

# 化合物半导体



# • CHINA

2021年 10/11月

采用智能切割技术的  
绿色 SiC 晶圆



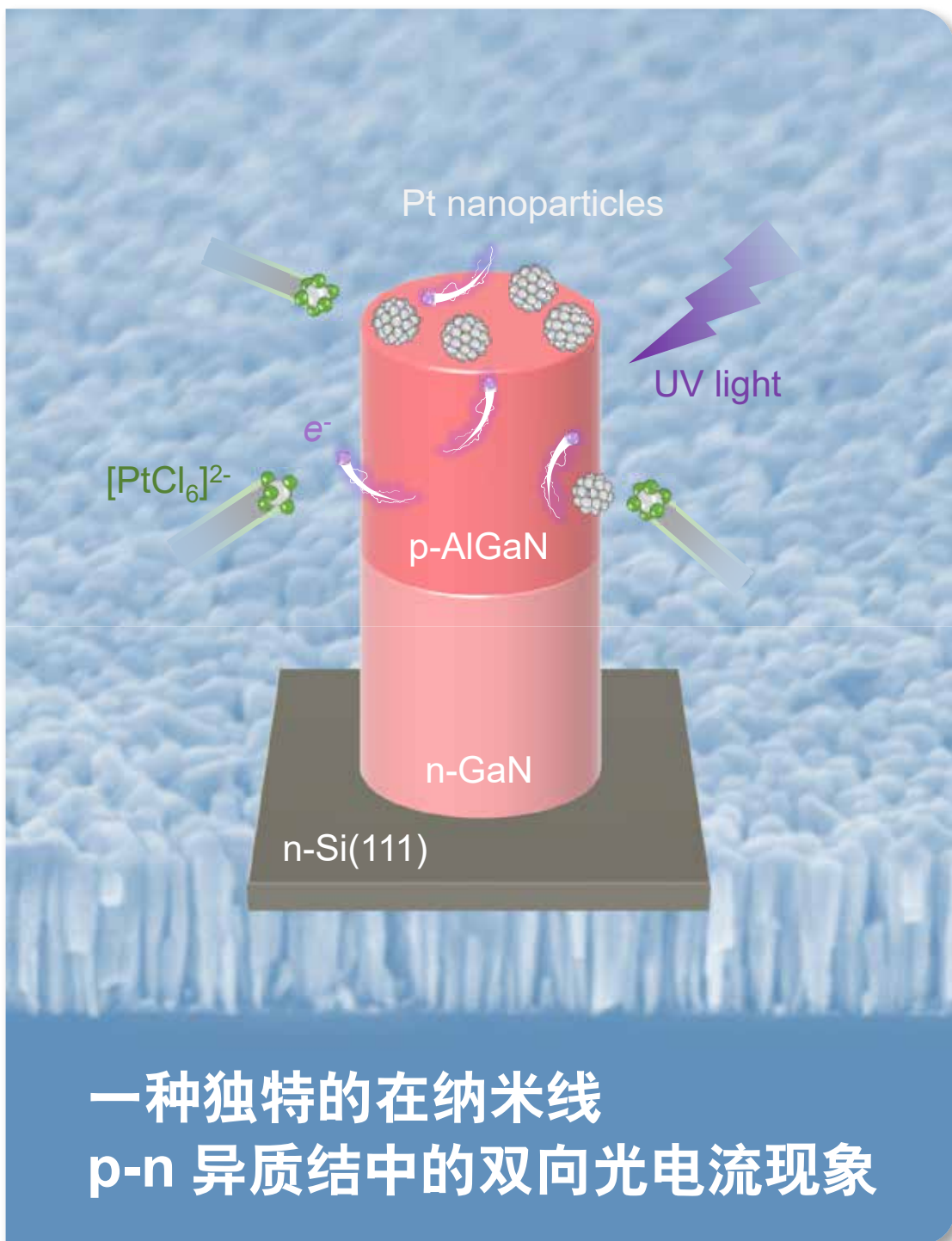
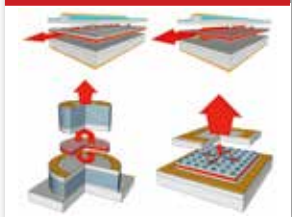
AIPN 的首次亮相

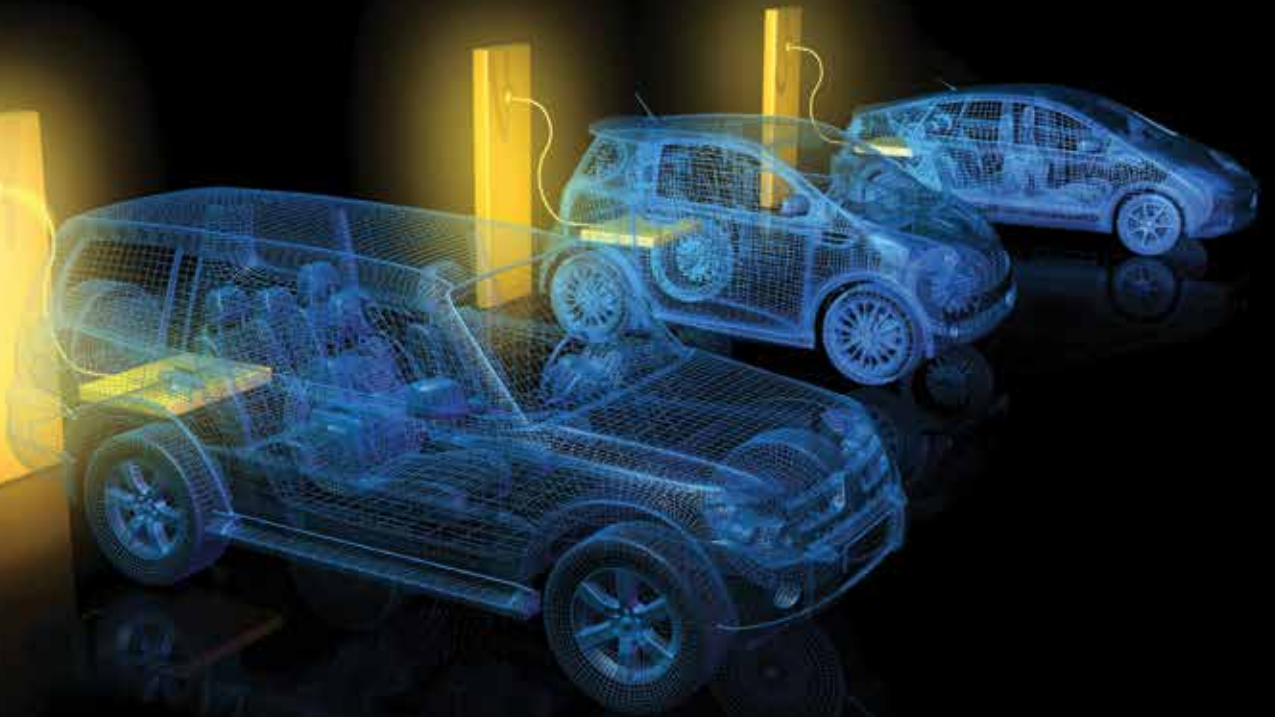


GTAT 满足快速增长的  
碳化硅需求



完美的激光





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



国际授权翻译

国内发行高新科技杂志

8本杂志免费送一年  
(6期/印刷版)

包揽全年行业资讯



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



免费  
订阅

扫一扫添加  
ACT读者服务号免费订阅

雅时国际资讯 (ACT International) 成立于1998年, 为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品 - 包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动 - 为跨国公司及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、洁净及污染控制等领域的约二十多万专业读者及与会者。

## 封面故事 Cover Story

### 08 一种独特的在纳米线p-n异质结中的双向光电流现象 Bidirectional photocurrent in p-n heterojunction nanowires

半导体p-n结因其具备独特的单向导电性而成为当今无数电子器件中最基础的构成单元。但同时因为传统p-n结必须严格遵循经典半导体物理中p-n结的单向导电性或整流特性，大大限制了p-n结器件的多功能性。在这里，我们创新性的提出一种在电解质溶液环境下工作的基于垂直排列p型铝镓氮半导体 (AlGaN) 和n型氮化镓半导体 (GaN) 所构建而成的纳米线p-n 异质结的光电化学光探测器。并利用铂纳米粒子修饰该纳米线，实现了一种独特的在不同光照条件下光电流极性反转的现象。也就是说，器件随着受光波长的不同，产生的光电流的极性（正号或负号）发生改变。具体来说，器件在两种不同波长（254 nm 和 365 nm）光的照射下，纳米线和电解质溶液界面处会触发还原（254nm光照下）或者氧化反应（365nm光照下），从而引起光电流的极性反转。该器件在0V工作条件下，在254 nm光照射下响应度高达-175 mA/W，在365 nm光照射下，其响应度为31 mA/W。

- 汪丹浩, 刘鑫, 康阳, 王晓宁, Yuanpeng Wu, 方师, 余华斌, Muhammad Hunain Memon, 张昊宸, 胡伟, Zetian Mi, 傅岚, 孙海定, 龙世兵

## 编者话 Editor's Note

### 04 第二代半导体之InP The second generation semiconductors: InP

- 陆敏

## 业界动态 Industry

### 05 通用汽车与Wolfspeed达成战略供应商协议，在通用汽车未来电动汽车计划中采用SiC

GM and Wolfspeed have reached a strategic supplier agreement to adopt SiC in GM's future electric vehicle plans

### 05 钙钛矿-硅复合材料达到近30%的效率 Perovskite-silicon composite material reaches nearly 30% efficiency

### 06 晶湛展示300mm硅基氮化镓HEMT晶圆 Enkris showcases 300mm silicon-based gallium nitride HEMT wafers

### 06 香港科技大学研究人员扩大GaN的范围 Hong Kong University of Science and Technology researchers expand the scope of GaN

### 07 InP裸片市场提供机会和利润 InP die market offers opportunities and profits

### 32 英飞凌和松下加速GaN的发展 Infineon and Panasonic accelerate the development of GaN

#### 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.



扫一扫  
免费下载电子书

## 高端访谈 Top interview

- 15 安森美赋能可持续发展的生态系统  
ON Semiconductor empowers a sustainable ecosystem

## 技术 Technology

- 19 采用智能切割技术的绿色 SiC 晶圆  
A greener SiC wafer with Smart Cut technology  
- OLIVIER BONNIN, ERIC GUIOT, WALTER SCHWARZENBACH 和 GONZALO PICUN; SOITEC 公司
- 24 AIPN的首次亮相  
A debut for AIPN  
- 马库斯·普罗斯特维克(Markus Prostovek), 名古屋大学
- 28 GTAT 满足快速增长的碳化硅需求  
GTAT MEETING RAPIDLY GROWING DEMAND FOR SIC
- 30 完美的激光  
The perfect laser  
- RICHARD TAYLOR, Vector Photonics
- 33 深紫外线设计  
Deep-UV designs  
- RICHARD STEVENSON

## 科技前沿 Research Review

- 40 雾化学气相沉积增强MIS-HEMTs  
Mist-CVD enhances MIS-HEMTs
- 41 Nichia提高了蓝绿垂直腔面发射激光器的效率  
Nichia raises the bar for blue and green VCSEL efficiency
- 42 利用极化工程实现GaN MSM紫外探测器的“自驱动”特性  
Using polarization engineering to realize the "self-driving" characteristics of GaN MSM ultraviolet detectors
- 43 用热循环增强蓝宝石模板上的氮化铝  
Enhancing AlN-on-sapphire templates with thermal cycling
- 44 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--为跨国公司与中国企业架起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



扫码关注我們

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

## 第二代半导体之 InP

InP 是 III - V 族化合物半导体材料家族中重要成员之一,它与 GaAs 一起担负起了第二代半导体的重任。在 Ge、Si 第一代半导体发展和研究的同时,大家对化合物半导体也开始了大量的探索工作。1952 年 Welker 等人发现 III 族和 V 族元素形成的化合物也是半导体,而且某些化合物半导体如 InP 等具有 Ge、Si 所不具备的优越特性,可以在微波及光电器件领域有广泛的应用,因而开始引起人们对化合物半导体材料的广泛注意。但是,由于这些化合物中含有易挥发的 V 族元素,材料的制备远比 Ge、Si 等困难。1962 年 Metz 等人提出可以用液封直拉法(LEC)来制备化合物半导体晶体,1965 ~ 1968 年 Mullin 等人第一次用三氧化二硼做液封剂,用 LEC 法生长了 InP 单晶材料,为以后生长大直径、高质量 III - V 族单晶打下了基础。但由于 InP 在熔点温度  $1335 \pm 7K$  时磷的离解压为 27.5 大气压,因此 InP 多晶的合成、单晶生长都相对比较困难,另外 InP 的堆垛层错能较低,容易产生孪晶,致使高质量的 InP 单晶的制备更加困难。所以目前相同面积的 InP 抛光片要比 GaAs 的贵 3 ~ 5 倍。因此对 InP 材料的研究要远滞后于 Si、GaAs 等材料。

与锗、硅材料相比,化合物半导体 InP 具有直接带隙结构,高的电光转换效率,电子迁移率高,易于制成半绝缘材料,工作温度高(400-450℃),强的抗辐射能力等许多优点。这些特性决定了 InP 材料在固态发光、微波通信、光纤通信、制导/导航、卫星等民用和军事等领域的应用十分广阔。按照器件处理信号类型分主要包括三大类:

1、光电应用:主要用于光纤通信技术,包括入户光纤和数据中心传输,以及目前正在大力发展的 5G 移动网络等。InP 就是生产光通讯中 InP 基激光二极管(LD),发光二极管(LED)和光探测器等的关键材料,这些器件实现了光纤通信中信息的发射、传播、放大、接收等功能。在 InP 单晶衬底上制备的 InGaAsP/InP, InGaAs/InP 异质结材料所制备的 1.3~1.6 $\mu m$  光电器件已广泛用于光纤通信中。事实上,目前全球高速互联网就是建立在这些器件的基础上的。

2、RF 应用:主要用于毫米波通讯、防撞系统、图像传感器、无线应用、卫星通信、军用雷达等方面,InP 半导体材料具有电子迁移率高及饱和载流子速率快,非常适用于高频 RF 器件,如高电子迁移率晶体管(HEMT)和异质结双极晶体管(HBT)等。这意味着用这种材料制作的器件能够放大更高频率或更短波长的信号,利用 InP 芯片制造的接收机和放大器可以获得 100GHZ 以上的频率。

3、光伏电池应用:InP 的带宽在 1.4eV 附近,因此可以制成高转换效率的太阳能电池。并由于其具有高抗辐射性能被用于空间卫星的太阳能电池。InP 基的太阳能电池目前报道最高可以获得 44.7% 的转化效率。

1980 年代 HEMT 技术和应用的迅速发展以及光纤通信事业的大发展,光电器件的走红,太阳能电池的大量需求,极大地推动了与这些技术密切相关的 InP 材料的研究和发展。

根据 Yole 测算,2021 年全球 2 英寸 InP 衬底需求达到约 400 万片,4 英寸 InP 衬底需求约 105 万片。到 2024 年,InP 市场规模将达到 1.72 亿美元,年复合年增长率为 14%。5G 时代光通信行业迎来快速发展,5G 基站网络结构的变化增加对光模块的需求,激光器和探测器是光模块的关键光电器件,产能有望扩张,进一步带动光通信核心半导体材料 InP 需求的增长。因此 InP 在 5G 时代(毫米波段应用)将成为终端设备以及基站设备前端射频器件的核心半导体材料,迎来更大市场空间。目前磷化铟衬底 90% 市场份额被国外厂商垄断,日本住友是行业龙头,占据着全球 60% 市场份额,美国通美市占率 15%,英法(法国 InPact、英国 WaferTech)的公司市占率各 10% 和 5%。

InP 基光子集成电路(PIC)及 InP 基 Tz 技术将是 InP 新的发展方向和市场增长点。前者将在光通信、Lidar、传感及医学诊断领域带来很多创新性应用;后者将对 6G 通信提供强有力的技术支撑,并且在大气传感及人体安检领域带来巨大市场。



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



## 通用汽车与 Wolfspeed 达成战略供应商协议，在通用汽车未来电动汽车计划中采用 SiC

通用汽车 (NYSE: GM) 和 Wolfspeed, Inc. (NYSE: WOLF) 于近日宣布达成一项战略供应商协议，约定 Wolfspeed 为通用汽车的未来电动汽车计划开发并提供碳化硅 (SiC) 功率器件解决方案。Wolfspeed SiC 器件将赋能通用汽车安装更高效的电动汽车动力系统，从而扩大其快速完善的电动汽车产品组合范围。SiC 将具体用于通用汽车下一代电动汽车的 Ultium Drive 单元所包含的集成电力电子之中。

根据协议，通用汽车将加入 Wolfspeed 供应保证计划 TM (WS AoSP)，旨在为电动汽车制造确保获得可持续且可扩展的材料。通用汽车全球采购和供应链副总裁 Shilpan Amin 表示：“我们与 Wolfspeed 达成的协议，代表着我们向着纯电动未来的转型又迈进了一步。电动汽车客户期望获得更长的续航里程，而且我们认为 SiC 是我们设计出满足客户所需电力电子的关键材料。与 Wolfspeed 合作将有助于确保我们实现纯电动未来的愿景。”

Wolfspeed 首席执行官 Gregg Lowe 表示：“我们与通用汽车的协议进一步表明了汽车产业致力于向市场提供创新电动汽车解决方案，并运用功率半导体的最新进步来提高整车

性能。该协议确保向通用汽车长期供应 SiC，帮助他们实现纯电动未来的承诺。”

SiC 功率器件解决方案将在 Wolfspeed 位于美国纽约州 Marcy 的 Mohawk Valley Fab 工厂进行制造。该工厂是目

前全球最大的 SiC 制造工厂，实现 200mm 制程。这一采用领先前沿技术的工厂将于 2022 年初投入使用，届时将大幅扩大公司 SiC 技术的产能。在全球电动汽车制造和其他先进技术行业，对 SiC 技术的需求正在不断增长。

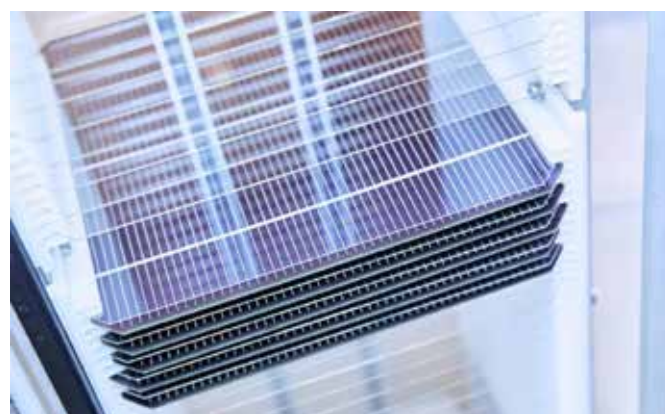
SiC 成为一种行业标准半导体在交通领域被广泛采用，为汽车行业向清洁能源车型的快速转型提供了有力支持。SiC 可实现更高的系统效率，从而在减轻重量和节省空间的同时，提升了电动汽车续航里程。Wolfspeed 的技术将为从 400V 到 800V 乃至更高电压的电动动力系统提供动能。CS



## 钙钛矿 - 硅复合材料达到近 30% 的效率

为了充分利用太阳光这一世界上最丰富的能源资源的潜力，几十年来，科学家们一直在努力最大限度地提高可以从太阳中提取的能量。在 AIP 出版的《应用物理快报》中，牛津光伏公司的研究人员描述了如何将金属卤化物钙钛矿与传统硅配对产生更强大的太阳能电池，克服单独使用硅电池 26% 的实际效率限制。“我们认为钙钛矿是硅串联系统的完美搭档，”作者 Laura Miranda Pérez 说。从材料的角度来看，钙钛矿满足光伏电池的所有光电要求，并且可以使用现有工艺制造。这些特性使钙钛矿成为硅技术的完美即插即用补充，因为它可以作为一层沉积到传统的硅太阳能电池上。Pérez 说：“我们通过不断创造世界纪录的效率，证明了钙钛矿 - 硅串联技术的潜力，我们目前的记录为 29.52%。”

钙钛矿材料的元素组成在现有供应链中很容易获得，这为快速扩大技术规模以实现应对气候变化所需的雄心勃勃的太阳能目标提供了明确的途径。此外，钙钛矿 - 硅串联电池的更高功率输出可以抵消生产光伏电池所需的高纯度硅所体现的碳足迹。因此，研究人员发现，将钙钛矿添加到现有的



串联太阳能电池克服了单独使用硅电池时 26% 的实际效率限制

硅光伏器件上是提高硅性能的最快方法，因为它绕过了与引进一项全新技术相关的行业中断。研究人员专注于串联太阳能电池已有七年之久，该小组现在非常接近在德国勃兰登堡的工厂开始大规模商业生产。Miranda Pérez 说：“我们希望帮助人们了解钙钛矿串联技术在提高太阳能装置效率并帮助世界实现为所有人提供可持续能源的目标方面的巨大潜力。”CS

# 晶湛展示 300mm 硅基氮化镓 HEMT 晶圆

位于中国苏州工业园区的 GaN 晶圆外延片代工厂晶湛半导体宣布，它已经展示了一系列高质量的 300mm 硅基氮化镓 HEMT 外延片，它们具有良好的厚度均匀性和低晶圆弯曲度，适用于 200V、650V 和 1200V 功率应用——为使用更复杂的 300mm CMOS 兼容线的器件加工铺平了道路。基于 GaN-on-Si HEMT 技术的商用 GaN 功率器件在消费电子、工业电子和数据中心以及能源、汽车和移动领域等广泛应用中越来越受欢迎。在成本降低和更复杂的集成电路设计的推动下，该行业现在正朝着更大的晶圆尺寸发展。

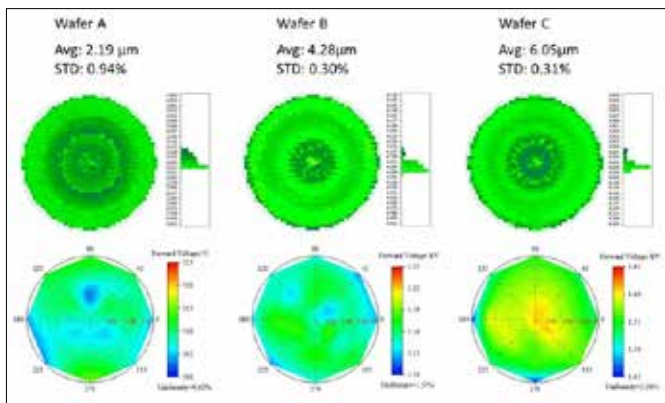


图1：外延片在200V、650V和1200V功率应用中表现出均匀性和低晶圆弯曲度

继 2014 年成功推出商用 200mm 硅基氮化镓 HV HEMT 外延片后，晶湛半导体现在已经成功将其 AlGaIn/GaN HEMT 外延工艺转移到 300mm 硅衬底上，同时保持了出色的厚度均匀性和 50 μm 以内的低晶圆翘曲。垂直电压击穿测量表明该晶片适用于 200V、650V 和 1200V 电源应用（图 1）。为解决晶圆开裂 / 弯曲和高结晶缺陷的关键问题而采用的 300 毫米硅基氮化镓外延层结构如上图 2(a) 所示。生长从 AlN 成核层开始，然后是应力消除层、GaN 缓冲层、AlGaIn 势垒层和 GaN 帽。如上图 2(b) 所示，狭窄的 XRD AlN(002) 峰和良好的 FWHM 均匀性表明整个 300mm 晶圆结晶质量

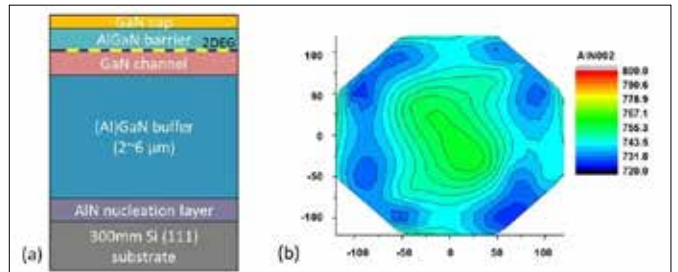


图2

很高。图 3 显示了 AlGaIn 势垒层中的 Al 成分和在从晶圆中心到晶圆边缘的九个位置测量的 2DEG 载流子浓度。测量结果表明，AlGaIn 势垒层中 Al 成分的平均值为 19.9%，标准值为 0.68%（图 3a），表明具有均匀的 2DEG 电气特性。这已被 CV 测量所证实，显示平均电子浓度为  $7.2E12 \text{ cm}^{-2}$  且误差小于 2%（图 3b）。

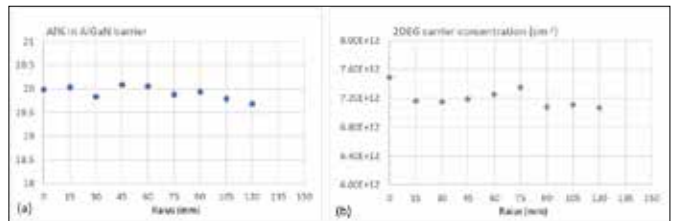


图3：显示了 AlGaIn 势垒层中的 Al 成分和在从晶圆中心到晶圆边缘的九个位置测量的 2DEG 载流子浓度。测量结果表明，AlGaIn 势垒层中 Al 成分的平均值为 19.9%，标准值为 0.68%（图 3a），表明具有均匀的 2DEG 电气特性。这已被 CV 测量所证实，显示平均电子浓度为  $7.2E12 \text{ cm}^{-2}$  且误差小于 2%（图 3b）。

“得益于我们优化的 AlN 成核层，我们能够生产无裂纹的 GaN 基 HEMT 外延片，满足 300mm 以下的大尺寸硅衬底的漏电流要求，”晶湛 CEO 程凯说，“尽管在向 300 毫米晶圆尺寸发展时，在外延工艺、应变管理和缺陷控制方面存在挑战，但我们在 AlGaIn/GaN HEMT 结构中实现了出色的结构质量和电气性能。这必将鼓励大功率集成电路的开发，以生产片上系统，并进一步降低 GaN 功率器件的成本。”

## 香港科技大学研究人员扩大 GaN 的范围

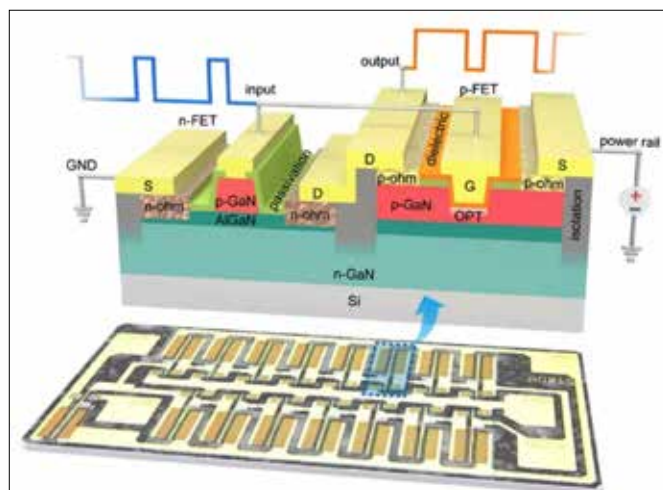
香港科技大学（科大）电子及计算机工程系 Kevin Chen 领导的研究团队最近将一个新成员——互补逻辑电路引入宽带隙 GaN 电子产品家族，从而大幅提升扩展了 GaN 研究领域的视野。GaN 基电子器件和集成电路的功能和性能

有望得到进一步提升，并变得更具竞争力。直到最近，节能 GaN CMOS 技术的发展一直很缓慢，因为在实施 p 沟道晶体管并将它们与互补的 n 沟道晶体管集成方面存在困难。在 GaN 功率器件技术平台上，Chen 的团队开发了一种新方法



来解决与栅极 - 电介质 / 沟道界面相关的棘手问题。他们设计了一种通过氧等离子体处理 (OPT) 技术实现的“掩埋沟道”结构，从而实现了 p 沟道 GaN 晶体管，其具有用于增强模式操作的阈值电压的良好平衡性能矩阵、高开 / 关 电流比和高电流驱动能力。还开发了单片集成工艺以实现与 GaN 功率开关器件无缝集成的 GaN CMOS 集成电路。

该团队表示，他们已经展示了一套完整的基于 GaN CMOS 的基本逻辑门，包括 NOT、NAND、NOR 门和传输门。该团队还展示了可以在兆赫兹频率下运行的多级逻辑电路。“这是一次激动人心的飞跃。我们首先证明了所有构建块都是功能性的，然后这些构建块可以组合在一起用于更复杂的实体。因此，可以通过组合这些逻辑门来构建任何基于 GaN 的互补逻辑电路，” Chen 说。这项工作中的器件技术是在科大位于清水湾校园的纳米系统制造厂 (NFF) 中开发的。这项工作得到了香港 RGC 研究基金 (RIF) 项目的部分支持，



将互补逻辑电路引入宽带隙GaN电子产品系列

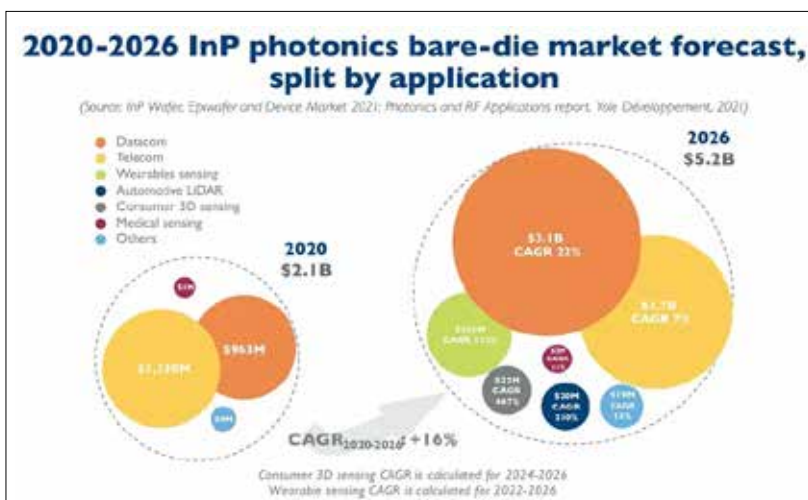
最近得到了来自深圳粤港澳大湾区科技项目的资金支持。这项工作最近发表在《自然电子学》上。☞

## InP 裸片市场提供机会和利润

“在 Yole，我们预计 2022 年 InP 在可穿戴设备中最初会有轻微的市场渗透，随后在 2026 年将显著增加至 2.55 亿美元，2022-2026 年的复合年增长率为 112%。” Yole Développement (Yole) 化合物半导体和新兴衬底技术与市场分析师 Ahmed Ben Slimane 断言。他补充说：“对于 LiDAR 应用，InP 可能很有前景，可以在更高波长下实现人眼安全。沃尔沃、采埃孚、大陆集团、戴姆勒等领先公司都对采用基于 InP 的 LiDAR 感兴趣。”

Yole 的分析师解释说，对于智能手机来说，OLED 显示器在 13xx 到 15xxnm 的波长范围内是透明的。有意去除手机屏幕上的摄像头凹槽并将 3D 传感模块集成到 OLED 显示屏下的 OEM 厂商正在考虑转向 InP EEL，以取代当前的 GaAs VCSEL。尽管这一趋势目前处于早期研发阶段，但 Yole 看到了多家厂商的浓厚兴趣，例如 ams、英飞凌科技、意法半导体以及多家激光器制造商和传感器制造商。

正如 Yole 团队在新的《2021 年 InP 晶圆、外延片和器件市场：光子和射频应用》报告中分析的那样，作为高速和远程光收发器不可或缺的构件，InP 激光二极管仍然是电信和数据通信光子应用的最佳选择。然而，在新冠疫情爆发和中美贸易关系紧张之后，电信基础设施部署中断，导致 2020 年 InP 市场略有放缓。数据通信领域对更高速度的数据



传输的要求正在增加，技术迁移到以最先进的 100Gbps 输出为目标的单一 InP 激光器，使其在 400Gbps 和 800Gbps 收发器中成为首选。

在大量采用高数据速率激光器的推动下，2020 年数据通信裸片市场达到了约 9.63 亿美元。预计到 2026 年将达到 31 亿美元，在此期间的复合年增长率为 22%。同时，由于 5G 部署，周期性 InP 电信市场将继续增长。Yole 预计，2020 年至 2026 年的复合年增长率为 7%，将从 2020 年的 11 亿美元增加到 2026 年的 17 亿美元。InP 行业是一个充满活力的市场，为传统企业和新进入者提供了大量机会。在其 InP 技术和市场分析中，Yole 报告了一个分散的市场，拥有众多公司，尤其是在设备层面。☞

# 一种独特的在纳米线 p-n 异质结中的双向光电流现象

半导体 p-n 结因其具备独特的单向导电性而成为当今无数电子器件中最基础的构成单元。但同时因为传统 p-n 结必须严格遵循经典半导体物理中 p-n 结的单向导电性或整流特性，大大限制了 p-n 结器件的多功能性。在这里，我们创新性的提出一种在电解质溶液环境下工作的基于垂直排列 p 型铝镓氮半导体 (AlGa<sub>0.3</sub>N) 和 n 型氮化镓半导体 (Ga<sub>0.5</sub>N) 所构建而成的纳米线 p-n 异质结的光电化学光探测器。并利用铂纳米粒子修饰该纳米线，实现了一种独特的在不同光照条件下光电流极性反转的现象。也就是说，器件随着受光波长的不同，产生的光电流的极性（正号或负号）发生改变。具体来说，器件在两种不同波长(254 nm 和 365 nm)光的照射下，纳米线和电解质溶液界面处会触发还原(254nm 光照下)或者氧化反应(365nm 光照下)，从而引起光电流的极性反转。该器件在 0V 工作条件下，在 254 nm 光照射下响应度高达 -175 mA/W，在 365 nm 光照射下，其响应度为 31 mA/W。

汪丹浩<sup>1</sup>，刘鑫<sup>1</sup>，康阳<sup>1</sup>，王晓宁<sup>2</sup>，Yuanpeng Wu<sup>3</sup>，方帅<sup>1</sup>，余华斌<sup>1</sup>，Muhammad Hunain Memon<sup>1</sup>，张昊宸<sup>1</sup>，胡伟<sup>2</sup>，Zetian Mi<sup>3</sup>，傅岚<sup>4</sup>，孙海定<sup>1\*</sup>，龙世兵<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>School of Microelectronics, University of Science and Technology of China, Hefei, People's Republic of China. <sup>2</sup>Hefei National Laboratory for Physical Sciences at the Microscale, Department of Chemical Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, People's Republic of China. <sup>3</sup>Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA. <sup>4</sup>Department of Electronic Materials Engineering, Research School of Physics and Engineering, The Australian National University, Canberra, Australian Capital Territory, Australia.)

半导体 p-n 结是众多电子元件的基本构建块，包括整流器 / 二极管、光伏电池、发光二极管 (LEDs) 和光电探测器。然而，所有基于 p-n 结的器件都必须遵守单向电流的物理特性，这限制了器件的可能功能。因此，在过去的几十年中开发了各种改进的器件设计。可以放大或切换电子信号的双极结型晶体管（一种半导体三极管）一开始就被创造出来，它为集成电路奠定了基础。同样，单个 p-n 结光伏电池的本质上是有局限的。然而，通过设计具有串联 / 串联电池的多结器件，在一系列材料系统（包括硅、III-Vs 和钙钛矿型太阳能电池）中实现了超越单结太阳能电池基本限制的显著功率转换效率。最近，这种多结或串联策略也被应用于单一结构内的双发光和检测光电器件中，用于能量收集显示器。

当与光电效应结合时，p-n 结可用于构建固态光电探测器。然而，由于两个基本工作原理，此类器件的检测能力受限于一定的光谱范围：入射光子能量需要大于半导体的带隙，并且由此产生的光电流在一定的外加偏压沿同一方向流动（单极光响应）。为了打破传统基于 p-n 结的光电探测器的限制，已经开发了由 SnS/ZnO

和 Sb<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>/ZnO 半导体制成的固态 p-n 异质结中的波长诱导光电流极性切换；这种器件的性能可归因于结中光伏效应和光热效应之间的竞争。这些结果表明双向光电流行为可用于应用，例如可切换光成像和光学通信，以及无滤光片颜色辨别。

在本文中，我们报告了一种基于均匀且垂直排列的 p-AlGa<sub>0.3</sub>N/n-GaN p-n 异质结纳米线的光电化学光探测器。在用铂 (Pt) 纳米颗粒修饰纳米线之后，结暴露于电解液环境中，该电解液环境起到第三电极的作用（类似于双极结晶体管中的第三电极），在恒定的外加偏压下，在不同的光照下，可以观察到器件具有相反极性的独特光响应。在两种不同波长 (254 和 365nm) 下对器件进行照射，会在纳米线 / 电解液界面触发相反的氧化还原反应，导致光电流的极性反转。该器件在 254 nm 和 365 nm 下的响应度分别高达 -175 mA W<sup>-1</sup> 和 31 mA W<sup>-1</sup>。产生的光电探测器在物理过程（单个 p-n 结中的光电转换和载流子传输）和化学过程（纳米线表面上的氧化还原反应）的组合下运行，通过简单地验证光电流的极性，提供了一种快速区分不同光谱带的方法。

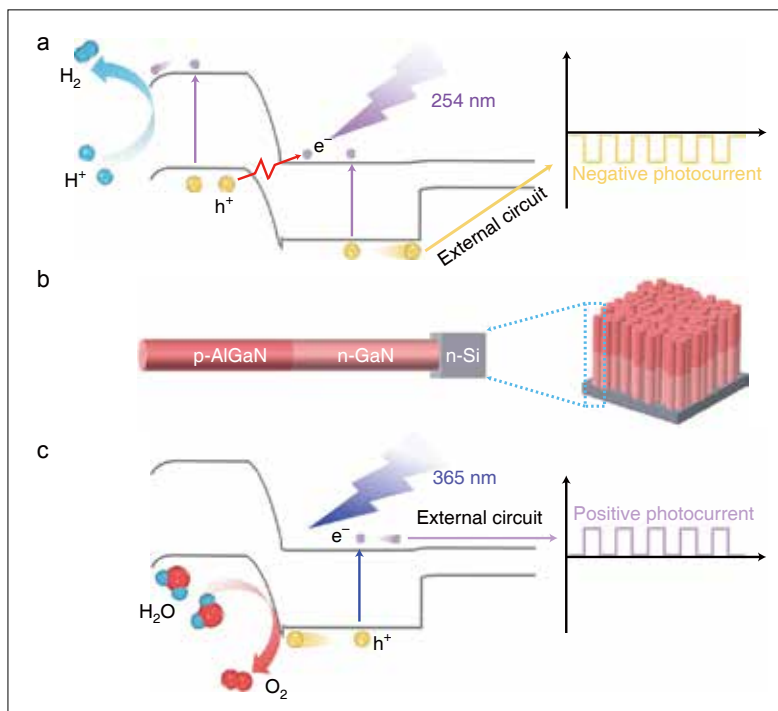
## 光电化学光探测器的构建

我们的光电化学光探测器由生长在  $n$  型 Si(111) 上的  $p$ -AlGaIn/n-GaN 纳米线组成 (补充图 1)。每条纳米线由沿轴向的 200 nm Si 掺杂  $n$ -GaN 和 200 nm Mg 掺杂  $p$ -AlGaIn 段组成 (图 1b 和补充图 1)。铝成分约为 35% 的顶部  $p$ -AlGaIn 专门设计用于吸收深紫外波段内的光 (例如, 我们测试中使用的 254 nm 光), 这些光也可以被下面的  $n$ -GaN 吸收。低能量光子 (例如我们测试中使用的 365 nm 光) 只能被底部的  $n$ -GaN 吸收, 因为  $p$ -AlGaIn 对 365 nm 光是透明的。此外, 由于  $n$ -Si 和  $n$ -GaN 导带边缘之间的带偏移相对较小,  $n$ -Si 衬底在有效载流子传输方面也起着重要作用。然后, 生长的  $p$ -AlGaIn/n-GaN 纳米线作为光电极来构建光电化学光探测器。

该元件的工作方式与传统的基于  $p$ - $n$  结的光电探测器不同, 主要是由于电解质辅助载流子传输特性是由物理和化学过程的组合引起的。图 1a、c 描述了在不同波长光照射下工作的光电化学光探测器的详细工作原理。沿着生长方向的能带图和相应的光电流信号也作了示意图。当用 254 nm 光照射  $p$ -AlGaIn/n-GaN 纳米线时, 在  $p$ -AlGaIn 和  $n$ -GaN 中都会产生电子-空穴对 (图 1a)。向下的表面能带弯曲有利于  $p$ -AlGaIn 中的电子向纳米线表面漂移, 以驱动质子还原反应 (析氢反应 (HER)), 而空穴则向  $p$ - $n$  结中的空间电荷区域迁移, 与从  $n$ -GaN 产生的电子有效地隧穿和复合。同时,  $n$ -GaN 中的光生空穴通过外部电路迁移, 并将水分子在 Pt 对电极处氧化成氧, 因此表现出负光电流信号 (补充图 2a)。

当纳米线暴露在 365 nm 光下时, 操作机制完全不同 (图 1c)。由于只有  $n$ -GaN 以吸收 365 nm 的光, 因此  $n$ -GaN 中的光生空穴很容易漂移到  $n$ -GaN/电解质界面并进行水氧化反应 (析氧反应 (OER)), 表面上带弯曲作为驱动力。同时,  $n$ -GaN/电解质界面处的能带弯曲和  $p$ - $n$  结的内置电场推动电子向外电路漂移, 通过电化学工作站记录为正光电流。这些电子最终在对电极处参与 HER (补充图 2b)。

本质上, 轴向  $p$ - $n$  异质结纳米线结构对于构建光检测电化学电池至关重要。通过选择合适的半导体材料, 以及所有纳米线与电解质环境的直接接触, 我们可以灵活地定制纳米线中每个的带隙以进行电化学反应。这种设计可以通过监测不同氧化还原反应产生的光电流的极性来区分光谱



范围。在这项工作中,  $p$ -AlGaIn/n-GaN  $p$ - $n$  异质结纳米线通过等离子体辅助分子束外延 (MBE) 系统在硅上生长 (补充说明和补充图 3 提供了纳米线的生长过程和晶体质量的详细讨论)。

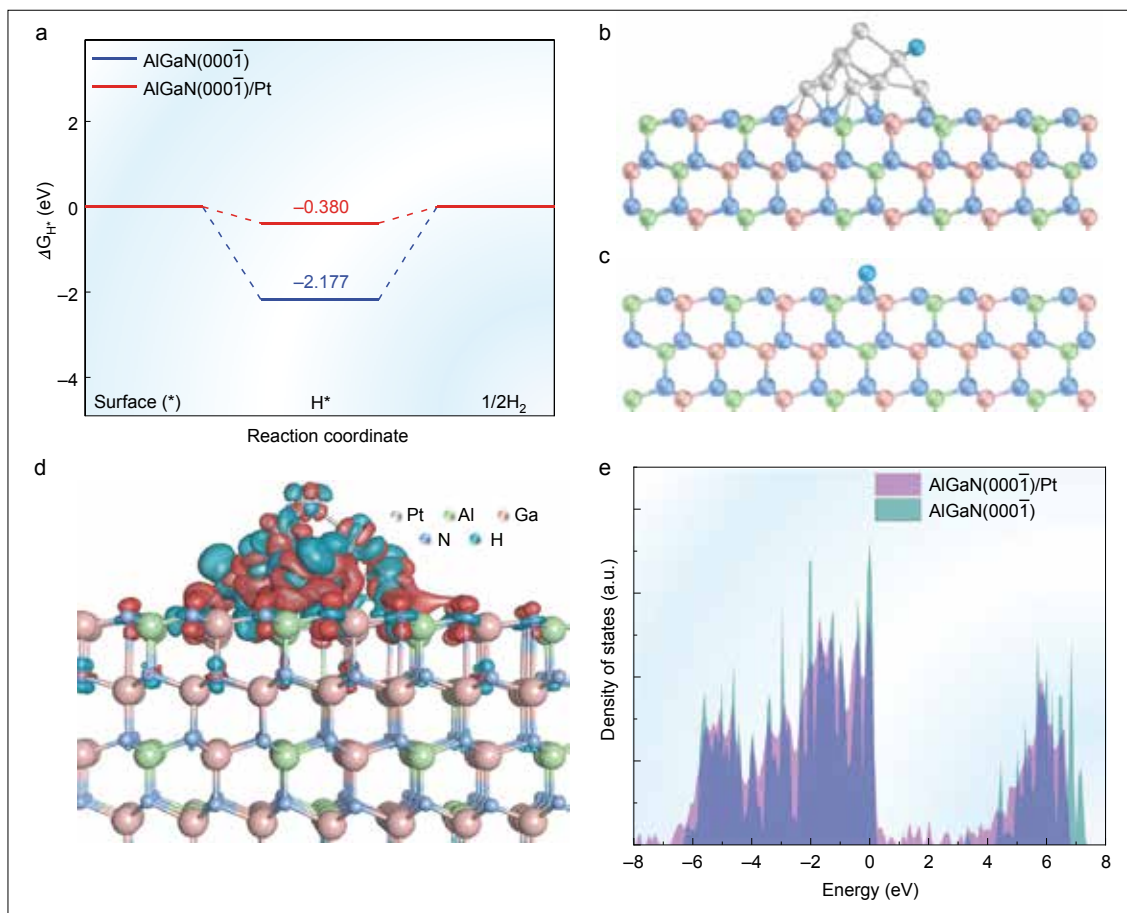
## 理论计算

与仅依靠光电效应进行光检测的传统  $p$ - $n$  结光电探测器不同, 基于纳米线的光探测电化学元件的光电流由参与氧化还原反应的光生载流子的数量决定。换句话说, 光电流的大小受光生载流子数量和氧化还原反应速率的影响。通常, HER 的速率主要由氢吸附自由能  $\Delta G_H$  决定。不幸的是, 裸  $p$ -AlGaIn 纳米线表面上反应中间体的吸附能不适用于 HER。为了提高 254 nm 光的检测效率, 需要修改  $p$ -AlGaIn 的  $\Delta G_H$  值。

在过去的几十年中, 人们已经认识到到催化剂在提高电化学反应速率方面起着至关重要的作用。通过助催化剂修饰, 可以同时提高反应中间体的吸附能和载体分离效率。因此, 我们基于密度泛函理论 (DFT) 计算进行了理论研究, 发现 Pt 纳米颗粒可能是修饰 AlGaIn 表面的最有效的质子还原助催化剂之一。图 2a 显示了计算出的 AlGaIn(000-1)/Pt 和 AlGaIn(000-1) 吸附中间氢的吉布斯自由能。图 2b、c 描绘了一个  $H^+$  吸附步骤的相应原子构型。显然, AlGaIn(000-1)/Pt 模型对 Volmer 步骤表现出相对较低的势垒, 能量势垒为  $-0.38$  eV。相比之下, 裸露的 AlGaIn(000-1)

图 1. 用于光检测电化学元件的  $p$ -AlGaIn/n-GaN 纳米线设计。a、254 nm 辐照下元件的运行模式。显示了能带图、光诱导光载流子激发、隧穿载流子复合、载流子扩散过程、 $p$ -AlGaIn 表面质子还原以及相应的负光电流信号。b、在  $n$ -Si 衬底上生长的  $p$ -AlGaIn/n-GaN 纳米线的示意图。c、该元件在 365 nm 辐照下的运行模型, 以及能带图、光诱导光载流子激发、载流子扩散过程、 $n$ -GaN 表面的水氧化和相应的正光电流信号。

图2. DFT 计算。a, 计算出的中间氢在 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1)/Pt 和 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1) 表面上的吸附能。b, c, AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1)/Pt(b)和 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1)(c)表面质子吸附步骤的相应原子构型。天蓝色、绿色、粉红色、宝蓝色和白色的球体分别代表H、Al、Ga、N和Pt原子。d, AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1)/Pt的电荷密度差异图。蓝色和红色区域分别代表电子的缺失和积累。e, 计算的AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1) (蓝色区域) 和 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1)/Pt (粉色区域) 的态密度。



表面的能量势垒高达  $-2.177\text{eV}$ 。这表明通过在 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1) 表面上掺入 Pt 纳米粒子, 可以优化质子还原热力学以促进 HER 过程。

为了实现高光电检测性能, 还应考虑电荷分离效率。幸运的是, 除了减少质子还原势垒外, Pt 纳米粒子还可以提高电荷分离和提取效率。进行微分电荷密度分析以阐明 Pt 纳米颗粒和 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 合金之间的相互作用。图 2d 说明电荷积累 (红色区域) 发生在 Pt 原子 /AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 界面, 而在 Pt 和 N 原子周围发现电荷减少 (蓝色区域), 表明电子显然由 Pt 和 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 合金共享, 这导致在禁带中产生新的杂交状态。为了进一步确认新诱导的电子态, 基于 DFT 方法计算了 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 块体和 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1) 表面和 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1)/Pt 的态密度。首先, AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 块体的计算带隙 ( $4.252\text{eV}$ ; 补充图 4) 与其实验值 ( $4.2\text{eV}$ ; 补充图 3) 的接近完美的一致性验证了我们的模拟方法和模型的高精度。其次, 如图 2e 所示, AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1) (蓝色区域) 的态密度呈现出典型的半导体特性, 带隙约为  $4\text{eV}$ 。关于禁带中小峰的解释可以在补充图 5 中找到。

最后, 当 Pt 纳米颗粒锚定在 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>(000-1) 表面时, 可以观察到带隙中的新状态 (粉红色区

域), 表明形成了新的迁移通道, 用于从 AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 到 Pt 纳米颗粒的载流子转移, 最终到达电解质。所有这些结果表明, Pt 纳米粒子的修饰赋予了该器件理想的氢吸附自由能以及在光电化学光检测过程中高效的电荷载流子提取。

### Pt 修饰和结构表征

基于理论指导, 我们通过使用选择性光化学沉积的 Pt 纳米颗粒来修饰生长的裸 p-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>/n-GaN 纳米线表面, 在此过程中, Pt 纳米颗粒锚定在电子选择性积累的表面位点上。图 3a 显示了光化学沉积过程的示意图。原则上, 当纳米线与电解质接触时, p-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 和 n-GaN 分别发生向下和向上的表面能带弯曲。因此, 只有 p-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 表面积累了由入射紫外光光生的电子。换句话说, 由于光化学沉积的固有选择性, Pt 纳米颗粒优先光沉积在 p-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub> 表面上。与其他随机合成方法 (例如, 化学还原) 相比, 光沉积方法更有利于光生电子漂移到光化学沉积的活性位点并参与 HER 过程。

为了阐明修饰后的 Pt 的化学性质, 通过 X 射线光电子能谱 (XPS) 研究了 Pt 的价态。如图 3b 所示, Pt 修饰的 p-AlGa<sub>0.5</sub>N<sub>0.5</sub>/n-GaN 纳米线的 Pt

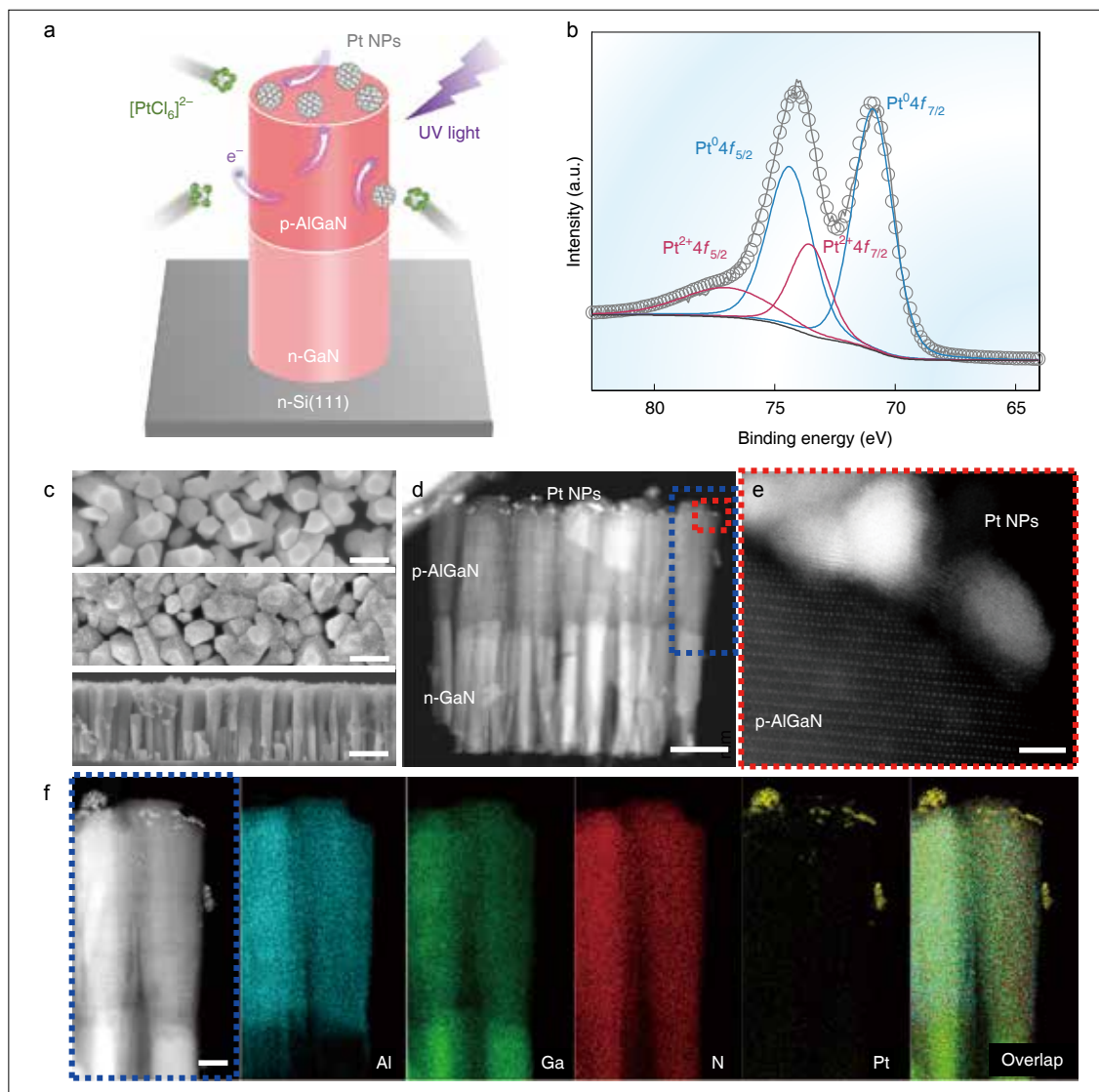


图 3. 纳米线的光沉积过程和结构表征。a, 在 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线上形成 Pt 纳米颗粒 (Pt NPs) 的光沉积方法示意图。b, Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的 XPS 光谱。高分辨率 Pt 4f 光谱由 3.45 eV 的自旋轨道分裂和 Pt 4f<sub>7/2</sub> 和 Pt 4f<sub>5/2</sub> 的 4:3 面积比拟合。c, 裸 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线 (顶部; 比例尺, 100 nm)、Pt 修饰的 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线 (中间; 比例尺, 100 nm) 和侧面的俯视图 SEM 图像查看 Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的横截面图像 (底部; 比例尺, 200 nm)。d, e, Pt 修饰纳米线的 STEM 图像概览 (d; 比例尺, 100 nm) 和 Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线顶部的原子分辨率 HAADF-STEM 图像 (e; 比例尺, 2 nm)。f, 选定区域的 STEM 图像和相应的 EDS 元素映射图像 (比例尺, 30 nm)。

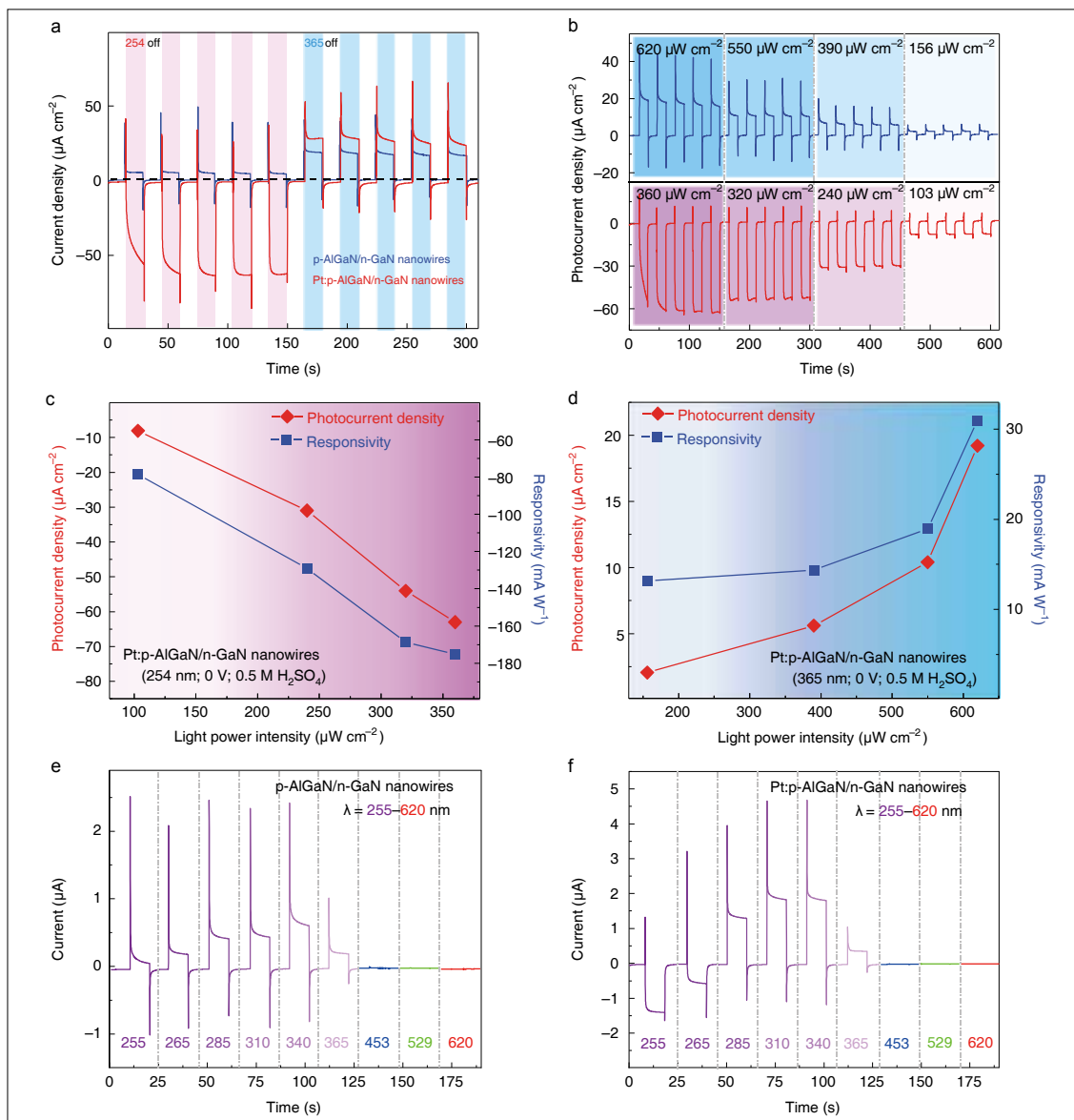
4f XPS 光谱可以指定为 Pt<sup>0</sup> 和 Pt<sup>2+</sup> 的混合物, 分别对应于金属 Pt 和 Pt(ii)O。如图 3b 所示, Pt 前体 (H<sub>2</sub>PtCl<sub>6</sub>) 的价态降低表明 PtCl<sub>6</sub><sup>2-</sup> 离子被光生电子有效地光还原。扫描电子显微镜 (SEM) 图像清楚地表明, Pt 纳米颗粒选择性地形成在 p-AlGaIn 上 (如图 3c 所示), 倾向于沉积在 AlGaIn(000-1) 的顶面上。为了进一步表征我们的 Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的结构特性, 我们进行了扫描透射电子显微镜 (STEM) 测量。可以看出, Pt 纳米粒子优先分布在 p-AlGaIn(000-1) 的顶面上 (图 3d)。

先前的研究报告说, 当助催化剂选择性地沉积在相应的电子集中部分时, 氧化还原反应可以增强, 因为电子往往会被捕获在助催化剂上, 从而导致更有效的电荷分离。相反, 如果助催化剂沉积在错误的片段上, 光电流将急剧下降。因此, 在我们的案例中, 由于 Pt 纳米颗粒主要位于 p-AlGaIn 表面, 因此有望提高光电检测性能。详

细的高分辨率高角度环形暗场扫描透射电子显微镜 (HAADF-STEM) 图像表明结晶 Pt 纳米颗粒的粒径约为 4 nm (图 3e), 具有两个不同的平面间距, 即 2.3 和 2 Å (补充图 6), 分别代表 Pt 的 (111) 晶面及 (100) 晶面。更重要的是, STEM 图像的能量色散光谱 (EDS) 元素映射分析直接证实了 Pt 纳米颗粒在 p-AlGaIn/n-GaN 纳米材料上的选择性分布 (图 3f)。

为了深入了解 Pt 修饰前后 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的载流子传输特性, 我们在 254 nm 光照下进行了电化学阻抗谱测量。众所周知, 奈奎斯特图中半圆的直径是电荷转移电阻的特征。如补充图 7 所示, Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的半径远小于 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的半径, 因此提供了明确的证据表明 Pt 修饰可以降低电子转移的电阻率。同时, Pt 纳米粒子可以作为有效的电荷存储介质, 用于从 p-AlGaIn 到电解质的轻松电荷转移。

图4. 光谱独特的光电检测特性。a, 基于p-AlGaIn/n-GaN纳米线和基于Pt:p-AlGaIn/n-GaN纳米线的光检测电化学电池在0 V下在254 nm和365 nm光照下的重复开关I-t特性。b, 基于Pt:p-AlGaIn/n-GaN纳米线的光检测电化学电池在254 nm和365 nm不同光强下0 V光检测电化学电池的I-t特性。c,d, Pt:p-AlGaIn/n-GaN纳米线在254 nm (c)和365 nm (d)不同光强度照射下的提取光电流密度和相应的光响应性。e,f, 不同波长( $\lambda$ ) LED照射下p-AlGaIn/n-GaN纳米线 (e)和Pt:p-AlGaIn/n-GaN纳米线(f)的电流信号。



此外, 我们通过室温光致发光 (PL) 光谱研究了生长的和 Pt 修饰的纳米线的载体特性。人们普遍认为, PL 峰值强度有效地反映了载流子的捕获、迁移、转移和复合效率, 并且与光相关电化学性能直接相关。补充图 8 清楚地显示了 Pt 加载后 PL 峰值强度的降低, 这证实了有效的载流子分离或载流子重组的抑制。

### 光谱独特的光电检测行为

基于我们的能带结构设计、理论计算和材料表征, 采用基于 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的光电极构建光电化学光探测器 (补充图 9) 并应用于 254/365 nm 光。为了对光电流的波长相关性切换有透彻和全面的了解, 我们对我们的光电化学光探测器进行了电流-时间响应 (I-t 曲线) 测试, 在 0V 下进行了多次光切换循环。在周期性切换

光的情况下, p-AlGaIn/n-GaN 和 Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的 I-t 曲线显示出可重复的开关行为。

图 4a 显示了 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线和 Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线在 0 V 下 254 nm 和 365 nm 光照下的光响应。裸 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线表现出在 365 nm 光照下的正电流密度为  $18.7 \mu\text{A cm}^{-2}$ , 而日盲区的电流变得更小, 电流密度仅为  $5.6 \mu\text{A cm}^{-2}$ 。重要的是, 两种光响应都是单极性的, 显示出单向电流瞬态响应。对于 Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线, 一旦入射光从 365 nm 变为 254 nm, 光电流极性就可以反转。Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线在 365 nm 照明下显示  $23 \mu\text{A cm}^{-2}$  的正电流密度, 而在 254 nm 照明下显示  $-64 \mu\text{A cm}^{-2}$  负电流密度。

值得注意的是, 两条 I-t 响应曲线中都有光电流峰值。光电化学元件中的这种瞬态光电流峰值可能归因于半导体/电解质界面附近的瞬态

# 深得 MBE 精髓

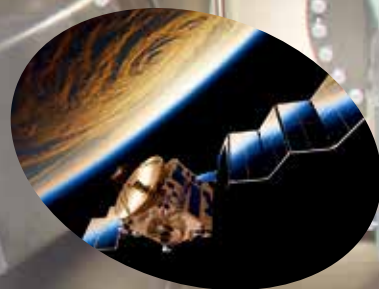
## 研发及生产设备全球市场最大拥有者

MBE不仅可以让  
我们去发现，更可以让  
我们去实现。

*Riber*是MBE设备和相关服务的  
世界主要的供应商。

拥有30年的经验，设计与客户  
密切相关的系统是公司的核心理念。*Riber*发明并设计的主要功能目前在所有MBE系统中都能找到。

*Riber*在MBE技术的发展中起着关键作用，为客户提供从设备配置到外延生长的整套解决方案。



**RIBER**

INNOVATIVE SOLUTIONS FOR SEMICONDUCTOR INDUSTRY

info@riber.com  
www.riber.com

载流子积累和复合, 通过在表面状态捕获电子/空穴。或者, 这可能是由热电效应引起的, 因为在基于 ZnO 的热电光电探测器中也观察到了这种瞬态光电流峰值。由于我们的 GaN 基纳米线还具有很强的热电效应, 此外, 纳米线的尺寸和形状也会影响氮化物纳米线的热电特性, 因此我们怀疑 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的热电效应可能会导致这种瞬态光电流峰值。尽管如此, 我们的电化学元件中的双极性光响应行为可以应用于光成像系统、可见光通信和精确室内定位应用的光诱导光电流极性可切换器件。此外, 通过在器件制造中选择具有高周期性和均匀性的纳米线阵列, 可以进一步小型化这种元件, 这可能导致下一代高像素、高分辨率成像/传感器。

为了进一步表征光电检测性能, 我们将光电流密度  $I_{\text{photo}}$  定义为如下:  $I_{\text{photo}} = I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}$ , 其中  $I_{\text{light}}$  和  $I_{\text{dark}}$  分别是分别从 I-t 曲线中提取的有光或无光的电流密度。然后评估了光强度相关的光电流  $I_{\text{photo-254}}$  和  $I_{\text{photo-365}}$ , 在不同 254 nm 光强度 ( $P_{\text{opt-254}}$ ) 下从 103 到 360  $\mu\text{W cm}^{-2}$  变化的  $I_{\text{photo-254}}$ , 与在不同 365 nm 光强度下 ( $P_{\text{opt-365}}$ ) 从 156 到 620  $\mu\text{W cm}^{-2}$  变化的  $I_{\text{photo-365}}$ 。  $I_{\text{photo-254}}$ 、 $I_{\text{photo-365}}$  的关系和辐照功率强度如图 4b 所示。可以发现,  $I_{\text{photo-254}}$  和  $I_{\text{photo-365}}$  都随着光功率密度的不断增加呈现正相关趋势, 显示出光强量化的潜力。  $I_{\text{photo-254}}$  值在  $P_{\text{opt-254}} = 360 \mu\text{W cm}^{-2}$  时最高可达  $-63.4 \mu\text{A cm}^{-2}$ ,  $I_{\text{photo-365}}$  值在  $P_{\text{opt-365}} = 620 \mu\text{W cm}^{-2}$  时为  $19.2 \mu\text{A cm}^{-2}$ 。图 4c、d 显示了作为不同  $P_{\text{opt}}$  值函数的  $I_{\text{photo}}$  和响应度 (R) 值。响应度计算如下:  $R = I_{\text{photo}}/P_{\text{opt}}$ , 其中  $I_{\text{photo}}$  为光强度。随着入射辐射的增加, Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线在 254 nm 光照下的响应率从  $-79$  增加到  $-175 \text{ mA W}^{-1}$ , 而在 365 nm 照明下响应率从  $13 \text{ mA W}^{-1}$  增加到  $31 \text{ mA W}^{-1}$ 。我们还对我们的器件进行了耐久性测试, 结果在补充图 10a、b 中进行了讨论。

为了确定光电流极性的切换点, 我们测量并比较了不同光照下的输出电流。图 4e、f 显示了在 0.5 M  $\text{H}_2\text{SO}_4$  中 0 V 不同波长的 LED 照明下, p-AlGaIn/n-GaN 纳米线和 Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的测量电流信号。结果表明, 裸 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的光电流表现出恒定的正极性 (图 4e), 而 Pt 修饰的 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的光电流极性高度依赖于波长入射光 (图 4f)。首先, 我们在波长低于 265 nm 的光照下观察到负电流信号。此后, 当器件暴露在更长波长 (285 nm 或更高) 的光下时, 光电流极性从负反转为正, 这完全遵循图 1 所示的工作原理。这一现象证实了我们通过简单测量光电流的极性来区分光谱带的器件设计的成功此外, 可见光照射 (入射光波长为 453 nm 或更高) 对应的光电流可以忽略不计, 这反映了我们的器件优异的可见盲特性。

此外, 在传统的固态光电探测器中, 光响应可以仅通过改变外加的电压或入射光强度来调整。对于我们的光电化学

光探测器, 本质上, 它们的光电流也可以通过周围环境轻松调节, 尤其是电解质, 这对光响应行为具有深远的影响。在补充图 10c、d 中,  $I_{\text{photo-254}}$  的值与  $\text{H}_2\text{SO}_4$  浓度的增加呈线性关系, 而  $I_{\text{photo-365}}$  保持在恒定水平, 这表明我们的光电化学光探测器也对电解质浓度敏感。这种额外的调谐能力可以进一步扩大我们的器件在复杂环境中对复杂光学和成像传感应用的应用。简而言之, 所有上述特征都表明 Pt:p-AlGaIn/n-GaN 纳米线在光谱选择性和敏感应用方面具有巨大潜力。

## 结论

我们已经报道了由 Pt 修饰的 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线组成的光电化学光探测器中的双向光电导行为。在不同光照下, 纳米线/电解质界面处的各种氧化还原反应触发了光电流的逆转: 在 0V 条件下, 器件在 254 和 365nm 下的响应度达  $-175 \text{ mA W}^{-1}$  和  $31 \text{ mA W}^{-1}$ 。这种双极光电导行为表明垂直 p-n 结纳米线可以提供可区分光谱带的光检测。我们的器件架构可以通过构建基于具有不同材料成分 (如 III 族氮化物或 III 族砷化物) 的二元或三元 III-V 半导体组合的纳米线 p-n 异质结, 潜在地提供对紫外线、可见光和红外线照射的不同响应。因此, 它可以提供一种直接且经济高效的方法来构建多通道光传感器和生物传感器、便携式光谱仪、光控逻辑电路和计算以及高分辨率光敏/成像器件。

## 方法

p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的分子束外延生长。采用射频等离子体辅助分子束外延技术, 在富氮条件下, 在 n 型 Si (111) 衬底上生长了 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线。为了去除有机污染物, 用丙酮和甲醇溶剂彻底清洁硅衬底。此后, 在加载到 MBE 腔室之前, 用 10% 氢氟酸去除基底上的天然氧化物。然后, 在开始生长之前, 通过在约 780°C 下对衬底进行原位退火来解吸残余氧化物。具有重构图案的反射高能电子衍射进一步证实了 Si (111) 表面的成功清洁。此外, 通过控制加热丝的温度, 使铝、镓、硅和镁喷射炉中的原子束流等效压力分别约为  $2.2 \times 10^{-8}$ 、 $7.1 \times 10^{-8}$ 、 $2.5 \times 10^{-9}$  和  $3.6 \times 10^{-9}$  torr, 而氮自由基由射频等离子体源提供, 正向等离子体功率为 350 W。对于掺硅的 GaN, 在 780°C 的衬底温度下生长纳米线; 对于掺镁的 AlGaIn, 在 835°C 的衬底温度下生长纳米线。

助催化剂 Pt 纳米颗粒的沉积。在室温下, 通过使用原位选择性光沉积方法将助催化剂 Pt 纳米颗粒沉积在 p-AlGaIn/n-GaN 表面。通常, 将纳米线样品浸入包含 100  $\mu\text{l}$   $\text{H}_2\text{PtCl}_6$  溶液 ( $20 \text{ mg ml}^{-1}$ )、15 ml 甲醇和 55 ml 去离子水的前体溶液中, 无需调节 pH 值。然后用汞灯照射纳米线 15 分钟。Pt 沉积后, 样品用乙醇和去离子水洗涤 3 次以上, 最后用  $\text{N}_2$  气干燥。所获得的样品用于材料表征和光电检测测量。SC





# 安森美赋能可持续发展的生态系统

关于可持续发展有很多报道，很多的国家、政府都在要求，员工也在要求，公司在大规模投入，股东要求可持续发展，这并不是可持续存在的原因，原因是这样做是正确的，这是必要的。如果我们看一下温室气体的排放趋势，汽车、工业领域占了温室气体排放的 2/3，考虑到气候的影响，这是我们重点关注的领域。但在汽车和工业领域，细分市场非常多，一个公司想选好自己的阵地，在很多细分市场上做的很好，其实这个决策很难做出，究竟专注于哪块业务？

安森美总裁兼首席执行官 (CEO) Hassane El-Khoury 接受了化合物半导体等众多媒体的采访。



安森美总裁兼首席执行官  
Hassane El-Khoury

**媒体：**安森美公布了新的商号“onsemi”的同时，向世界许下可持续发展的承诺，2040 年实现“碳中和”，为何安森美把时间定在 2040 年，接下来有什么具体的计划吗？

**Hassane El-Khoury：**首先，安森美更名就是为了做一家更加负责任的企业，帮助客户实现可持续发展和抗击气候变化方面的目标。为什么定在 2040 年这个年份呢，首先是因为，它是一个非常非常积极的目标，同时也是可实现的年份。如果把时间定的太久远，对人们现在的行为不会产生太大的影响，员工也不会感受到压力。而具体的计划就是整个公司层面，不论在任何地点、任何行业的业务部门都需要有自己具体的计划降低能源的消费，降低排放。同时从每一个员工的角度，安森美拥有 34000 名员工，人人行动起来，目标将会实现。整个策略是非常广的，跨越到公司的各个层面。涉及到不同业务和地区的话，可能会有一些细分和不同，具体的计划做出来，负责这部分的人向我本人汇报，这是我们全公司的承诺。

**媒体：**关于这次收购 GTAT，GTAT 目前月产能如何，收购对 GTAT 之前和其它客户的供应承诺是否会产生影响？现在安森美对碳化硅年需求是多少片？GTAT 以后能满足这一需求并有余吗？

**Hassane El-Khoury：**首先，我要说一下收购 GTAT 这家公司，是因为要支持客户对于碳化

硅长期的需求，尤其客户在电动车生产爬坡之后对于碳化硅需求更高，确保市场上碳化硅可用性，到 2028 年电动车销量占到汽车销量 50%，碳化硅是非常需要的材料。至于月产能和年产能，现在签署了最终协议，收购交易还没有最终完成，GTAT 现在是一家独立的公司，产能取决于自己内部规划，直到完成了收购过程之后我们才能规划让产能扩张。其它产品方面的产能，现在支持他们与自己的客户所签订的供销的协议，因为它们现在是独立的公司，等到收购完成之后也会支持它们以前的客户，同时也会扩张新的客户。

**媒体：**全球新能源汽车市场增长迅猛，尤其是新能源节能的需求给第三代半导体提供了大量增长机遇。安森美作为该领域的主导者之一，在碳化硅和氮化镓领域的投资结构是怎样的？

**Hassane El-Khoury：**关于投资，如果看上一季度的财报，营收 6% 做了资本投入，投资于新的技术和产能。如果看未来两年的计划 6% 的资本支出，将会增长到 12%，未来在产能方面投入将会是现在的 2 倍，投入主要有两个方面，一个是扩充 300 毫米晶圆厂的产能，另外在整个碳化硅供应链全部环节，包括基板衬底到最终产品到封装相关的技术都会进行比较大的投入，看未来 5 年公司制造产能将会是现在的 1.3 倍。

**媒体：**您认为芯片短缺主要原因是什么，有什么样的解决方案。安森美针对汽车和工业相机

市场，芯片供应情况如何？也有人认为现在芯片短缺，未来出现芯片产能过剩的情况，您怎么看？

**Hassane El-Khoury**：首先来回答关于芯片短缺的问题，因为我们知道 2019 年整个半导体行业进入了销售库存的阶段，因为很多客户在 2018 年采购了大量的芯片，2019 年还有剩余的库存没有用完，消费不是特别旺盛。因此这个行业产能也有相关的调整，但是到了 2020 年疫情席卷全球影响了所有的行业，所以说大家都是处在基本停滞的状态。

到了 2021 年，各个行业开始逐渐恢复，恢复了之后就所有的行业，包括汽车行业、消费者行业，因为很多人在家办公，需求同时增大了。需求从四面八方来的时候，半导体行业的产能一下子跟不上需求平行的涌现，所以说这个是目前芯片短缺最大的原因，而我们的解决方案是安森美在跟客户进行密切的合作和沟通，支持战略技术的发展和产能的扩张。未来五年会投产更多的产能和技术。

像您说的未来是否会出现产能过剩的情况，我个人认为不会出现。到目前为止没有谁能够 100% 将供应和需求完全匹配。虽然说可能供应有所增加，但是需求增加的更加旺盛。尽管再过一段时间当需求区域比较平缓的时候，供应也会匹配着需求而来，而不是出现供应过剩的现象。比如说智能电源和智能感知技术，如果智能电源技术发展起来有了更多的产品，电动车领域也会相应在它的支持下有更长足的发展，多出来的产能也会被电动车行业消耗，我们的供应跟着产业走不会出现供应过剩的情况。

关于汽车领域和工业相机这方面，安森美的一些做法，我们会持续在这些领域研发的投入，如果要想在这个市场胜出，必须有足够好，尺寸足够小，功能足够全的摄像头，我们会支持在这方面产能的扩充，同时支持 ADAS 系统的发展。

**媒体**：您对未来自动驾驶的看法，认为未来自动驾驶的落地需要多长的时间？

**Hassane El-Khoury**：其实关于自动驾驶，现在市场上人们已经开始很少谈及四级五级自动驾驶，换了一个说法叫做二级以上，就是 L2+ 说法，它其实是比较好的也是可持续的方向。L2+ 现在已经具备了，汽车当中电子含量大大增加了，不管是摄像头还是雷达、激光雷达，我认为在未来 5-10%，L2+ 都是舒适区的说法。像国内 AutoX 这些公司在一些有限的条件下，能够在市区环境实现完全的自动驾驶了。但就大众市场全面自动驾驶的实现，我认为还得是下个年代的事情，未来 5-10 年不会完全落地，要再下 10 年。

**媒体**：汽车图像传感器领域竞争在加剧，您认为安森美在汽车图像传感器的优势是什么，以及图像传感器会有怎样的趋势？

**Hassane El-Khoury**：我们的确看到有一些新公司想要进入到汽车市场，尤其是进入到 CMOS 图像传感器 (CIS) 的领域。但是我想要强调的是安森美的业务并没有涉及到移动和消费市场，我们还是专注于汽车市场，在汽车市场我们的全球市占率达到 60%，在 ADAS 市场的市占率是 80%，我们还是相当大的优势。

因为我们的技术从最开始就是为了汽车行业，为了汽车而设计，而不是将用于移动和消费行业相关的技术拿来嫁接到汽车上。我们为汽车从头进行量身定制专属设计，具备很多优势。比如说刚才强调汽车的摄像头在非常亮和非常暗的环境下—视同仁，有智能感知和高像素的功率范围，把它叫做 HDR（高动态范围）。刚才提到的全局快门可以探测到快速移动的物体，并且使得这个图像成型，这都是具有优势的技术。

另外还有一点是车辆安全完整性最高要求的等级，要求汽车内部的摄像头不能够出故障，必须绝对可靠，这也是我们的专利和 IP。虽然说这方面市场上有更多的竞争者，但是我们的优势是投入与客户非常需要、完全不可或缺的功能。而且在这方面已经有了长足的发展，所以竞争对手想要短期赶上我们是不可能的。

**媒体**：之前有数据现实安森美图像传感器在高级驾驶员 ADAS 和自动驾驶 AD 领域拥有超过 80% 的市场份额，这个数据是否有变化，汽车要实现更安全的自动驾驶在感知技术上还有哪些需要提升的地方？

**Hassane El-Khoury**：份额的数字没有变化，现在还是 80%。未来在智能感知方面更高的要求是集成，因为需要在汽车的摄像头侧需要有更多分析和决策的能力，算力需要增强，而不但依赖汽车主机的处理器。在摄像头里边边缘算力和智能需要增强，这样可以卸载一些主处理器上的工作负载，同时需要进一步降低整个处理的延迟。

**媒体**：安森美如何借力中国产业政策和国际市场机遇来发展壮大自己，与过去相比安森美在中国发展得到了哪些新优势，又遇到哪些新困难，安森美未来在中国有哪些扩容计划？

**Hassane El-Khoury**：首先强调一下我们的制造遍布全球，没有任何一款产品是完全在一个地方生产，所以在中国有制造中心在别处也有，如果进行制造产能的扩充也在全球范围内进行扩充，而不局限于某一个地区。中国非常重视自动驾驶汽车的发展，同时在电动车领域也有相当大的投入，有很多中国电动车的品牌已经走向了国际。所以我们会跟这些客户保持良好的关系，不仅仅是电动车领域的新客户，也有整个汽车行业的客户。如建立联合实验室，依照客户的意

见共商共建的解决方案，能够更好服务于客户，这是我们所具有的优势和机遇。我们会帮助在中国的客户，按照他们的计划扩容。

**媒体：**针对中国大力发展智能制造市场，安森美对接下来用于工业生产中的机器视觉应用，有什么新的产品计划和部署？

**Hassane El-Khoury：**在这方面我们还是非常强调全局快门技术，它是实现最快吞吐量的技术，能够捕捉到快速移动的物体，同时产出非常清晰的图像，这个技术可以应用于库存管理，更重要的如实时质量检测、质量控制，这些都是有非常好的应用。

工厂在智能制造方面需要提高作业的效率，需要提高自动化，所以吞吐量上涨非常快。为了使得生产线赶上吞吐量的增长，需要生产线具备全局快门的技术和能力，不管是库存管理还是质量检测，还是在其它工业自动化方面，都能够得到更好的满足。

**媒体：**安森美全新口号是“智能技术，美好未来”，请问安森美如何看待未来智能技术的普及，以及如何布局自己的产品线？

**Hassane El-Khoury：**关于智能技术方面，我们的布局是要发展差异化的产品和技术，尤其是智能电源和智能感知技术。在智能电源方面主要是把感知技术集成在里面，不管是电流、电压还是温度的控制器都能够嵌入电源内部，这样的话能够提高效率，提高性能。

而在智能感知方面，不管是图像传感器还是其它应用和领域，我们会专注于功能的集成。像全局快门、高动态范围，都是为了提高每一个模块本身的智能，从而提高效率、能效、吞吐量，在更小的尺寸上实现更好的功能和性能，通过这些方式支持可持续生态系统的发展，推动美好未来的建设。

当然“智能技术，美好未来”这个口号刚刚提出，需要很多年努力和很长的旅程，我们都知道“千里之行，始于足下。”我们现在是刚刚开始，所以会坚持在这一领域进行投入，创造更大的价值，也帮助客户创造更大的价值，这样共同创造更加美好的未来。

**媒体：**智能技术离不开处理器和 AI 技术，在这方面安森美有什么规划？

**Hassane El-Khoury：**一说到智能可能很多人都想到主机处理器 AI，其实我觉得智能是分布式，会分布在系统各个方面，所以说除了主机 AI，在边缘也有智能，同时像刚才提到电源技术、传感器技术，也是含有智能的，比如说像图像处理器也是一个处理器，只不过服务于图像特定的用

途，但是它本身也是处理器。

如果说电源功率器件，虽然功率器件本身并不是处理器，但是也可以从内嵌于传感器的处理器当中受益，组合起来也可以看作是处理器。同时看智能的方式，不管是 AI 还是自动驾驶的汽车，也需要功率器件，需要电源驱动它们，哪怕一个自动驾驶汽车内部有最好的自动驾驶的计算系统，如果没有电源、功率器件，它也运作不起来。我们看智能方式不局限于处理器和 AI，而要看到更加广泛的视角。

**主持人：**WiFi-6 将如何与安森美新战略结合？

**Hassane El-Khoury：**我们主要的业务专注于智能电源和智能感知技术，而联接也是我们的一块业务，但是它是另外一个领域。比如说蓝牙用在医疗行业，我们知道 WiFi-6 是新一代联接技术，可以广泛应用于智能工厂、智能家居、智能汽车，在这一块的布局主要是通过研发去支持客户的设备，使得在物联网市场上能够有更大的布局。

**媒体：**之前安森美的并购思路非常明显，未来安森美是否会持续之前的并购思路，还是说未来的产品组合和投资方向也有新的变化？

**Hassane El-Khoury：**说到并购，其实所有的并购宗旨是要完善在智能电源和智能感知产品组合方面的进展。所有并购都是工具，需要来支持和加速公司战略的实现，比如说上周对 GTAT 的收购也是一个例子，展示如何利用并购实现目标，帮助客户在智能感知和智能电源方面满足他们的需求。

至于产品组合上我们是有一些变化，我今天一再强调智能电源和智能感知，就是未来要加大投入的重点业务领域。同时有一些业务会逐渐减少，甚至是退出，这就是公司最新的方向。

**媒体：**现在“碳中和”和“碳达峰”在驱动着功率市场的发展，安森美预计未来功率市场的走向和需求是什么样的？

**Hassane El-Khoury：**在功率市场方面的发展是有加速，因为政府推动可持续发展和抗击气候变化在这方面进行发力。我们的目标是首先保证有足够的产品，智能电源和智能感知方面的产品，支持客户在这方面的转型，比如汽车从内燃机转向电动汽车的转型，所以说在这方面我们会有非常大的投入，投入技术差异化和具有战略优势的解决方案，同时更重要的是给客户保持长期稳定的供应。

**媒体：**汽车和工业领域是安森美传统的强势领域，但在本次发布会中我们也看到安森美在数据中心领域的布局，谈

一下对数据中心市场的看法，认为这个市场为安森美提供哪些机会？

**Hassane El-Khoury**：我们的重点关注市场还是汽车和工业领域。至于数据中心尤其是 5G、云电源方面也是目前市场，原因是支持这个市场的技术和产品也是为汽车和工业市场最终服务。我们之前提出 5G 和云电源的市场未来增长率将会达到 11%，这是非常健康的数字，我们知道智能工厂需要在 5G 方面投入，车联网和 ADAS 也需要 5G 的投入。

**媒体**：安森美转向 Fab-Liter 是基于哪些考虑，未来 IDM 向 Fab-Liter 是一大趋势吗，您如何看待代工模式的变化？

**Hassane El-Khoury**：其实对于我们来说，Fab-Liter 形式也不能说是全行业未来的增长趋势，它是安森美现阶段战略。我们会需要扩充产能，尤其是 300 毫米晶圆的产能，同时对于一些产能不足的晶圆厂会进行退出，会减少工厂的数量。但是增加工厂和产能，减少物理的厂址，留下来的工厂产能将会扩张，同时一个重点是进一步开发差异化技术，包括智能电源和智能感知的内部产能。至于其它的技术可以代工的话，就会跟代工厂密切合作，利用外部产能支持客户。Fab-Liter 的模式能更好、更灵活利用外部产能，更好为客户服务。

**媒体**：刚才介绍了安森美全局快门增强机器视觉的案例，从机器视觉、生态系统来看，在前端感知和后端算法方面还存在哪些可以改进的地方？安森美对此有哪些解决方案？

**Hassane El-Khoury**：我们认为在机器视觉上，还是取决于能够创建出多少种新的功能。全局快门是其中一种技术和功能，刚才提到 HDR 高动态范围也是另外一个功能，我们也会持续对它做出改进。

有了这些新的功能就能够使我们处在一个比较好的竞争地位。但是创新是永远不会停步的，对于任何技术和应用而言我们都会进行不断地创新，而且不仅仅是在图像这一个领域，整个电源的能效也是非常重要的。我们通过联合发力的方式，提高整个作业的能效。

**媒体**：您在 Cypress 担任 CEO 的时候，对自己的定位是：一位工程师；一个创新先锋；一名难题解决者。来到安森美之后，这样的定位是否会有一些变化？作为头顶“硅谷最年轻 CEO”光环的人，您的加入，会给安森美带来哪些不一样的变化？

**Hassane El-Khoury**：其实我的性格特点一点都没有改变，就像您描述的这是我的个人风格，不会以我加入的公司而转移，我的个性特点走到哪里也会带到哪里，尤其作为

问题解决者和创新先锋，我也会把这样的特点带到安森美。

这是我跟安森美非常契合的原因，同时因为董事会接受我秉性使然也是我非常愿意来安森美的原因，就是因为我个人性方面的解决问题和推动边界的特点，与公司方向和战略是完全契合的，这样双方可以达到双赢的效果。就是当 CEO 跟整个公司的文化、跟公司其他员工的方向都是一致的时候，能够拧成一股绳，使得公司走的更加长远。

而至于作为硅谷最年轻的 CEO，当然也有我的优势，因为我面前的机遇很多，要做的事情也很多，因为年轻我也会具备更大的能量去完成未来的工作。

**媒体**：人工智能、大数据等新兴技术都是耗电大户，您关注到哪些技术趋势可以降低电力电子能耗，对于如何提升半导体器件及系统的能效比，安森美有何技术储备和布局思路？

**Hassane El-Khoury**：这些耗电大户能耗是一方面，但是另外一方面需要考虑的是密度，在服务器、计算处理器电源功率密度是怎么样的，密度提升就可以提升能效。所以说我们会投入于功率密度相关的技术，包括 IGBT 在内，优化在碳化硅方面的能效，至于投资主要分了三个层面：

首先，底层技术方面，进行相应的投入。

第二，基于技术构建起来的产品，在提升产品性能方面进行相应的投入。

第三，把产品组合成模块，在模块设计和工程方面也会有相应的投入。

这三个方面协作，能够构建出具有竞争力的解决方案，而我们的团队也是非常专注的，在这三个方面的创新目前都是非常领先的。

**主持人**：在汽车工业 5G、云电源领域相对于竞争对手安森美的特色和优势是什么？

**Hassane El-Khoury**：其实说到底，员工创新的能力和差异化能力是我们最大的优势。不管是在任何行业和市场，在员工的能力的支持基础之上，我们有优势的技术、器件、封装等等，在市场上处于领先的地位，帮助客户解决问题。无论产品技术多好，背后支持的都是员工、人的创新能力，这一点是最宝贵的资产。

## 总结

**Hassane El-Khoury**：我想再一次强调非常荣幸加入安森美团队，我们公司有非常宏伟的战略，我们会专注一项一项地落地和执行，最终这些战略将转化为服务客户的能量，促使客户的业务有所提升。更广泛来讲就是利用我们的技术创造更美好的未来。这是我很骄傲的。CS。



## 采用智能切割技术的绿色 SiC 晶圆

智能切割基板技术为电力电子元件的生产开辟了一条更环保、更快、更好的道路

OLIVIER BONNIN、ERIC GUIOT、WALTER SCHWARZENBACH 和 GONZALO PICUN, 来自 SOITEC 公司

今年，中国和中美发生了可怕的洪水，北美气温飙升。因此，在二氧化碳排放水平上升的推动下，气候变化似乎已经开始。科学界普遍认为，这种情况只会恶化，如果气温的额外上升不限于 1.5°C 以下，我们的气候将发生重大变化。

减少二氧化碳排放量并保持在这一限度内以防止气温上升的关键是可持续发展，其中包括引入更环保的技术和流程。工业部门、发电和运输业目前约占所有二氧化碳气体排放量的四分之三。因此，显然有必要建立一个更好、更绿色的能源生态系统。这可以通过在三个方面进行实质性改

进来实现：削减数据中心消耗的能源、增加可再生能源的生产以及加快零排放汽车(ZEV)的生产。

在 ZEV 领域，必须努力抓住一切机会提高功率转换效率，从发电到动力系统的供电。为了在这项工作中取得优异成绩，必须转向使用更环保的电力电子器件，以提供更好的性能并采用更环保的生产工艺制程。

今天现有产品是基于硅的组件，在其理论极限下运行，无法提供下一代 ZEV 所需的更高效、更环保的系统所需的额外性能。必须广泛采用宽禁带半导体，例如碳化硅，使器件能够将更高的工作温度与更快的开关频率和更高的效率相结合。采用这项技术的动力系统不仅效率高，而且体积更小、重量更轻、成本更低。

率先在 ZEV 中采用 SiC 的是特斯拉。早在

2017 年，它就开始在其 Model 3 汽车中部署这项技术，从意法半导体公司进口电力电子器件。特斯拉领先的地方，其他公司肯定会效仿，为 SiC 创造一个巨大的市场，因为到这个年代末，ZEV 市场将占有所有汽车销量的一半以上，并且所有采购都将在 2050 年完成（见图 1）。

与这场交通革命齐头并进，需要大幅增加可再生能源的生产。人类正朝着正确的方向前进，到 2040 年，太阳能和风能发电的装机容量预计将增加三倍。在这两种形式的可再生能源中，逆变器是一个关键组件。

该组件的设计人员正在寻求减小体积和重量，同时提高整体系统效率。为实现这些目标，他们将采用由 SiC 支持的简化双向拓扑，可处理超过 100 kW 的功率。

IoT（物联网）和 AI（人工智能）的快速增长阻碍了遏制二氧化碳排放的努力。它们通过数字应用增加全球排放，据估计，到 2025 年，数字应用部门将占有所有排放量的 10%，到本年代末可能会超过 20%。迫切需要二氧化碳排放量更小的新数据中心。实现这一点的一种方法是提高电力效率。为此，通过引入 SiC 切换到更高的功率密度是一个有效的选择。

### Soitec 碳化硅副总裁 Emmanuel Sabonnadière 的见解



#### 问：Soitec 对工程基板技术的看法是什么？

答：在过去的三十年里，我们一直在成功地推广微电子领域的优势和制造工程基板。我们现在正在探索基于先进工程基板的更好、更快和更环保的电力电子器件。碳化硅是最有前途的

电力电子材料，尤其是新能源汽车市场。我们正在开发一种环境预算非常低的经典块体碳化硅的替代品：Smart Cut 碳化硅。这将我们几十年前发明的 Smart Cut 工艺与 SiC 材料相结合。这种更环保的技术与我们多年来在开创性和领先的工程基板技术方面的努力完美契合。

#### 问：您是否在增加 Smart-Cut 碳化硅的产量？

答：Smart Cut 碳化硅正处于采用阶段，一些主要参与者参与了新兴的蓬勃发展的电动汽车市场。Smart Cut 碳化硅也将找到替代市场，用于需要 400-800-1200 伏、75-150-300 千瓦及更高功率的高效功率转换的应用。我们预计未来几年我们的 Smart Cut 碳化硅将实现高个位数增长。这将为我们提供从微电子到汽车应用的战略多元化。

#### 问：您将在 Smart-Cut 碳化硅生产中投入多少资金？

答：这取决于正在建设的战略伙伴关系。然而，我们估计未来五年我们对 Smart Cut 碳化硅生产的资本支出投资将占我们同期总投资的 20% 左右。我们在 6 月的 Soitec 资本市场日宣布了这一意向（详情请参见：[https://www.soitec.com/media/images/Soitec-CMD\\_2021.pdf](https://www.soitec.com/media/images/Soitec-CMD_2021.pdf)）。

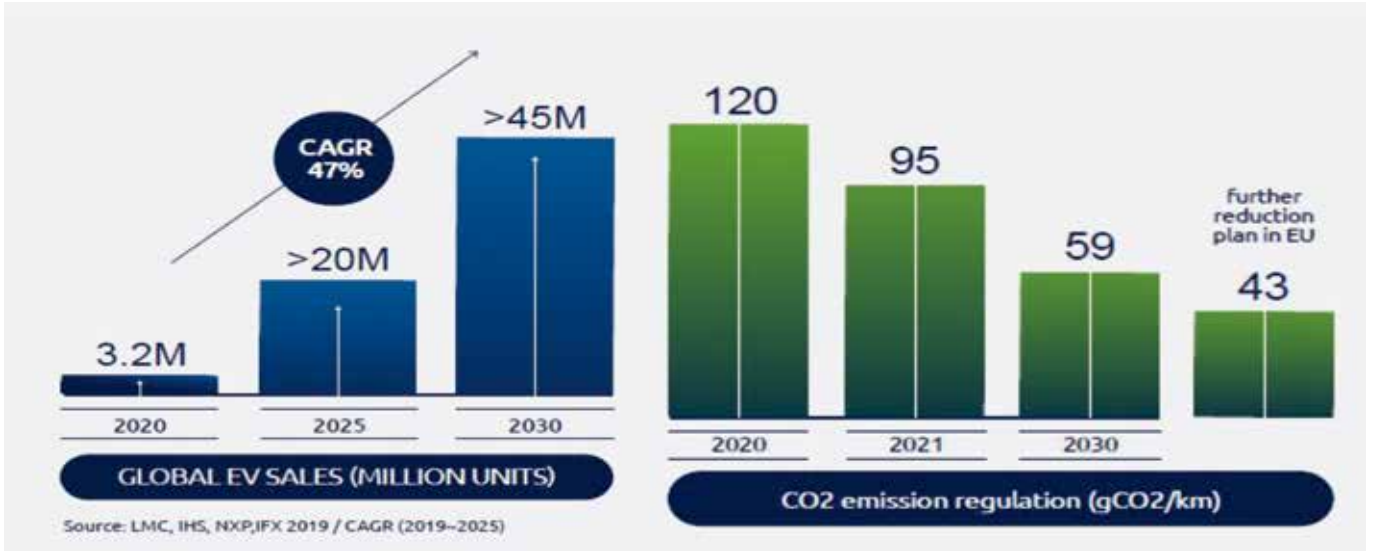
### 碳化硅的致命弱点

虽然 SiC 具有许多优势，但通过传统技术（物理气相传输）生产晶圆通常需要 2300°C 至 2400°C 的温度——这远高于在 1400°C 至 1500°C 下生长的硅的温度。另外的缺点是生长 SiC 晶圆可能需要一周时间，而且只能生产 40 到 50 个晶圆。

所有这些障碍都有助于解释为什么今天的 SiC 晶片的价格是硅等效物价格的 50 倍，而后者仅在几天内生长。碳化硅生产过程对环境的影响必须得到解决，因为这种材料在帮助遏制全球二氧化碳排放方面提供了巨大的希望。

在法国伯宁的 Soitec，我们有解决此问题的方法：专有的分层和晶圆键合技术，称为智能切割（Smart Cut）。将其应用于 SiC 允许将这种材料的薄单晶层从 SiC 供体衬底转移到 SiC 载体衬底。

我们的智能切割技术是一种经济高效、环保的制造技术，我们采用它来制造先进的工程基板。三十多年来，我们一直使用这项技术来制造用于微电子的绝缘体上硅晶片。最近，我们还将此技



2400° C 的温度——这远高于在 1400° C 至 1500° C 下生长的硅的温度。另外的缺点是生长 SiC 晶圆可能需要一周时间，而且只能生产 40 到 50 个晶圆。

术应用于压电材料和化合物半导体的生产。我们采用的生产工艺需要两个起始晶片，一个称为供体，另一个称为载体。供体的制备涉及离子注入，以在定义的深度创建解理计划。在准备我们的供体和载体晶圆时，我们会考虑表面粗糙度——最大限度地减少这一点对于实现更高的微电子性能至关重要。我们的方法非常环保，这要归功于供体晶片的重复使用十次以上。

使用我们的智能切割技术生产 SiC 衬底时，我们发现优化键合步骤对于实现高水平的导电性和导热性至关重要。我们的研究表明，键合界面对衬底总电阻的贡献相当于仅几十微米的标准 SiC 材料。在智能切割分裂并将 SiC 薄片从供体衬底转移到载体衬底后，我们采用精加工工艺确保通过抛光和退火，我们新形成的衬底已准备好外延并与 SiC 器件加工兼容。请注意，我们的智能切割 SiC 技术生产的晶片的顶层没有基平面位错（见图 2 和图 3）。

今天，智能切割技术用于直径高达 300 毫米的晶圆的微电子技术，我们认为在更大直径的 SiC 晶圆上使用这种方法没有障碍。由于这种多功能性，我们的智能切割 SiC 技术将加速从 150 毫米到 200 毫米衬底的过渡，同时缓解产量的增加并确保芯片生产的可用性。智能切割工艺的另一个优点是，对于 200 mm SiC 的切换，实现起来比块体 SiC 衬底更容易、更快。

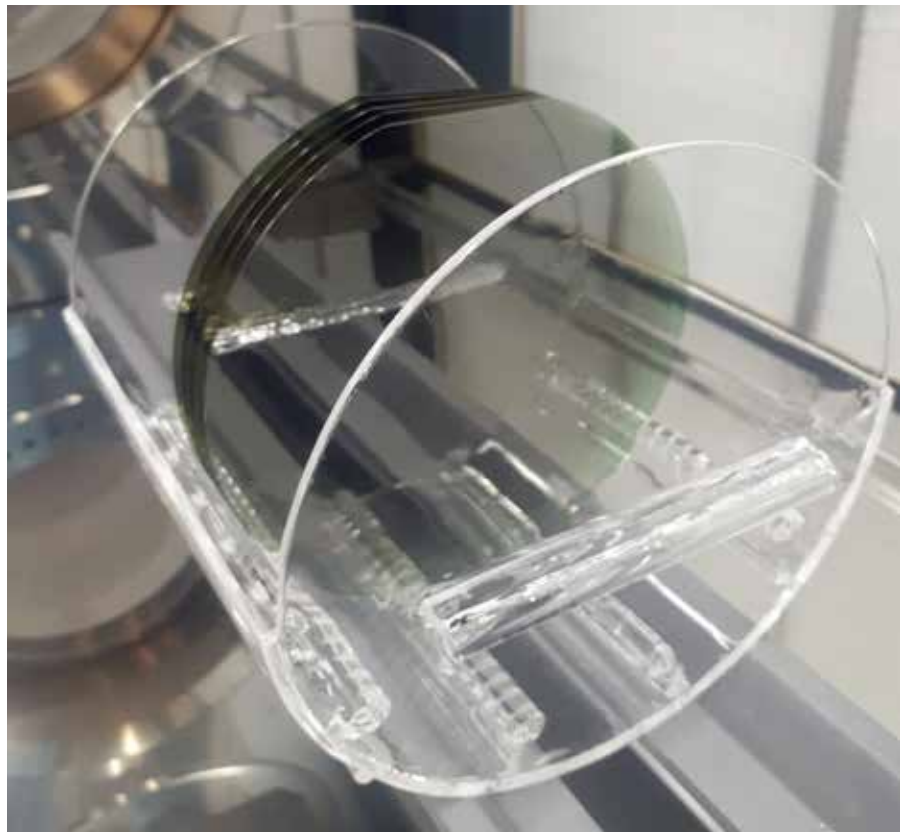
### 智能切割的多重优势

用智能切割晶圆制造 SiC 器件比用块状 SiC

制造 SiC 器件具有显著优势（参见图 4 以了解它们的结构比较）。一个优点是在生产器件时，智能切割 SiC 衬底已经包含转换缓冲层。这简化了漂移外延生长过程。

智能切割 SiC 技术的另一个特性是它为器件制造提供了优化的顶层，具有来自 SiC 供体晶片的先进物理特性和晶体质量，并且独立于载体材料。这使得智能切割 SiC 技术对于电力电子器件而言如此高效和有趣。

Soitec 的智能切割工艺旨在降低微电子行业的成本，有望提高 SiC 器件的竞争力和产量。



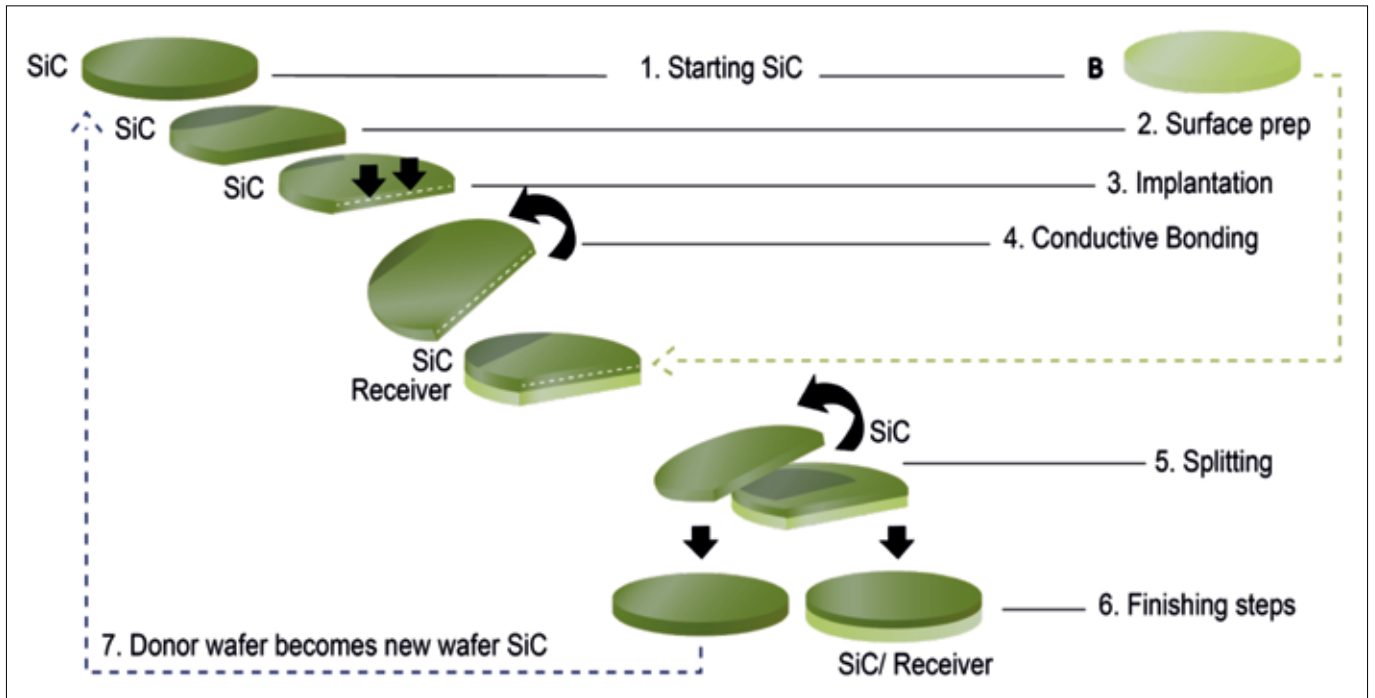


图 2: Soitec 已将其智能切割工艺应用于 SiC 的生产。

对于由块体 SiC 制成的衬底，在导电性和晶体缺陷率之间存在权衡。如果增加 4H-SiC 的掺杂水平，为了降低衬底电阻率，晶体缺陷会增加。对于 n 型 4H-SiC 晶片，折衷方案涉及介于 0.015 Ω cm 和 0.025 Ω cm 之间的典型电阻率。

由于基础衬底的材料工程，智能切割 SiC 将衬底的电阻率降低了至少四倍。这种电阻率的显著降低使 MOSFET 尺寸缩小了 5-15%，具体取决于器件设计。另一个优点是可以减少甚至跳过晶圆背面研磨。这些在电力电子器件上的节省是巨大的，使智能切割 SiC 技术被视为块体 SiC 的强大替代品。

由于供体衬底和转移的无 BPD 顶层的特定

工程工艺，智能切割 SiC 晶片的其他优势是高表面质量和更低的粗糙度。这些改进降低了诱导的外延缺陷密度，从而使尺寸超过 20 mm<sup>2</sup> 的器件的产量提高了 20%。

简而言之，智能切割 SiC 技术的颠覆性方法在于重复使用超过 10 次的无基面位错的供体，并在低电阻率载体的顶部提供超光滑的顶层。与块体 SiC 晶片相比，再利用可使生产的裸片数量增加 10 倍，因此智能切割 SiC 的引入减轻了供应链的负担，同时减少了生产晶圆对环境的影响。

### 构建更好的器件

通过与欧洲主要工业和研究及技术合作伙



图3: 体 SiC (左)、Smart Cut SiC (中) 和带器件的 Smart Cut SiC (右) 的图片。



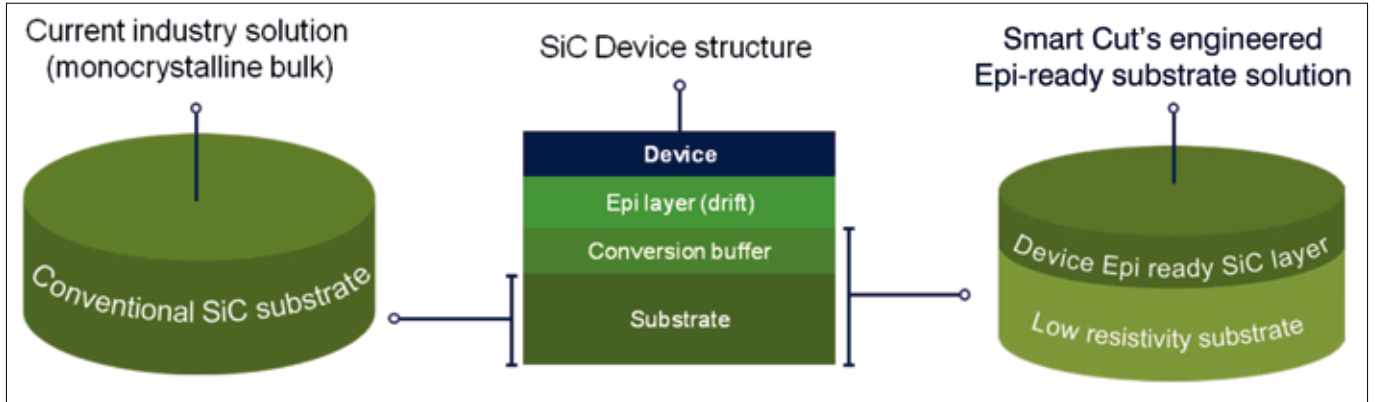


图 4：用于 SiC 器件制造的智能切割 SiC 和块状 SiC 的比较。

伴的合作，我们在我们的第一代智能切割 SiC 衬底上制造了结势垒肖特基 (JBS) 二极管，使用 20 mΩ cm 电阻率载体衬底。对这些器件的电气测量显示，其性能相当于在同一批智能切割 SiC 衬底（见图 5，左图）上制备的参考块体 SiC 晶片上的 JBS 二极管的性能。基于这一结果，很明显，智能切割 SiC 晶圆可以完全替代块体 SiC 用于制造电力电子器件。

我们对在智能切割 SiC 衬底上制备的 JBS 二极管的传输特性进行了建模。在这项工作中，我们考虑了来自键合界面和替代的低电阻率 SiC 载体衬底的测量电气特性的贡献。计算表明，在大约 1.4 V 的电压下，该 JBS 二极管的额定电流增加了 20%（见图 5，右）。这将有助于电力电子器件的设计者。他们可以设计具有更高额定电流的产品，同时保持现有的设计和技术；或者他们可以将总芯片面积缩小 15% 以上。除了降低芯片成本外，后者还因减少了栅极表面而将开关损耗降低了 10%。

### 减少碳足迹

在考虑电力电子器件生命周期（从原材料

准备到最终组件使用）的环境影响时，智能切割 SiC 技术的优势是：由于多次重复使用大量 SiC 衬底，因此 SiC 的能源预算较低；以及采用来自更简单、低能耗的制造工艺的低电阻率晶圆。请注意，载体基板可以在较低的温度下制造 - 即低于 1500 °C - 处理过程只需一两天。结果是能耗接近制备硅片所需的能耗，这是 SiC 的重大突破。

使用我们的智能切割 SiC 技术，可以从 SiC 晶圆生产 500 个外延片，使用当今的传统 SiC 技术只能生产 40-50 个外延片。这种效率提高了一个数量级是减少碳化硅技术整体碳足迹的重要因素，碳化硅技术具有与碳化硅晶圆生产相关的高环境预算。

随着电动汽车产量在这十年中飙升，我们的技术将通过提供可靠的、颠覆性的替代品来取代目前用于最先进动力系统逆变器的块体碳化硅。

汽车行业向更环保汽车的转变将包括实施更先进的 SiC 技术，这将得益于采用我们的智能切割 SiC 技术，该技术可提高性能并大幅减少与基板生产相关的碳足迹。

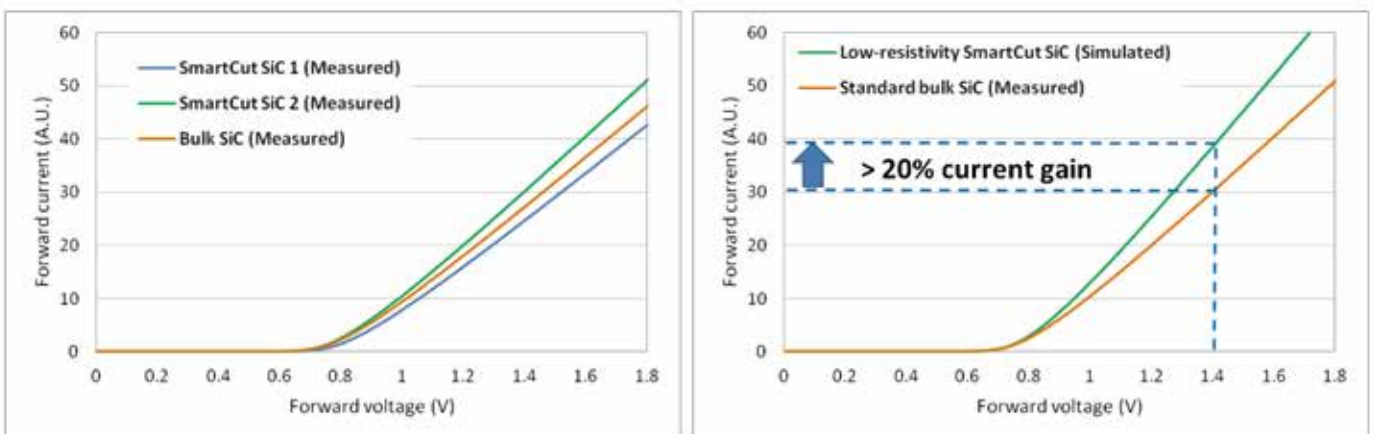


图 5：智能切割 SiC 衬底性能。



## AIPN 的首次亮相

当 AIPN 生长在 GaN 衬底上时会产生很强的极化效应，这有望进一步提高高频 HEMT 的性能

马库斯·普罗斯托维克 (Markus Prostovek), 名古屋大学

对于我们中的大多数人来说，从来没有机会与一种全新的材料邂逅。虽然在职业生涯中从一种材料体系转换到另一种材料体系的情况当然并不少见，比如从经典的 III-V 族化合物转变到 III-氮化物是一条常见的途径，但是第一个到达那里的情況却很少见。即使是在比工业行业中更加注重培养冒险精神的学术界里，渐进式的改进也是常态，其研究往往是由新应用中发现的机会所推动的。

这种情况在 III 族氮化物中尤其真实。除了 AlN 和 GaN 之外，所有器件只使用了三个三元组体系：AlGa<sub>N</sub>、InGa<sub>N</sub> 和 AlIn<sub>N</sub>，而且后者也很少使用。使用三元体系带来了一定的挑战，这主要是由于应变，只有 Al<sub>0.83</sub>In<sub>0.17</sub>N 能与 GaN 实

现较好的晶格匹配。与之形成鲜明对比的是，相比之下传统的 III-V 族化合物更容易实现晶格匹配。最著名的是 GaAs 和 AlGaAs 的配对，它们组合起来制造了 VCSEL 的高反射镜；但不要忘记 InGaAsP 的多功能性，它提供的成分可以与 GaAs 或 InP 晶格匹配，同时也可以实现带隙工程。

为了进一步扩大三族氮化物材料的组合，已经进行了几次尝试性的工作。任何此类努力的先决条件是找到合适的金属有机前驱体，因为所有商业化生长都使用的是金属有机源化学气相沉积技术。

BGaN 已经试验了一段时间，因为其有可用的前驱体—即便它们的主要目的是火箭燃料！然而，研究表明，（假设的）纤锌矿氮化硼的带隙比氮化铝更低，而且应变也更高。更重要的是，要掺入超过百分之几的硼是非常具有挑战性的，这使得已建立的宽带隙三元组 AlGaIn 在几乎所有方面都具有优越性。

最近，人们试图将铟合金化，以形成氮化镱基的 AlScN，这是一种很有应用前景的在射频 HEMT 中实现高极化的组合。使用分子束外延，研究人员已经生长了具有纤锌矿结构的 AlScN 层，其铟含量稳定在 50% 以内。在金属有机源化学气相沉积技术中重复这些结果非常具有挑战性，因为铟基的金属有机前驱体的蒸汽压非常低，生长难以控制。尽管纯度正在不断地提高，但也有人对原料的纯度存在一定的顾虑。

### 砷化物和磷化物

如果开发一种新材料的起点是一种经过验证的金属有机前驱体，那么决定掺入砷或磷是一种合乎逻辑的方法。毕竟两者在传统经典的 III-V 族化合物中都用的很多。

已经有一些人致力于将砷合金化到 GaN 中。其中的问题是，由于砷是一个比镱更大的原子，它不能挤进氮晶格的微小空间里。正因为如此，纤锌矿 GaAsN 中镱晶格上的砷几乎比氮晶格上的砷多。GaAsN 生长的另一个障碍是氮位上的砷原子的键能很低，导致在外延所需的较高生长温度下大部分的砷被解吸（解除吸附）。

这时可选的就只剩下磷元素了。考虑到镱或铝与氮的共价半径，磷原子应该比砷原子更容易在氮的晶格上结合。

在 1996 年至 2006 年间，研究人员试图在

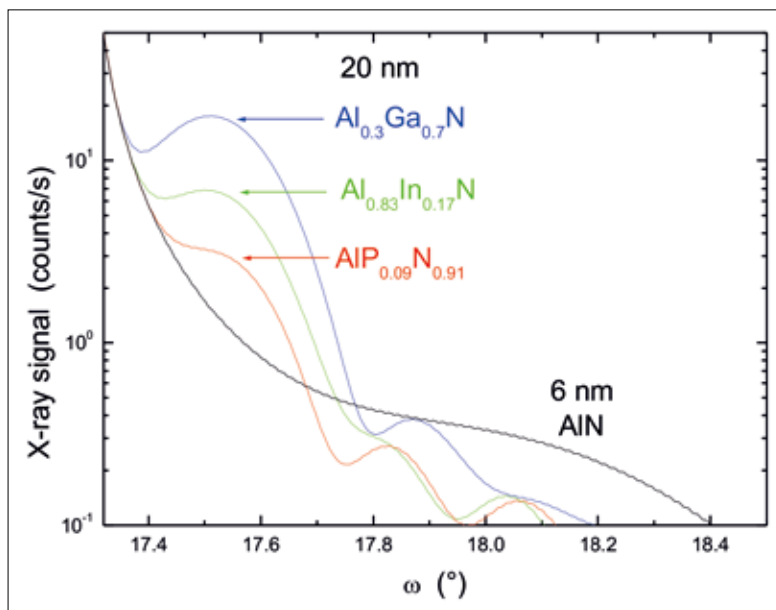


图1：假设氮化镱(0002)为 $10^6$ 个计数/秒，计算了不同材料的氮化镱上的HEMT结构在(0002)氮化镱周围的X光衍射。

GaN 上生长纤锌矿  $\text{GaP}_y\text{N}_{1-y}$ 。这一努力取得了有限的成功，实现了磷含量高达 3% 的同质层。然而，当试图制备更富磷的薄膜时，这导致了两类缺陷的形成：磷原子反位，即磷原子位于镱原子所在的位置；以及  $\text{P}_x\text{N}_x$  团簇，这既是由于 P-N 的键长比 Ga-N 短，也是由于 P 原子的原子半径比 N 原子的大。这些缺陷是由应变驱动的：当 GaPN 生长在 GaN 上时，这个三元组分受到的是压缩应变，所以在镱位置上磷原子的存在可以降低这种应变。这种固有的局限性最终使得人们结束了对 GaPN 的研究。

那么 GaN 上的 AIPN 呢？这有很大的希望：AlN 在 GaN 上产生的是拉伸应变，所以在除了价态之外，磷原子有进一步的动机留在 V 族位置上。请注意，这并不是一个新的想法。早在 1999 年，松下的一个团队就申请了一项与应变弛豫电位相关的专利，提出用 AlGaNP 代替 AlGaIn。然而，从未发表过任何实验结果。

自 2012 年以来，我一直热衷于研究 GaN 基的 AIPN 的前景。我在做博士后时没有机会和条件去追求这一点，但当我在 2017 年接受名古屋大学 (Nagoya University) 指定教授的职位时，情况发生了变化，我终于有机会尝试使用 EpiQuest 制造的封闭式耦合蓬莲头反应器来生长这个新的三元结构。

磷的一个明显的候选有机前驱体源是  $\text{PH}_3$ 。然而，对我们来说，磷化氢不是一种好的选择，因为它的毒性使其无法在我们的实验室使用，但

对于高频HEMTs，最重要的是尽可能高的极化。  
目前，AlInN提供了这一功能。

这并不是一场灾难，因为即使我们的团队获得了许可，使用这种源对我们来说也不是一件小事，因为这将需要新的瓶柜、安全电子设备和擦洗系统。取而代之的是液体前体叔丁基膦 (TBP)。这一举动让我绕了一圈，因为在我的毕业论文中，我帮助评估了这种毒性较小的磷光体前体。(在世纪之交的过程中，TBP 发展到了高标准，当时加州考虑禁止使用  $\text{PH}_3$ )。我们首先将 TBP 发泡器连接到重新调整用途的 MO (金属有机源) 生产线上。

开始行动吧

当试图生长任何新材料时，发现合适的生长条件是首要任务。幸运的是，对于 AIP，我们不必从头开始，因为我们可以借鉴 AlN 的成就，它比您想象的更接近 AIP。

这些努力得到了一些关于立方结构的 AIP 生长的报告以及我自己十年前试图生长这种材料的尝试的帮助。所有这些努力都包括将反应器的温度提高到最高温度—在 750°C 和 950°C 之间，并采用相对较低的 V/III 比值—在 20-100 范围内。这些条件类似于氮化铝生长的条件，氮化铝生长同样使用尽可能高的温度—在这种情况下在 1150°C 和 1250°C 之间—并且 V/III 比值 50-100。

作为我们的起点，我们选择了 1100 摄氏度，这是适中温度，仍然可以生长良好的氮化镓。我们还选择了低 V/III 比。基于 AIP 和 AlN 生长的条件，这不仅是一个明显的选择，而且有助于减少污染的影响和削减开发成本，因为与  $\text{NH}_3$  和  $\text{PH}_3$  相比，tBP 相对昂贵。

由于氮化镓和氮化铝之间巨大的晶格失配，实现成功并不容易。这使得所有高铝含量的晶体，包括 AlGa<sub>y</sub>N、AlIn<sub>y</sub>N 和 AIPN，在薄膜生长超过几纳米后很容易在氮化镓上开裂。虽然可以生长非常薄的层，但是用最常用的分析材料成分和质量的技术，即 x 光衍射来表征它们是具有挑战性的。铝、磷和氮中电子总数值很低，使得这些原子成为 X 射线的弱散射体，从而阻碍了这方面的努力。对于厚度与铝镓氮相似的铝磷氮而言，其 X 光衍射产生的信号低十倍 (见图 1)。AIPN 薄膜进展的另一个障碍是，由于生长所需的 V 族前躯体的分压高得多，由于异质交换反应，存在界面不明显的威胁。另一个需要防止的挑战是在冷却过程中形成富氮表面层。

鉴于存在这些困难，毫不奇怪，我们的第一个超晶格的 X 射线衍射光谱显示出相对较宽的衍射峰，并且缺乏清晰的 Pendellösung 也就不足为奇了。尽管如此，我们还是能够使用零级峰来计算磷含量。为此，我们有幸能够利用材料项目 (The Materials Project) 进行纤锌矿 AIP (和许多其他材料) 的晶格常数和弹性常数的计算。在进行 X 光计算时，我们使用了计算晶格常数的修正版本，使用了与氮化铝计算晶格常数与其实验值相匹配所需的相同因子进行了调整。

假设厚层 AIPN 的生长速率与 GaN 的生长速率相似，我们估算了磷含量高达 10% 的 AIPN 基超晶格的 X 射线光谱。当磷含量超过这个数字时，我们发现与量子阱相关的 X 射线光谱中的特征完全消失，只留下一个宽阔的肩部 (见图 2)。

这一观察结果与我们的假设相一致，即拉伸应变至关重要：浓度为 11% 时，AIPN 层变成了压缩应变，同时过量的磷形成黑色吸附  $\text{P}_x\text{N}_x$  团簇。当 AIPN 层破裂时，情况也是如此。松弛 (开裂) 的 AIPN 的 AIPN 含量低于 3%，并有过量的磷形成夹杂物。很明显，生长磷含量较高的氮化铝的关键是避免压缩应变或松弛。

好消息是，当谈到制造 HEMT 时，一个薄层就

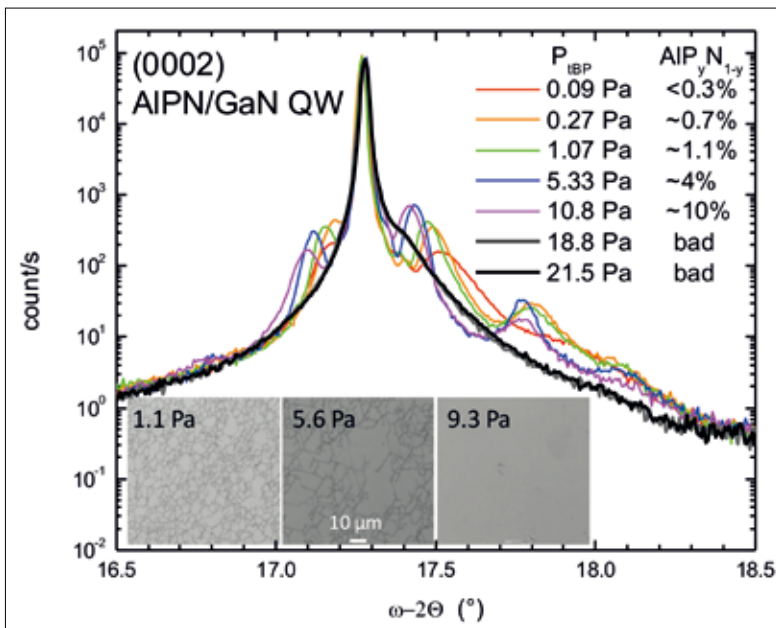


图2：在1100°C生长的多个AIPN/GaN量子阱随tBP分压增加的X射线衍射

足够了。对于高频 HEMT，最重要的是尽可能高的极化。目前 AlInN 提供了这一点，而 AlScN 正在研究中，其可以产生更高的极化电荷（见图 3）。然而，通过金属有机源化学气相沉积法生长 AlScN 是非常具有挑战性的。AIPN 很有前途， $\text{AlP}_{0.05}\text{N}_{0.95}$  的组成提供了与 AlScN 相似的极化程度。由于低磷含量的对晶格常数的强烈影响，该三元组的临界厚度可超过 20 纳米。

这项工作仍处于起步阶段，正在产生非常令人鼓舞的结果。我们制造了薄层电阻低于  $200\ \Omega/\text{sq}$  的结构。并进行低温霍尔测量，发现了二维电子气体。

一个悬而未决的问题是 AIPN 的光学性质。为了保证高质量，这一层必须薄。我们发现，当厚度低于 60 纳米时，载流子漂移到相邻的较小带隙氮化镓层中，在那里发生复合。因此，对带隙弯曲的明确确认仍然是这个材料的长研究清单中的一部分。

### 反应器改装

我们的成功来之不易，AIPN 的发展仍然面临着许多的挑战。为了满足 V 族原子更高的蒸气压，与铝基材料生长的传统值相比，III 族源需要更高的分压。这些较高的压力会导致表面反应，即使没有生长，表面上的一种成分也会部分取代另一种成分。解决这些问题的方法是在从氮化镓

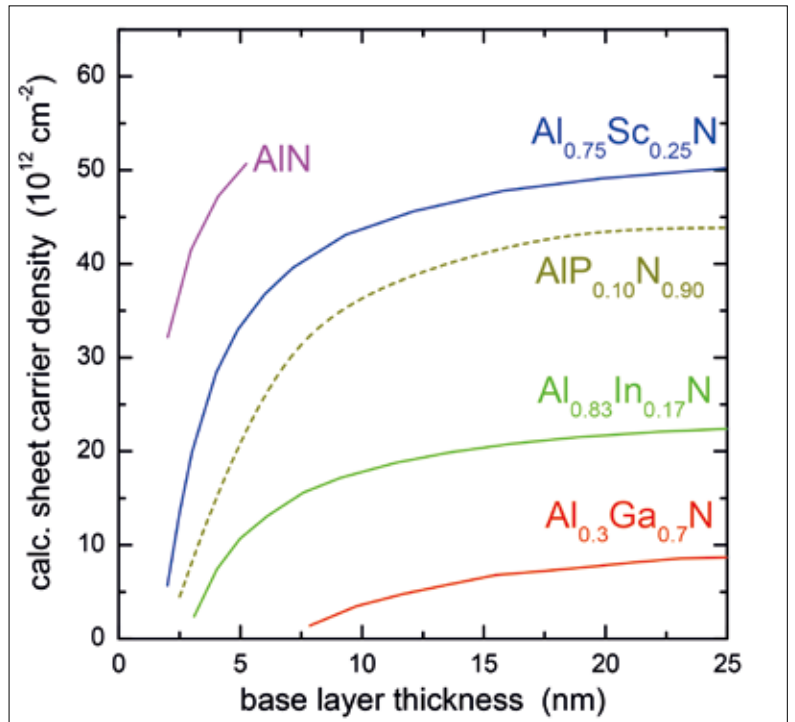


图3：使用不同阻挡层材料的HEMT结构中计算的面载流子密度。在假设 $\text{AlP}_{0.1}\text{N}_{0.9}$ 的偏振系数与 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{N}$ 类似的情况下，添加了AIPN的曲线。（改编自T.Kazior等人。2019 IEEE/MTT-S国际微波研讨会。）

到氮化铝的转换过程中引入适当的转换顺序。这种方法在经典的 III-Vs 族化合物中很常见，例如在 GaAs 生长 InGaP 时就采用了这种方法——这需要在 V 族气体之一预流的情况下切换顺序。在 AIPN/GaN 界面的阻挡层生长之后，我们采用了类似的方法。在我们的例子中，我们发现当从氮化镓到氮化铝时，5 秒到 20 秒之间的 tBP 预流可以改善其 X 光反射。我们还需要研究在 AIPN 上生长 GaN 形成的界面。

除了表面反应，我们还必须考虑铝前驱体（三甲基铝，TMAI）和 TBP 之间的汽相反应，这些反应与 TMAI 和  $\text{NH}_3$  类似。直到最近，我们还会通过空的 MO 线引入 TBP。在这种配置下，通过运行 / 排气阀后，TMAI 和 TBP 前体将一起移动 1.5 米，然后一起进入莲蓬喷头。这不是一个理想的设置，导致强烈的颗粒形成和磷的强烈携带进入随后的运行，可能是由于管道和莲蓬喷头内的沉积。今年 1 月，我们通过将 TBP 入口改为 V 组歧管，成功地解决了这个问题。不幸的是，这种修饰影响了 TBP 流量和磷掺入之间的关系，因此我们需要修改我们的生长条件。

毫无疑问，AIPN 大有可为。成功并不容易，材料的生长仍然是主要的挑战，但我们已经开始努力实现我们的 HEMT 器件了。CS

# GTAT 满足快速增长的碳化硅需求

**根**据 Precedence Research 在 2021 年 1 月 8 日的一份报告中预测，到 2027 年，全球电动汽车 (EV) 市场预计将年增长 40% 以上。它说，除了其他事情外，为这些车辆提供动力的芯片和模块的供应链需要立即演变。其中一个明显的转变将是将从由硅制成的传统器件转向由化合物半导体材料 (如 SiC) 制成的器件。在电动汽车所需的较高电压下，碳化硅的性能远远超过硅，但碳化硅的供应链远没有那么成熟。全球电动汽车市场需要 SiC 供应赶上来…而且要快。

已经对硅的集成器件精通的制造商需要一条途径来生产碳化硅器件和模块，以快速满足电动汽车的需求。但是碳化硅更复杂，因为它是一种极难生长的晶体，这就使得产业线的发展出现了瓶颈。

正是在这样的背景下，GTAT(www.gtal.com) 于 2017 年开始打造一种商业模式，成为一家支持晶圆生产的纯 SiC 生产商。该公司专注于生长 SiC 块状晶体，远离晶圆和设备制造，这是一个重要的区别。GTAT 总裁兼首席执行官格雷格·

奈特 (Greg Knight) 说：“我们有一项核心能力，那就是晶体生长。”他说：“世界上有很多才华横溢的公司知道如何制造晶圆和设备，但他们不一定拥有生长碳化硅晶体的方法。他们需要材料，而且是很多材料。”

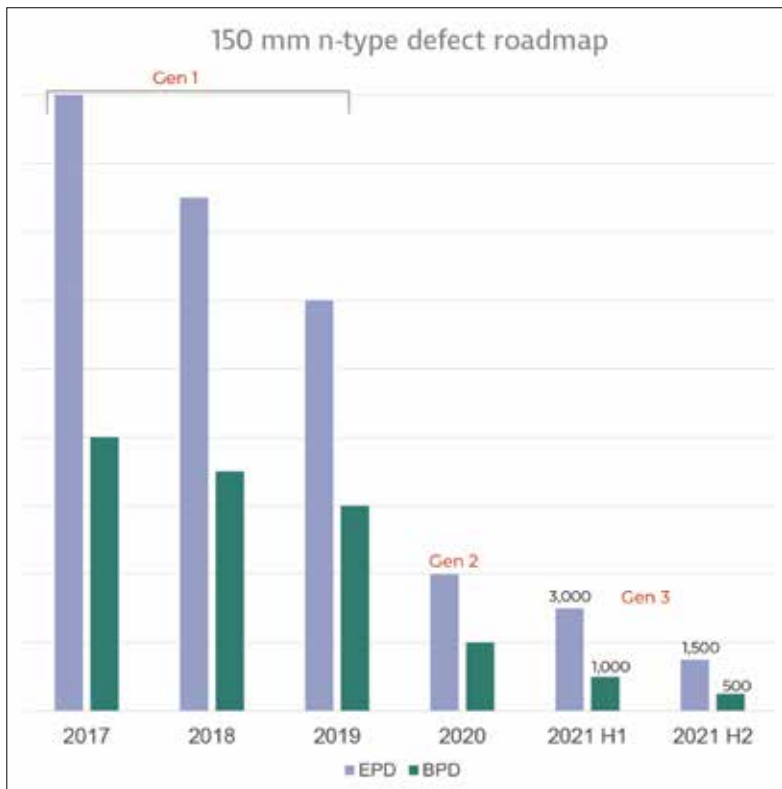
GTAT 作为晶体生长设备生产商的传统意味着它可以非常迅速地“扩大”产能。设计和建造晶体生长炉所需的技术是 GTAT 基因的精髓。奈特说：“我们比任何人都能更快地将 SiC 产能推向市场。”事实上，该公司以非常快的速度实现其具有里程碑意义的进展。奈特说：“2018 年，在我们的工厂开业不到一年后，我们向客户提供了我们的 CrystX 碳化硅 n 型材料。”一年后，GTAT 获得了 ISO 9001 认证，并与首批主要客户签署了直径 150 mm 的多个长期供应协议。

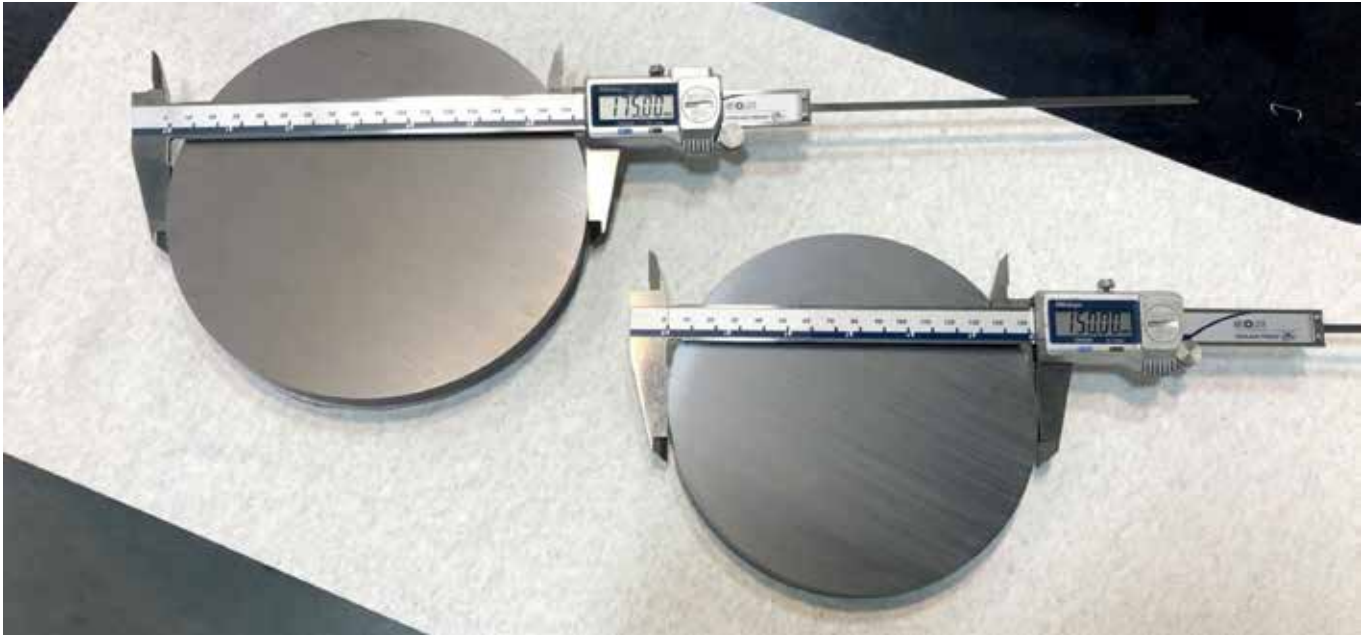
从根本上说，碳化硅不是一种无缺陷的材料，以客户要求的高质量水平制造是一项挑战。这就是为什么大多数投资制造碳化硅晶片和器件的公司没有制造晶体材料本身的经验。用于制造硅的设备不能用于碳化硅，开发内部碳化硅生长所需的资本支出 (和时间) 是很大的。“我们很早就明白了这一点，”奈特说。“我们知道，碳化硅将成为电动汽车等不断增长的应用中使用的半导体的基础材料。”

碳化硅并非无缺陷，这一事实意味着 GTAT 已投入大量资源来降低这些缺陷率。图表 (下) 显示了 GTAT 自推出其 CrystX 碳化硅材料以来表现出来的非常积极的发展趋势。

具体地说，位错腐蚀坑密度 (EPD) 和基面位错 (BPD) 是 SiC 的关键质量指标。GTAT 已经取得了重大进展，将 BPD 密度降至每平方米 1000 个以下，并将在短期内再降低 50%。GTAT 的主要关注点是通过持续改进来减少缺陷密度。奈特说：“这就是我们的客户所要求的，我们做到了。”我们在制造我们现在使用的设备方面有悠久的传统，我们将这一传统与高水平的工艺卓越结合在一起。“GTAT 固有的稳定生产流程使其所有的高质量材料都能按照这一标准生产，该标准在单一产品等级下均可使用。

GTAT正在迅速大幅降低缺陷率





引入200mm直径。碳化硅将在2021年晚些时候出现

虽然持续改进是 GTAT 不断增加的学习和优化周期的结果，但研发 (R&D) 的努力使该公司能够推进 200 毫米直径的碳化硅以及用于射频应用的半绝缘碳化硅。这两款产品预计将于 2021 年底或 2022 年初上市。为了支持现有的 150 毫米需求，同时推进 200 毫米和半绝缘产品，GTAT 目前在现有的基础上增加了 60% 的产能。随着多个供应协议的到位，快速提升的能力使 GTAT 处于一个完美的位置。奈特说：“像电动汽车这样快速增长的市场需要非常灵活的供应链，我们能够应对。”此轮扩张将于 2021 年第三季度初完成，随着合作伙伴继续扩大需求，预计还会有更多扩张。

增加了的研发能力将用于进一步推进该公司在半绝缘 CrystX 碳化硅及其向更大的直径 200 毫米晶圆过渡方面的努力。随着 5G 继续在全球不断推广，对半绝缘碳化硅的需求将会加速。硅碳化硅有许多与射频相关的应用，GTAT 在研发中的努力集中在快速将其推向市场。此外，从直径 150 毫米到 200 毫米的碳化硅过渡是提高产量所必需的。晶片表面积增加 78% 意味着器件数量相应增加，这有助于降低成本。“更高质量和更大直径的晶圆对我们来说是并行的努力方向，”奈特说。“我们正快速行动，以应对一系列非常活跃且快速增长的市场。”

从电动汽车到 5G，全球推动“一切电气化”的趋势导致对电路和器件的需求，这些电路和器

件的性能远远超过硅所能提供的性能。尽管碳化硅被视为应对这一挑战的先行材料，但对它的需求远远超过供应。这是因为，如果不投资于一种全新的工艺，并经历一个非常陡峭的学习曲线，大多数硅生产商就无法将 SiC 添加到他们的投资组合中。这就是像 GTAT 这样的“纯粹的”碳化硅生产商在全球范围内变得有价值的地方。随着 GTAT 推动全球高产量、高质量碳化硅的“非专属”供应，由碳化硅制成的器件变得更加实惠。这意味着更高的性能和更低的系统级成本。实际上，电动汽车可以享受更好的续航里程，这要归功于更多的电效率更高的碳化硅 (SiC) 的使用。此外，随着碳化硅变得更加普遍，电动汽车的可负担性指数将随着时间的推移而增加。SiC

GTAT 将在 2021 年将其产能扩大 60%



# 完美的激光

光子晶体面发射激光器具有成本低、速度快、功率大等优点

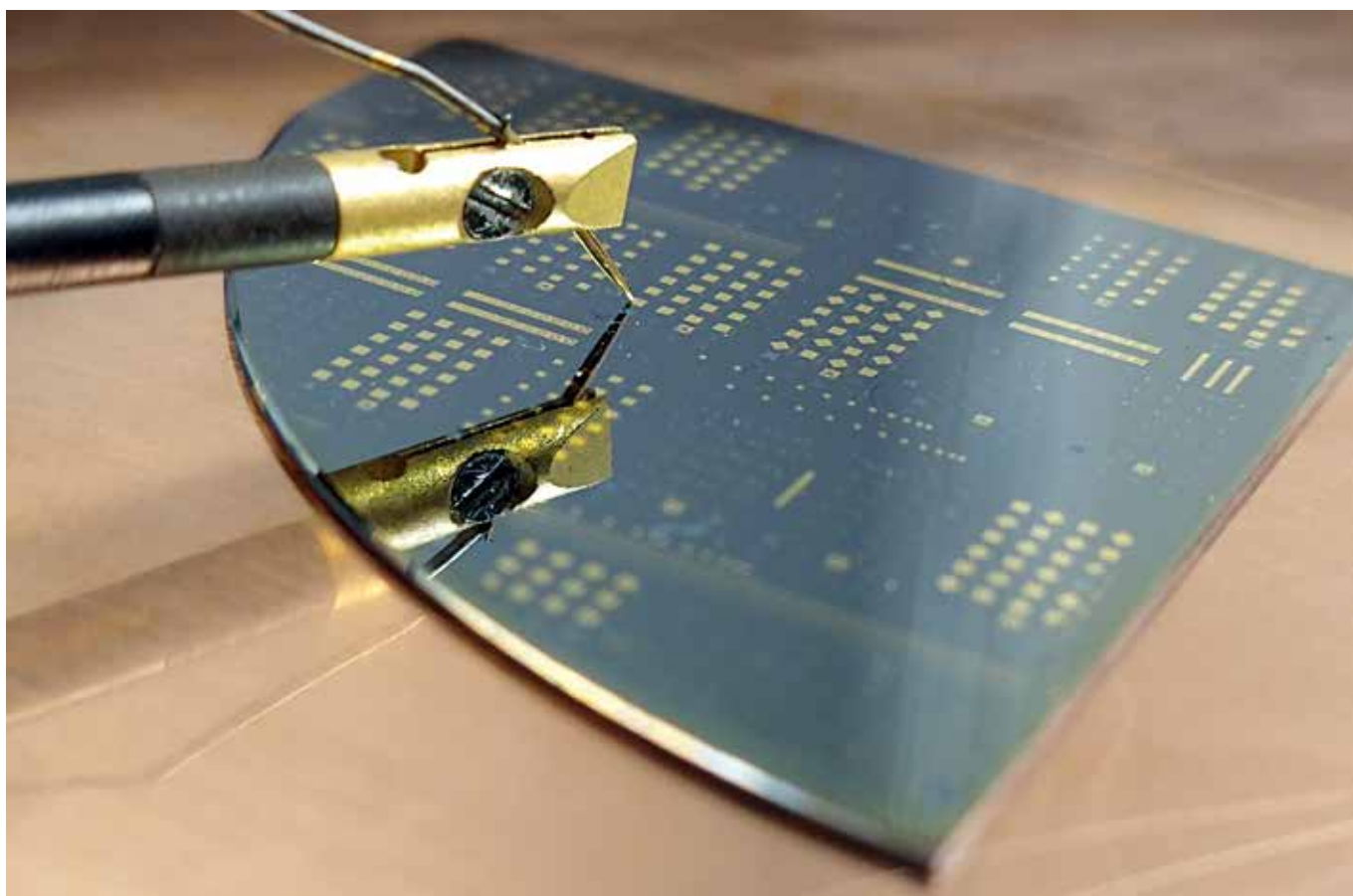
RICHARD TAYLOR , Vector Photonics

半导体激光器正在彻底改变我们的生活。这些微小的发射器现在是数据通信中的关键部件；增材制造，包括金属和塑料印刷；激光雷达；和光学传感——这些是目前世界上增长最快的技术市场。

Vector Photonics 的团队帮助推动所有这些领域的部署。去年，我们从位于格拉斯哥大学的世界领先光子小组之一分拆出来，发明了 PCSEL，即光子晶体面发射激光器的缩写。这种采用专有技术的新型器件是上世纪 90 年代 VCSEL 商业化以来半导体激光器的第一个重大突破。

PCSEL 最大的优点是它结合了低成本、高速度和大功率。所有其他激光技术在这方面都存在不足，仅提供这三个关键特性中的两个。

除了在所有这些方面都表现出色之外，PCSEL 还提供了额外的优势。与 VCSEL 一样，它从其顶面发光，使这种激光器易于封装并集成到 PCB 或电子组件中。然而，它的制造类似于边发射激光器的制造，允许生产利用现有的供应链能力和产能。最后但并非最不重要的一点是，PCSEL 跨越了广阔的光谱范围，使其具有满足广泛应用的潜力。





为了推动 PCSEL 的应用，我们将继续开发和改进此类激光器的制造技术。这些努力将有助于扩大 PCSEL 的应用范围。我们最初的重点是数据通信市场，这种新型激光器似乎是唯一能够满足下一代高数据速率要求的技术。然而，我们也开始研究塑料和金属印刷应用，不久之后我们也会考虑与移动消费电子和传感应用相关的机会。

要充分了解我们发明的优点，关键是要了解现有竞争对手的生产工艺及其他的运作方式。

边发射激光器速度快、功率大，但造价昂贵。以其最简单的形式——即原始半导体激光技术法布里-珀罗激光器 (Fabry-Pérot laser)——激光反馈和发射都在平面内，导致光从激光器末端射出，增益反射来自分面镜。这种设计的一个变体是分布式反馈激光器；它具有面内反馈和发射功能，但这次增益反射来自光栅结构。

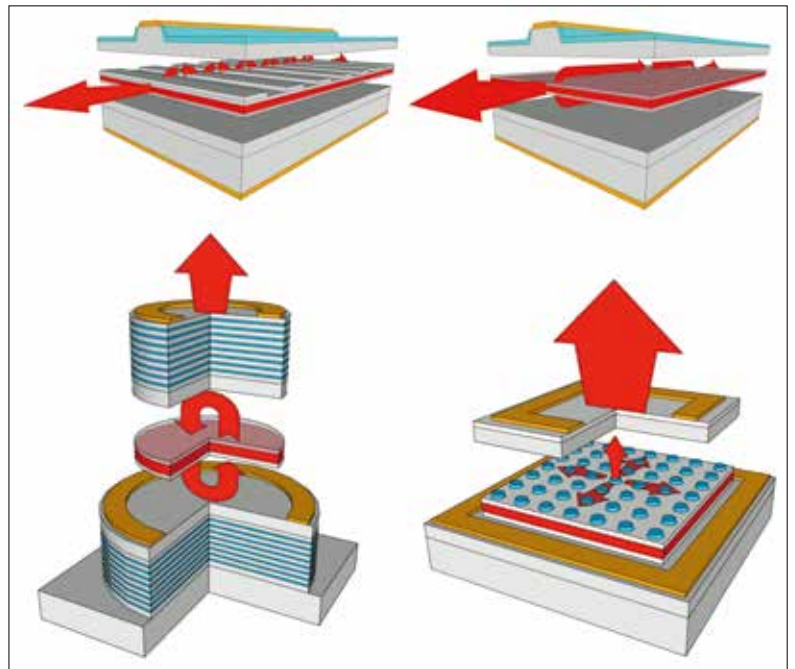
VCSEL 具有完全不同的架构，有源区域上方和下方的反射镜提供面外增益和发射。因此，测试和封装此类激光器比边发射器便宜得多。

VCSEL 的反射镜由布拉格反射器形成，通过生长具有不同折射率的交替层产生。增加层数，每层的厚度等于发射波长的四分之一，增强了反射率。为了确保最佳的 VCSEL 性能，布拉格堆栈的反射率需要超过 99%。

增加 VCSEL 的发射波长并不容易。它不仅仅是简单地增加布拉格堆栈中每一层的厚度。在较长的波长下，用于形成这种结构的两种材料往往具有较小的折射率差异，因此需要更多的周期来确保足够的反射率。除了增加外延生长时间和成本外，更厚的堆叠会增加激光器的电阻，并最终限制其输出功率。考虑到这些制造挑战，VCSEL 的工作波长范围有限也就不足为奇了。请注意，对于与数据通信和电信波长相关的材料 InP，没有合适的具有高折射率对比度的晶格匹配化合物对。

PCSEL 不会遭受同样的命运，因为它可以由任何直接带隙半导体材料系统制成。更重要的是，它兼具两全其美，将面内反馈与面外表面发射相结合，同时受益于廉价的测试和封装，就像 VCSEL 一样。

PCSEL 相对于 VCSEL 的另一个优势——以及任何带有刻面涂层的边发射器，例如分布式反馈激光器中使用的——是它具有易于缩放的二维光栅。与 VCSEL 相比，PCSEL 还有其他优点：



PCSEL 结合了边发射激光器的最佳特性，无论是 Fabry-Pérot 设计 (左上) 还是带有光栅的设计 (右上)，以及 VCSEL (左下)。PCSEL 的优点包括高功率、高速度和低成本。

接触电阻低，确保任何激光器的最高功率输出，尺寸大小；与 VCSEL 不同的是，它不包含氧化物孔径，因此其生产不需要专门的氧化炉。还有一个优点是它的输出是单模，因此由于二维设计和平面内反馈，它会随着面积成比例地放大。

### 针对数据通信和电信

由于没有 InP VCSEL，边发射技术服务于这个市场。它可以提供 1310 nm 和 1550 nm 的发射，这两种波长分别为数据通信和电信提供最佳传输。

数据通信网络使用 1310 nm 波长的光源，这种波长在单模光缆中提供最小的色散。最小化色散可确保当通过光纤传输光脉冲时，它几乎同时到达目的地并且相对完整。这种状态受到高度重视，因为传输过程中固有的低色散减少了对半导体激光器相干性的要求。顺便说一句，天下没有免费的午餐——付出的代价是光缆衰减更大，将 1310 nm 激光器的使用限制在数据通信应用中使用的相对较短的距离。使用 PCSEL，由于其高输出功率，传输距离不像边发射激光器那么短。

由于电信的传输距离要长得多 - 光在重新放大之前可能会传播 200 公里 - 所采用的激光器以 1550 nm 发射，此时光缆的损耗最小。取舍是更大的色散，因此激光器需要具有高度的相干性，以确保良好的系统接收器性能。好消息是 PCSEL 在这方面表现出色。

表 1. PCSEL 的小模式体积允许此类激光器以比边发射激光器和 VCSEL 高的数据速率运行。

	Simple VCSEL	High-speed VCSEL	Simple EEL	High-speed EEL	PCSEL
Optical mode width (μm)	10	3	2	1	3
Optical mode length (μm)	10	3	250	200	3
Optical mode height (μm)	1.15	1.15	0.25	0.25	0.25
Active region	3 x GaAs QW	5 x InGaAs QW	1 x GaAs QW	6 x AlInGaAs QW	6 x AlInGaAs QW
Differential gain (cm <sup>2</sup> )	5.1 x 10 <sup>-16</sup>	1.5 x 10 <sup>-16</sup>	5.4 x 10 <sup>-16</sup>	2.2 x 10 <sup>-15</sup>	2.2 x 10 <sup>-15</sup>
Np @ 1 mW (cm <sup>3</sup> )	2.8 X 10 <sup>14</sup>	3.1 X 10 <sup>15</sup>	2.4 X 10 <sup>14</sup>	1.5 X 10 <sup>15</sup>	1.4 X 10 <sup>14</sup>
Photon lifetime (s)	2.2 x 10 <sup>-12</sup>	2.0 x 10 <sup>-12</sup>	2.8 x 10 <sup>-12</sup>	2.0 x 10 <sup>-12</sup>	2.0 x 10 <sup>-12</sup>
Resonant frequency (GHz)	3.4	20.4	2.9	17.4	53.1

用于传输信息的任何激光器的另一个关键标准是其数据速率。无论发射波长如何，数据速率都由激光器的模体积控制。减小模体积的大小并提高数据速率。边发射激光器的模高度较小，但这受到较大模长度的影响。VCSEL 则相反，模长度较小，但模高度相对较大，因为模会穿透布拉格堆栈。因此，VCSEL 虽然可以实现高速，但单模性能有限，不适合高速数据通信和长途电信。VCSEL 的特性也是传感应用中的一个问题，将这种技术的使用限制在相对较短的距离内。

打破束缚的是 PCSEL，它将 VCSEL 的模宽度和长度与边发射激光器的模式度结合在一起。由于在所有三个方向上都有良好的模限制，PCSEL 可以比具有相同发射面积的 VCSEL 快 2.5 倍，比高速边发射激光器快 3 倍以上（见表 1）。

### 多重机会

PCSEL 架构的另一个特点是它允许制造相干耦合阵列，为其他几个机会打开了大门。为了产生这种形式的光源，阵列的激光元件通过耦合器区域连接。这将激光元件之间的平面内光连接起来，从而产生相干性。使用透镜，这种相干发射

可以聚焦到具有更大功率密度的小点，这是切割、焊接、熔化、雕刻和干燥应用的机会。

由于阵列的激光元件在平面上耦合，在“n x n”阵列中，有明显的功率缩放路径。PCSEL 实现了高亮度，并且由于其独特的几何结构，它可以提供千瓦级的相干功率。这是其他激光技术无法复制的成就。

阵列还提供其他有价值的特性。通过电子调谐耦合器区域的相位以创建光学相控阵，可以实时控制激光器产生的光束，而无需移动部件。这一特性使 PCSEL 适用于快速发展的 LiDAR 应用，这些应用需要控制光束进行成像。PCSEL 可以彻底改变的其他应用包括金属和塑料的 3D 打印。如今，这些应用由涉及高度机械化的系统提供服务。切换到基于 PCSEL 的固态解决方案，系统尺寸可以缩小 10 倍，同时提高可靠性。

凭借使其能够在众多应用中服务的特性，毫无疑问，PCSEL 将彻底改变半导体激光技术。提供一系列珍贵的特性——与所有其他当前半导体激光器平台相比，它具有更低的成本、更高的速度和更高的相干功率——它的未来是可以接受的。☞

## 英飞凌和松下加速 GaN 的发展

英飞凌科技公司和松下公司已签署一项协议，共同开发和生产第二代 (Gen2) 经验证的 GaN 技术，提供更高的效率和功率密度水平。英飞凌的高性能、高可靠性以及 8 英寸 GaN-on-Si 晶圆生产能力，标志着英飞凌对 GaN 功率半导体不断增长的需求进行了战略性拓展。

根据市场需求，Gen2 将开发为 650 V GaN HEMT。这些器件将易于使用，并提供更高的性价比，尤其针对高功率和低功率开关电源应用、可再生能源、电机驱动应用。“除了与第 1 代相同的高可靠性标准外，由于转向 8 英寸晶圆制造，下一代客户将受益于更容易的晶体管控制以及显著改善的成本状况，”英飞凌电源和传感器系统部门总裁 Andreas

Urschitz 说。与联合开发的第一代器件（英飞凌的 CoolGaN 和松下的 X-GaN）一样，第二代器件将基于常类型 GaN-on-silicon 晶体管结构。这与混合漏极嵌入式栅极注入晶体管 (HD-GIT) 结构无与伦比的稳健性相结合，使这些组件成为首选产品和市场上最长期可靠的解决方案之一。

“我们很高兴在 GaN 组件上扩大与英飞凌的伙伴关系和合作。在联合方法中，我们将能够以高质量和基于最新创新发展的方式应用 Gen1 和 Gen2 器件”，工业解决方案工程部副主任 Tetsuzo Ueda 说。新的 650 V GaN Gen2 器件计划于 2023 年上半年投放市场。☞

# 深紫外线设计

Photonics West 的发言人概述了提高深紫外 LED 性能的多重选择

RICHARD STEVENSON

**您**如何看待深紫外 LED？我们很容易将此视为病毒的杀手，尤其是 Covid-19，现在这种流行病已经占据我们的生活一年多了。但是这类 LED 的应用机会远远超出了空气、水和表面的净化。该芯片还可以位于感测一系列气体的系统的核心，并为非视距通信提供光源。

对于所有这些应用，深紫外 LED 有利有弊。与该光谱域中更传统的发射源不同——准分子灯，以及基于汞、氙和氙灯的那些——它并不脆弱、笨重或寿命短。但它的电光转化效率是可怜的，远远落后于它的蓝色表亲，尤其是当发射低于 250 nm 时。

使用深紫外 LED，要获得更好的性能有很多障碍。但是，从更积极的角度看待这种情况，您会发现还有很多机会可以将性能提升到一个新的水平。在今天的 SPIE Photonics West 上详细讨论的这些选项包括：降低衬底中的缺陷密度，以防止有源区域布满高密度缺陷；通过改进发光区的结构来提高内量子效率；并提高从芯片中的光提取效率。

## 哪种衬底？

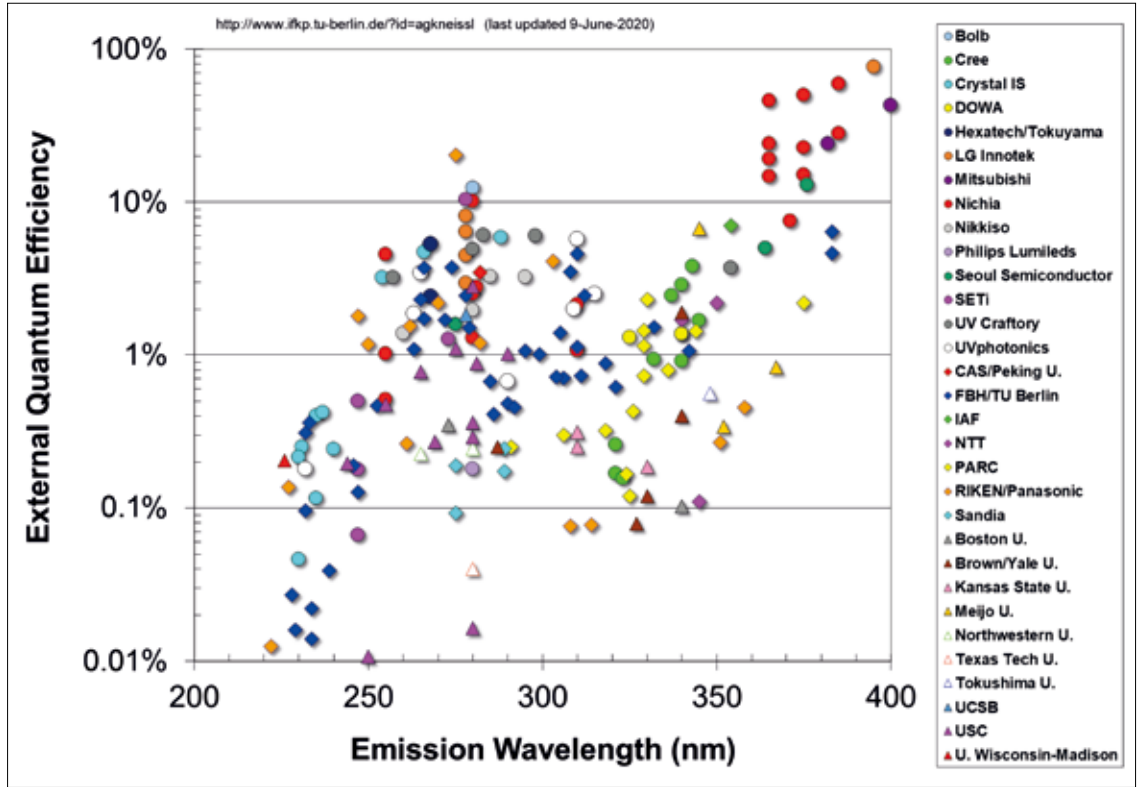
在为深紫外 LED 选择衬底时，妥协是不可避

免的。块状 AlN 最大限度地减少了异质结构中的缺陷密度，但价格昂贵且可用性有限。因此，深紫外 LED 的开发商和制造商倾向于使用蓝宝石衬底，并采用生长技术来降低外延结构中的缺陷密度。假设不存在非辐射缺陷，抑制缺陷密度低至  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  和内部量子效率高达 80-90% 应该是可能的。

在过去几年中，来自德国柏林工业大学的 Michael Kneissl 小组一直与 FBH 的研究人员合作，以提高在蓝宝石上生长的 AlN 薄膜的材料质量。Kneissl 在今年的 Photonics West 上发表了受邀演讲，他解释说，他的团队最初专注于在蓝宝石上生长薄的 AlN 膜，通过氮化物蚀刻柱进入衬底，二次外延导致 AlN 合拢。然而，虽然这种方法形成了厚度为  $5.5 \mu\text{m}$  的良好薄膜，但并不理想。“图案制作既费时又费钱，” Kneissl 承认。

最近，他的团队转向了日本三重大学 Hideto Miyake 小组首创的低成本方法。该方法包括在蓝宝石上溅射 AlN，然后在  $1700^\circ\text{C}$  的氮气下对所得模板进行退火。“经过这三个小时的退火，我们观察到 AlN 层中的穿透位错密度显著降低，” Kneissl 解释说。这些模板具有良好的形态，在  $350 \text{ nm}$  厚的薄膜中实现了  $7.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  的穿透位错密度。

图1：随着紫外线波长的减小，外量子效率有下降的趋势。该图由柏林工业大学的 Michael Kneissl 提供。它是 M. Kneissl 等人论文中图 2 的更新版本。Nature Photonics 13 233 (2019)



Kneissl 及其同事的最新方法是结合这两种技术，通过溅射、退火和再生长形成蓝宝石上的 AlN 薄膜。这有望导致更低的位错密度。结果令人鼓舞，通过高温退火和外延再生长的样品为内部量子效率提供了最高值。测量表明该值接近 30%。

Kneissl 表示，在该模板上生产的封装 LED 发出 265 nm 的光，能够在 350 mA 下产生 54 mW 的功率，并且具有 3.7% 的峰值外部量子效率。他认为，通过引入反射触点和透明的 p 面，可以实现更高的价值。

### 面对面

溅射和退火方法的开拓者 Miyake 也在今年的 Photonics West 上发表了讲话。他的团队通过在蓝宝石上溅射 AlN，然后将成对的 AlN-on-sapphire 外延片，将它们的生长面放在一起，并在 1 个大气压的氮气下将它们退火 10 分钟到 10 小时来形成高质量的模板。“通常我们使用 3 个小时，” Miyake 补充道。

为了说明退火所带来的结晶质量的显著改善，Miyake 提供了 X 射线衍射数据，表明升高的温度使衍射峰宽度从 532 弧秒急剧减少到 49 弧秒。

优化溅射条件的努力包括评估溅射压力、层厚度和退火温度的影响。这些实验表明，当薄膜在 1700° C 下退火 3 小时时，较低的溅射压力会

降低形成裂纹的机会。它将溅射压力降低到仅 0.03 Pa，并且可以生产厚度超过 800 nm 的无裂纹薄膜。在优化晶体质量时，溅射压力会影响理想的厚度。例如，当在 0.03 Pa 的溅射压力下生长时，X 射线衍射测量表明理想的 AlN 厚度约为 700 nm。

选择最佳退火温度并不容易，因为有几个因素在起作用。一项涉及一系列 480 nm 厚的 AlN 薄膜的研究，在 0.05 Pa 的溅射压力和 1650° C 到 1775° C 的温度范围内生长，表明较高的温度对 X 射线 (0002) 衍射峰的宽度没有影响。然而，对于 (10-12) 方向，峰的半高宽从 170 弧秒以上下降到 125 弧秒以下。但请注意，这种收益是以宏观缺陷增加为代价的。为了尽量减少这些缺陷，调回退火温度的另一种方法是转向更厚的薄膜。

通过在 1700° C 下退火的溅射薄膜组合的平面扫描透射电子显微镜图像量化了较厚薄膜的好处。对于这些样品，用 MOCVD 添加的 0.8-2.8 μ m 厚的 AlN 层覆盖，当溅射膜的厚度从 153 纳米至 481 纳米，MOCVD 的加入使位错密度从  $1.1 \times 10^9 \text{cm}^{-2}$  下降到  $3.6 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$ 。

为了进一步降低穿透位错的水平，Miyake 及其同事采用了双溅射和退火技术——即溅射和退火，然后是第二次溅射和退火。根据平面透射电子显微镜图，它带来了成功，穿透位错密度降至  $4.3 \times 10^7 \text{cm}^{-2}$ 。

该团队还比较了通过 MOCVD 在蓝宝石上直接生长的 AlN 薄膜的特性，以及通过 MOCVD 添加到通过溅射和退火形成的蓝宝石上的 AlN 模板的特性。后者导致螺位错和混合位错密度低得多 - 它是  $2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2}$ ，而不是  $3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。

虽然这种较低的密度乍一看似乎是一件好事，但它也带来了自己的问题。当比较通过 MOCVD 在两种结构顶部生长的 1500 nm 厚的  $\text{Al}_{0.74}\text{Ga}_{0.26}\text{N}$  薄膜的 Nomarski 显微镜图像时，这一点很明显。当这种合金沉积在 MOCVD 生长的 AlN 蓝宝石上时会产生相对光滑的表面，但当它生长在具有一层 MOCVD 生长的 AlN 的溅射和退火 AlN 模板上时，AlGaIn 布满了巨大的小丘。

Miyake 和同事发现这些小丘的起源是溅射的 AlN 模板中的螺旋生长。由于螺旋位错和混合型位错的密度低，小丘不间断地生长到大尺寸。与此形成鲜明对比的是，当有更多的螺旋和混合型位错时——这就是通过 MOCVD 在蓝宝石上生长 AlN 的外延结构的情况——与位错诱导的螺旋生长相关的干扰会产生更平坦的表面(如图 2 所示)。

三重大学的 Miyake 的同事 Kenjiro Uesugi 也在 Photonics West 发表了演讲，其中包括小丘问题的解决方案。Uesugi 展示了显示小丘密度如何随着切边角增加到  $1^\circ$  而变化的图像，并评论道：“增加衬底切边角对于消除小丘结构非常有效。”

为了评估切角对有源区质量的影响，三重大学的团队对具有量子阱的样品进行了阴极发光研

究。将切角增加到  $0.6^\circ$  导致更强烈、更窄的光致发光峰。但进一步增加切角没有好处，导致发射强度降低。“我们推测这种行为是由于表面阶梯聚束，并导致多量子阱的退化，” Uesugi 认为。

研究人员已经考虑了对抗小丘的各种选择。提高温度可以消除它们，但会引入点缺陷。更好的选择是将较低的生长速率与较高的氨分压相结合，这是抑制镓原子过度表面迁移的步骤。利用所有这些技巧，该团队在蓝宝石上生产了  $0.6^\circ$  切角的深紫外 LED。在 Taiyo Nippon Sanso 反应器中添加 MOCVD 生长层，使用  $1300^\circ\text{C}$  的生长温度作为第一 AlN 层，然后将温度降至  $1150^\circ\text{C}$  以生长器件层。

对直径为  $160\mu\text{m}$  的圆形未封装 264 nm 器件的晶圆上测量显示最大外部量子效率为 1.73%。当以 20 mA 驱动时，输出为 1.61 mW。相比之下，在 MOCVD 生长的 AlN 上进行的控制具有略高于 1.4% 的最大外部量子效率。

### 超薄阱

众所周知，LED 有源区的内部量子效率受非辐射和辐射过程之间的相互作用控制。随着发射波长深入紫外线，光致发光寿命会减少，这是非辐射寿命的倒数。这意味着非辐射复合在较短波长处增加。

在日本京都大学工作，Mitsuru Funato 及其同事测量了在蓝宝石和块状 AlN 上形成的在一定

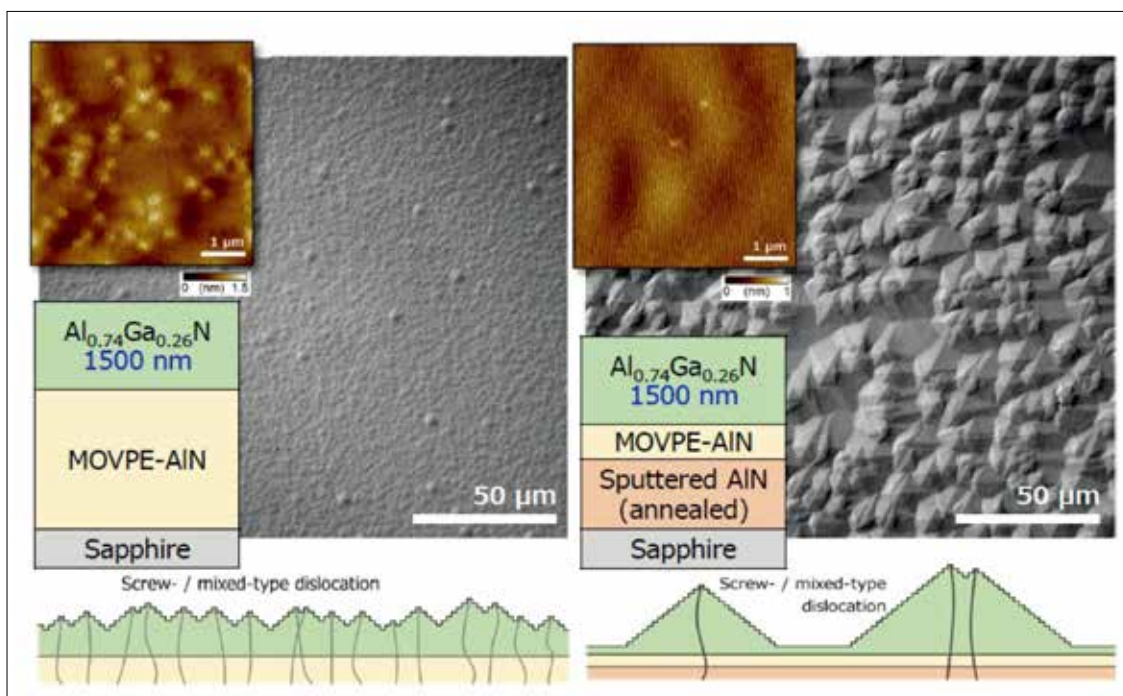


图 2. 蓝宝石模板的高质量 AlN 中的低螺旋和混合型位错密度位于 MOCVD 生长过程中形成的大丘面。当存在更多的螺旋位错和混合型位错时，它们会中断小丘的形成，从而减小它们的大小。此图由三重大学的 Hideto Miyake 提供。以下论文提供了更多详细信息：H. Miyake et al. J. Cryst. Growth 456 155 (2016); S. Xiao et al. J. Cryst. Growth 502 41 (2018); K. Uesugi et al. Appl. Phys. Express 12 065501 (2019).



紫外线灯广泛用于水净化，但随着紫外线 LED 的改进，它们将在这个市场上占据越来越大的份额。

波长范围内发射的量子阱样品的光致发光寿命。Funato 告诉 Photonics West 的代表，尽管这两类样品具有明显不同的螺纹缺陷密度，但寿命相似。这使他相信主要的非辐射复合中心是点缺陷，而不是穿透位错。

许多年前，理论家计算了 GaN 和 AlN 中点缺陷的形成能。基于这些工作，Funato 认为 AlGaIn 量子阱的弱点是与铝相关的点缺陷。他提倡使用富镓 AlGaIn 量子阱。这种方法有很多优点：AlGaIn 的光学各向异性阻碍了表面发射，而这在 GaN 中很强，有助于光提取效率。

为了评估这一推测，Funato 和同事首先计算了 1 nm 厚的 GaN 量子阱和 2 nm 厚的 AlGaIn 量子阱中的电子和空穴波函数，两者都夹在 AlN 势垒之间并在 230 nm 左右发射。较薄的阱的电子空穴重叠为 0.7，而较厚的变体仅为 0.2。

受到这一结果的鼓舞，研究人员继续生长超薄 GaN 量子阱。他们不是第一个这样做的人，但之前的工作主要集中在基于 MBE 的方法上。来自京都的团队使用 MOCVD，通过自限流工艺实现了非常薄的 GaN 量子阱。Funato 告诉 Photonics West 的代表，他认为第一个单层 GaN 稳定在 AlN 上，但是当添加第二个单层时，它会蒸发。结果是量子阱的厚度仅限于单层，这要归功于 GaN-on-AlN 的结合强度超过 GaN-on-GaN 的结合强度。这种薄阱的证据来自透射电子显微镜横截面高分辨率图像，该图像显示夹在 AlN 之间的单个单层 GaN。

在高达 300K 的温度范围内进行光致发光测量已经产生了有希望的结果。与较厚的 AlGaIn 表亲相比，在 300 nm 处发射的 GaN 量子阱中的温度淬灭受到的抑制较少，这意味着更高的内部量

子效率。GaN 阱的室温值为 5%，而 AlGaIn 变体为 0.1%。

转向室温下的时间分辨光致发光提供了对阱性质的额外了解。1.5 nm 厚的 AlGaIn 量子阱的光致发光寿命为 40 ps，而单层 GaN 阱的光致发光寿命为 100 ps，表明后者在抑制非辐射过程方面更好。

Funato 及其同事还在低温下进行了时间分辨光致发光。有了这些额外的测量结果，他们推导出了辐射和非辐射寿命。在 AlGaIn 中，两个寿命都是 0 ps，而在 GaN 中，非辐射寿命为 105 ps，辐射寿命仅为 2 ns，因为电子 - 空穴重叠较大。

该团队通过用 193 nm 激光正面激发样品并用 CCD 测量面内发射来研究发射的偏振态。研究人员发现，横向磁极化略强于 AlGaIn 量子阱中的横向电极化，而横向电极化在 GaN 量子阱中占主导地位，有助于光提取。

为了尝试为超薄 GaN 量子阱达到更高的内部量子效率值，该团队已切换到半极性平面。在蓝宝石的 r 平面上形成两个单层厚的 GaN 量子阱并在大约 250 nm 处发射，产生了 50% 的内部量子效率。

### 深紫外量子点

来自法国 CNRS-CRHEA 的 Julien Brault 在演讲中概述了生产深紫外有源区的另一种选择是使用 AlGaIn 量子点。由于这些纳米结构为电子和空穴提供了高度的空间限制，因此有望在具有相对高缺陷密度的样品中实现高量子效率。

与蒙彼利埃大学和里伯大学的研究人员合作，Brault 及其同事生产并研究了 MBE 使用 Stranski-Krastanov 生长模式生长的量子点样品。这项研究的主要目标之一是确定实现具有高内量子效率的点的生长条件。

这种合作在涂有通常 1μm 厚的 AlN 层的蓝宝石衬底上形成点。该模板的位错密度约为  $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 。铝成分为 10-40% 的 AlGaIn 点生长在  $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$  上， $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{N}$  也用于包覆它们。这些密度在  $3\text{-}6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  范围内的点的横截面透射电子显微镜显示，纳米结构的高度在 1.5 nm 到 3 nm 之间，直径约为 10 nm。

Brault 分享的原子力显微镜图像显示，在高于 800°C 的温度下，生长后退火会导致量子点的形状从细长结构转变为对称实体。形态的变化对

发射波长没有影响,意味着 AlGaIn 成分没有变化。然而,由于载流子限制的显著增加,室温光致发光效率从 1-3% 急剧上升到 10-30%。

研究人员使用时间分辨光致发光来研究铝成分在 10% 到 40% 之间的量子点的内部量子效率——它们跨越 340 nm 到 275 nm 的光谱范围。研究小组发现,随着波长变短,内部量子效率增加,在 UVC 中提高到 20% 左右。

在这项工作的基础上,Brault 及其同事继续生产具有这些纳米结构的 LED。这些器件采用相对标准的结构,具有三到五个量子点平面和 p 型 GaN 接触层。后者提高了空穴浓度,但增加了紫外线范围内的吸收。

法国合作制造了带有  $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$  量子点的 UVA LED,带有  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  量子点的 UVB 同类产品,并预计通过将铝成分增加到 0.3 到 0.4 来达到 265 纳米到 280 纳米之间。

这些发射器的行为与传统 LED 的行为完全不同,其性能高度依赖于电流。当载流子开始流过器件时,最初发射波长会急剧减小,同时发射峰的宽度也会减小。据信,这两种趋势都源于量子点的组成和大小的波动,以及屏蔽效应。电流的进一步增加导致第二个状态,其中发射波长稳定并且其峰值变窄。人们认为这些特性与载流子注入  $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$  量子点有关。由于热效应和注入效率的降低,进一步加大电流,发射波长会增加。

这些量子点器件的工作电压为 10-20 V。外部量子效率的峰值略低于 0.1%,加热导致该数字下降。

“下一步将是制造基于隧道结的 LED,通过避免使用 p 型 GaN 接触层,我们可以期待内部效率和提取效率的显著提高,” Brault 说。

## 光提取

传统深紫外 LED 的最大弱点之一是其低提取效率。日本理研大学 (Riken University) 的 Hideki Hirayama 在讨论可以解决这个问题的各种架构之前,在他的演讲中强调了这个问题。

根据 Hirayama 的说法,对于标准 UVC LED,由于 p-GaN 接触吸收光和蓝宝石衬底中的内部反射,提取效率可能低至 4-8%。我已经解释过,从芯片中获取更多光的一种选择是在器件的 n 侧添加光子晶体结构,但这只会将提取效率提高到 12-15%。他说,更好的策略是通过切换到高

反射电极和透明接触层来解决 p 侧的弱点。将其与器件 n 侧的基于柱的技术相结合——据称是比光子晶体结构更好的选择,以提高 n 侧的提取——光提取效率可能超过 70%。

Hirayama 及其同事在蓝宝石上生产 UVC LED,首先是由氮脉冲流增长产生的五步多层缓冲层。这种 3.8 $\mu\text{m}$  厚的结构具有  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  的位错密度,为生产 UVA-UVC LED 产品组合奠定了基础。以 270 nm 发射的器件产生超过 50 mW 的输出。根据在各种温度下进行的光致发光测量,内部量子效率估计为 54%。该团队多年来一直致力于开发提高深紫外 LED 光提取效率的方法。早在 2017 年,这些研究人员就报告了以下器件的结果:透明 p-AlGaIn 层、反射 p 型电极、图案化蓝宝石上的 AlN 缓冲层和透镜状树脂模板。据 Hirayama 称,这种强大的组合为 275 nm LED 创造了 20.3% 的世界纪录光提取效率。

虽然这令人印象深刻,但 Hirayama 很快指出还需要做更多的工作,因为电光转换效率只有 6% 左右。损耗可归因于使用 p-AlGaIn,这会导致工作电压升高,从 5.5 V 左右增加到 9.1 V。最近,该团队评估了在 p 侧插入光子晶体反射器的好处的 LED。模拟表明光提取效率提高了三倍——当将这种新型反射器与 p 型 AlGaIn 配对时,这可能达到 54%。

Hirayama 及其同事通过纳米压印和干法蚀刻生产了光子晶体 UV LED。这些器件在 p 侧包含一系列直径为 160 nm、深度为 338 nm 的孔,以及由镍和镁的组合制成的高反射镜,以高达 10% 的外部量子效率运行。

为了降低工作电压,该团队还生产了 p 型 GaIn 的变体。引入光子晶体是有益的,因为它不会改变电流 - 电压特性,但可以将光提取提高 70%。这并没有模拟所承诺的那么大,因为光子晶体还有待优化。最新一代 UVC 器件产生的功率介于 30 mW 和 50 mW 之间。

大型倒装芯片结构可产生更高的功率。对于尺寸为 1.2 mm  $\times$  1.2 mm 并以 2 A 驱动的器件,输出高达 140 mW。

Hirayama 及其同事以及其他深紫外 LED 研究人员的努力在今年的 Photonics West 上展示了他们的成功,表明该器件与其蓝色同类器件之间的性能差距正在缩小。策略很明确,随着实施的改进,这些芯片肯定会物超所值。CS

# 解决 Mini LED 印刷工艺的挑战

Axel Lindloff, 应用工程师, Koh Young Technology 等。

自从 LED 取代 CFL 管成为 LCD 的主要背光以来, 显示器行业几乎没有创新。然而, 随着背光模块越来越多地采用 Mini LED, 这种情况正在发生变化, 其对比度可与 OLED 媲美。

Mini LED 显示出用于新型显示器的前景, 如基于 LED 的视频墙, 让大面积显示器的性能远远超过了以前的技术。

使用 Mini LED 最困难的部分是将其组装并焊接到 PCB 上。典型 Mini LED 的边缘长度为 240 $\mu$  或以下。能容纳这些微小元件的焊接点更小。

## 锡膏印刷验证

钢网印刷仍然是为 Mini LED 应用涂抹锡膏的主要方法, 但在这些尺寸级别上需要微小的模版孔径。为了将极小的锡膏印刷均匀且可靠地印刷在电路板上, 锡膏的颗粒直径必须小于 15 $\mu$ 。钢网必须按最高精度制造。

只有当印刷机能够提供精确对准且印刷头能够分配最细的结构时, 锡膏才能有效地进行印刷。为了可靠地检测和验证这种小几何形状, 需要一个准确综合的检测设备。

Christian Koenen 公司的应用中心凭借其专业知识, 为电路板贴装和电子制造工艺的技术发展做出了重大贡献。该中心作为一个合作平台, 可以与客户一起为苛刻的要求开发最佳的解决方案。该中心配备了无尘室。这些都是确保工艺条件能够可靠地保持最佳品质的基本前提条件。

Koh Young、Heraeus、ASYS 和 Christian Koenen 共同进行了一系列的实验, 在不使用阻焊剂的情况下, 在 PCB 上印刷 10 次, PCB 底部在印刷过程中从未被清洁过。

印刷品质直接用 Koh Young Meister S 锡膏检测设备进行检测。为统计数据钢网上使用了大约 1000 个孔, 使用显微镜和激光扫描仪验证结果。这些 PCB 既没有贴装, 也没有印刷。这些测试是在实际制造条件下进行的, 使用的是可从市场上购买的元器件和材料。

使用的系统和材料包括: 由 EKRA SERIO 5000 印刷机组成的 ASYS SMD 生产线, 带有运输和处理模块; Heraeus LED131 (6 型) 和 LED100 (7 型) 迷你 LED 焊膏; CK Nanovate™ 镍网板, 带等离子处理; 以及 Koh Young 的 Meister S SPI 系统。

## 超细锡膏

对于小型化的 Mini LED 焊盘的几何形状, 需要锡膏颗



在 Christian Koenen 的 Mini LED 印刷测试环境。

粒小于 15 $\mu$  的特殊锡膏, 这样才能为该应用得到可靠的锡膏。

钢网厚度在 15 到 30 $\mu$  之间, 孔径小于 80 $\mu$ , 这些颗粒能可靠地减少潜在的印刷不良, 如大幅波动的锡膏量或锡膏印刷。

在这里描述的研究中, 使用了 6、7 号粉, 由 Welco® 专利工艺生产。在这个过程中, 焊料合金首先在热稳定的分散介质中被加热到高于其熔点范围。通过一个特殊的转子-定子程序, 生产出熔化后的均匀焊料颗粒。

冷却后, 得到了锡膏颗粒分布范围非常细的焊粉, 在这种情况下, 即 6 号粉 (5 至 15 $\mu$ ) 和 7 号粉 (2 至 11 $\mu$ ) 锡膏。其特点是具有特别好的球形度 (长宽比约为 1) 和光滑的表面。

这些锡膏参数有助于保证出色的初始印刷能力以及长期的印刷稳定性, 这对 Mini LED 装配技术的提升尤为重要。

Heraeus 为这些 LED 应用开发了一个优化的 NC 助焊剂配方系列 (LED131/LED100), 旨在确保出色的印刷性和必要的可焊性。由于颗粒较小, 锡膏球体的表面积会大大增加 (氧化程度较高), 因此首先必须设计一个可靠的活化设计。

其目的是使所有参与的连接部分 (特别是 Mini LED 和基板) 实现良好的润湿, 并达到低空隙率, 以保持剩余助焊剂残留物的必要绝缘值 (SIR)。

除了这些考虑因素和对焊膏的标准要求之外 (如低坍塌度和低焊球形成), 还要特别注意在回流焊之前确保锡膏有足够的粘性。这可以将 Mini LED 的颗粒及其明显最小化的连接区域在回流焊之前保持在原位。

## 钢网

CK 镍钢网的材料近年来得到了 Christian Koenen 团队的改进。因此产生了 CK Nanovate 镍钢网。这种超级合金的引入让用激光切割镍而不形成微裂缝成为可能。这种材料结



合了镍和不锈钢钢网的优点，解决了其缺点。

该公司可以生产厚度为  $15\mu$  以上的钢网系列。该团队在实验中使用了厚度为  $15$  至  $30\mu$  的钢网，从而评估不同的面积和填充率。

为了获得具有代表性的结果，尽管有不同尺寸的 Mini LED，但该团队仍决定采用  $45 \times 45\mu$ 、 $60 \times 60\mu$  和  $80 \times 80\mu$  的尺寸。

小孔的可印刷性得到了进一步改善，因为钢网的底面和孔的内壁都有 Plasma 3.0 涂层。该涂层可减少锡膏和钢网之间的粘附力，从而使其能更好地从孔隙中释放出来，并减少了各个凹槽之间以及后续印刷周期之间的体积分散。

## 印刷系统

现代钢网印刷机必须具有高度的灵活性，就像 EKRA SERIO 5000 一样，可以动态地满足不断变化的要求。决定锡膏印刷的关键因素是基板的平整度及其与钢网的共面性。

通常情况下，Mini LED 基材只有十分之几毫米薄，因此容易弯曲。

EKRA 的先进印刷头是专门为超细间距应用而设计的。刮刀的压力在一个狭窄的公差范围内精确印刷。

## 锡膏检测

所有相关的印刷参数都通过 EKRA 高端闭环接口连续传输到 Koh Young KPO 检测解决方案，并进行记录和自动



Koh Young 的 Meister S SPI 设备。

优化。刮刀和脱模可以针对高度微型化的 Mini LED 等应用进行微调，且无需操作人员的任何调试。

在自动光学检测中，总是需要在检测速度和测量精度之间做出让步。用 SPI 系统处理 Mini LED 也会涉及像素大小的问题。在该应用中，这意味着 LED 越小，显示器的分辨率就越高。一个可重复的测量需要大约 100 个像素的信息。然后，就可以快速地从图案的大小来推断。


另一个重要的方面是 z 轴分辨率。光学测量系统会评估单个像素之间的灰度值相移。光线以一个确定的角度从两侧投射到相机领域。投影角度和

像素大小与 Z 轴高度分辨率有关。

Meister S SPI 系统正是为了满足这些要求而设计的。在这项研究中，像素尺寸被降低到  $5\mu$ ，同时投射角也将至最低。虽然这会导致高度测量范围比标准 SPI 减少了一半，但在 Meister S 系统的具体应用中，低高度的高精度是必须的。此外，Meister 设备的 Plus 版本对反光表面进行了特别优化。

该研究揭示了光学检查的物理极限。为了满足未来的要求，Koh Young 已经在设计一个新的相机系统，其分辨率可以达到  $3.5\mu$ 。

对于这样小的印刷，印刷机必须能够提供出色的解决方案，以实现基板和钢网之间的最大共面性。

为确保正确的印刷位置，生产线应配备先进的检测设备，如 Koh Young Meister S。 

Koh Young 将参加 10 月 20 日至 10 月 22 日在深圳会展中心举行的 Nepon Asia 2021 展会（中国深圳），展位号为 1F45。参观我们的展位，体验解决电子贴装难题的九大智能工厂解决方案。

如要了解更多关于 Koh Young 技术信息，您可以在以下网站注册 NEPCON 亚洲展会 <https://www.nepconasia.com/en-gb.html>。如果您无法参加会展，也可以在 [kohyoung.com](http://kohyoung.com) 上了解更多关于我们解决方案的信息。

Koh Young 将举行 2021 年在线检测技术发展方向研讨会，其中包括 5 场在线研讨会，并将于 2021 年 11 月 16 日开始举行。Koh Young 的专家团队都将在每次研讨会后开展直播问答环节。

在 [kohyoung.com](http://kohyoung.com) 上立即注册，预定在线研讨会，参观 Koh Young 专家小组为您详细讲解关于检测技术发展方向的内容。

联络信息：Room 202, Block 2, No.69, WeiXinRoad, Suzhou Industrial Park, 215121 +86 512-6255-8900

电子邮件：[sales.kyc@kohyoung.com](mailto:sales.kyc@kohyoung.com)

联络信息：Koh Young America, Inc., 1950 Evergreen Boulevard, Suite 200, Duluth, GA 30096 +1 704-651-2860

电子邮件：[brent.fischthal@kohyoung.com](mailto:brent.fischthal@kohyoung.com)

网站：[www.kohyoung.com](http://www.kohyoung.com)

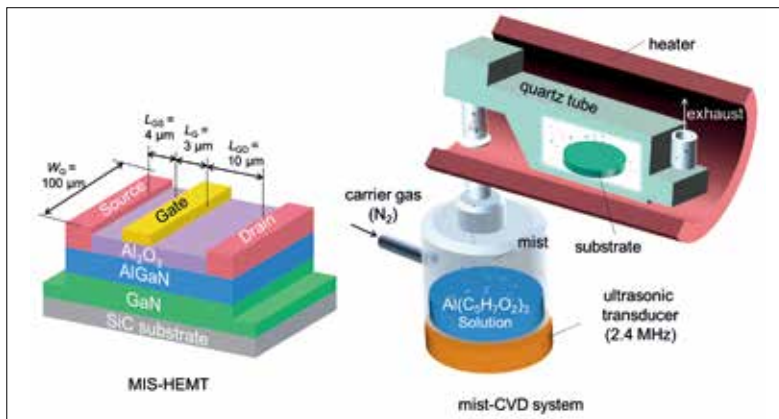
其他作者：Stefan Mausner 与 Dr. Sebastian Fritzsche, Heraeus Deutschland；Lukas Sänger, Asys；与 Sebastian Bechmann, Christian Koenen GmbH

# 雾化学气相沉积增强 MIS-HEMTs

得益于雾化学气相沉积 (mist-CVD) 技术, 不再需要自燃材料和真空泵在 GaN HEMT 上沉积绝缘层。

一家日本合作公司声称已经生产出第一个金属-绝缘体-半导体 (MIS) HEMT 器件, 其中添加了由 mist-CVD 沉积的氧化铝绝缘层, 这是一种成本效益高、环境友好的生长工艺。

这种 HEMT 的变体不像肖特基栅极那样常见, 肖特基栅极的结构更简单, 更容易制造, 并且产生高跨导。然而, 肖特基栅 HEMT 有一个缺点: 它存在高泄漏电流, 这是由驱动栅极正向偏置的高输入摆幅引起的。解决问题的方法是通过在 AlGaIn 层和金属栅之间插入绝缘层而形成的 MIS 结构。



MIST CVD为生产 MIS-HEMT提供了一种环保、低成本的方法。

不幸的是, 现有的实现 MIS-HEMT 的沉积技术需要在真空下使用高度易燃的有毒源。例如, 氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 是一种具有高击穿电场和良好介电常数的绝缘体, 但沉积氧化铝的常见方法是原子层沉积技术, 使用的气源是三甲基铝, 这是一种极度易燃的材料。

相比之下, 日本团队, 福井大学 (University Of Fukui)、关西学院大学 (Kwansei Gakuin University) 和熊本大学 (Kumamoto University) 的研究人员合作下开发的雾化 CVD 技术具有成本效益高, 环境友好等优势, 而且沉积过程是在大气压下进行的, 因此也不需要真空泵, 从而进一步减小能耗。

来自福井大学的研究小组发言人乔尔·阿苏巴尔 (Joel Asubar) 说: “最重要的是, 雾化学气相沉积系统使用的是更安全、更便宜的乙酰丙酮铝作为铝源。”

Asubar 支持这项技术的简单性, 指出雾化 CVD 系统只有两个主要部分: 一个雾化器, 它与商业超声波加湿器非常相似; 以及一个加热器。其主要挑战在

于控制雾气的流动, 雾气一半是液体, 一半是气体。根据 Asubar 的说法, 正是流体力学知识和源前躯体的热解反应解开了在半导体表面沉积氧化铝的“秘密配方”。

为了展示雾化生长的能力, 研究小组将这种方法生产的器件与那些采用肖特基栅极的器件的性能进行了比较。这两种类型的晶体管都是由具有 SiC 衬底和具有 24 nm 厚的 AlGaIn 势垒层的外延片制成的, 这种 AlGaIn 三元结构产生了一种二维电子气, 其面载流子密度为  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ , 迁移率为  $1510 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 。

HEMT 的制造始于反应离子刻蚀 (限定隔离沟槽) 和电子束蒸发 (提供源极和漏极接触)。为了制造 MIS-HEMT, 研究小组加入了  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 使用乙酰丙酮铝在甲醇中溶解产生的雾, 并用 2.4 MHz 的超声波换能器雾化这种液体前躯体。使用氮气作为载气, 在加热到  $400^\circ\text{C}$  的样品上沉积薄膜只需要 90 秒。

在长  $3 \mu\text{m}$ , 宽  $100 \mu\text{m}$ , 栅漏间距为  $10 \mu\text{m}$ , 栅源间距为  $4 \mu\text{m}$  的器件上进行了测试, 结果表明, 用喷雾化学气相沉积方法制作的 MIS-HEMT 比肖特基栅有更大的优点。栅漏电流降低三个数量级, 允许应用 +3V 栅源, 将最大漏电流提高到  $780 \text{ mA mm}^{-1}$ 。此外, 反向击穿电压更高, 为 320V, 而不是 210V。

Asubar 还将他的 MIS-HEMT 与 ALD 制造的采用相同绝缘体的 MIS-HEMT 进行了比较。用雾化学气相沉积法制备的薄膜具有较低的界面态密度和亚阈值摆幅, 被称为“具有高度的竞争性”。

该合作团队的下一个目标之一是在最近工作的基础上进一步揭示为何 mist- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$  界面上的固定正电荷水平出人意料地低。“这意味着使用 Mist- $\text{Al}_2\text{O}_3$  更容易获得增强模式的器件,” Asubar 说, 他打算利用这一特性来获得高性能、更安全的“常关型”器件。☒

## 参考文献

R. S. Low et al. Appl. Phys. Express 14 031004 (2021)

# Nichia 提高了蓝绿垂直腔面发射激光器的效率

具有电介质和氮化镓基反射镜的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 打破了效率记录

日亚化学公司 (NICHIA) 声称已经打破了氮化镓基蓝色和绿色 VCSEL 的效率记录。

今年 3 月在 SPIE 光子学西部会议上宣布的这些胜利, 使这家日本 LED 和激光二极管制造商重新回到了氮化镓基 VCSEL 发展的前沿。十多年前, Nichia 率先开发了这种类型的激光器, 生产了世界上第一个室温下以连续波模式工作的氮化镓基 VCSEL, 随后似乎放弃了多年的进一步发展。

在 Photonics West 大会上代表公司发言时, Kenichi Terao 透露, 这些 VCSELs 的主要目标是智能眼镜中的光源。在这些视网膜显示器中, 红色、绿色和蓝色光源只需要产生一毫瓦的最高功率——这是该团队最新的激光器所满足的规格。

Nichia 首次涉足 VCSEL 开发取得了初步的成功。那个时代的里程碑性进展包括 2008 年研发的在 CW 模式下工作的可发射紫外激光的室温 VCSEL, 以及随后 2011 年和 2012 年的蓝色和绿色兄弟。然而, 这种设计的制造工艺的主要特征是有一对介质镜, 与大规模生产不兼容。为了确定腔体的尺寸, 必须将外延层从衬底上移除并抛光到理想厚度。不幸的是, 这不能在纳米尺度上常规完成, 从而无法以可接受的产量进行大规模的生产。

为了解决这个问题, Terao 和他的同事们已经转向了一种基于  $\text{Al}_0.8\text{In}_{0.2}\text{N}/\text{GaN}$  分布的布拉格反射器的设计, 该设计将介质顶镜和底镜结合在一起。尽管该团队不是这种架构的先驱, 但他们在这方面取得了重大进展, 包括第一次绿色激光, 以及各种形式的 GaN 基 VCSEL 的创纪录效率。

该团队的蓝色 VCSEL 有: 由  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  配对制成的介质 DBR; 由 p-GaN 表面钝化定义的  $4\ \mu\text{m}$  直径孔径; 以及仅相当于  $4.5\ \lambda$  的腔长, 确保这种设计足够短, 可用于单模激光。

这些器件的发射波长为  $442.3\ \text{nm}$ , 阈值电流和电压分别为  $0.4\ \text{mA}$  和  $3.75\ \text{V}$ , 峰值电光效率为  $13.6\%$ 。对其中 7 个在  $25^\circ\ \text{C}$  下运行时各产生  $0.6\ \text{mW}$  的器件进行了测量, 结果显示其可连续工作时间稳定在 1000 小时以上。



这些蓝色 VCSEL 由具有 2 英寸 GaN 衬底的外延片组成, 成品率超过 90%。这一数值是考虑了小于 4 毫米的去除区, 包括去除非常靠近晶片边缘区域的材料, 因为那里的光刻工艺是不稳定的。

当驱动电流分别为  $1\ \text{mA}$ 、 $3\ \text{mA}$  和  $5\ \text{mA}$  时, 垂直腔面发射激光器出现单峰, 显示出稳定的单纵模和单横模。由于自加热引起折射率的变化, 发射波长漂移了  $0.11\ \text{nm}/\text{mA}$ 。根据 Terao 的说法, 进一步的自加热研究发现了  $0.017\ \text{nm}/^\circ\text{C}$  的变化, 这比边发射激光器的变化要小。

该团队的绿色 VCSEL 的设计与它的蓝色表亲非常相似。Terao 说, 主要的区别是孔径更大(从  $4\ \mu\text{m}$  扩大到  $5\ \mu\text{m}$ ), 以防止驱动电压的增加。绿色的 VCSEL 还具有更薄的有源层, 以抑制压电场。

绿光垂直腔面发射激光器的激光波长为  $514.9\ \text{nm}$ , 其特性包括  $3.7\%$  的电光效率、 $5.02\ \text{V}$  的阈值电压和  $2.8\ \text{mA}$  的阈值电流。光输出功率超过  $1.5\ \text{mW}$ , 打破了索尼之前保持的  $0.1\ \text{mW}$  的纪录。OSc

## 参考文献

K. Terao et al. SPIE Photonics West 11686-1 (2021)

Nichia 将用氮化镓垂直腔面发射激光器瞄准智能眼镜应用

# 利用极化工程实现 GaN MSM 紫外探测器的“自驱动”特性

**创新点：**中科院宁波材料所的郭炜研究员、叶继春研究员团队利用氮化物自发极化特性，首次制备了具有横向极性结构的高性能紫外光电探测器，并实现了紫外光在 0 伏偏压下的“自驱动”响应。该探测器的高响应度和光暗比主要归因于内建空间电荷区的建立。这一工作有望为新型紫外光电器件的设计和研发提供新的思路。

**关键词：**自驱动光电探测器，MSM 探测器，极化工程，中科院宁波材料所

**紫**外光电探测器 (Ultraviolet Photodetector) 长久以来在军用和民用领域都具有广泛的应用前景，例如飞行器尾焰预警、紫外通信技术对抗、火灾检测、生物医药分析等应用都能看到他的身影。相比于传统硅基紫外探测器，基于 III 族氮化物的宽禁带半导体探测器具有结构简单、体积小、高温稳定性好等众多优点，是目前产业界和学界的关注热点。其中，金属-半导体-金属 (Metal-Semiconductor-Metal, MSM) 型探测器在制作过程中只需构建金属-半导体肖特基接触，无需对外延薄膜进行掺杂，结构最为简单，但通常工作需要外加偏压，因此不符合低功耗紫外探测的发展趋势。在本工作中，中科院宁波材料所的研究人员利用氮化物自发极化的特点，即氮化物在 c 轴具有金属极性和氮极性两个极性面，且自发极化方向相反的特性，提出了一种利用氮化物极化工程构建自驱动 MSM 紫外探测器的方法。这一方法的关键在于基于同一衬底外延生长金属极性和氮极性畴在衬底上交替分布的“横向极性结构” (Lateral-polarity-structure, LPS)，并一次性沉积肖特基电极。在这种情况下，阳极和阴极电极分别沉积于金属极性和氮极性之上。这一探测器与传统 MSM 探测器相比，横向极性结构的 MSM 探测器表现出更为优越的性能。如图一所示为 LPS-MSM 探测器的结构示意图以及探测器的响应度曲线。与传统 MSM 探测器相比 (图 1(c))，基于 LPS 的紫外探测器 (图 1(b)) 在 -10V 偏压下表现出更高的响应度 (933.7 mA/W) 和更大的光-暗电流比 ( $1.2 \times 10^4$ )。更为重要的是，在紫外光照射下，器件不需要任何外部偏压即能探测到紫外光响应，其峰值响应度为 6.4 mA/W，暗电流低至 6.8 nA/cm<sup>2</sup>，探测率大于  $1.0 \times 10^{12}$  Jones。而相比之下传统的 MSM 紫外探测器在 0 伏偏压下则看不到任何响应。综上所述，利用氮化物的极化工程，科研人员首次制备了自驱动特性的 MSM GaN 紫外探测器，其响应度、探测率、光暗电流比等参数均达到同类器件领先水平。

为了探究 LPS PD 性能更优越的内在原因，团队结合能带工程对器件在暗态和光照下的能带和载流子分布进行了对比分析 (如图 2)。我们发现 LPS MSM 探测器的自驱动功能主要归因于两个原因：一、不同极性畴对于作为浅施主

的氧原子吸引能力存在差异，引起了不同极性畴费米能的分离。显然，这直接导致了 LPS 在界面处产生了空间电荷区。横向空间电荷区的产生加快了光生载流子的分离，下转第43页

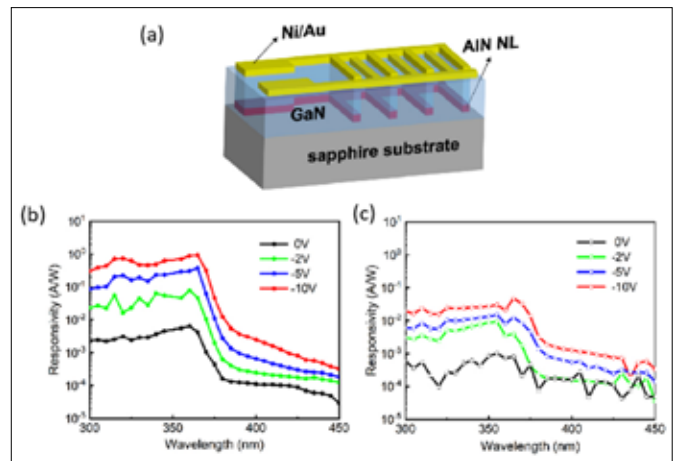


图1: (a) 横向极性结构自驱动紫外探测器结构示意图；横向极性结构 (b) 与传统结构 (c) MSM紫外探测器响应度曲线。

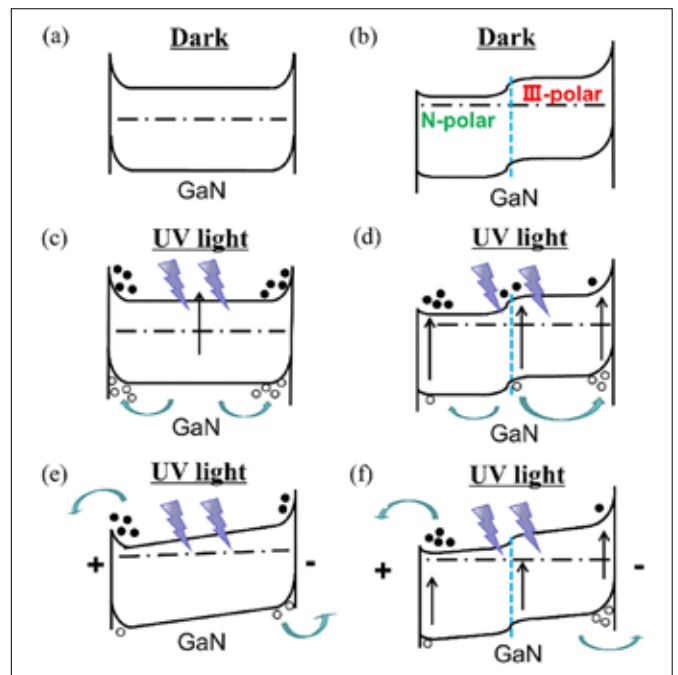


图2: 传统MSM探测器 (左栏) 与横向极性结构MSM探测器 (右栏) 能带示意图。其中 (a) (b) 为暗态条件, (c, d) 为紫外光照、无偏压状态, (e, f) 为紫外光照、器件反向偏置状态。

# 用热循环增强蓝宝石模板上的氮化铝

## 重复热循环降低了蓝宝石上溅射 AlN 薄膜的螺位错密度

日本三菱大学的研究人员通过热循环退火提高了蓝宝石模板上氮化铝的晶体质量。

他们的工艺降低了 AlN 薄膜中的位错密度，应该有助于增加深紫外光 LED 的前景。在低成本、高质量的衬底上制造这种器件有望增加其输出功率，并推动其在各种应用中的部署，包括医疗、净水和日盲通信。

由于块状氮化铝价格昂贵，可获得性和尺寸都有限，因此人们对蓝宝石模板上的氮化铝兴趣有所增加。使用蓝宝石模板上的氮化铝可以解决所有这些问题，但由于与衬底的大晶格失配，沉积层可能会出现千疮百孔的缺陷。较厚的层可以降低螺位错密度，但代价是加工问题导致的晶圆弯曲。

早在 2016 年，Mie 大学的研究小组就报告称，他们可以通过溅射的方法生产一对沉积在蓝宝石衬底上的氮化铝，然后将生长表面面对面放置在氮气中进行退火，从而将位错密度降低一到两个数量级。在这项工作的基础上，该团队成功地通过双重溅射和退火进一步降低了位错密度。这将使螺位错密度降至  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  以下，但这一过程并不简单，需要两个溅射和退火步骤，成功与否取决于在第二次溅射之前保持表面清洁。

为了简化这一过程，该团队最近研究了热循环退火，评估了不同循环对厚度从 100 nm 到 1000 nm 的一系列 AlN 薄膜质量的影响。一系列热循环条件包括温度坡道数量、温差的大小以及是否采用两步退火，最好是在开始或结束时使用较高的温度。

上接第 42 页 从而更有利于其被电极所收集；二、由于自发极化相反，金属极性和氮极性畴表面金半接触肖特基势垒数值也存在明显差异。据报道，氮极性 GaN 的肖特基势垒高度低于金属极性 GaN，能带弯曲更小，这一不平衡特性也导致了载流子在外界偏压条件下向阳极和阴极传输的效率不同。

然而，宁波材料所的科研人员认为，这一结构仅仅是利用“极化工程”进行器件设计的开始。通过引入 AlGaIn 材料，随着材料禁带宽度增大，探测截止波长也将进入日盲波



高质量的蓝宝石上氮化铝模板将帮助深紫外光 LED 取代用于净水的灯具

该团队还研究了延长退火时间的影响，考虑了 370 纳米厚的 AlN 薄膜在恒温下的情况。随着时间从 1h 增加到 12h，螺位错密度从接近  $5 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$  下降到不到该值的一半。然而，较长的时间带来了其他问题：由于 AlN 的形成，宏观缺陷在 9 小时后开始出现；AlN 与蓝宝石之间的界面开始恶化，不适合生长。

在应用的热退火条件范围内，最佳结果来自 1600°C 到 1700°C 之间的五个循环斜坡。采用这种方法，在每次温度变化后样品保持 72 分钟，螺位错密度降至  $1.65 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。

根据研究小组的说法，当 AlN 薄膜在 1700°C 简单地退火时，微弱的拉伸应变松弛，几乎没有应变。通过在 1600°C 和 1700°C 之间改变温度，这使得较低的温度可以诱导压应力，从而加速位错的移动，最终增加湮灭和合并的可能性。在此条件下，将 AlN 薄膜厚度增加到 800nm 时，位错密度进一步降低到  $8 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 。

该团队已经在这种高质量的模板上生产了深紫外光 LED，并在由 MOCVD 形成的变体上进行了比较。与对照组相比，低螺位错密度模板中的多量子阱的暗点密度降低了近一个数量级。使用高质量模板的器件的输出功率提高了 80%。通过优化生长条件、衬底偏角和空穴注入层，有望进一步改善这一数值。📄

### 参考文献

D. Wang et al. Appl. Phys. Express 14 035505 (2021)

段，这将明显扩大紫外探测器的应用范围。此外，通过改变 MOCVD 条件，可以调控不同极性畴的背景载流子浓度、表面形貌等特性，从而进一步优化、提升氮化物内部内建电场的强度和能带弯曲程度，为新型紫外光电子器件的开发带来了无限的可能性。📄

### 参考文献

Chenyu Guo, Wei Guo et al., Optics Letters, 46, 3203 (2021), <https://doi.org/10.1364/OL.428721>

Advertiser	广告商名称	网址	页码
Aixtron		www.aixtron.com	IFC
IQE		www.iqep.com	IBC
Koh Young		www.kohyoung.com	38-39
Riber		www.riber.com	13
特思迪半导体		www.tsd-semicon.com	3

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

### 新产品投稿指南

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

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

Editor in China (中国版编辑)  
 Min Lu (陆敏)  
[minL@actintl.com.hk](mailto: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](mailto: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](mailto:floyd@actintl.com.hk)  
 Tel: 852 2838 6298

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

**Shanghai (上海)**  
 Hatter Yao (姚丽莹)  
[hattery@actintl.com.hk](mailto:hattery@actintl.com.hk)  
 Amber Li (李歆)  
[amberl@actintl.com.hk](mailto:amberl@actintl.com.hk)

Linda Li (李承珍)  
[lindal@actintl.com.hk](mailto:lindal@actintl.com.hk)  
 Tel: 86-21-6251 1200

**Beijing (北京)**  
 Cecily Bian (边团芳)  
[cecilyb@actintl.com.hk](mailto:cecilyb@actintl.com.hk)  
 Tel: 86-135 5262 1310

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

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

Grace Zhu (朱婉婷)  
[gracez@actintl.com.hk](mailto: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](mailto:floyd@actintl.com.hk)  
 Tel: 852 2838 6298

**Korea (韩国)**  
 Lucky Kim  
[semieri@semieri.co.kr](mailto:semieri@semieri.co.kr)  
 Tel: 82-2-574-2466

**US (美国)**  
 Janice Jenkins  
[jjenkins@brunmedia.com](mailto:jjenkins@brunmedia.com)  
 Tel: 724-929-3550

Tom Brun  
[tbrun@brunmedia.com](mailto:tbrun@brunmedia.com)  
 Tel: 724-539-2404

**Europe (欧洲)**  
 Shehzad Munshi  
[sm@angelbcl.co.uk](mailto:sm@angelbcl.co.uk)  
 Tel: +44 (0)1923 690215

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



# THE GLOBAL LEADER IN EPIWAFER SUPPLY

*Enabling the Best RF, Photonics & Power Semiconductors*

'One-stop-shop' for III-V & Silicon epiwafer products

2" to 6" epitaxy ready substrates & polycrystalline materials

Multiple manufacturing sites; Europe, Asia & America

Leveraging 30+ years of compound semiconductor IP

Custom engineered structures; R&D to production volumes

EUROPE: +44 2920 839 400

AMERICAS: +1 508 824 6696

APAC: +886 3 579 8181

ALL INQUIRIES: [sales@iqep.com](mailto:sales@iqep.com)

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

## RF

**GaN HEMT**

*5G Infrastructure  
Radar, EW/ECM, & SATCOM*

**GaAs  
HBT / pHEMT / BiHEMT**

*5G Smartphones & Infrastructure  
WiFi6 Hotspots, GPS & IoT*

**SiGe HBT**

*5G Smartphones  
WiFi6, Bluetooth, GPS & IoT*

## PHOTONICS

**InP Laser & Detector**

*Optical Comms & Data Centres  
SW IR Imaging*

**GaSb Laser & Detector**

*MW-LW IR imaging  
Biometrics*

**GaAs VCSEL**

*3D Sensing & LiDAR  
Datacoms*

## POWER

**GaN on Si HEMT**

**GaN on GaN**

*Electric Vehicle Systems  
Power Conversion & Storage*

**GaAs Multi-Junction Solar**

*High Efficiency Terrestrial CPV & Space PV*

**GaN LED & Laser**

*MicroLED Display & AR/VR  
UV Sterilisation*



# 2021“晶芯”研讨会全年主题

## 线上

▶ 01.21 第二届

先进封装发展趋势与应用挑战

▶ 05.20 第四届

半导体制程配套供应链的生态与生机

▶ 08.25 第六届

SiP微组装产业突围与创新高峰论坛

▶ 10.20 第八届

半导体测试专题研讨会

▶ 12.23 第十届

芯片设计/软件工具技术研讨会

▶ 02.24 第三届

IC制造高端光刻机发展趋势和技术挑战

▶ 07.29 第五届

MEMS制造技术发展论坛

▶ 09.23 第七届

LED技术发展及应用研讨会

▶ 11.18 第九届

功率器件技术与应用研讨会

## 线下

📍 04.15 深圳(线下)

集成电路应用技术创新发展论坛

📍 06.10 苏州(线下)

超越摩尔定律的三维先进封装

📍 10.20 深圳(线下)

SiP微组装产业突围与创新高峰论坛

\* 以上议题暂定, 请以会议举办实际议题为准



公众号



客服号