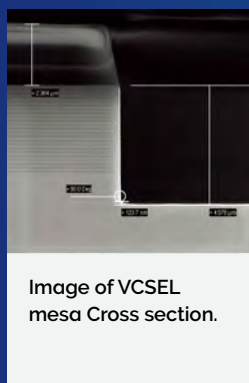
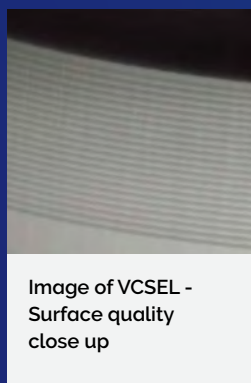
下转第26页

# High yield VCSEL manufacturing solutions



**SEMICON<sup>®</sup>  
CHINA**  
欢迎莅临 N2-2213

- Precise control of fabrication process leading to superior control of electro optical performance
- High Productivity resulting from maximised yield and throughput at 150 mm wafer size
- Unique Plasma capability to deliver reliable performance





## LED 投影的新水平

投影仪得益于发光技术，它将强大的蓝色和红色 LED 与基于荧光激发的绿色光源结合在一起。

ALEXANDER MARTIN， 欧司朗光电半导体公司（OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS）

**如**果你参加了像今年拉斯维加斯消费电子展这样的展会，你就会知道，当你想向你的同事推荐时，你有很多种放映技术选择。先进制造商们正展出他们更大、可扩展甚至可折叠的屏幕，这些屏幕基于 OLED 或 micro-LED 技术。

但很不幸，这两种技术都有一个很大的问题——就是屏幕越大，价格越贵。对于以 microLED 技术来说，还有一个难题 - 负担得起的高通量批量生产的挑战，这些屏幕的制造商将在未来几年内尝试解决这一挑战。

当屏幕技术的发展占据新闻头条的时候，现代投影技术的进步却常常不被重视。很多人都会忽视 LED 投影所取得的长足进步，如今它们能提供比传统 LCD 和 OLED 屏幕更高的亮度，成为其可行的替代选项。为了让观众能看清演示文稿

而不得不将会议室变暗的日子早已一去不复返了。

LED 投影仪相较于 LCD 和 OLED 屏幕的另一个优势是它的灵活性。通过这种技术，能缩放尺寸的图片可以投影在任何刚性或柔性表面上，从而释放出空间。

在德国雷根斯堡（Regensburg）的欧司朗光电半导体公司，通过将一种新的 LED 技术进行开发和商业化，使基于这种光源的投影仪能够实现超过 3000ANSI 流明的破纪录亮度水平，从而为这一类投影仪的商用贡献了力量。这种亮度水平适用于大型投影市场，如办公室和家庭影院的投影仪。

我们的努力为投影仪制造商提供了一个更优越的选择，以替代他们现有的照明光源，即传统高亮度汞灯。随着对高亮度、高可靠光源需求的增长，激光成为理所当然的接替者。最近，激光器性能

的改进使其成为汞灯优质成熟的替代品。其较长的寿命和亮度水平不会随时间降低的特性增强了它们的优势，这些恰是传统照明技术的又一短板。

随着激光成为有前途的潜在候选者之时，LED 已开始成为一个有竞争力的替代者。几年前，第一台微型投影仪的推出，宣告了 LED 投影仪的初步成功。当时它们只有 15 流明的亮度，与现在 LED 投影仪所能提供的 4000 流明亮度而言就是小巫见大巫了。除了亮度强，LED 及激光所占用的空间也非常小，也是投影仪设计者高度重视的一个特性。

### 汞灯 vs LED

判断图像质量的方法之一是考察其颜色范围。常规的投影仪通常使用白光光源，其原色是通过机械驱动的色轮产生的。由于机械运动部件和高强度汞灯的体积较大，这些投影仪需要相对较大的光引擎架构。此外，它们也不是那么坚固。

高强度放电汞灯的另一个缺点是，在投影仪的使用寿命内需要多次更换它。因此，投影仪必须设计成让人容易接触到光源。

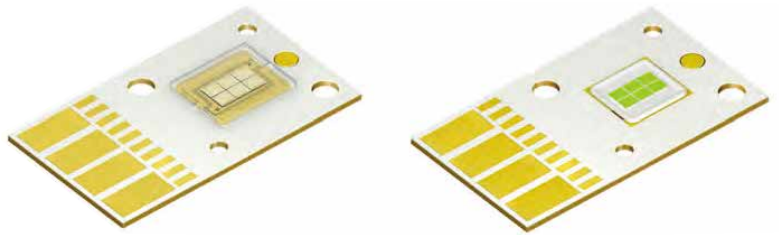
使用 LED 有许多好处。它们能提供差不多的亮度，但结构更紧凑，使用寿命也更长，并且由于直接产生有色光，它们能展示出更强烈、更丰富的色彩，即一个 LED 用于红色，另一个用于绿色，第三个用于蓝色。由于这些光源的使用寿命长，因此不需要定期更换它们，从而可以更好地密封投影仪的外壳，隔绝灰尘和湿气等外部影响，从而延长投影仪的使用寿命。所有这些因素，让 LED 投影仪更加紧凑，系统设计也更为简单。

此外，LED 的另一个优点是，与高强度放电汞灯不同，它不含有毒的汞，而且它几乎可以立即开启，而传统的灯可能需要很长的“预热”时间。

我们长期以来一直在开发和制造应用于投影仪的光源。我们广泛的 LED 产品组合使我们能够帮助客户开发屏幕亮度值从 15 到 3,000 ANSI 流明的投影仪。为了满足如此广泛的需求，我们的产品系列包括为那些以电池为电源的投影仪提供最佳效率值的产品，和那些可以在非常高的电流密度下工作（高达 6 A/mm<sup>2</sup>）以实现巨大亮度的产品。

### 不同的 LED 设计

大多数 LED 制造商没有花很长时间就开发



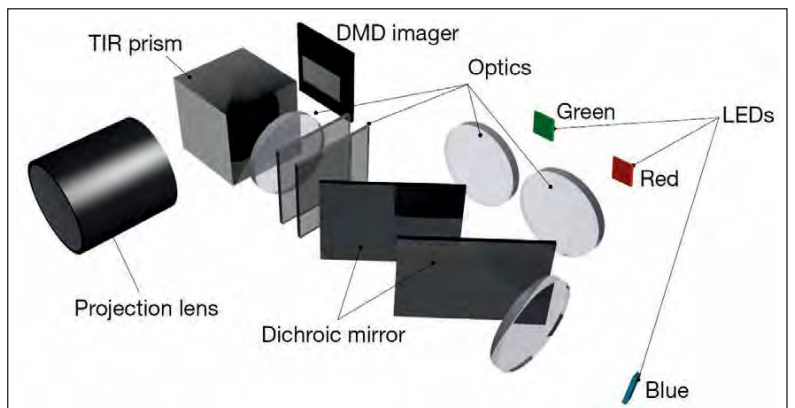
出了亮度值可以接受的红色和蓝色 LED。但真正的挑战一直是绿色表亲。正是所谓的“绿色差距”，损害着效率和亮度。这是一个重大缺陷，因为绿色是对白光投影仪亮度而言最重要的颜色。部分原因是在标准 D65 白点下，投影仪的绿色部分提供了大约 80% 的亮度，而红色部分只提供了 15%，蓝色部分更只有 5%。另外，人眼在色阶的绿色范围内灵敏度最高。

为了避免与“绿色差距”相关的问题，我们开发了具有“绿色转化技术”的 LED。在这些器件中，借助特殊的荧光粉将蓝光转换为绿光。这样就使亮度和效率得到了提升。

我们的工程师发现，这种色彩转换技术在单一的蓝色 LED 芯片上并没有发挥出最大的亮度。因此还有获得更大亮度的可能。为了利用这一点，除了三色设置外，我们还将另一块蓝色 LED 芯片集成到系统中，该芯片将更多的蓝光泵入转换后的绿色 LED 的转换器中。这种四通道概念构成了当今 LED 投影仪的技术基础。

除 LED 外，投影仪的光引擎还包含光学器件、反射镜和数字微镜装置。将这些组件组合在一起会形成一个复杂的结构，设计师需要考虑它们之间的所有相互作用。如果要提高系统效率，则必须考虑所谓的集光率——这是一个物理常数，它描述了光学系统内光线传输的几何范围。LED 最大发光面积由各个系统参数（例如接收角度和成像器的尺寸）确定，并且不能增加以达到更高的流明值。

一种带有数字微镜装置和单片红、绿、蓝 LED 芯片的投影仪系统。



欧司朗的Ostar投影电源系列是专为用于办公和家庭影院的投影解决方案而设计的。



为了实现更高的效率和可实现的更高亮度，投影仪的设计者必须努力匹配光源和成像仪的集光率。这么做的核心目标是在数字微镜设备的受光面上容纳尽可能多的光线。值得庆幸的是，我们在LED技术上的进步为这些努力提供了帮助，为投影仪亮度的提高奠定了基础。

### Ostar 的投影能力

在大功率、多LED芯片器件中，为了产生一个光源，常见的做法是将单个芯片焊接到金属芯PCB上，以并联的方式驱动各个芯片，从而使电流均匀分布在各个芯片上。例如，要用6个芯片产生预期的投影仪亮度，每个芯片需要约8A的电流，因此总共需要48A的电流。这样的缺点是，需要昂贵的专用驱动器来提供极高的电流，还需要直径巨大的电缆来承受它们。

在现有芯片技术已经达到最大驱动电流的情况下，我们决定开发一种具有更高的电流能力的新芯片技术。它应用于欧司朗Ostar投影电源产品系列中，其全新的拓扑结构能够极大地提高LED投影仪的亮度。今年早些时候发布的这个产品组合，具有三色一芯片、二芯片、四芯片和六芯片四个版本，可分别使投影仪达到750、1500、2500和3000 ANSI流明以上的亮度。这些器件是当今LED投影机的理想选择，它得益于我们的红、绿、蓝三色发射器，以及深蓝色版的泵浦绿色转换器。

该产品系列的核心创新点是采用全新封装设计的革命性芯片技术。它允许单个芯片串联，而不是并联。这种配置大大降低了整体驱动电流，不再需要像前几代LED技术那样在金属芯PCB和LED芯片之间设置一个特殊的绝缘层。此外，我们的技术还简化了光引擎的电气驱动、电气隔离和热管理，并降低了冷却系统的噪音，从而为产品设计人员提供了帮助。例如，驱动一个六芯片的引擎不再需要48A的电流，而只需要10A。得益于这降低的电流，光引擎的制造商可以使用更便宜的驱动结构和插头等连接技术。

随着投影仪的成像元件变得越来越小，这些产品也变得更加紧凑。模组尺寸得以缩小，或者说，节省下来的空间可以用来集成其他功能，如高品质的音频器件。在传统投影仪系统中，会存在一个即使不使用也要永久挂在墙上的平面幕布，以及一个占用额外空间的音响系统。如果便携式投影仪配备了集成的音频功能，那么家庭影院的体验不仅更加灵活，而且对最终用户来说也更加易于使用。

一个需要改进的地方是，当今投影仪中LED产生的1万多流明光线，其中只有约3000流明到达了屏幕。解决这个问题将有助于加速投影仪向LED芯片技术的转换，而这种技术正越来越受到关注。毋庸置疑，基于LED的投影仪将有一个光明和创新的未来。OS



## 新开关技术的评估

转向宽带隙技术需要的不仅仅是零件数量的改变。需要一种同时考虑设计的各个方面的系统方法

STEFAN OBERSRIEBNIG, 英飞凌

**晶**体管无处不在。它们存在于我们的手机、平板电脑和个人电脑等电子设备中，是集成电路的关键组成元件，每种器件都针对特定功能进行了调整，例如快速转换或低的工作电压。晶体管也以分立的形式出现，用于功率转换应用中。在这里，还需要优化，随着产品种类的不断增加，这项任务也变得更具有挑战性。但是，选对

了合适的优化方式，将会获得比以往更大的回报。

功率晶体管范围的扩大是在“超越摩尔”的背景下发生的，在这个时代下，新材料的使用提供了进一步提高性能的新途径。这段时间里我们了解到，最新的制造节点不一定能提供最优的解决方案；相反，更谨慎的做法可能是为每个功能选择适当的节点并在模块化水平上进行集成。

当涉及到分立晶体管技术，特别是高功率应用时，可选择的扩展方式来自于新材料的引入。可以认为，目前所具备的技术，即硅、碳化硅和氮化镓所走的道路可与集成数字晶体管相媲美；每一个新步骤都是对上一步骤的线性改进，而且应该毫无疑问地被作为正确的替代方案而采用。但这是一种错误的认识。现实是更加微妙的，最佳解决方案依赖于将通过“超越摩尔”的开发所汲取的教训应用于功率领域。我们不能在没有首先进行细致的检查的情况下就简单地把最新的技术看作是最好的。当工程师这样选择时，他们需要考虑到与设计相关的许多方面，以便他们能够选择出最适合各自应用的技术。

对于硅、碳化硅和氮化镓功率电子器件的制造商来说，功率转换和功率管理是最大的两种应用。基于常见开关电源的变化，许多器件都部署在转换拓扑中。基本的开关电源利用了晶体管快速和精确开关的能力，其变体可通过操纵特定的特性以在特定条件下提供更高的效率。新的宽带隙技术凭借更快的开关频率和更高的功率处理能

力，使开发这些拓扑的创新方法成为可能。

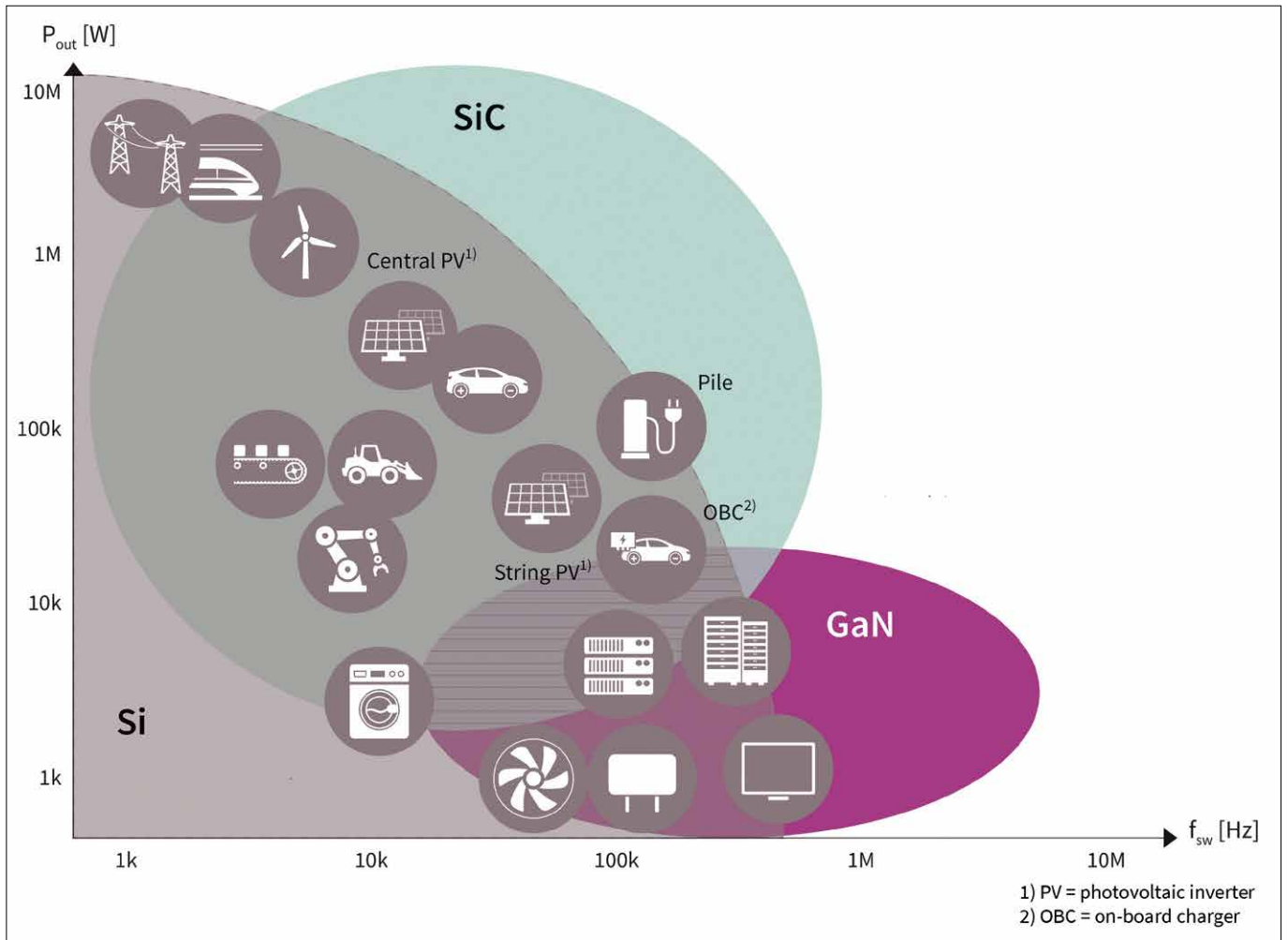
人们经常忽略的是，即使不改变开关频率和开关时间，用更宽的带隙的器件替代硅器件仍然可以带来改进。这些增益与特定的特性有关，例如碳化硅 MOSFET 的集成体二极管，这些二极管可以在同步整流设计中代替常规二极管。

碳化硅 MOSFET 体二极管的优点包括小到可以忽略的反向恢复电荷和导电时高的正向压降，这消除了限制硅器件开关频率的能量积累。碳化硅的开关特性是其可提供更高转换效率的坚实后盾。

目前使用的开关拓扑有许多不同类型，包括逆变器、有源钳位反激式转换器和相移桥拓扑。这种多样性不太可能改变，因为每个拓扑都有自己的优点。

当设计者在选择一种拓扑结构时，他们的决定往往是受应用需求主导，而不是理想的衬底。由于决策过程中的这种层级结构，氮化镓并不总是有高电压和高电流需求的应用的最佳选择。理由是，虽然在实现硬开关时，氮化镓在半桥拓扑结构方面优于硅，但碳化硅在软开关和谐振开关

图1:主流的硅器件在碳化硅和氮化镓的补充下可以提供更高的转换效率和功率密度。







Wolfspeed®

A CREE COMPANY

W O L F S P E E D  
**WOLFPACK**



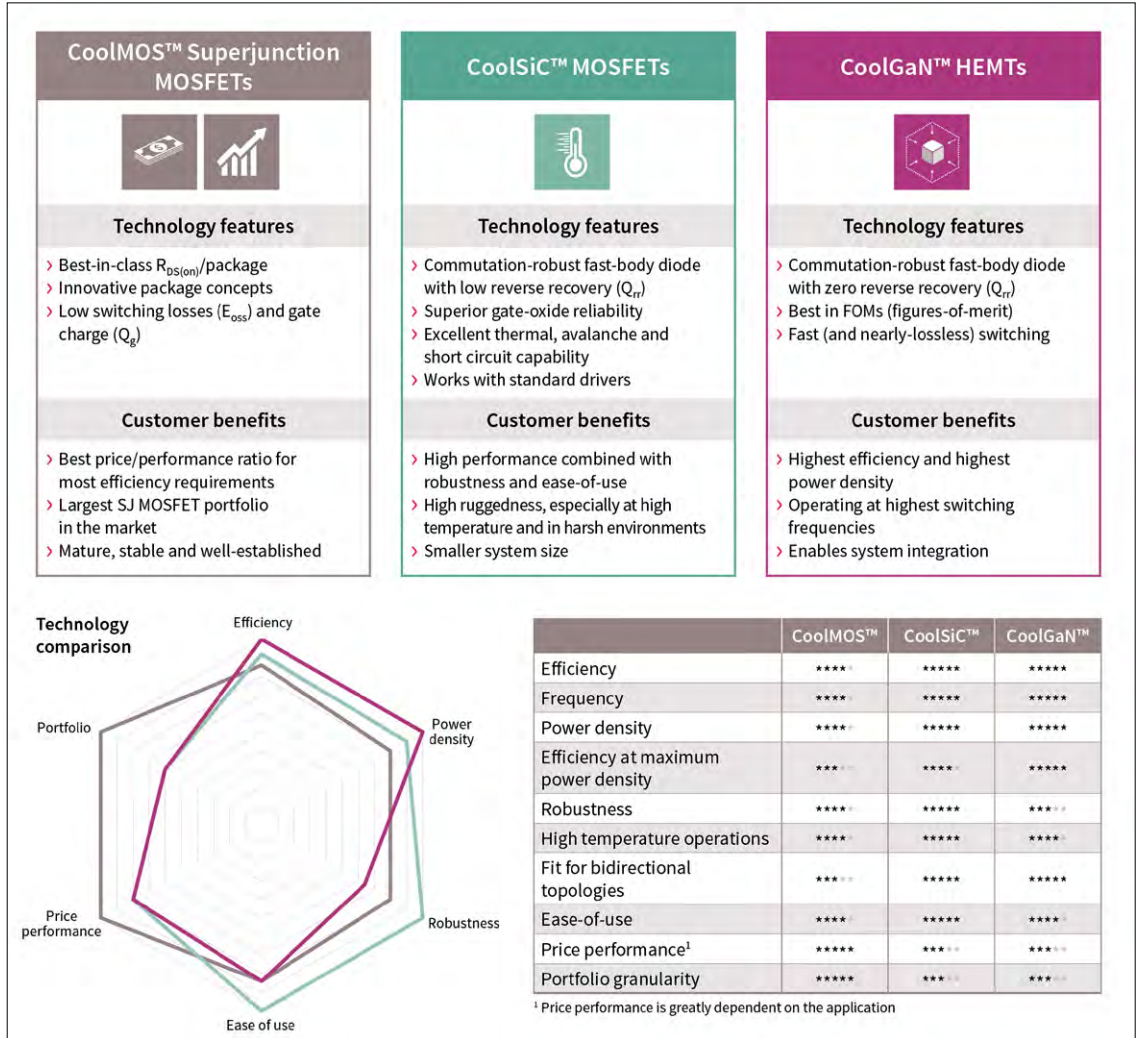
**提供更高电流**  
**实现更快产品面世速度**

Wolfspeed 所有 SiC 模块目前均可提供  
半桥与六合一配置

[wolfspeed.com/cschina-wolfpack](http://wolfspeed.com/cschina-wolfpack)



图2:不同功率开关技术及其应用领域。



拓扑结构方面更占优势(参见图1,目前可用的半导体技术对几个关键应用的适用性评估)。

随着像电动汽车和可再生能源这样的新应用的出现,以及像数据中心和蜂窝电信等现有应用的不断发展,需求已不仅仅是更高的功率。取而代之的是,需要在不同的电压水平,电流,稳定性和响应时间下,以相同或较小的外形尺寸提供更多功率。这一系列的要求给电源开发人员带来了不小的压力,他们可能需要去探索新的拓扑结构。然而,这些需求也为评估满足这些需求的新晶体管技术提供了机会。

在一个高的水平上,去考虑所有类别的晶体管技术的特性,将会有很多收获。通过这种方法,我们可以全面地了解到它们各自的优点,并在一定程度上解释了为什么行业会追逐它们的发展。

**晶体管的特性**

英飞凌是一家致力于电力电子行业的跨国器件制造商,我们投入了大量的时间和精力去开发

一系列基于硅、碳化硅和氮化镓的器件和相应的驱动技术,以最大限度地发挥每种材料的潜力。

我们可以就哪一种技术将提供最佳的性价比给出一些建议:它可能是硅;在某些高功率应用中,它可能是碳化硅;而在其他情况下(例如在需要高频设计的情况),氮化镓可能会提供最佳性能,从而使其成为正确的选择。

我们拥有丰富的创新历史,包括超级结技术的发明以及世界上第一个碳化硅肖特基势垒二极管的推出(在上图2中,我们以图表的形式展示出了每种半导体技术在功率晶体管方面的适用性情况)。

根据我们的经验,对硅基功率器件的需求仍然很大。对于许多应用来说,它仍然是最好、最合适的技术,并且它已经达到了一个成熟的水平,这使得它在成本方面具有很大的竞争力。虽然在某个时期,普通硅器件似乎快达到了它的应用极限,但是超级结技术的引入为硅技术再次注入了新的生命,进一步降低了其导通电阻。这导致了

我们可以就哪一种技术将提供最佳的性价比给出一些建议：它可能是硅；在某些高功率应用中，它可能是碳化硅；而在其他情况下（例如在需要高频设计的情况），氮化镓可能会提供最佳性能，从而使其成为正确的选择。

开关损耗的减小，使得这类器件能够在高电压、高功率应用中继续发挥作用。

当碳化硅器件被推出时，它使晶体管在给定区域的导通电阻降低了三倍。另一得益于其有更宽的带隙所带来的优势是，它能够使器件处理比普通硅器件所能承受的高得多的电压而不被击穿。

最近，氮化镓也加入到了竞争中，它的带隙与碳化硅非常相近。然而，它的晶体管结构与碳化硅 MOSFET 和超结器件有着很大的不同。氮化镓基场效应晶体管（GaN FETs）的特点是具有一个非掺杂层，这增加了其电子迁移率，进而具有更低的导通电阻。

乍一看，从硅到碳化硅，再到氮化镓的导通电阻的依次降低表明，后者始终是功率转换的首选解决方案。然而，尽管晶体管所采用的材料类型决定了它的优势所在，但在相同的工作条件下，每一类器件所表现出的特性是不同的。因此，当氮化镓用于实现连续导通模式的拓扑结构时，它只能在特定负载条件下提供比硅 MOSFET 更高的转换效率。所以，当设计者做出选择时，他们必须综合考虑这种技术在所有工作条件下的表现如何；他们不应将任何两种技术视为彼此的替代品。

考虑到上述因素的影响，设计者必须要评估不同类型的功率转换器电路中碳化硅、氮化镓以及硅基 MOSFET 和超结器件的性能差异，因为适用于一种应用形式的好方法往往在另一种应用形式中不一定同样的适用。因此，最好的结果并不是简单地对一种宽带隙技术进行标准化，因为这不会使得所有应用形式的效率都得到提高。

我们在提供由硅、碳化硅和氮化镓制成的行业领先器件方面处于令人羡慕的地位；我们可以利用我们的系统专业知识在客户的每一代应用中为他们提供支持。这使我们能够为最合适的拓扑结构提供最好的技术支持，无论是硅、碳化硅还是氮化镓，都使我们成为了一个出色的功率设计合作伙伴。我们可以就哪一种技术将提供最佳的性价比给出一些建议：它可能是硅；在某些高功率应用中，它可能是碳化硅；而在其他情况下（例

如在需要高频设计的情况中），氮化镓可能会提供最佳性能，从而使其成为正确的选择。

值得注意的是，正确的选择决定并不是一成不变的。碳化硅和氮化镓仍在不断发展当中，同时考虑用于功率转换的驱动技术也是至关重要的，因为最好的晶体管和最好的驱动匹配在优化设计中起着非常重要的作用。

### 功率集成

每种应用都有着自己独特的要求，这些要求决定了正确的拓扑结构形式，进而也决定了最合适的半导体技术。然而，也有更多集成的解决方案的趋势，它将晶体管和驱动组合成模块化解决方案。与超摩尔技术汇集最合适节点以达到给定功能的设计方式大体相同，功率模块也开始简化具有相似要求的各种应用的功率设计。

半导体行业正在朝着模块化的高度集成迈进。这在无线通信领域已经很明显，整个无线系统与控制器紧密集成在一起，从而使最终设备可以轻松通过认证。在许多情况下，无线模块是经过预先认证的，因此使其成为“即插即用”解决方案。在功率系统领域中，类似的趋势正在发生着，并将不断继续下去。凭借着开发高质量集成功率模块并将其推向市场所需的产品组合和经验，我们已做好了应对这种变化趋势的准备。

功率模块的优点并不局限于简化客户的设计过程。通过优化设计，我们还提供了两个主要的性能优势：与分立元件相比，尺寸减小了，从而以“无额外成本”获得了更高的功率密度；更高的效率是功率转换的首要要求，也是宽带隙技术发展的关键驱动因素之一。

使用模块也有实际的好处。工程团队要实现高水平的转换效率并非易事，因为他们在选择可以提供最符合其目标用途的性能曲线的设计时，需要了解电源在所有可能的工作模式下的运行情况。对于分立器件，这可能是一个迭代过程，不能保证结果在所有工作条件下都能提供最佳效率。通过转而使用功率模块，可以消除复杂性，

从而使开箱即用的解决方案在提升易用性的同时提供更高的转换效率。

毫无疑问，宽禁带半导体技术的引入改善了功率转换的前景。它们通过提升功率和开关频率对基于硅的技术进行了补充，从而支撑了具有改进的拓扑结构的新应用。然而，它们一定不能被视为现有技术的替代产品。应用的基本需求决定了其所使用的开关拓扑，进而指导工程师选择最佳的晶体管技术以实现功率效率目标，这一点也至关重要。

我们在功率半导体行业拥有令人难以置信的强劲记录，掌握了超过 40 年的功率 MOSFET 技术。我们的产品组合包含硅、碳化硅和氮化镓功率器件，以及优化的互补驱动电路。我们继续扩大我们的产品供应，最近在这个方向上采取了一些措施，包括收购赛普拉斯半导体公司，这将在



系统层面上增加我们的产品供应能力。通过将所有这些经验付诸实践，我们独一无二地定位成半导体行业中值得信赖的顾问和合作伙伴。OSc

上接第16页

IGBT 和两个二极管，而不是使用两个 MOSFET 和零个二极管)。由于这一点，MOSFET 在 10 kV 额定电压下作为大电流器件将继续表现出吸引力。这一发现与我们的粗略估计和从硅材料得到的传统经验“即单极型器件在额定电压超过 650 V 时早已耗尽其价值”形成了鲜明对比。

转向更低的系统频率设计，基于 IGBT 的设计所需的有源开关面积减少了。然而，有得必有失，功率模块必须增加专用于反并联二极管的区域。由于 SiC MOSFET 具有出色的体二极管，这是这些器件的一个强大卖点，因此紧凑型高频系统肯定会使用中压 SiC MOSFET。但即使是频率较低的系统也仍然可以从纯 MOSFET 的方法中获益，因为它们不需要额外的二极管。

我们对不同应用的需求进行了简要研究，强调了最佳方法必须考虑特定系统的细节。IGBT 和 MOSFET 都分别具有一些特性，使它们能成为中压应用中颇具吸引力的候选产品。最佳选择取决于多种因素。SiC IGBT 的发展将继续下去，使其成为越来越有竞争力的选项，特别是在更高的开关速度下，并且随着诸如反向传导能力等附加技术的发展，采用 4H-SiC 中压 MOSFET 技术的技术平衡可能会倾向双极型器件。在过去的 30 年里，硅功率器件行业一直在不断创新其单极和双极技术，而且没有迹象表明这种趋势会停止。我们应该期待 4H-SiC 中压器件也会如此。OSc

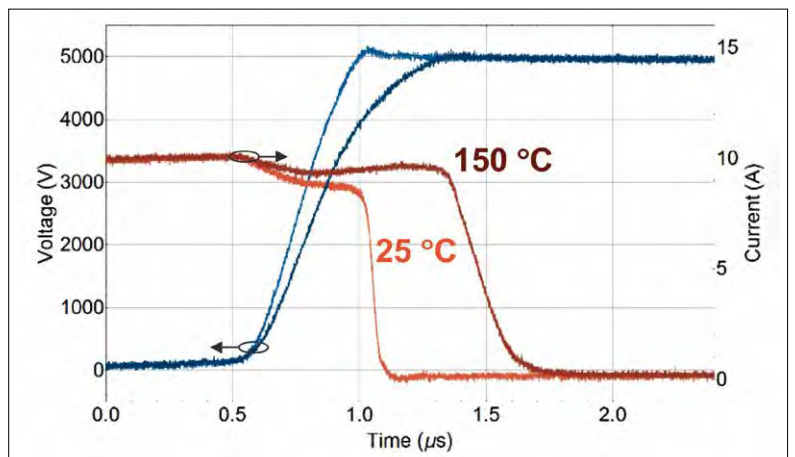


图 4. SiC IGBT 在室温下表现出非常可控的  $dv/dt$ ，大约为  $12 \text{ kV}/\mu\text{s}$  (淡红色的痕迹)。开关损耗主要由大容量存储电荷和高发射极效率以及低缓冲寿命导致的非常小的电流拖尾所决定。

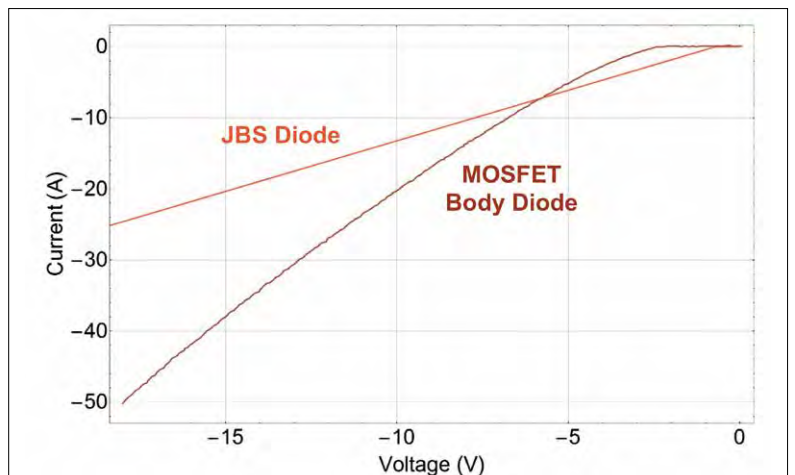


图 5. MOSFET 体二极管 (深红色) 比 JBS 二极管有更好的电流。电流额定值：对于 10 kV SiC MOSFET 体二极管，在  $T_j = 175^\circ\text{C}$  时为 30.6A；对于 10 kV SiC JBS 二极管，在  $T_j = 175^\circ\text{C}$  时为 17 A。

# 半导体芯科技

**S/S SILICON SEMICONDUCTOR**  
Connecting the Silicon Semiconductor Community

• **CHINA**

从中国政府定立的长期目标，与及中国半导体行业的潜在规模，催化了《半导体芯科技》（Silicon Semiconductor China）中国版杂志的诞生。目前，中国的半导体消耗量达全世界的60%，但其中约90%的半导体需要依靠进口。从更广阔的背景来看，中国已经启动了自己的工业4.0计划，以便与欧洲和北美的制造能力相竞争。“中国制造2025”的目标之一是升级和增加包括信息技术、机器人和汽车业在内的十个关键领域的国产零部件含量。

为了提升半导体制造能力，中国政府计划在未来10年至少投资1770亿美元，以建立中国自己的芯片产业。目前，中国正在建设中的晶圆厂有24座。

多年来，面向全球的Silicon Semiconductor英文版杂志也一直为中国半导体行业的专业人士提供服务，但现在是时候推出一本独立的《半导体芯科技》（Silicon Semiconductor China）中文版杂志了。

## 免费索阅



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



# 使用定量阴极射线荧光技术研究氮化镓 HEMT

通过定量阴极射线荧光技术进行无损检测，详查氮化镓 HEMT 的穿透位错，组分和掺杂，有助于氮化镓 HEMT 的开发和生产。

MATTHEW DAVIES 和 CHRISTIAN MONACHON，ATTOLIGHT

化合物半导体具有硅的很多特性，但也有些显著差异，这导致一些针对硅的表征技术无法为化合物半导体提供准确信息，对于氮化镓来说尤其明显。为了保持有竞争力的价格，氮化镓晶体管和 LED 生长在异质衬底上，因此外延层的缺陷密度非常高，但这从来不会发生在硅基器件上。

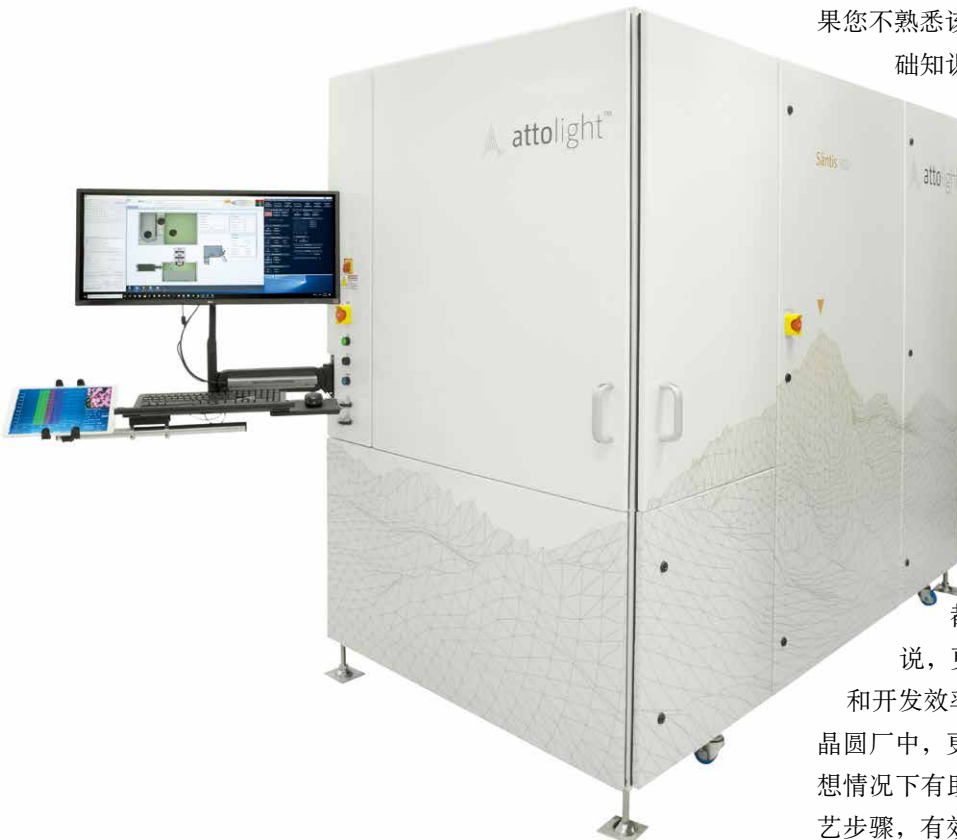
一种被称为定量阴极荧光光谱法的无损技术，可以帮助阐明各类化合物半导体器件的特性，

其中包括由氮化镓制成的器件。位于瑞士洛桑的 Attoligh 团队是这一领域的开拓者，已经推出了支持这种计量方式的工具。

之前，我们的团队发表过有关定量阴极射线荧光技术协助太阳能电池，照明和显示技术领域的制造商的文章（具体可参考《化合物发光技术的阴极射线管发光》，2018 年 7 月版的《化合物半导体》）。本文将探讨，对于硅上氮化镓 HEMT 器件，该技术是如何监测其异质结构的质量（如果您不熟悉该器件，请查看“氮化镓 HEMT 的基础知识”部分）。

对于这类晶体管，定量阴极射线荧光技术帮助工程师通过关注以下三个关键指标来优化生产线的成品率：穿透位错密度、沟道上方铝镓氮层的铝含量和 p 型氮化镓栅极的镁掺杂量，这是实现常关型 HEMT 的关键。

为了确保最优流程管理，工程师需要在流程中的每个步骤采用来自测量工具的快速无损反馈。对于试生产线，以及专用研发设施和大容量晶圆厂中的生产线来说，都是如此。对于从事研发的生产线来说，更快的反馈速度带来更快的开发速度和开发效率，同时降低成本。在大批量生产的晶圆厂中，更快的无损反馈减少了在制品，在理想情况下有助于快速的工艺控制，对于给定的工艺步骤，有效在制品为零。在工序间隔的停机时



间中，在后续过程之间有来自计量工具的反馈，例如在清洁 Epi 反应器时就会发生这种情况。

使用在外延片生长之后的 Sántis 平台，可对各类指标提供快速、可靠、非破坏性的反馈，在此之前，这些反馈只能通过破坏性而且耗时的方法来获得。有了这种新型高分辨率的外延晶片检测平台，晶圆厂的负责人和工程师可以很好地做出关键性决策，包括对关键性能指标的即时反馈，确定某些晶圆是否应进行前端处理以及是否需要调整生长配方。

在后面的段落，我们将介绍使用 Sántis300 全晶片定量阴极荧光平台对氮化镓 HEMT 进行研究的成果，包括为功率 HEMT 开发的专有测量和分析方法，代表了在氮化镓制造中用于外延工艺控制技术的发展现状。

### 确定位错

氮化镓 HEMT 性能降低的原因是穿透位错。如果它们与二维费米气体形成的通道相交，或将衬底连接到栅极触点，则可能会导致器件泄漏电流<sup>[2]</sup>，并可能损害器件的长期耐用性。氮化镓 HEMT 的开发人员设计出几种解决方案，以减少通过这些通道的泄漏电流。但是，相关工作人员仍需对此问题进行全面了解，他们并不完全了解位错电流泄漏的原因或有效控制泄漏的方法，而且并不知晓影响位错对器件性能和耐用性的影响。因此，有必要分析外延层中的穿透位错，有助于我们更加了解此问题及控制过程，从而获得更好的器件。

阴极荧光已经存在了几十年，因此人们通常认为使用这种技术计算穿透位错是微不足道的。但事实并非如此：阴极荧光要比最初看起来要复杂得多，以确保穿透位错密度符合过程控制度量标准。

但是，定量阴极荧光非常有洞察力的，结合了简单的穿透位错计数和许多新指标来确定其密度。包括穿透位错的局部空间分布、伯格矢量大小，以及区分这种缺陷和其他结构缺陷（例如 V 形凹坑）的能力。定量阴极荧光光谱法具有广泛功能，更是用于氮化镓 HEMT 开发和生产的强大工具。

机器视觉是一种可能有助于定量阴极荧光的技术。近年来，该技术得到了改善，因此广泛应用在各行各业中。但是，将机器视觉应用于小而密

集的特征时会遇到一些麻烦，例如在硅基氮化镓 HEMT 外延层中发现的穿透位错簇。在这些异质结构中，平均每平方微米大约有十个穿透位错，传统的特征检测算法可能会降低精度。

我们采用一种创新的图像重建方法解决了这一问题，该方法利用了蒙特卡洛和数值模拟的结果以及特定材料知识和假设。在研究了不同图像上的数百次迭代之后，我们确定了重建的可再现性，以  $3\sigma$  的方式评估为  $\pm 1.05\%$ （见图 1）。此外，与基准特征检测解决方案相比，我们的技术可解决多达 40% 的缺陷。

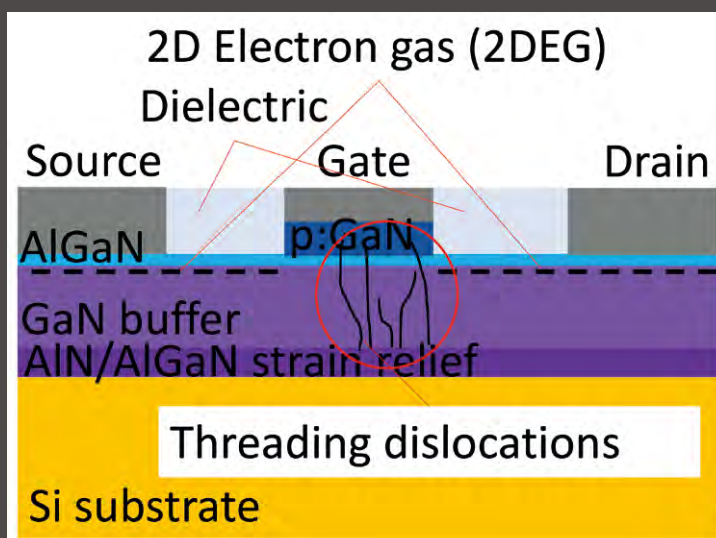
将通过定量阴极荧光得到的穿透位错成像用于过程控制，其功能不仅限于对单个图像的缺陷进行精确计数。为了使检测精度最大化，工程师应该记录较少的高分辨率图像，每个图像具有较少的特征。但这可能无法同时保证准确性和采样误差的。这对于使定量阴极荧光在过程控制中发挥重要作用至关重要。

## GaN HEMT 的基础

结型常关 HEMT<sup>[1]</sup> 的核心是在宽带隙  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  ( $x$  通常为 10% 至 20%) 和常规氮化镓之间的界面上形成的二维电子气 (2DEG)。为了确保常关操作，p 型掺杂的氮化镓层被插入在铝镓氮层和栅极触点之间。

对于采用这种设计的器件，性能会受到以下因素的极大影响：

- 位错密度：位错最终与泄漏电流有关<sup>[2]</sup>
- p 型氮化镓中的镁浓度：这会影响栅极下方氮化镓的费米能级，并最终影响器件的阻断能力
- 铝镓氮中的铝浓度：这直接影响 2DEG 浓度<sup>[3]</sup>



这是结型常关 HEMT 的一般设计，通常用于功率转换应用。整个样品中均存在穿透位错。该草图仅表明了它们的存在和方向，尤其是在结下方，在这里它们可能会产生最大的影响。

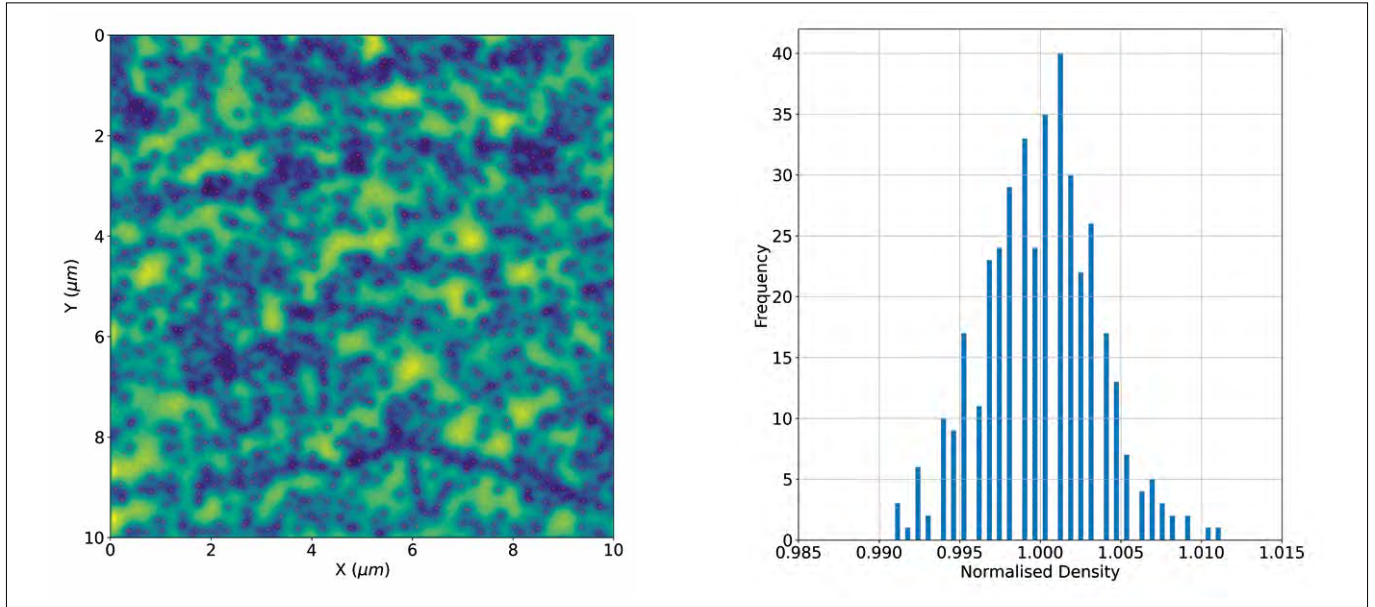


图1. (a) 带有突出显示的Attolight图像重建解决方案识别出具有穿透位错的阴极发光图像。  
(b) 基于图像重构算法的数百次迭代后的归一化穿透位错密度的直方图。

如图2所示，当使用较小的图像确定穿透位错密度时，更少的特征被展示 - 并且图像更容易受到随机统计波动的影响。尽管单个图像可以对穿透位错提供更精确检测，但在某些情况下，采样误差会覆盖此增益，从而导致结果的准确性较低。

例如，视野较小的单个图像。由于随机的统计波动，可能导致很大范围的可能值，较低的穿透位错密度会加剧这种影响。在极端情况下，当对缺陷密度为  $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  的样品成像时 - 相当于每平方微米平均有 10 个缺陷 - 在单个  $2 \times 2 \mu\text{m}^2$  的视野中发现缺陷的可能性很小但不等于零 (图1 (b) 所示)。

解决方案是将高采样率与优化的视野结合起来。尽管这种方案可以最小化采样误差，但无法以高精度处理无限大视场的图像。为了实现采样率，保证过程控制度量工具有足够的可重复性和可再现性，需要具有出色可靠的自动化功能和可

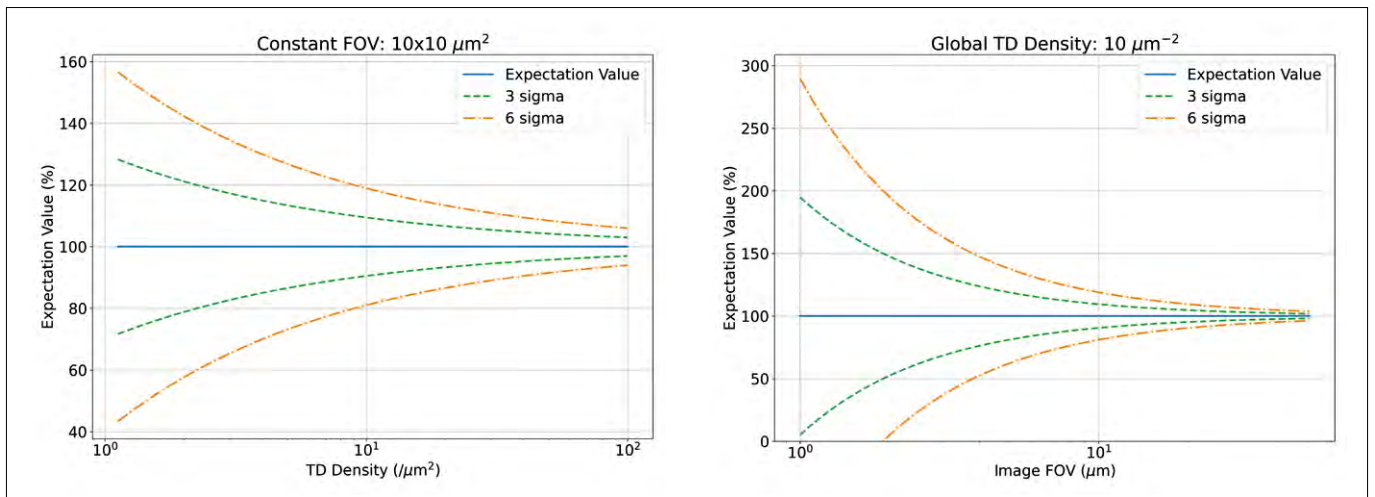
重复的检测算法。我们将以下功能结合在一起：Santis300 平台的自动化，并适当考虑了采样误差和可重复性；通过创新的方法，采用专有的图像重建方法来检测特征。

### 外延层成分

无论是常开还是常关，每个 HEMT 的核心都位于铝镓氮层，该层与二维电子气通道的形成密不可分。通过仔细控制铝镓氮层的生长，工程师可以设置电子气浓度并最终确定关键特性，例如阈值电压和导通状态串联电阻。

氮化镓 HEMT 异质结构的生长从未完美。由于外延反应器的设计，衬底的弯曲以及生长过程的动力学，出现了与外延层的成分和厚度相关的径向晶圆级依赖性 (见图3)。它们在关键层上产生的变化 - 对于 HEMT 来说，关键层是铝镓氮层，在 LED 中是有源区 - 会降低晶圆级的均匀性和器

图2. (a) 当在单个  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  图像中考虑恒定图像区域 (FOV) 时，变化的穿透位错密度的不确定性 (表示为期望值的百分比)。  
(b) 对于恒定的穿透位错密度为  $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$  的不确定性 (表示为期望值的百分比)，针对具有变化的FOV的单个图像进行评估。





件良率。尽管无法对关键外延层进行计量和监控，但它们在最大程度地提高均匀一致性和生产良率方面起着至关重要的作用。

一种被非常广泛采用的可以快速确定外延层组分的方法是测量光致发光的峰值。但是，这并不适用于所有外延结构，包括被氮化镓包层包围的铝镓氮层埋层。当埋入铝镓氮层时，其相对于相邻氮化镓层的能量状态在光激发下会导致极低的发射速率。更为复杂的是，铝镓氮层的激发过程效率低下，尤其是在其上方的层吸收最多（即使不是全部）入射激光的情况下。由于这两个因素，无法测量掩埋的铝镓氮层的光致发光。

想要克服这问题，要么在沉积铝镓氮层之后中断生长，要么通过蚀刻其上方的材料来暴露铝镓氮层。两种选择都是破坏性过程，因此都不是理想方案。无论是蚀刻晶片还是中断生长，用于光致发光测量的材料都不能加工成器件。由于测量是在陪片上执行的，因此这个方法的另一个限制是涉及间接反馈。

我们的方法提供了一种更好的替代方案，即调整电子束的穿透深度，精确有效地激发掩埋的铝镓氮层。通过使用嵌套量具对比研究，具有和不具有顶部 p 型氮化镓层的等效晶片，证明了我们技术的准确性和可重复性（参见图 4）。100 多次的重复测量，归一化标准偏差低于  $\pm 0.25\%$ ，说明这项研究有很强的测量可重复性。当假设规格极限为 14%（目标为  $\pm 7\%$ ）时，记录的每个样本的量具方差低于 10%。

### 掺杂控制

在常关氮化镓 HEMT 中，镁掺杂会影响多种

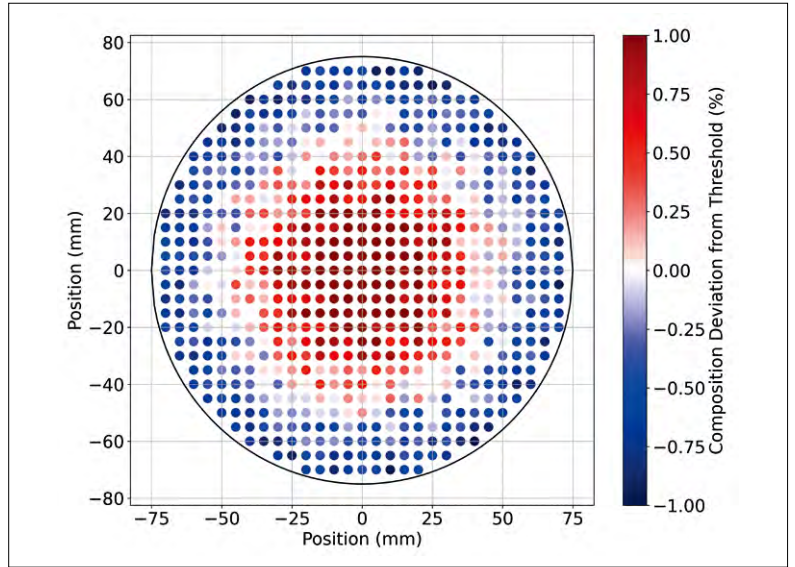


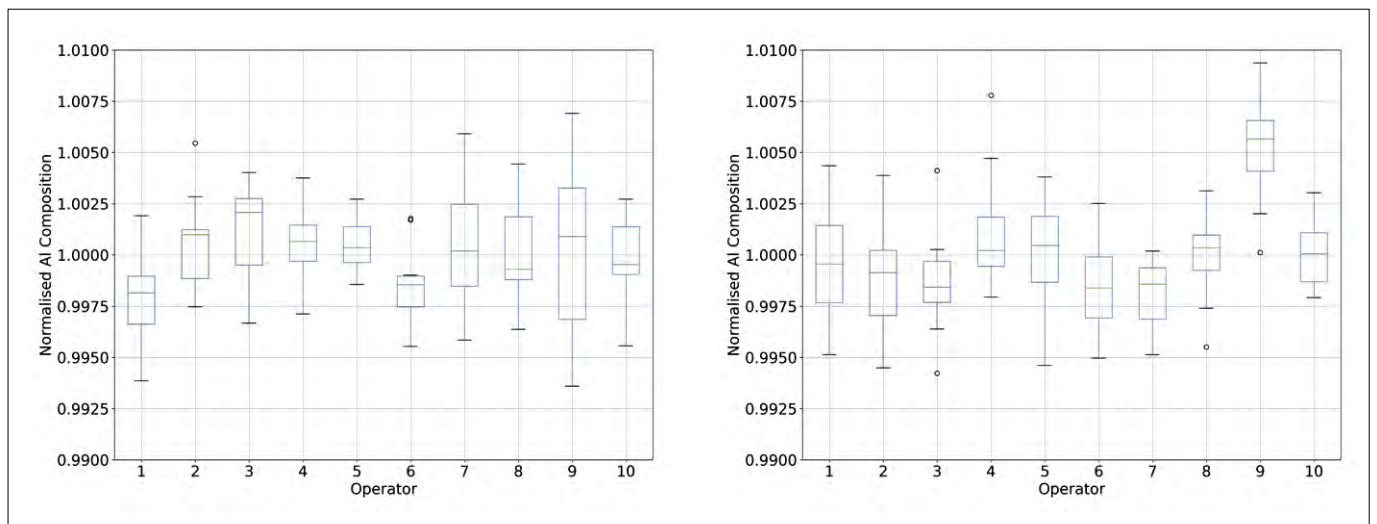
图3.Santis300平台能够生成氮化镓HEMT结构中埋入式铝镓氮层的铝成分的晶圆图（模拟数据）。

元器件特性，包括鲁棒性，截止态泄漏和阈值电压。研究氮化镓的先驱者投入了很多精力来开发实现镁掺杂的工艺，并在 1990 年代取得了成功，使氮化镓可以取代 ZnSe 并成为制造蓝色和绿色 LED 和激光器的最佳材料。在随后的几十年中，从事氮化镓技术的人们在了解镁掺杂方面取得了长足的进步，其自补偿机制已被研究群体探究和讨论<sup>[5]</sup>。

尽管取得了这些进步，但氮化镓 HEMT 中的镁掺杂特性仍然是一个复杂性问题。这些问题包括源于镁受体和穿透位错之间的相互作用导致的增强的泄漏路径<sup>[6]</sup>。

测量氮化镓中镁掺杂的传统技术是二次离子质谱 (SIMS)。与霍尔效应测量一起使用，它使工程师能够发现所结合的镁与电活性镁的比率。不幸的是，SIMS 和霍尔效应测量都具有破坏性，前者有时甚至需要将样品送到专业实验室进行测试。

图4.嵌套量具可重复性和可靠性研究的代表性结果。用于确定以下条件的铝镓氮层中的铝成分：(a) 完整的常关氮化镓HEMT结构（埋层）；(b) 去除了p型GaN盖层的等效HEMT结构（表层）。



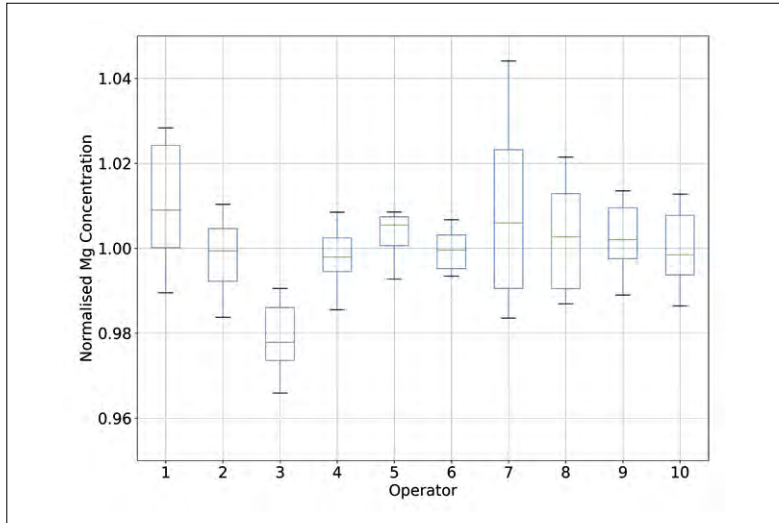


图5.嵌套量具可重复性和可靠性研究的代表性结果，用于确定完全带氮化镓HEMT结构的p型氮化镓层中的镁浓度。

但是，由于我们通过定量阴极荧光法测定镁参杂量的专有技术，原地和异地 SIMS 测量不再需要漫长的等待时间。我们的方法基于详细的光谱分析，对电子物质相互作用和阴极荧光技术以及材料特定的专业知识有深入的了解。

为了证明定量阴极荧光光谱法测定镁参杂量的可靠性，我们将测定结果与 SIMS 提供的结果进行了比较。在对多个样品进行测量后，SIMS 和定量阴极荧光测定的镁参杂量的均方根误差为 3.8%。为了确定技术的可重复性，我们进行了嵌

表1 Attolight解决方案分析氮化镓HEMT外延片的优势。

| Use case  | Competing techniques | qCL competitive advantage   |
|---|----------------------|---|
| Threading dislocation density                     | XRD                  | - Fast (<1 min/site vs >10 min/site)<br>- Tailored depth sensitivity[7]                           |
|   | 2 photon absorption  | - Fast (<1 min/site vs >10 min/site)<br>- Tailored depth sensitivity[4]                           |
|   | TEM/AFM              | - Fast (<1 min/site vs >60 min/site)<br>- Non-destructive<br>- Statistics (see Figure 3.)         |
| Al content in Al <sub>x</sub> Ga <sub>1-x</sub> N | XRD                  | - Fast (<1 min/site vs >10 min/site)  |
|   | SIMS                 | - Fast (<1 min/site vs >10 min/site)<br>- Non-destructive   |
|   | PL                   | - Better excitation efficiency, stronger signal, more reliable results                            |
| Mg content in p:GaN                               | SIMS                 | - Fast (10 min/site vs >60 min/site)<br>- Non-destructive<br>- Measures activated part of dopants |
|   | Hall effect          | - Non-destructive<br>- Fast (10 min/site vs >60 min/site)   |

套量具的可重复性和可靠性研究（见图 5）。这项研究证实了定量阴极荧光测定法良好的可重复性，当假设 60%的规格极限（目标 ±30%）和量具偏差低于 10%时，在 100 次重复测量中标准方差低于 ±1%。

### 三大优点

我们方法的优点之一是测量过程不破坏材料。因此本技术可以避免晶片的定期破坏性的性能测试 - 考虑到其他所有替代技术都具有材料破坏性，本技术将成为氮化镓 HEMT 中镁参杂量测定技术中的佼佼者。第二个突出的优点是该技术测量过程相对较快，可以从每个晶片的数十个位置进行采集，因此可以测试片内均匀性。第三个突出优点是该方法具有多功能性，可测量穿透位错密度，铝镓氮成分和镁参杂量等。尽管该技术由于需要在真空下更换晶圆，使得更换待测样品耗费时间，但此技术为晶圆厂节省的空间与降低的反馈周期复杂性依然使其充满竞争力。（表 1 罗列了使用该技术的优势，同时概述了其他技术的优缺点）。

由于 Sántis300 平台的诸多优点，使它非常适合于研发实验室和生产工厂中的过程控制与无损反馈。考虑到该技术可提供其他技术无法提供的深入分析，以及对现有指标的更快的测定，该技术将推动实验室提高效率、缩短开发周期，同时也可助力现有商业化产品提升产能。OSc

### 扩展阅读

- [1] M. Meneghini et al., Power GaN Devices:Materials, Applications and Reliability. Springer Nature, 2017.
- [2] S. Usami et al. Appl. Phys. Lett. 112 182106(2018)
- [3] Y. Ohmaki et al. Jpn. J. Appl. Phys. 45 L1168–L1170 (2006)
- [4] I. Rossetto, et al. Microelectronics Reliability76-77 298 (2017)
- [5] A. Klump et al. J. Appl. Phys. 127 045702(2020)
- [6] J. Chen et al. Appl. Phys. Express 12 051010(2019)
- [7] V. Yon et al. Phys. Status Solidi 257 1900579(2020)

# 国内巨大应用市场引爆契机

## VCSEL 产业链后段相对成熟，前段还需进一步本土化

VCSEL 技术最初是在通讯设备和模块领域得以成熟应用，近几年由于在手机人脸识别的海量需求而成为消费类电子元器件产品，接下来也预期将在汽车电子领域及其它 3D 感测市场得到广泛应用。业者关心在这一巨大市场需求趋势下，中国作为全球应用市场的领导者能否因此带动本土全产业链取得相应的巨大进步，包括 VCSEL 激光器芯片的设计、制造工艺和材料及相应的制造设备等等，在各个产业链重要环节有哪些重要技术难点需要攻关？就此，我们采访了几位业内专家。

### 圆桌论坛掀头脑风暴 听专家揭示技术攻关难点

**陆敏博士：中国的供应链准备情况如何？我们是否已经能够提供国产化的 VCSEL 芯片，它是否已经足够成熟了，国内与国际上知名公司进行比较，差距在哪里？这个问题偏产业，请 Ryan 博士先分享。**

**Ryan 博士：**VCSEL 产业链主要包括设计 - 外延 - 封装 - 测试 - 应用推广几大环节。近几年，国内这几大环节发展很快。设计这块，国内崛起了多家设计公司，纵慧已经完全做到自主设计，自有知识产权，产品性能业界领先，所以器件设计环节我们与国外的差距较小。外延环节，国内处于起步发展阶段。纵慧在外延这块走得相对靠前，在国内率先建立了 6 英寸外延产线能力，已经导入量产。在外延材料生长方面我们有很多积累，但更基层的材料比如衬底、气源对国外的依赖比较高，这也是整个产业链需要关注的点。制程这块，大陆处在发展阶段，与欧美、台湾成熟的厂商 / 代工厂有一定差距，需要一定时间和经验积累去赶上。封装测试国内资源比较多，像 3D 传感模组级别的

封装，国内模组厂已经非常成熟了。应用这块：国外前沿应用开拓更活跃，会带动对 VCSEL 新技术的开发，牵引作用相对较强；国内优势是市场需求量非常大，一旦出现很强的刚性需求，相应的产业链响应能力很强。国产 VCSEL 和进口 VCSEL 在性能和可靠性方面，以纵慧为代表的国产 VCSEL 已经基本能与国际先进水平比肩，差距可能主要在公司体系制度，体量规模，出货记录等方面。目前纵慧有几千万颗 VCSEL 的出货量，国内第一，在国际上处于第一梯队，不过与国外最大厂的出货量相比还有一定差距。

**陆敏博士：VCSEL 在光通讯领域时间更长，请佟博士分享一下在光通讯领域产业链的情况。**

**佟博士：**目前国内做 VCSEL 厂商有 20 家，做 DFB 的大约有 15 家。20 家里面做通讯的比较少，主要还是像纵慧这样做光应用的比较多，因为这块市场比较大。高速通讯的市场尤其是 850 VCSEL 市



《化合物半导体》主编  
陆敏博士



中科院院长光所研  
究员佟存柱博士

场要小很多，国内厂商我知道的只有 2、3 家做高速 850 光互联芯片的，做的比较好的是泰州华芯半导体，目前已经实现了 25 Gbit/s 的长寿命的，可靠性也通过了头部厂家的验证，还有三安光电，也是能够实现了 25G，也做了很多可靠性测试，其他就比较少了。这两家公司特点是，都是自己做外延。从外延到全套的工艺都是全的。

**陆敏博士：外延主要是砷化镓的衬底，这个衬底的国产化率是多少？**

**佟博士：**砷化镓衬底的国产化率是很不错的，零几年中科镓英等好几家公司就在做衬底，做得都很不错，包括华为也战略投资了好几家做砷化镓衬底、镓磷衬底、碳化硅衬底的公司，衬底的问题不太大，问题较大的是原材料大部分需要进口，国内也有公司在做但用的情况还不太清楚，另外一个卡脖子的问题是砷化物和磷化物的 MOCVD 主要还是从德国 Aixtron 进口，不像氮化物的设备基本已经实现国产，现在很多公司还能买砷化物、磷化物 MOCVD，但很多研究所已经买不进来了，所以相对于材料来讲这个是很大的问题。



中科院长光所研究员佟存柱博士

**陆敏博士：纵慧的器件芯片是代工的，为什么选择代工？以后有没有计划自己建厂？自己建厂生产会不会更有成本优势？**

**Ryan 博士：**我们主要面向消费电子市场，用的 6 寸砷化镓这样的工艺平台。而射频器件也是用 6 寸砷化镓这样的工艺，射频器件的量比 VCSEL 要大很多，产业链相对很成熟；全球大的代工厂的制程完备、产能也都很充足；价格方面因为有射频器件量的带动，比自己建厂更有成本优势。因此在 3D 消费电子 VCSEL 这块今后我们也会沿用代工模式。

**陆敏博士：VCSEL 技术目前在市场正逐步渗透，原来主要在通讯，现在在消费电子，接下来也会在汽车电子领域，在 3D 感测市场也逐渐在渗透，想请 Ryan 博士分享一下，您预计 VCSEL 需求在未来 3-5 年内会是什么样的情况？**



《化合物半导体》主编陆敏博士

**Ryan 博士：**我从三个领域分享一下。首先是手机，目前这是存量最大的一个市场，其次是除手机之外的消费电子，第三个是车载电子。手机这块的 3D 感测可以看到苹果走得很坚决，iPhone 12 除了前置 Face ID，后置现在也上了 LiDAR Scanner 3D 传感方案，他们在整个 3D、AR、VR 这块的布局很深远的，很坚定地在走这个路线。安卓

手机阵营也在慢慢沿着这个潮流往前走，但目前安卓手机的渗透率相对较低一点，一些厂商还是在观望，看看是否有爆款应用出现。其他消费电子比如智能家居，包括扫地机器人，智能门锁之类的，现在 3D 传感应用的量慢慢在起来。另外像一些机器人，无人机等领域，也在开始启用 3D 传感方案。第三块大的领域—汽车电子领域应用主要是激光雷达，这块市场潜力是非常大的；尤其是等高端辅助驾驶或是无人驾驶开始普及起来的话，这将是一个海量的市场，但可能还需要几年时间成熟，才能到大规模上量的阶段。激光雷达各种方案大家在市场上可以看到很多，目前处在一个群雄逐鹿的阶段，VCSEL 的方案在激光雷达各种方案里从可靠性以及性价比来看还是很有竞争力的，我们看好这块市场。

**陆敏博士：刚刚说到安卓阵营在观望，汽车电子领域也有微波的技术。您认为影响 VCSEL 技术市场市场渗透程度和渗透速度的原因是什么，是成本吗？**

**Ryan 博士：**我们认为主要是需求本身吧，终端用户有没有看到刚需或是爆款应用；苹果 Face ID 解锁是一个很好的应用例子，具有非常方便实用的功能，所以苹果一直很坚定地在采用 3D 传感方案。后置的 3D 传感方案带来的功能，比如 3D 建模、AR/VR 的游戏、摄影的背景虚化这样一些应用也开始慢慢起来了。尤其是游戏这块，随着 3D 传感技术平台的成熟，大家可以开发游戏的种类会越来越多，这块的前景是非常好的。但是可能还需要一些时间的积累，目前还没有出现比较多爆款游戏让大家感觉一定要去买这样一个功能；而手机厂会不会上这样的硬件最终还是看用户会不会为这样的功能买单。至于成本方面，如果有量的带动，成本是有可调整空间的。

**陆敏博士：消费电子是一个成本敏感的领域，如果成本有更多压缩空间，对市场应该会有更大的推动作用。成本肯定和良率有关，您认为在 VCSEL 制程里有哪些关键工艺会影响它的良率？**

**Ryan 博士：**最重要的是外延本身，即外延的设计和生长出来的质量怎么样，对 VCSEL 良率有很大的、直接的影响，所以这也是外延这块我们选择自己掌控设计与生长的原因。制程过程中刻蚀、薄膜沉积，还有氧化的工艺，对器件的性能和良率也是比较关键的。

**陆敏博士：说到制程，有请牛津的邓博士分享一下。**

**邓博士：**说到市场的发展，Ryan 博士和佟教授已经讲的很清楚了，Ryan 博士和佟教授比我们更理解真正的市场需求，根据 YOLE 的市场估计，在下面 2-5 年之内，

这个市场的主要需求还是来自手机市场，随着 Android 手机开始采用 VCSEL 器件，VCSEL 的需求才会有一个比较大的增长，另外，VCSEL 应用在自动汽车的 LiDars 上也在慢慢成熟，比如 AMS 和 Lumentum 都发布了他们已经可以提供这一类的器件。



天津仪器公司产品  
经理颜丽刚博士

从市场对 VCSEL 器件技术要求来说 Ryan 和佟教授比我们懂得更多，从我的理解呢，主要分为三个部分：器件的性能，可靠性和成品率，我们作为设备供应商，我们可以考虑的或者是能够提供的就是怎样提高刻蚀或者沉积可控性，低损伤，侧壁的光滑程度，我主要讲一下刻蚀，沉积部分由黄博士来补充。

器件的性能，前面提到，和优化的器件设计以及高质量的外延是息息相关的，也是最主要的因素。但是高质量的刻蚀对器件性能也是会有影响的，器件的可靠性和成品率这个和器件的制作工艺紧密相关，比如刻蚀的均匀性和重复性。基于我们对这些的理解，我们天津仪器在工艺研发上下了很大的功夫，刚才黄博士已经介绍了我们可以提供的用于 VCSEL 的刻蚀和沉积工艺。就刻蚀工艺来说，我们是首先进行了大量的工艺优化，比如哪个气体更适合这个工艺，可以得到非常光滑的侧壁，因为我们认为光滑的侧壁对下一步的氧化很重要，还比如怎样得到一个非常小的 footing？大家知道用氯基类的气体刻蚀 GaAs/InGaAs，是一个化学反应占主导的刻蚀，所以 footing 会很大，因为 VCSEL 的刻蚀主要是刻蚀 DBR 层，层间的厚度大概在 100-200 甚至 300 纳米，所以大的 footing 可能会导致你的刻蚀会停在不同的界面上，我们所提供的工艺注意了这一点，如黄博士所展示的，我们不仅可以得到 low footing，并且还可以控制这个 footing，这是我们天津仪器的特有工艺，相关的专利正在申请之中。

另外我们在设备的硬件上也进行了优化，使 6 寸 wafer 工艺的均匀性从原来的 5% 左右提高到小于 3%，多数时候不到 2%。在这个基础之上，我们进行了马拉松工艺测试，通过这个马拉松，我们进一步改善了工艺和系统硬件，以达到 SEMI S2 的标准，我们的马拉松测试一共用了 1425 片 wafer，一共刻蚀了 7450 微米深，所有的工艺和硬件都达到了我们事前跟进 SEMI S2 设定的目标，所有我们天津仪器在 VCSEL 这个市场上的投入是非常大的，也是我们公司主要专注的一个方向。

**黄博士：**关于可靠性和成本，不管是薄膜沉积，或刻蚀都拥有相似的策略与规划。天津仪器投入大量的马拉松测试和设备的开发。达到设备成本 CoO 降低与可靠性提升的目标，大家可以回想另一个观点：硅基半导



天津仪器公司技术  
经理黄永扬博士

体市场为什么芯片可以卖得便宜，为什么 VCSEL 的价格目前还偏高，最关键在于良率和量产成本，我们做过初步的运算，发现成本下降的速度会随着放大的产能达成曲线交叉，代工或芯片制造从原本一个月几百片，到上万片的时候，就可以实现成本下降，不管是 PECAD, ALD，或是刻蚀设备，都拥有相类似的成本控制模型。

**陆敏博士：**请佟博士分享一下长波长 VCSEL 目前的成熟度和最有前途的设计方案或波段

**佟博士：**如果是从传感应用角度，长波长 VCSEL 现在已经验证到 3-5 米波段也都有的，如果是从光通讯来说，1.3 微米和 1.5 微米波长来说，目前来说性能比较好的还是键合的方式。但 1.3 微米 GaInNAs 量子阱具有潜在优势，因为它能够和 GaAs 基 DBR 兼容，大面积生长，这样可以实现 6 英寸 wafer 的批量制备，这样就有可能让 1.3 微米的低成本高速器件得以实现。键合是把磷化铟跟砷化镓键合在一起，它能否规模化商业应用还取决于它跟 1.3 微米 DFB 在成本方面的竞争，毕竟后者现在成本已经降了很多了。但 1.3 微米不仅磷衬底成本高，工艺复杂也导致器件高成本。当然键合的成本也不是很低，所以未来如果 1.3 微米的 DFB 想追求更高速率比如 50Gbit/s 以上的速率，在 150 微米以下更短腔长方面遇到技术瓶颈，这时候就有可能会有一个驱动力，让人们回过头来考虑 VCSEL 能否克服这个瓶颈。那个时候 GaInNAs 可能会有一定的发展优势，目前来看，还是键合为主。



中科院光所研  
究员佟存柱博士

**陆敏博士：**请佟博士也分享一下目前短波方向的发展状况

**佟博士：**这种 VCSEL 的结构，短波方向不仅红光、绿光都能做，包括有机激光也是利用这种结构，还有蓝光 VCSEL、镓氮基的 VCSEL，国内国外也有很多人在做。虽然我本人不做镓氮基 VCSEL，但我也看了一些文献，镓氮基 VCSEL 应用主要是光存储、显示、光通讯、照明等，但从它自身特点而言，我认为最可能的应用是可见光通讯上，在显示上以 VCSEL 的功率可能还达不到应用要求，而且成本还高；光存储的市场现在也在萎缩；如果它能实现很高的速率的话，最有可能还是在 LIFI。目前基于 LED 的可见光通信速率也就是几百兆比特每秒的水平，LED 的速率肯定不如激光器，如果 VCSEL 能把高速这个问题解决了，它有可能是实现了一个可见光的、跟我们现在的照明灯集成在一起，可以



中科院光所研  
究员佟存柱博士

实现 G 或几十 G 比特每秒的传输率，那么未来可能在 6G 或者其他场景会有更好的应用。目前，沙特 Kaust 大学做到 GHz 的带宽，如果能进一步提高，就有望在 LIFI 以及未来 6G（30 米以下的传输距离）上有一个规模化的应用。

**陆敏博士：请邓博士分享更大尺寸的材料和器件的情况。**

**邓博士：**IQE（去年 11 月份）报道了用 Ge 衬底替代 GaAs 衬底，用 Ge 衬底，就有机会把现在 6 寸的 VCSEL 芯片提高到 8 甚至是 12 寸，这样可以大大提高产能，据他们的报道 Ge 衬底的平整度比 GaAs 的衬底要高几个数量级，但是这个什么时候可以市场化，还不是很清楚，从对 VCSEL 的新要求，从近期可以看到的就是对长波段的 VCSEL 需求，已经有好多科学家和研究小组在这个领域进行研究，如果想得到对人眼安全的激光器，可能需要引入新的半导体材料比如在 InGaAs 中加入 N, Sb-GaInAsNSb, 但这个现在还在研究阶段，怎样变成产业化的产品和降低成本还面临一个巨大的挑战，佟教授已经介绍了很多 PCSEL，最近我们也会被经常问到 PCSEL 的器件工艺，怎样把光子晶体那么小尺寸的图形刻蚀出来以及转移到整片 Wafer 上是一个挑战，我让黄博士介绍一下我们是怎样应对的吧。



牛津仪器公司产品经理邓丽刚博士

**黄博士：**牛津在 VCSEL 组件开发上，尤其是针对刻蚀 MESA 的 footing 控制，或纳米等级细线宽的工艺调制，都已经有一定的基础和数据库，最关键的是我们一直和目前的用户持续合作和开发下一代产品所需的工艺菜单，对应一些特殊的应用，例如光子晶体结构等，由于涉及各个公司的专利和保密协定，这里就不方便跟大家做进一步讨论，我们对设备和工艺的菜单有很明确的了解。任何特殊应用都可以从资料库里找到相应的数据，回应客户的需求。



牛津仪器公司技术经理黄承扬博士

**陆敏博士：我还想问黄博士一个问题，我看到斜切面用 IBE 来刻蚀，第一个问题是你用的什么粒子？第二个问题是 IBE 的损伤会比较大，您做的时候如何控制损伤问题？**

**黄博士：**的确最后有一个比较特殊的应用，针对侧面出光的钢磷 (InP DFB Laser)，藉由 IBE 斜向刻蚀达到正面出光效果。因为 IBE 是一个高度直线性的刻蚀源、在比较高的真空条件之下 (10<sup>-4</sup> Torr)，让等离子体是直线飞行去刻蚀倾斜的芯片达到倾斜的效



牛津仪器公司技术经理黄承扬博士

果。使用的气体为了增加刻蚀速度，主要是氯基配合氩气来达成。确实它的轰击是比较大的，特别是氩气所造成的物理性轰击，对于损伤控制，通常有两种方法避开：第一个是我们使用的是高的等离子体密度搭配低偏压的加速，让加速碰撞性低一点；第二个从组件端设计，让斜面刻蚀在组件的非有源区（被动区），保护钢磷的有源区域或者是具有光电特性的位置不受等离子体轰击，这样可以大大降低电性损伤的疑虑。

**陆敏博士：最后一个问题想问 Ryan 博士，在您的报告中看到有多结 VCSEL 很有新意，它的功率会大大增加，但我有一个疑问，多结意味着外延和外延的复杂性以及制备的复杂性都会增加，如果不用多结，用单结阵列不会更好吗？多结的应用场景主要在哪些领域？**



《化合物半导体》主编陆敏博士

**Ryan 博士：**多结的优势是在光功率密度，就是在同等面积下，用多结能够输出更高的光功率。如果只是在水平方向扩展的话，把芯片做大，光功率是可以增大，但光功率密度没法得到一个大幅度的提升。多结外延生长的确会复杂一些，但我们经过持续的研发投入，这个问题已经解决了，工艺生长的控制没有大的问题。制程这块，刻蚀的深度需要做一些调整，对刻蚀的均匀性要求也会更高一点。多结 VCSEL 的应用主要在对功率密度要求较高，距离比较远的一些场景；比如面向消费电子在 3~5 米之外进一步拓展到 5~10 米的应用场景；或是面向汽车电子激光雷达的几十米甚至上百米的应用场景。

终上各位专家之高见，纵观 VCSEL 激光器芯片的整个国内产业链，在器件设计环节我们与国外的差距相对较小。在工艺和制造环节，国内处于起步发展阶段，陆续有国内产线在在建，有些已经导入量产，但整体与欧美、台湾成熟的厂商 / 代工厂有一定差距，需要一定时间去追赶，当然也需要人才的招募和培养及更多资本投入。另外，在更基层的材料比如衬底、气源对国外的依赖比较高，这也是目前整个产业链的关键点。相比之下，芯片制造的后段即封测方面，国内资源比较多，像 3D 传感模组封装方面国内模组厂已经非常成熟了。总之，期望国内巨大的应用市场优势驱动 VCSEL 各产业链环节本土化提升，以求全面提高产品质量的同时逐步降低成本，推动 VCSEL 行业的大发展。

感谢各位专家的精彩点评。感谢本刊编辑吴婧玥的记录整理。OSC

## 高效、价格合理的半极性 GaN

图形化的蓝宝石衬底为低成本半极性 GaN 提供了基础，其内部量子效率超过 50%。

GaN 的半极性平面因其兼具了有助于辐射复合的弱内建电场和相对容易形成绿色发光器件所需的富镓量子阱两个优势而备受关注。

半极性的局限在于其天然（同质）衬底的价格非常高昂，但是值得庆幸的是，得益于中国团队的工作，很便宜的基于蓝宝石的复合衬底正在显示出很大的希望。

这些研究人员分别来自南京大学，合肥工业大学和江苏大学，他们在蓝宝石衬底上制备了半极性 InGaN 量子阱，其内部量子效率超过 50%。如此高的量子效率鼓舞着人们去进一步实现高效、价格合适的绿色 LED 和激光器。

南京大学的团队发言人刘斌说：“我们获得的量子阱具有高晶体质量和低缺陷密度，这对于提高内量子效率至关重要。我们也要感谢 Saphlux 在半极性 GaN 模板方面的合作。”

这些半极性量子阱的另一个特性是，它们产生的光致发光寿命仅为 0.5 ns，这突显了它们作为高速通信光源的潜力。根据计算，可以实现一个 1.4 GHz 的 -3 dB 调制带宽，通过高级调制方案甚至可以实现更高的数据速率。但是，Liu 说，由于器件质量不足以处理高注入电流，因此如今的调制带宽限制在 500 MHz 左右。

他和合作者通过将具有宽 3 $\mu\text{m}$ 、厚 1 $\mu\text{m}$  沟槽结构的蓝宝石衬底装入 MOCVD 室生长具有八个量子阱的异质结构而得到了一系列样品。通过采用一定范围的温度进行量子阱的生长，它们的组份会有所不同。

通过横截面透射电子显微镜观察这些结构，发现第一个量子阱的界面模糊，随后是七个具有陡直，清晰界面的量子阱（见右图）。根据该团队的说法，模糊的界面可能是由下面的 GaN 的不光滑表面引起的。

通过在一定温度范围内进行光致发光测量，研究小组得出了半极性 (20 $\bar{2}$ 1) 样品发射峰分别在 404 nm, 460 nm 和 497 nm 及其相应内量子效率值分别为 33%，52% 和 25%。

Liu 和他的同事们提出了一个模型来解释内量子效率的这些变化。认为在 460 nm 样品中定位中心比在 404 nm 处发射的定位中心更深，从而降低了载流子到达非辐射中心的可能性。尽管在 497 nm 样品中具有更深的定位中心，但较高的镓含量会导致晶体质量下降，进而增加缺陷并且抑制了辐射复合。

该团队的下一个目标之一是提高其半极性 GaN 的晶体质量，尤其是在 530 nm 至 560 nm 范围内的。

Liu 说：“基于半极性方向，我们计划实现用于全彩显示的微型发光二极管，其具有可靠性高，速度快的特性。”这项工作将在去年的工作的基础上继续进行。去年的工作实现了色偏较小，衰减最少的微型 LED，其在接近 800 A cm<sup>-2</sup> 的驱动电流下外量子效率为 62%。

Liu 和同事还将开发载流子寿命很短的 VCSEL。“我们计划得到一种调制带宽大于 1 GHz 的半极性光源。”

### 扩展阅读

M. Gong et al. Appl. Phys. Express 13 091002 (2020)



半极性(20 $\bar{2}$ 1)InGaN / GaN多量子阱样品的透射电子显微镜 (TEM) 横截面图像。插图是半极性(20 $\bar{2}$ 1)GaN模板的TEM横截面图像。

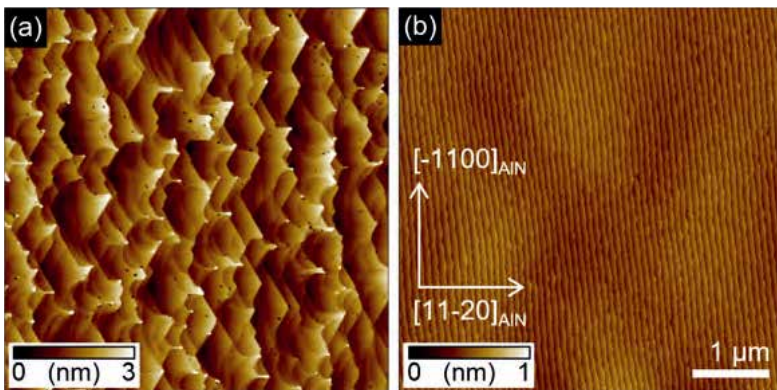
# 双重溅射提升 AlN 结晶质量

溅射和退火工艺得到的 AlN 膜的位错密度非常低。

日本三重大学的研究人员声称，已在蓝宝石衬底上生长的 AlN 膜的材料质量树立了新的标杆。

该团队的发言人 Hideto Miyake 表示，他们通过溅射和退火相结合所得到的 AlN 薄膜的位错密度约为  $4 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 。

Miyake 认为，这些薄膜是制造深紫外 LED 的最佳选择之一，深紫外 LED 是医学和生化治疗、水净化和日盲检测方面很有吸引力的备选方法。使用螺位错密度较低的 AlN 作为器件生长的衬底，可以提高外部量子效率并且具有卓越的可靠性。



原子力显微镜显示：(a) 退火后溅射的 AlN 膜中的成束台阶结构；  
(b) 在这些衬底上生长的 AlN 外延层具有原子台阶级光滑的外延层。

相比之下，利用 MOCVD 在蓝宝石上生长 AlN 膜这一更普遍的方法就要更逊色些。其螺位错密度通常为  $2-3 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ ，尽管图形化蓝宝石可以降低位错密度，但改善有限。

“在任何情况下，为了通过 MOCVD 实现足够低的螺位错密度，工程师需要生长相对较厚的 AlN 膜，通常为几微米。” Miyake 说。

相比之下，溅射和高温退火的结合的工艺可以得到具有结晶质量高且厚度薄得多的薄膜。

生长薄膜前要溅射 600 nm 厚的 AlN 层。接着，研究者将该 AlN 的表面放在另一块长在蓝宝石衬底上的 AlN 上，然后再将其在 1725 °C 下退火 3 小时。

“通过这种配置，可以有效地保护 AlN 膜免受高达 1700 °C 的温度的影响，” Miyake 解释说。

如果没有这种面对面的方法，将需要具有数千乃至数万个大气压的氮气来抑制氮原子的解吸附。

随后溅射第二个厚度也为 600 nm 的 AlN 膜，然后再在 1725 °C 下进行 9 个小时的第二次面对面退火步骤。

原子力显微镜显示，退火将溅射形成的柱状 AlN 转化为成束的阶梯状结构（见左图）。

Miyake 及其同事使用 MOCVD 在其模板上沉积了 200 nm 厚的 AlN 膜。根据原子力显微镜的测量，该外延层具有清晰的原子台阶，并且在  $2 \mu\text{m} \times 2 \mu\text{m}$  的面积上的均方根粗糙度仅为 0.1 nm。

通过在溅射和退火的膜上进行 X 射线衍射测量得出的峰可估计总位错密度为  $5.9 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 。对具有 200 nm 厚的 MOCVD 生长的 AlN 层的样品进行的类似测量得出的值表明，溅射膜中低的螺位错密度在 MOCVD 生长的 AlN 外延层中得到了保持。

该团队还通过平面透射电子显微镜表征了他们的材料。在面积为  $8 \mu\text{m} \times 8 \mu\text{m}$  的观察区域内，位错密度为  $4.3 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 。研究小组将此较低的位错密度值与通过 X 射线衍射获得的数值之间的差异归因于第一次和第二次溅射的 AlN 薄膜之间的生长界面附近的阻挡效应。

Miyake 及其同事使用大角度环形暗场扫描透射电子显微镜，在 AlN 的两次生长之间的界面处发现了高浓度的氧。

认为该富氧区域产生极性反转，该极性反转可以将一些 AlN 第一次生长期间形成的位错终止或者转向，从而进一步降低了第二次生长中的位错密度。

该团队现在正在使用其模板来开发深紫外 LED。他们还热衷于研究他们的基本原理是否可以用来改善其他器件，包括大功率，高频 HEMT。[1]

## 扩展阅读

D. Wang et al. Appl. Phys. Express 13 095501 (2020)



# 开拓性的 AlInN 功率二极管

## 首批 AlInN 二极管的制备为功率开关性能的飞跃迈出了第一步

Lehigh 大学的研究人员通过报告基于 AlInN 的功率器件的首个研究成果开辟了新天地。由纳尔逊·坦苏 (Nelson Tansu) 和乔纳森·韦勒 (Jonathan Weirer) 领导的这个团队制备了一种准垂直双极二极管，其中包含高掺杂的 p 型 GaN 和低掺杂的 n 型  $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  漂移层。

这些研究人员的工作是在基于 GaN 的垂直功率器件的开发基础上进行的，该器件提供了优于 Si 和 SiC 器件的替代品。

基于 GaN 的垂直功率器件在很多方面都占据上风，包括可承受更高的功率密度和工作温度，有更高的开关速度，以及可提供更高阻断电压。

$\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  的引入将 GaN 基垂直功率器件推进到超宽带隙领域，其可与 AlGaIn、 $\text{Ga}_2\text{O}_3$ 、金刚石和立方 BN 等竞争。

对于在低开关频率下运行的器件，Baliga 品质因数是比性能的有效指标。对于  $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$ ，该品质因子（定义为阻断电压的平方，除以特定的导通电阻）为  $33 \text{ GW cm}^{-2}$ ，这要归功于  $4.4 \text{ eV}$  的带隙和  $450 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$  的电子迁移率。相比之下，GaN 的品质因数仅为  $14 \text{ GW cm}^{-2}$ ，而  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和 AlGaIn 的值分别为  $37 \text{ GW cm}^{-2}$  和  $41 \text{ GW cm}^{-2}$ 。

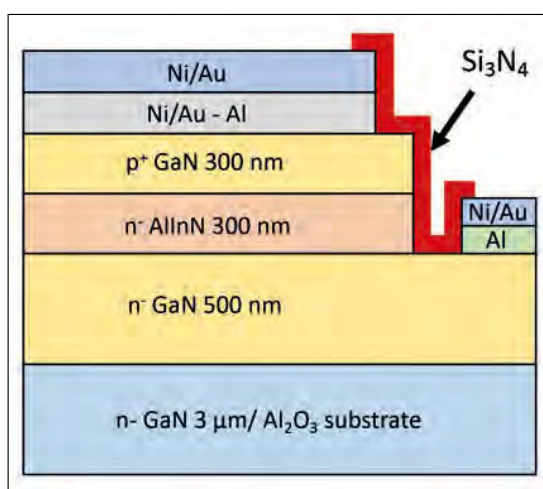
尽管从 Baliga 的品质因数来看， $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  略低于  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  和 AlGaIn，但在掺杂方面占优势，且已在 n 型和 p 型掺杂中得到了证明。

该团队的 AlInN 功率器件的开发始于评估蓝宝石上的 n 型 GaN 模板上 AlInN 外延层的生长。一个  $300 \text{ nm}$  厚的 AlInN 层的均方根粗糙度为  $3.5 \text{ nm}$ ，这是该三元体系的典型值，受 V 型缺陷和螺位错困扰。根据霍尔的测量，该团队的蓝宝石上的 AlN 模板的 n 型载流子浓度为  $2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，并且它的电子迁移率为  $370 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

这种低掺杂，晶格匹配的  $\text{Al}_{0.82}\text{In}_{0.18}\text{N}$  已被应用于功率二极管的异质结构中（见右图）。器件的制备过程中，先通过电子束沉积和蚀刻形成直径为  $60 \mu\text{m}$  的 p 型接触，然后在氮气下退火  $60 \text{ s}$  以确保欧姆接触。用感应耦合等离子体蚀刻产生了直径为  $60 \mu\text{m}$  的台面，暴露出下面的 n 型 GaN 接

触层，在添加  $2 \mu\text{m}$  厚的铝层之前在圆形台面周围形成了阴极接触。

为了帮助探测，研究人员在两个金属触点上沉积了 Ni/AI 膜并对其进行了构图。通过等离子增强 CVD 沉积  $\text{Si}_3\text{N}_4$  钝化层，并通过刻蚀去除接触区域的金属，便完成了器件的制备。



AlInN 功率二极管主结中高掺杂的 p 型 GaN 层和轻掺杂的 n 型 AlInN 漂移层。

对二极管的测量表明，受泄漏电流限制，击穿电压约为  $60 \text{ V}$ ；受 n 型 GaN 接触层内以及 n 型 AlInN 与 n 型 GaN 之间的界面处的扩散电阻的影响，导通电阻为  $0.53 \text{ m}\Omega \text{ cm}^{-2}$ 。

在正向偏置下，该团队的双极二极管在  $2.51 \text{ eV}$  至  $2.67 \text{ eV}$  处产生了强大的光致发光。人们认为这种发射远低于 GaN 和 AlInN 的带隙，是由钨从 AlInN 扩散到 p 型 GaN 而产生的非故意量子阱引起的。

通过更好地控制 p 型 GaN 的生长以及改换 GaN 衬底来消除这种量子阱，从而可以减少反向漏电流并增加击穿电压。引入 GaN 衬底还应该消除横向电流散布，并修整特定的导通电阻，这可以通过引入中间层和减少 AlInN / GaN 异质结电阻的掺杂设计来进一步降低。☞

### 扩展阅读

M. Peart et al. Appl. Phys. Express 13 091006 (2020)

| Advertiser | 广告商名称       | 网址                             | 页码  |
|------------|-------------|--------------------------------|-----|
| Aixtron    | 德国爱思强股份有限公司 | www.aixtron.com                | IFC |
| CREE       |             | wolfspeed.com/cschina-wolfpack | 23  |
| Evatec AG  |             | www.evatecnet.com              | 7   |
| 福禄克        |             | www.fluke.com.cn               | 2   |
| IQE        |             | www.iqep.com                   | BC  |
| 牛津仪器       |             | www.oxinst.cn                  | 17  |
| 特思迪半导体     |             | www.tsd-semicon.com            | 3   |
| 华卓精科       |             | www.u-precision.com            | 1   |

## 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

3. 图表编号一致;
4. 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;
5. 请勿一稿多投;
6. 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 Building,  
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)  
Min Lu (陆敏)  
minL@actintl.com.hk

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)**  
Floyd Chun (秦泽峰)  
floyd@actintl.com.hk  
Tel: 852 2838 6298

**China (中国)**  
**Shenzhen (深圳)**  
Jenny Li (李文娟)  
jennyli@actintl.com.hk  
Gavin Hua (华北平)  
gavinh@actintl.com.hk  
Tel: 86-755-2598 8571

**Shanghai (上海)**  
Hatter Yao (姚丽莹)  
hattery@actintl.com.hk  
Amber Li (李歆)  
amberli@actintl.com.hk

Linda Li (李承珍)  
lindali@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

**Wuhan (武汉)**  
Sky Chen (陈燕)  
skyc@actintl.com.hk  
Tel: 86-137 2373 9991

Eva Liu (刘婷)  
eval@actintl.com.hk  
Tel: 86-138-8603 3073

Grace Zhu (朱婉婷)  
gracez@actintl.com.hk  
Tel: 86 159 1532 6267

**Taiwan, Singapore, Malaysia (台湾, 新加坡, 马来西亚)**  
Floyd Chun (秦泽峰)  
floyd@actintl.com.hk  
Tel: 852 2838 6298

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

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

# 化合物半导体

**HS COMPOUND SEMICONDUCTOR** • CHINA  
Connecting the Compound Semiconductor Community

《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双月刊出版。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



*your*

# EPITAXIAL GROWTH

*partner*

InGaN InAlN AlGaN  
GaSb InSb InP InGaP  
InAlGaN GaAs AlGaAs

*Enabling advanced technologies*



- World leading technology
- Complete materials range
- MOCVD, MBE, CVD
- Advanced semiconductor wafer products
- Advanced R&D capabilities
- Multiple, manufacturing sites (Europe, Asia, USA)



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