化合物半导体

COMPOUND SEMICONDUCTOR
Connecting the Compound Semiconductor Community

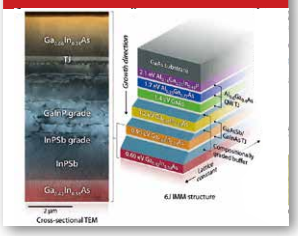
·CHINA

2020年12月/ 2021年1月

绽放氧化镓的光辉前景



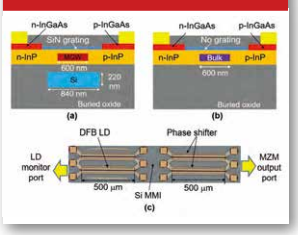
六结超级电池



碳化硅晶体



硅PIC





ACT

www.compoundsemiconductorchina.net

创道硬科技研究院

创道硬科技研究院，创道（北京）咨询顾问有限公司，专注于服务风险投资机构和科技成长型企业，聚焦“硬科技”领域，涵盖半导体、信创、人工智能、物联网、智能制造、云计算、大数据等。打造“创道硬科技研究院”、“创道硬科技生态圈”、“创道硬科技融服务”三大业务板块，科技研究、产业协同、投融资服务一体化平台，涵盖业务包括风险投资、科技深度研究、投融资咨询等。

“创道硬科技”公众号

微信号“riseen001”

翎贲资产 LeadingEdge

上海翎贲资产管理有限公司，成立于2015年2月，是专注于自主可控、半导体集成电路、新材料及国产软件等领域投资的私募管理公司，备案登记号为P1062596。

截止至2020年12月，翎贲资产目前管理9只基金，目前下属基金实际投资规模近15亿元，主要投资企业为麒麟软件、中芯国际、宸芯科技、数梦工场，夜视丽反光材料、衢时代大数据等核心项目，与中船投资、中国软件、水晶光电、天马股份、国华人寿等多家大型上市企业和投资机构达成了合作。

Wolfspeed®

A CREE COMPANY

WOLFSPEED 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

化合物半导体 COMPOUND SEMICONDUCTOR ·CHINA

2020年12月/ 2021年1月

目录

Contents



封面故事 Cover Story

5 **从1995年到2020年化合物半导体大事回顾**

Retrospective: Looking back at the biggest stories from the last 25 years

在过去的25年中，我们取得的成就举世瞩目。我们发明了多种器件，开发了多种应用广泛且价值极高的芯片技术。其中包括：氮化镓基蓝光、绿光激光器及其衍生光电器件，一系列氧化镓功率器件；大规模量产的大功率LED用于显示屏背光源及白光照明灯泡；碳化硅二极管和晶体管的商品化正在推动电路效率的提高；已经由砷化镓晶圆厂生产出数十亿的放大器用于手机的关键零部件。接下来让我们细细品味吧，了解每一个里程碑和它背后的故事，那就从1995年这本杂志首次亮相的时候开始。

- RICHARD STEVENSON

编者话 Editor's Note

04 **第三代半导体的赛道及窗口机会**

Track and window opportunities for third-generation semiconductors

- 陆敏

专家访谈 Expert interview

30 **不平凡之年孕育非凡的“芯愿”**

An extraordinary year gave birth to marvellous wishes

- 陆敏

技术Technology

40 **绽放氧化镓的光辉前景**

Unleashing the promise of gallium oxide

- WENSHEN LI, ZONGYANG HU, KAZUKI NOMOTO, DEBDEEP JENA和HUILI GRACE XING，康奈尔大学

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、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

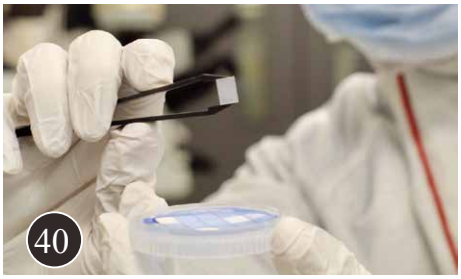
About ACT International Media Group

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

化合物半导体
COMPOUND SEMICONDUCTOR·CHINA
2020年12月/ 2021年1月

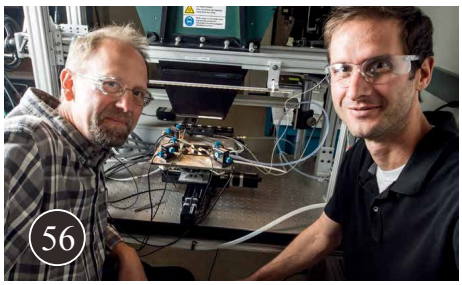
目录

Contents









46 **开拓SiC衬底生产**
Opening up SiC substrate production
- SANTHANARAGHAVAN PARTHASARATHY，GT ADVANCED TECHNOLOGIES

51 **膜点亮硅光子学**
Membranes light up silicon photonics
- TASUROOU HIRAKI，TAKUMA AIHAARA，TAKURO FUJII，KOJI TAKEDA，TAKAAKI KAKITSUKA，TAI TSUCHIZAWA，SHINJI MATSUO，NTT 公司

56 **六结超级电池**
Six-junction super cells
- RICHARD STEVENSON

60 **广告索引 Advertisement Index**

注：本期因刊登回顾及专家访谈文章，业界动态和科技前沿栏目暂停一期。

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，亦是中国唯一专注于化合物半导体产业的权威杂志，重点介绍国外先进技术和产业化经验，促进国内产业发展，为国内读者提供化合物半导体行业的专业知识。内容涵盖晶体的特性研究，器件结构的设计，生产中用到的材料、设备、软件、测量、厂房设施，以及有关市场分析和动态。

About Compound Semiconductor China
Compound Semiconductor China (CSC) is the ‘sister’ title to Compound Semiconductor - the world's most respected and authoritative publication. It is also the unique and authoritative publication dedicated to the Compound Semiconductor industry in China, introduce advanced global technology information and manufacturing experience, support the growth of the industry in the China market. Our content covers the technology development of crystal characteristic, design of IC structure, and materials, equipment, software, metrology, facilities for manufacturing, as well as market analysis & trends.

扫一扫
免费下载电子书



化合物半导体
CS COMPOUND SEMICONDUCTOR · CHINA

第三代半导体的赛道及窗口机会

近年来，第三代半导体备注产业、资本及政府的关注。据不完全统计，2019 年国内涉及碳化硅的投资项目总体量达 300 亿（人民币），2020 年截至到 11 月底国内涉及第三代半导体（主要是碳化硅，包括部分氮化镓）的投资项目总体量达 900 亿（人民币），这其中典型的具有引导意义的投资项目包括：华为哈勃投资碳化硅材料龙头企业天科合达、山东天岳及翰天天成；大基金投资天科合达及世纪金光。国际上在第三代半导体领域，产业扩产及资本运作也很活跃。碳化硅世界龙头企业 Cree 在近几年先后卖掉了它的主营业务—照明及 LED 版块，收购了英飞凌的微波射频版块，先期已投资 10 亿美元扩产，企在大力发展 8 英寸车规级碳化硅产业链，计划材料产能扩大 30 倍（完成后年产能达千万片庞大体量），器件产能扩大 18 倍，可见 Cree 已将发展重点专注在第三代半导体的功率应用领域，因为这正是第三代半导体最具发展潜力及市场空间的方向。其他公司如 II - VI 及 SiCrystal（已被罗姆收购）也都发布了相应的扩产计划。

我们知道，相比于第一、二代半导体，我国第三代半导体技术与国际先进水平虽然没有大的代际级别的差距，但是也至少有 5 年以上的距离，这主要表现在材料的尺寸及品质上，器件的性能、良率，和模块封装的可靠性及电路拓扑应用的实战技术上等。这些差距都会直接影响到产业应用的拓展及市场占有率。众所周知，民用功率器件应用主要分 3 个层次，消费级、工业级和车规级，消费级对器件的可靠性要求最低，车规级最高，因此进入供应链名单门槛最高，客户认证周期最长。故此，我国的差距就会直接影响到我国第三代半导体材料及其器件进入车规应用，而新能源汽车应用恰恰是第三代半导体应用的最大蓝海市场（将来器件年市场估计最大可达 500 亿美元）。

去年第三代半导体电力电子器件市场共 5.8 亿美元(碳化硅 5 亿，氮化镓 0.8 亿)，微波射频器件市场 6.4 亿美元。今年预计电子器件市场共 8 亿美元（碳化硅 7 亿，氮化镓 1 亿），微波射频器件市场 20 亿美元（快速增长源于 5G 基站建设的高速度）。我国企业所占的市场份额应该在 10% 之内。

市场需求正在以较高的速度快速释放，而我们又面临着国际先进技术及庞大产能的竞争，我们的竞争优势何在？我们的赛道机会在何处？我们的窗口机会在哪里？都值得我们深思，我们国内企业应该联合起来，形成竞争合力，在 Cree 的产能没有释放出来之前，定位好我们的相对优势赛道，打攻坚战，迅速占领相关市场。否则重复同质化建设，盲目大而全扩张，恶性竞争，必将是“红海一片，一地鸡毛”！

陆敏

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

北京 Beijing
Tel/Fax: 86 10 64187252
上海 Shanghai
Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030
深圳 Shenzhen
Tel: 86 755 25988571
Fax: 86 755 25988567
武汉 Wuhan
Tel: 86 27 59233884

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

© 2021 版权所有 翻印必究

此专栏由昂坤视觉（北京）科技有限公司独家赞助出版，感谢昂坤视觉对化合物半导体行业发展的支持！

化合物半导体

大事记

1995 - 2020



在过去的 25 年中，我们取得的成就举世瞩目。我们发明了多种器件，开发了多种应用广泛且价值极高的芯片技术。其中包括：氮化镓基蓝光、绿光激光器及其衍生光电器件，一系列氧化镓功率器件；大规模量产的大功率 LED 用于显示屏背光源及白光照明灯泡；碳化硅二极管和晶体管的商品化正在推动电路效率的提高；已经由砷化镓晶圆厂生产出数十亿的放大器用于手机的关键零部件。接下来让我们细细品味吧，了解每一个里程碑和它背后的故事，那就从 1995 年这本杂志首次亮相的时候开始。

1995 年：璀璨的激光

1995 年夏季，高效蓝色 LED 的开拓者中村修二（Shuji Nakamura）已经成为业界名人。在 1993 年发明了该器件之后，他通过为该发光芯片设定更高的性能基准而备受关注。这些成就奠定了他在技术殿堂中的地位，也带来了许多赞誉，其中最重要的是 2014 年的诺贝尔物理学奖。但让中村修二更高兴的是，他的工作为照明革命奠定了基础。

中村修二因对氮化镓 LED 的贡献而闻名，但这不是他唯一一个广泛应用的发明。他也是氮化镓 LED 的相关技术——举世震惊的氮化镓激光二极管的发明者。在当时，距离氮化镓 LED 被引进后的 25 年内，尽管制造商们每月可以制造数百万个氮化镓 LED，但可以批量生产氮化镓激光二极管的制造商仅有两家：中村修二在 1990 年代效力的日亚公司（Nichia）和德国雷根斯堡的欧司朗光电半导体。



高效氮化镓 LED和氮化镓激光器的发明者中村修二（Shuji Nakamura）与日亚化学的创始人小川伸夫（Nobuo Ogawa）。来源：Bob Johnstone。

中村修二的激光突破发生在 1995 年底，12 月 12 日报到了新闻。当月晚些时候，日亚公司最伟大的工程师出现在电视上，在一个全国性的晚间新闻广播中，展示了他出色的新器件。

到了 1996 年初，有关激光二极管的细节开始出现在科学媒体上。日本应用物理学杂志上的一篇论文描述了在蓝宝石衬底上生长的宽 30μm，长 1500μm 的条形激光器。发射波长为 417 nm，具有一个包含 26 个量子阱的有源区，每个量子阱由 2.5nm 厚的 $In_{0.2}Ga_{0.8}N$ 层制成。为了使它正常发射激光，需要将电压调高到 34 V。在更高的电压下以脉冲模式驱动，该芯片产生了 200 mW 以上的输出。令人兴奋的是，在运行两个小时后，该激光器没有显示出退化的迹象。

在激光二极管问世之前，整个光电行业对这种短波长激光二极管的杀手级应用几乎没有怀疑。那时，大多数音乐爱好者都购买了 CD，VHS 刻录机正处于被 DVD 播放器取代的边缘，蓝紫色激光使存储密度提高了五倍，更清晰的画质时代即将到来。

一些希望在家中观看高清电影的人们是新一代光盘播放器的狂热支持者，但他们度过了一段非常艰难的时期。早期的使用者被卷入 HD DVD 派和蓝光派的格式之战。当这一问题得到解决后，允许客户为于 2003 年在日本上架的首批蓝光播放器买单，随之而来的便是更多的挫败感，这些早期的支持者在数年后才等到首款产品的推出。

幸运的是，随后的好年景为蓝色激光二极管提供了一个不断增长，利润丰厚的市场。自那时以后，流媒体服务的日益普及将蓝光播放器的销售送到终点。但随着这扇门关闭，其他几扇门也打开了。现在，蓝光激光器与红色和绿色激光器一起部署在彩色投影仪中，它们也被用于铜焊接系统中，应用在吸收最佳点便可实现出色的焊接。也许有一天，激光会代替普通照明中的 LED，也许也会有这样一个时刻，我们会像感激中村修二的 LED 那样感激他发明的 LD。

1996 年：光伏技术飞速发展

回到 1985 年，当时只有很少有人拥有手机，其中包括一位摩托罗拉高管的妻子 Karen Bertinger，她在加勒比海度假时试图联系丈夫，但电话不通，这使得本应该接到电话的 Barry Bertinger 坚定了对全球无线通信网络的需求。为了实现这一目标，摩托罗拉创立了铱星系统并为其提供资金，通过发射 66 颗卫星（全部置于近地轨道上）来推动电话通信技术的发展。

到 1996 年，III-V 光伏制造商正在为生产卫星的供电设备而忙碌着。尽管硅电池仍在太空领域赢得销售，但是单结 GaAs 器件正处于上升趋势。一开始单结砷化镓器件的效率就要比硅电池高出 25%，更重要的是，在同样受到辐射损伤后，其效率仍比硅电池要高出 40%至 60%。虽然造价是硅电池的五到八倍，但是砷化镓器件因更高的效率而备受青睐。考虑到每颗铱星卫星都需要 24 平方米的 GaAs 电池，但比起硅器件，使用砷化镓电池可以显著减少太阳能电池的面积。

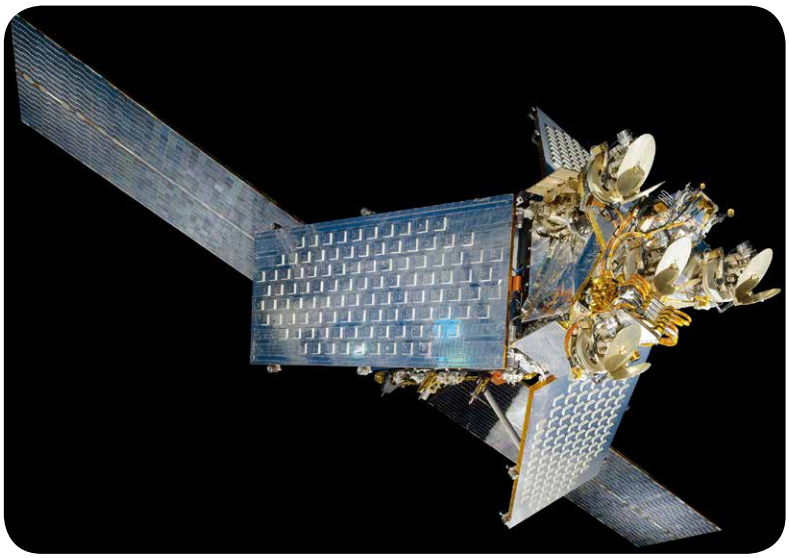
承接砷化镓太阳能电池订单的是加利福尼亚州的两家光伏制造商：Spectrolab 和 Tecstar。Spectrolab 当时是休斯的子公司，现在隶属于波音公司；而 Tecstar 由于参与了铱星项目，1996 年的生产总量为 200,000 个 3 英寸晶圆，相当于 140 kW 的功率。

工程师在锗衬底上制备这些电池，造价仅为砷化镓的 50% 但性能更佳。锗的使用为原材料制造商带来了很多生意，高纯度多晶锗的价格飙升，在短短 18 个月内上涨了 7 倍。并且使得业内领先的两家衬底制造商销量大增，即美国 Eagle Pitcher 公司和比利时 outfit Union Minière，即现在的 Umicore。1996 年，锗衬底的消耗总量在 30 万到 50 万片之间，尺寸从 1.5 英寸到 4 英寸不等。

1998 年 11 月 1 日，铱星网络被受热议，美国副总统阿尔 • 戈尔（Al Gore）与亚历山大格雷厄姆 • 贝尔（Alexander Graham Bell）的曾孙吉尔伯特 • 格罗夫纳（Gilbert Grosvenor）进行了首次通话。

但是，如此大阵势的宣传也没有带动铱星业务，潜在的客户拒绝为这款手机支付 2500 美元。价格降至 1495 美元，服务成本削减至三分之二，都没能扭转这一局面，即使到了 1999 年底，铱星也仅有 1 万 5 千个用户，与预期的 50 万相去甚远，随后不可避免地申请破产了。

这项失败的业务给光伏制造商 Tecstar 造成了巨大的损失。Tecstar 在 2001 年试图进军 LED 外延片领域，但多元化经营并不顺利。2002 年，Tecstar 的管理层决定到此为止，以 2100 万美元的价格将太阳能部门出售给 Emcore。如今，这项技术已由 SolAero 掌握，该公司于 2014 年底通过拍得 Emcore 的太阳能业务而成立。



旨在提供全球蜂窝覆盖范围的铱星项目拥有66颗卫星，每颗卫星需要24 m^2的砷化镓太阳能电池，为III-V光伏产业带来了可观的收入。图片来源：Eric Long, National Air and Space Museum, Smithsonian Institution。

1997 年：砷化镓的增长

拥有一部移动电话在九十年代初并不普遍，但在 2000 年之际已经变为常态。手机的普及促进了砷化镓微电子器件生产商的销售，推动了几家公司实现里程碑式的突破，包括：1997 年 RFMD 发行股票，Rockwell 的 HBT 出货量达到 200 万颗以及 Anadigics 砷化镓集成电路的销售量达到 100 万个。

RFMD 现为 Qorvo 公司的一部分，最初是砷化镓 MESFET，硅双极型器件和 HBT 的无晶圆厂供应商，贡献了 85% 的销售额。随着对后者的需求激增，RFMD 很难跟上供应节奏，错失了与高通公司的重要合同。

为了防止这种情况再次发生，九十年代末，RFMD 在北卡罗来纳州的 Greesnsboro 建造了 4 英寸 GaAs 晶圆厂。厂房分两期建设，年生产量从最初的 10,000 个晶圆到最终的 25,000 个。该设施的资金来 IPO，由 RFMD 的 HBT 晶圆供应商 TRW 公司提供。持有 RFMD 31.1 % 的股份，TRW 成为 RFMD 的最大股东。

罗克韦尔半导体系统公司（Rockwell Semiconductor Systems）因在 90 年代末 HBT 的爆炸性增长而被铭记。在 1996 年初到 1997 年中的 18 个月中，生产量从每月的 1 万片 4 英寸晶圆，猛增了 70 倍，后来通过与 Alpha Industries 的合并在 2002 年成立 Skyworks Solutions。这些 HBT 的买家包括高通和三星。两者都很看重这类晶体管，因为它具有良好的线性度和高效率的结合，是制造基于 CDMA 技术保证长时间通话手机的理想选择。

罗克韦尔（Rockwell）面临来自 Anadigics 公司的竞争，该公司到 1997 年夏季之前就已经出货了超过一百万个支持 CDMA 标准的 GaAs IC。尽管 Rockwell 的大多数 HBT 都已整合到 800 MHz 至 900 MHz 频段的电话中，但 Anadigics 的部分产品却是使用 1900 MHz 频段在手机发射机中提供放大功能。

MESFET 是基于 Anadigics 核心技术的高频产品，其创造的初衷是为公司取得成功奠定基础，但在未来到来之前，MESFET 导致了公司的衰落。

到 90 年代后期，手机制造商已从使用 6 V 电池转变为 4.5 V 再降至 3 V，这有利于 HBT 的价格竞争力的提高。到 2000 年代初，Anadigics 停止生产 MESFET，通过开发新一代的 HBT 进行反击。它没有使用 AlGaAs 发射极，而是使用 InGaP。这项改进提高了 HBT 的可靠性，增强了高温工作能力并改善了线性度。 Anadigics 的产品在手机制造商中大受好评，从而使该公司在 3G 市场中获得了稳固的份额。

1998 年：神话般的晶圆厂

在您想到大量生产砷化镓（GaAs）微电子器件时，您也可能会想到用于智能手机的异质结双极晶体管（HBTs）。但这并不是已经存在的唯一市场。在电信领域中，激光器、调制器驱动器、多路复用器、多路分解器、跨阻放大器、时钟和数据恢复电路制造中使用了许多 GaAs。在所有这些组件中，GaAs 比硅 CMOS 上获得的更高速度产生了更高的比特率。

早在 1998 年，当电信领域的 GaAs 器件热销时，Vitesse 通过建造世界上第一座 6 英寸 GaAs 晶圆厂来提高产品的产量。

与大多数建筑项目一再推迟项目的完成期限不同，Vitesse 在科罗拉多州科罗拉多斯普林斯的工厂比原计划提前了三个多月便完成了建设。第一款采用 GaAs MESFET 技术的产品于 1998 年初下线，并于当年第三季度以 16 种不同的产品为基础，交付了 1500 万美元的芯片。

Vitesse 公司，也是全球从 3 英寸到 4 英寸 GaAs 生产转变的的引领者，为了进一步降低每个芯片的制造成本，建造了 6 英寸的晶圆厂。尽

管改用更大的晶片后每单位面积的衬底成本增加了 25%，但是最终对芯片的生产成本却降低了 40%。在 Vitesse 服务的市场上，它的技术必须继续进步，这样它才能与基于硅 CMOS 的产品保持安全的距离。

网络泡沫的破裂造成了残酷的打击，导致 Vitesse 的 40Gbit/s 器件的销售崩溃，并且在 90 纳米硅工艺技术赶上之前都没有得到恢复。这最终导致 Vitesse 的 GaAs 晶圆厂在 2003 年关闭。

在那之后，该公司转移了产品重点，专注于面向地铁、企业和存储市场的硅基器件产品；并利用其 4 英寸的 InP 晶圆厂制造高速电子器件。该公司发展历史的最后篇章永远地定格在了 2015 年，这一年它被 MicroSemi 公司收购。

即使在今天，6 英寸的晶圆厂也代表着生产 GaAs 晶体管的最先进水平。这可能也表明了，在过去的二十年里，芯片制造的进展已经停滞不前。但考虑到这一点：在硅 CMOS 晶圆厂中，晶圆尺寸在 20 世纪最后 30 年的快速进步并没有持续到本世纪，而且可能永远都不会有 450 毫米的硅晶圆厂。

对于硅单晶来说，300 毫米的晶圆厂似乎是生产的最佳选择，因为投资任何更大的尺寸都无法获得合适的回报；而对于 GaAs 而言，同样的情况也适用于其 6 英寸的生产线。

1999 年：完美的结合

怎样才能实现理想的结合呢？简而言之，当结果大于其各部分之和时，这样的合并就可称为是完美的结合了。

这样的完美结合似乎发生在 1999 年，外延产品国际公司 (EPI) 与量子外延设计公司 (QED) 联手创建了 IQE，这是世界上最大的外延晶片供应商。位于宾夕法尼亚州伯利恒的 EPI 公司通过向主要国内市场供应 MBE 生长的晶圆（用于制造电子器件）来建立自己的业务；而总部位于英国的 IQE 一直专注于光电外延晶片，其三分之二的销售额来自欧洲和亚洲。

合并后的实体为一些产品提供了双重供应来源，并有望借助两家公司不断发展的业务在全球范围内取得巨大的成功。QED 的销售额以 40% 的复合年增长率增长，而 IQE 的销售额以 30% 的速度增长。为了应对更大的需求，两个地点都有扩产计划。QED 已经订购了一台能够一次生产多个 6 英寸晶片的 MBE 反应器，最近扩大了设施规模的 EPI 也订购了多晶片金属有机物气相沉积（MOCVD）设备。为了为这些扩张计划提供资金，IQE 在一次首次公开募股（IPO）中筹集了 7000 万美元，于 1999 年夏天在欧洲版的纳斯达克 (NASDAQ)Easdaq 上市。

从那时起，IQE 巩固了其在外延片市场的领先地位。2006 年，它收购了 Emcore 的 EPI 业务；次年，它收购了新加坡的 MBE Technologies；2012 年，它收购了 RFMD 的 EPI 业务。它还扩大了投资组合。公司在 2009 年增加了实现高质量 GaN 的技术，收购了英国巴斯的 NanoGaN 公司；2010 年收购了华盛顿州斯波坎的 Galaxy 半导体公司，使跨国公司具备了锑基板和红外技术的能力；2012 年，对 Solar Junction 的投资加强了多结太阳能电池方面的专业知识；2018 年，对 Translucent 技术的收购提高了晶体稀土氧化物的制备能力，使化合物半导体膜可以在硅晶片上生长。 IQE 现在是晶片制造及相关技术领域的庞然大物。



1999年，英国的EPI和美国的QED合并产生了IQE，IQE在欧洲的纳斯达克上市。

在 20 世纪 90 年代末和 21 世纪初，砷化镓晶圆厂开始向更大的晶圆过渡。TriQuint 在一系列按时间顺序描述的图片中提供了其 6 英尺高的工厂的“证据”，为这场争取获得生产线越来越大的竞争中注入了一些幽默。TriQuint 在 1999 年举行的 GaAs ManTech 会议上发布了一则新闻，宣布启动业界第一条 72 英寸晶圆装配线。(左上)TriQuint 随后透露，它的一些工程师一直在疯狂地工作，以防止沉重的举重。“伙计，这些都是些大型的砷化镓晶圆，”一位操作员 (上中) 评论道。在接下来的图片故事 (右上角) 中，TriQuint 的一名技术人员评论道：“我不知道发生了什么，它就这么从魔杖上掉了下来！”TriQuint 接着解释了在一家 72 英寸的晶圆厂里，设备维护是如何被证明是一件相当繁琐的事情的。这位设备工程师正在检查蒸发过程中使用的众多中的一个大型真空室 (左下)。在最后的新闻稿中 (右下)，TriQuint 报道了当第一批成品晶圆通过“硅森林”分发时，72 英寸晶圆工厂是如何的让人激动不已。







AK OPTICS
昂坤视觉

在售产品：

viperRTC
先进的 MOCVD 在线监测系统

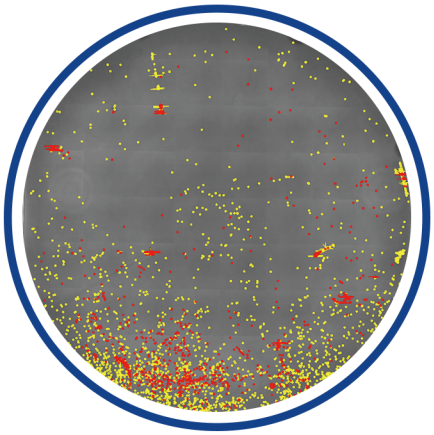
AI+AOI
智检半导体各环节



自研双远心
大视场彩色镜头
超清晰，更可靠



DataX 数据贯通
数据集成，智算研判
服务成品率提升



AI 算法研发
缺陷自学，精确识别
不断冲向 100%

为化合物半导体、光电子和集成电路产业提供光学测量和光学检测设备及解决方案

昂坤视觉（北京）科技有限公司
南昌昂坤半导体设备有限公司

电话： 010-82356771
邮箱： info@akoptics.com
网址： www.akoptics.com
地址： 北京昌平区昌平路 97 号新元科技园 B 座 503 室
江西南昌高新区艾溪湖北路 688 号中兴科技园 8 号楼一层

2000 年：头晕目眩

黄金时代到来之际，互联网流量激增，给光通信基础设施带来了巨大压力。运营商通过增加网络容量来解决这个问题。这创造了一个价值近 100 亿美元的光学元件行业，并有望以 40% 的复合年增长率增长。III-V 族化合物的光电子产品制造商处于有利地位，可以从这一增长中受益，因为他们的产品占到了这一市场的一半。

可以理解的是，疯狂的运营商不想与众多零部件供应商打交道。他们渴望一站式商店，理想的情况是提供可以直接进入他们网络的模块。

为了迎合这一需求，收购在零部件行业盛行。1999 年 6 月，由加拿大公司 JDS Optics 和美国公司 Unival 合并而成的 JDS Unival(JDSU) 引领了这股收购支出热潮。1999 年底，JDSU 签署了一项价值 4 亿美元的协议，收购了光电探测器制造商 EPitaxx，并在 2000 年进行了三笔重大的收购：以 62 亿美元的价格收购了光学镀膜实验室，以 150 亿美元的价格收购了 E-T ek Dynamics，以及以 410 亿美元的价格收购了 SDL Lasers。



前JDSU首席执行官凯文•卡尔霍温(Kevin Kalkhoven)与人共同创立了PKV赛车，后来被称为KV Racing技术。这支车队同时参加了冠军汽车世界系列赛和印地车系列赛，累积了五场胜利，其中包括2013年印第安纳波利斯500大赛。

当互联网泡沫在新黄金时代的头几个月开始破裂时，每个人都知道以比年收入高出许多倍的价格去收购一家公司是多么愚蠢的行为。这使得购买 SDL 成为了一个令人震惊的错误，JDSU 为此支付了相当于其年收入 142 倍的金额。任何关于世界新秩序的概念在后见之明中都被暴露了出来，这种新秩序在令人眼花缭乱的高潮期横冲直撞，传统经济学卷土重来。

2000 年期间，供应链内部开始进行库存调整，压低了利润率。那一年的 6 月 30 日，JDSU 报告了令人极度怀疑的有史以来最大的年度亏损 -- 令人瞠目结舌的 561 亿美元 (考虑到通货膨胀，它目前排在第四位，仅次于美国在线时代华纳 (AOL Time Warner)、美国国际集团 (American International Group) 和房利美 (Fannie Mae))。然而，对于 JDSU 来说，这一损失主要是在账面上。561 亿美元中的绝大多数来自与各种收购相关的商誉减记，这些收购主要是全股票交易。

对于投资者来说，公司命运的低迷不能这么轻易地置之不理。2000 年 3 月，在分析师的支持下，即开即用的梦想家们在正确的时间、准确的地点领导着一家伟大的公司，这家华尔街的“宠儿”的股价达到了 1200 美元的峰值。再往前走几年，他们已经下降了 99% 以上。

该公司领导人在股价接近最高点时抛售了部分股票，因而被指控为欺诈和内幕交易。JDSU 现在支持“不要起诉我们”——代表康涅狄格州的人就是这么做的，他们希望从养老基金中弥补损失。该案件于 2002 年提交，五年后提交法院，管理层被证明没有欺诈行为。

到那时，辉煌时期的的公司首席执行官凯文•卡尔霍温 (Kevin Kalkhoven) 已经退休，其将部分财富用于慈善事业。他还资助了一支赛车队，累计赢得了五场胜利，其中包括 2013 年的印第安纳波利斯 500 大赛 (Indianapolis 500)。

至于 JDSU，它已不复存在。光学元件业务的长期低迷造成了沉重的损失，该公司裁员 80%，关闭了 29 家工厂。2015 年 8 月，该公司分拆，组建了网络测试和测量专家 Viavi Solutions 和激光制造商 Lumentum。

2001 年：一个强有力的开始

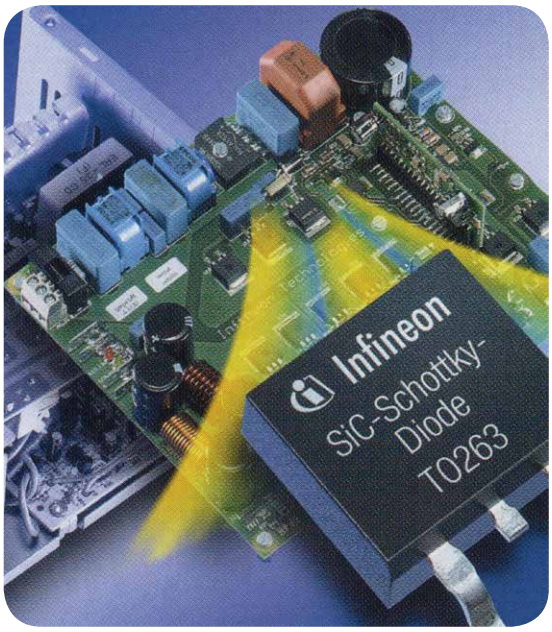
是什么标志着宽禁带电力电子产业的开始？这肯定是英飞凌推出的 SiC 肖特基势垒二极管，这是第一款上市的宽禁带电力电子产品。

当这款器件在 2001 年首次亮相时，它填补了市场的空白。为了避免在高温下会进一步加剧的非常高的泄漏电流，硅和砷化镓肖特基势垒二极管被局限于 250V 以下的阻断电压。英飞凌的两个新器件在承载高达 1A 的情况下可以处理 300V 和 600V 的电压，而且在散热方面要好得多，这使得它们在电源应用方面具有很大的优势。

英飞凌在其位于奥地利维拉赫的工厂用 2 英寸的碳化硅晶片制造这些器件，目标是工作在 200 瓦到 1000 瓦之间的电源。在这种方式下，该公司的二极管被用于服务器和无线基站。

那些愿意从硅二极管转换到碳化硅二极管的设计师得到了丰厚的回报。他们的电源更可靠，效率更高，而且可以更小更轻，因为 SiC 二极管允许提高工作频率，从而为减少无源元件的尺寸和重量打开了大门。

英飞凌的第一代碳化硅二极管采用了一种简单的架构，选择这种架构是为了尽量降低由昂贵的 2 英寸碳化硅衬底材料主导的成本。



2001年，随着英飞凌推出SiC肖特基势垒二极管，宽禁带产业应运而生。

自那以后，衬底的尺寸和质量都在提高，而价格却在相应地下降，二极管也经历了几次迭代，复杂性不断增加。到 2018 年，英飞凌已经发展到了其第六代产品，即能够处理 4 A 至 20 A 电流的 650 V SiC 肖特基势垒二极管系列。

2002 年：手机专用万岁

化合物半导体行业永远不应该被指责把所有的鸡蛋都放在了一个篮子里。但在本世纪初，它肯定把它最大的两个放在了那里。当时的手机提供了杀手级应用：LED，用于背光屏幕、照亮键盘和提供相机闪光灯；以及 GaAs 晶体管，用于放大和切换 RF 信号。

当手机行业还处于初级阶段时，重点应该放在吸引新客户上。但在短短几年内，努力的范围已经扩大到包括试图吸引用户升级他们的设备。2002 年，最酷的新功能是彩色屏幕、内置相机以及图片和照片信息服务。



本世纪初，手机中彩屏的引入帮助推动了LED的销售。

在日本，移动网络运营商 J-Phone 为那些购买了新手机的人提供了发送 5 个带有声音的第二个视频剪辑的机会。在过去的二十年里，领先的品牌发生了显著的变化，改变了砷化镓微电子制造商的命运。

2002 年初，当支持 2.5G 的手机处于领先地位时，诺基亚以超过 35% 的份额主导了市场，向 GaAs-HBT 制造商 RFMD 提供了大约一半的出货量。摩托罗拉以 16% 的市场占有率位居第二，紧随其后的是三星、西门子和索尼爱立信。快进到 2019 年，三星已经升至榜首，紧随其后的是华为、苹果、小米和 Oppo。

手机年销量也出现了大幅增长。2002 年，这一数字略高于 4 亿，而前年又购买了近 10 亿辆。去年早些时候的一项预测显示，由于新冠肺炎造成的财务影响，今年的销售额将下降 2 亿。

2003 年：电信公司的动荡时期

当我们从“非典”疫情中走出来的时候，许多人都在想，经济复苏将会以什么形式出现。我们当然最渴望的是“V”型 -- 也就是说，在大幅下跌之后，还会出现同样大幅的上涨，从而让我们加速进入一个稳定、持续增长的时期。不幸的是，我们所能希望的最好结果可能是“U”，也就是说在我们恢复到原来的好日子之前还会有几个艰难的季度。我们极力避免的是“L”型衰退，即在经济上留下永久性伤疤的衰退。

有时，即使整体经济在上升，一些行业还是会经历一个“L”型的走势。这种情况就在本世纪初发生在电信市场的零部件制造商身上，导致了 2003 年的一系列活动。当互联网泡沫开始破裂时，在该行业运营的 III-V 族芯片制造商最初将问题归因于库存调整。然而，到了 2003 年，在订单仍未回升的情况下，问题变得更加明显，真正的问题是长期产能过剩。当工厂易手时，这个问题也无法解决，所有能做的就是潜在地提高生产效率。残酷的现实是，当工厂的数量超过需求时，一些工厂不得不关闭，工人不得不下岗。

这一连串的事件可以在 Bookham 的活动中看到。泡沫破裂后不久，它收购了北电网络 (Nortel Networks) 的光学元件部门和马可尼 (Marconi) 的光学元件业务。2003 年，为了尝试和简化运营，该公司开始将北电位于加拿大渥太华（Ottawa, Canada）的前 InP 芯片制造工厂迁往位于英国卡斯韦尔（Caswell, UK）的前马可尼（ex-Marconi）工厂。此外，该公司还将激光组装和测试的半自动生产线从瑞士苏黎世（Zurich, Switzerland）的工厂搬到了英国佩恩顿（Paignton, UK）的工厂。在那个用于将光学芯片组装成封装产品的工厂，员工人数已经从全盛时期的 7000 人骤降至仅有 800 人。

当一个行业举步维艰，没有任何复苏的迹象时，扩大产品种类以开拓新的市场是一个好的主意。2003 年底，Bookham 便将自己定位于此，其收购了 Ignis Optics 和 New Focus。Ignis Optics 是一家数据通信网络收发器制造商，New Focus 是一家为半导体、生物技术、国防和研究行业提供光电子和微波产品的供应商。

2003 年，光学元件领域的另一个重大转变来自 Avanex 对阿尔卡特 (Alcatel) 和康宁 (Corning) 的部门的收购。前者剥离了阿尔卡特光电 (Alcatel Optronics)，而后者则剥离了位于意大利米兰的光学元件工厂和位于纽约州欧文 (Erwin) 的光放大器设施。康宁 (Corning) 的重组还包括关闭其激光泵浦激光设施，该设施是于 1999 年 11 月通过 18 亿美元的股票交易购买的。

2003 年组件领域的进一步变化还包括有：InP 光电组件制造商 ASIP，收购陷入困境的竞争对手 ThreeFive Photonics；NTT Electronics 和 Oki Electric 的用于激光、光电二极管和调制器的光学芯片生产线进行了整合；爱立信公司（Ericsson）通过将爱立信的光电（Ericsson Optoelectronics）出售给瑞典初创公司 Northlight Optronics 而退出了光学组件业务；杰尔（Agere）决定以 2500 万美元现金的价格将其西海岸光电业务出售给 Emcore，从而告别了这一领域。

在 2003 年的一波活动之后，该行业的重组速度有所放缓，但并未停止。2009 年，Avanex 和

Bookham 合并成立了 Oclaro，Oclaro 随后在 2013 年以 1.15 亿美元的现金交易将其苏黎世（Zurich）GaAs 激光二极管业务出售给 II-VI 公司。然后，在 2018 年，Lumentum 收购了 Oclaro，以扩大其激光产品的组合。

虽然很容易把 2003 年看作是悲观和厄运的一年，但仔细地回顾一下这一历程，你也会发现一线希望。当时，一些精明的投资者愿意向这一领域注入资金，使 Infinera 在今年下半年通过 D 轮融资筹集了 5300 万美元的巨额资金。这家总部位于加州的机构已经蓬勃发展，净赚了数十亿美元，并有力地证明了电信行业垂直整合的好处。

2004 年：寻找新的杀手级应用

手机为 GaN LED 提供了第一个杀手级应用。这种器件被用来照亮键盘和背光屏幕，随着手机成为必备配件，这种器件的制造出现了爆炸式增长。这导致领先的 LED 制造商面临更多的竞争。他们知道他们在这个市场的利润率会慢慢缩小，所以他们开始寻找新的、要求更高的应用，这样他们就可以赚更多的钱。

比手机屏幕大得多的屏幕背光提供了一个非常有希望的机会。2004 年，Nichia、Tyoda Gosei 和 Osram Opto Semiconductors 都在各种展会上推广 LED 背光屏幕。但竞争对手 Lumilez 抢先一步，赢得了一份供应合同，将其 Luxeon 系列的 LED 发货给索尼，用于索尼 2004 年的两款旗舰电视：分别为 40 英寸和 46 英寸的 Qualia 型号电视，零售价分别约为 7500 美元和 1 万美元。

这些电视的色域比装有冷阴极荧光灯的屏幕要宽得多，不可能不给人留下深刻的印象。毫无疑问，一些早期采用者会愿意支付高额溢价来获得这项新技术。但他们的现金分配帮助索尼收回了部分研发投资，但并未导致未来几年价格暴跌，同时出货量增加和在市场上取得了重大成功。虽然这已经发生在 LED 背光电视上，但这需要相对较长的时间。索尼推出五年后，其高端机型的零售价仍高达数千美元。三星在 2004 年也推出了 LED 背光电视，当时三星的电视售价较低，但 46 英寸和 40 英寸电视的价格仍分别略低于 2000 美元和 1500 美元。只是在过去的十年里，LED 背光才变得更加实惠，开始流行，并成为主导技术。

随着 LED 背光的开始，2004 年将作为中国开始寻求占据相当大市场份额的一年载入史册。中国国家固态照明计划于当年 6 月启动，为本土芯片制造商提供了巨大的支持。这一努力最终促成了 LED 行业的超薄利润率以及 LED 照明的商品化。



三星和索尼率先推出了LED背光电视。2004年推出，售价数千美元，最初的销售疲软。由于这些屏幕的成本大幅降低，它们成为当今的主流技术。

2005 年：对超高效激光器的追求

使用高功率激光以令人难以置信的强大光线摧毁坦克和导弹是一件优雅的事情。尽管激光武器的研发可以追溯到 60 年前，然而即使在今天，这个想法距离成为主流军事技术仍然还有很长的路要走。有各种各样的问题，包括一种被称为热晕的现象 - 这是激光束的散焦，这是由于在非常高的光强度水平下产生等离子体而引起的。不幸的是，浓雾、烟雾、尘埃和雨水都可以加剧热晕的产生，而且这些都不是战场上的陌生事物。

尽管存在所有这些担忧，美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 在 2003 年还是开展了一项名为 SHEDS(超高效率二极管光源) 的为期三年的计划，旨在为激光武器铺平道路。这一努力的重点是将商用红外激光棒的壁塞效率从远低于 50% 提高到至少 80%。根据赞助商的说法，达到这一目标可能会带来一种高效的 100 千瓦激光防御武器。



将激光武器的愿景变成现实的努力得到了国防高级研究计划局资助的一个项目的支持，该项目旨在将红外激光二极管的效率从50%以下提高到80%或更高。

美国三大芯片制造商接受了激光二极管效率的挑战：Alfaight、nLight 和 JDSU。所有这些公司都通过一系列举措来改进他们的器件，包括量子阱界面的成分分级，引入增强光学和电学限制的材料，以及改变掺杂以降低接触电阻，从而顺利地使效率超过了 65% 这一中间目标。但是没有人能够达到令人眩晕的高度来完成最终的目标，即 80% 的效率。

尽管这一计划失败了，但这个项目还是留下了巨大的遗产。像国防高级研究计划局 (DARPA) 的许多倡议一样，受益者在军方之外。甚至在 2005 年，在该项目结束之前，激光效率的提高就已经对使用固态二极管泵浦激光器完成各种加工相关任务的行业产生了影响，包括从医疗设备的成型到车身部件的焊接。更高的效率正在逐步降低每瓦特电费标准，进而减少了可能占系统总成本三分之一的二极管支出。更重要的是，器件的可靠性提高了，因为更高的效率意味着更少的热量，芯片在更低的温度下运行。

二极管性价比的提高也有助于光纤激光器的成功。二极管泵浦光纤激光器为如何最好地将光聚焦到目标上这一棘手问题提供了一个简单的解决方案，现在被广泛用于金属和聚合物的切割、焊接和折叠，年销售额为 30 亿美元。

2006 年：点亮硅芯片

硅光子学听起来太棒了，简直不像是真的。在最先进的晶圆厂生产的硅芯片微型赛道上呼啸而过的光子预示着未来将提供负担得起的、令人叹为观止的计算能力和超快的通信。但我知道你们会有疑虑，因为你们知道硅是不发光的。这使得光子芯片的制造成为一个相当大的挑战。

如果你想把光源放在芯片上，你需要找到一种方法，将 III-V 激光器和硅波导结合起来，同时解决这些材料之间严重的晶格不匹配所引起的问题。

这一努力的第一次重大成功是在 2006 年，英特尔的工程师与加州大学圣巴巴拉分校约翰·鲍尔的团队建立了合作伙伴关系。这些研究人员

利用低温氧气等离子体在这两种材料的表面都创造了一层薄薄的氧化层。这一氧化层使得含有AlGaInAs 量子阱的 InP 的芯片能够熔合到硅波导条上，从而产生一种电泵浦激光器。由于这些实体之间的良好耦合，硅波导在激光作用中起着基础性的作用。

在这一胜利的基础上，英特尔开发了一系列收发器产品并将其商业化。

2016 年，该公司推出了支持 100G 通信的硅光电子收发器，两年后，该公司瞄准了这款产品在 5G 无线的应用前景。这款 100G 收发器有一个发射器和一个接收器模块，每个模块都有几个芯片。发射器包含几个 InP 激光器和一个对其信号进行编码的 Mach-Zehnder 调制器，接收器具有四个锗光电二极管芯片和一个跨阻抗放大电路。英特尔现在已经出货了 300 多万个基于其硅光子平台的 100G 可插拔式收发器，并展示了一款运行速度为 400Gbit/s 的四通道设备。



英特尔率先将InP激光器和硅光子学集成在一起。在这条50 Gbit/s的链路中，发射模块(左)从绿板中心的硅芯片发出激光，通过光纤传输到接收器模块(右)，第二个硅芯片检测激光器上的数据并将其转换回电信号。

2007 年：关于“效率下降”的辩论

一些科学问题激起了人们的浓厚兴趣，但实际上并没有那么重要，因为它们只是学术兴趣。但在 2007 年，对于 LED“效率下降”这一科学问题显然不是这样的。当时，这个神秘的弊病将 LED 的效率牢牢地钉在原地，即目前所需的以在所有最大的通用照明市场中赢得业务的效率值。

在那个时间点上，研究人员已经排除了热效应的原因，也否定了铟聚集的原因，他们认为这是一种测量假象。搜寻这一原因的工作仍在继续，这在很大程度上决定了成功与否。揭开 LED“效率下降”的面纱将会使我们深入地了解如何制造高效的 LED 器件，以为我们的家庭和办公室提供照明。

今年 2 月，飞利浦 Lumilez 发表了一份令人震惊的大胆声明，声称其从根本上解决了“效率下降”的问题。根据这家加州芯片制造商的说法，没有这种病弊的 LED 将在几个月内问世。

让人颇为好奇的是，该公司并没有提供造成这种缺陷的详尽原因。但在 9 月，他们在年度最大的氮化物会议上透露了秘密。在拉斯维加斯中心举行的一场关于氮化半导体的国际会议上，时任该公司先进实验室负责人的迈克 • 克拉姆斯 (Mike Krames) 宣布，俄歇重组就是其原因所在。

人们对于这一说法可谓是爱恨交加。在一定程度上，这是一个没有人愿意接受的原因，因为它未能提供一条制造无“效率下降”LED 器件的途径。俄歇复合是一个依赖于载流子密度的内在过程，所有能减少它的方法都是都是原子级社会疏远的一种形式，比如加宽势阱。但在实际生产中，由于应变的影响，很难生产出厚的、高质量的量子阱。

更重要的是，并非所有研究人员都同意克拉姆斯 (Krames) 和他的同事的观点。

一些人质疑将其作为主要损失机制所需的俄歇系数的大小，而另一些人则争辩说，仅仅是因为可以用与经典的俄歇重组相关的三次方依赖关系来拟合曲线，这并不能证明是俄歇复合效应导致了效率下降。

另一种理论解释来自于弗雷德 • 舒伯特 (Fred Schubert) 的团队和纽约州特洛伊市伦斯勒理工

学院 (Rensselaer Polytechnic Institute)，他们与三星 (Samsung) 的研究人员以及器件模拟咨询公司 NUSOD 的理论家约阿希姆 • 皮普雷克 (Joachim Piprek) 合作。这个研究小组在 2007 年年底开始发表论文，将效率下降归因于载流子泄漏。他们继续构建极化匹配器件，以更高的驱动电流提供更高的效率。

关于下效率下降原因的辩论持续了许多年。2013 年，正如我们很快就看到的那样，独立工作提出了确凿的证据，证明了俄歇重组是导致效率下降的原因。但即便如此，也不是每个人都对此信服。

2008 年：阳光时代

经过多年的等待，聚光光伏 (CPV) 行业似乎终于迎来了辉煌的时刻。风险投资家们已经厌倦了在电信市场投资，开始向清洁技术投入大量资金，其中包括 CPV 的开发商，帮助少数 CPV 公司赢得了几个兆瓦级的部署合同。这使得两家多结太阳能电池制造商，Spectrlab 和 Emcore，拿到了许多的订单。随着 Spire Semiconductors、MicroLink 和 Kopin 等公司准备推出竞争产品，这些设备的销售竞争很快就会加剧。

羽翼未丰的 CPV 行业花了很长时间才走到这一步。将太阳光聚焦到高效的 III-V 太阳能电池上的想法可以追溯到 20 世纪 70 年代末。从那以后的几年，俄罗斯圣彼得堡 Ioffe Physico 技术研究所的研究人员组装了一个原型系统。他们的系统在 1981 年由与诺贝尔奖获得者物理学家 Zhores Alferov 合著的一篇论文中报道，该系统使用像垃圾桶盖一样大的反射器将阳光照射到直径 1.7 厘米的 AlGaAs/GaAs 太阳能电池上，并与铝管对接以防止过热。在接下来的几十年里，更多的参与者聚集在一起，III-V 太阳能电池的效率不断地攀升，相关系统也在持续地建造和销售，最终在 2008 年之前部署了几十兆瓦的电力。

2008年，人们CPV的兴趣达到了历史最高水平。该领域的领导者Concentrix使用菲涅耳透镜将太阳光聚光到三结电池上的比例通常为500倍。信贷紧缩和硅光伏价格的大幅下跌，对刚起步的CPV行业造成了严重破坏。Soitec在2009年购买了Concentrix，然后在2015年将该技术出售给加拿大STACE。



那一年，市场分析师 Lux Research 声称，长期迹象很好，到 2012 年，用于安装 III-V 族太阳能电池的支出将达到 12 亿美元。Lux 警告说，一些 CPV 初创企业将无法生存，因为它们无法解决围绕维护、冷却和抗风的重要工程问题。但这并没有引起太多恐慌，因为在新兴市场，一些公司总是会碰壁的。

不幸的现实是，到了 2012 年，CPV 行业已经支离破碎。许多公司已经破产，而那些剩下的公司也已经奄奄一息了。由全球经济危机引起的信贷紧缩使这些公司失去了对扩大规模和实现规模经济至关重要的投资。另一个沉重打击来自过去十年以来硅太阳能电池价格的下跌。尽管进行了 5 亿美元的投资，但仅部署了大约 100 兆瓦的 CPV，缺乏业务导致该行业许多大牌公司的灭亡，包括 Ammonix、SolFocus、Isofotón、GreenVolts 和 Semprius。

今日的 CPV 仍在消沉，但还没有完全出局。2017 年，发电行业电气设备供应商 STACE 收购了 Soitec 的 CPV 资产。使用这项技术，可以追溯到 Concentrix，在魁北克的舍布鲁克大学安装了 8 个 30 kW CPV 系统。

因此，如果对 CPV 的进一步研究能够让它变得足够有竞争力，能够与现有的公司竞争 (这肯定是一个很大的假设)，那么就有一家公司处于有利地位，可以推出这项技术。

2009 年：走向绿色

哪个更容易？使用一个高效的蓝色 LED 作为起点，建立一个在相同光谱范围内发射的激光器；还是从一个发射蓝紫色的激光器开始，再构造一个绿色发射的变种？你可能会认为是后者。毕竟，要从 LED 变成激光器，你需要引入光学限制，创建反射镜，提高局域载流子浓度，并大幅降低有源区的缺陷密度。相比之下，要将蓝紫色激光器变成绿色激光器，你只需在量子阱中再加一点铟即可。

但是如果你看一下历史书，你会得出一个非常不同的结论。多亏了中村修二的开创性工作，Nichia 在 1993 年报告了第一个高效的蓝色 LED，并只用了两年时间就开发出了激光。但又过了近 15 年，世界才制造出第一台绿色 GaN 激光器。

迈向这个光源的第一个重要步骤是在 2003 年，日亚报告了一种 480 纳米的激光，该激光仍然是蓝色的，但倾向于绿色。五年过去了，它仅仅又前进了 8 纳米。这个激光器是不是碰到了一堵看不见的墙，蓝绿色是它的极限了？

任何能够获得真正绿色激光 (被认为是 520 纳米以上) 的机会似乎都有赖于彻底的重新设计。要达到更长的波长，需要提高铟含量，这可以通过降低 MOCVD 腔内的生长温度来实现。但这会提高该器件的缺陷密度，从而降低了其发光性能。使问题更加复杂的是，这些异质结构中的本征电场将阱中的电子和空穴分开，随着铟含量的增加，它们这种本征电场会变得更强。一方面，虽然这些领域是有益的，可以将激发光推向更长的波长，但另一方面，它们也会使向器件中注入载流子变得更加困难。调高电压会迫使载流子注入，但同时又会抵消内场带来的好处，所以传统的结构只能与更长的波长说再见了！

解决这一问题的一个新方法是切换增溢平面。在非极性平面上生长该器件可以消除电场。2007 年初，加州大学圣巴巴拉分校 (University of California，Santa Barbara) 的一个团队，包括中村 (Nakamura)（他于 1999 年末从日亚加入这个团队）就做到了这一点。他们揭开了世界上第一台非极性激光器的面纱，该激光器以脉冲模式发射，激光的波长为 404 纳米。

领路的快乐并没有持续太久。就在三天后，罗姆报告了一种非极性激光器，这一次是在连续波模式下工作。当罗姆达到这一里程碑时，它也提出了自己真正的雄心：制造一种用于彩色显示器的 532 nm 激光器。在这一年结束之前，它已经将发射波长延长到了 459 纳米。尽管 2008 年夏普以 463 nm 非极性激光器进入竞争时，罗姆失去了领先地位，但它又凭借 481 nm 的激光器重新夺回了自己的领先地位。

2009 年被证明是关键的一年。这年 2 月，罗姆透露了更多的新进展，激光器波长达到了 499.8 纳米，使传统氮化物激光器的最佳纪录黯然失色。到那时，非极性激光器将是第一台 GaN 基绿色激光器在竞争中最受博彩公司欢迎的激光器。但 9 天后，当一台传统激光器占据主导地位时，任何想要做到这一点的人都受到了巨大的震惊。这并非出自日亚的实验室，而是来自一匹黑马—德国雷根斯堡的欧司朗光电半导体公司 (Osram Opto Semiconductor)，该公司在许多方面上都取得了不错的进展，并达到了 500nm 的波长。然后，在春天，日亚又一次用传统的激光夺回了记录。它首先报道了在 510 nm 处的成功，然后又透露了其已经制造了 515 nm 的激光器。它是怎么做到的？这很难说 -- 该公司只会说，它已经改善了有源区的质量。

第一台真正的绿光激光器于 2009 年夏季问世。夺冠的是 GaN 衬底专家住友（Sumitomo），其于 7 月 16 日公布了发射 531 nm 波长的器件。成功来自于半途而废的半极性面。这种取向的晶面消除了内部电场，同时为生长富铟的 InGaN 层提供了良好的基础。

随后在非极性、半极性和常规平面上进行了进一步的工作。去年夏天，索尼公司报道了一种输出功率高达 1.75 瓦的 525 纳米半极性激光器。在今年的 Photonics West 大会上，日亚透露，它可以做得更好，能制造出一种发射功率高达近 2 瓦的传统 525 纳米激光器。这样令人印象深刻的结果有助于推动绿色氮化镓激光器的销售。

2010 年：期待已久的晶体管

英飞凌于 2001 年推出了世界上第一个 SiC 肖特基势垒二极管（SBD），为电力电子设计人员提供了一种效率更高的电流控制装置。

然而，虽然这种宽禁带二极管有助于降低损耗，但电路设计者知道，如果他们能将其与 SiC 晶体管配对，他们可以做得更好，因为这将提高开启和关闭电流的效率。

碳化硅器件的初创企业和老牌制造商都在应对这一挑战。美国首屈一指的 SemiSouth 公司率先成立，并于 2008 年将结型场效应晶体管（JFET）投放市场。几个月后，出现了另一种选择：由瑞典 KTH 皇家技术学院的分公司 TranSiC 推出的双极结型晶体管（BJT）。

但是，这两种类型的 SiC 晶体管均未赢得设计师的青睐。两者均具有快速开关和低导通电阻的特点，是 SiC 的标志，但均处于“常开”状态。从安全角度来看，这是一个巨大的问题。虽然可以通过添加另一个器件来创建一个正常关闭的混合，但这是一个不好的解决方案。

设计人员渴望找到一种更有效的嵌入式绝缘栅双极型晶体管（IGBT）替代方案。

碳化硅基金属 - 氧化物 - 半导体场效应晶体管（SiC MOSFET）同时兼顾了这两个方面，但它的生产非常具有挑战性。如何制造高质量的原生氧化物是一个需要花费许多年的时间来解决的难题。这是器件核心部位的关键一层，其位于碳化硅和金属触点之间。不幸的工程师们对硅产业中所采用的任何工艺技巧都行不通，因此他们不得不另辟蹊径，例如采用热生长工艺。此外，低的沟道迁移率也对其商业化产生了一定的阻碍，通过氮气退火可以大幅度削减界面态，从而使这一问题得以解决。

到了 2010 年，碳化硅行业的两大巨头开始批量生产碳化硅 MOSFET。到目前为止，哪一家公司赢得了这场比赛还是个未知数 -- 两家公司都宣称自己取得了胜利。这款产品的推出并没有打开丰盛的大门，由于价格非常高昂，销售量受到了很大的抑制。

例如，Cree 的 MOSFET 在推出后不久，通过 Digikey 出售的零售价为 80 美元或更高。从那时起，随着生产商数量的增加，产品的价格开始下降，目前碳化硅 MOSFET 的生产商还包括意法半导体和三菱公司。由于产品组合的扩大和性能的提高，在阻断电压和电流处理方面也有了更多的选择。

去年夏天，Rohm 推出了第四代 SiC MOSFET，而 Cree 已经将其产品组合扩大到十几种第三代变种。Yole DéDevelopment 的市场分析师艾哈迈德 • 本 • 斯利曼 (Ahmed Ben Slimane) 表示，所有这些活动都在扩大销售额，SiC MOSFET 去年的净收入为 8500 万美元，预计 2025 年将达到 3.48 亿美元。

2011 年：获奖的灯泡

在不太遥远的过去，当我们的灯泡坏了，并且不得不更换它时，我们中的许多人还会为该怎么办而烦恼。如果削减碳排放是我们的首要任务，我们应该选择一种紧凑型荧光灯。但它们从来没有成功过。在安装完一个灯泡并打开开关后，这个灯泡需要一分钟左右的时间才能达到其最高亮度，而此时房间里的光线已经亮得相当刺眼了。调光器开关也无法降低其光强，当在我们要处理这种废旧灯泡时，必须小心处理这一充满汞的光源。

如果所有这些妥协对我们来说实在是太多了，我们便会买一款久负盛名的灯丝白炽灯。它产生的热量比光线多得多，而且持续的时间也没有那么长，通常是 1000 个小时，但它还是可以受到很多人的欢迎，因为它可以立刻用一种可爱的白色阴影笼罩整个房间，而且其灯光也可以直接

调暗。美国能源部意识到这些担忧并试图采取措施来解决，其在 2008 年发起了一项名为“照明未来”的照明奖 (Bright Tomorrow Lighting Prize) 的比赛，也就是众所周知的 L-Prize。该比赛的奖金共有 1000 万美元，奖励给第一家能够将白炽灯的优点与运行成本结合在一起，并生产更加紧凑，寿命更长的灯泡的公司。

2011 年 8 月，飞利浦宣布胜利，其推出了一款可调光灯泡，它的峰值输出功率为 910 流明，比传统的 60W 白炽灯高出 110 流明，而且功耗仅有 9.7W。为了评估其耐用性，飞利浦的灯泡接受了一系列的测试，包括摇晃、在极端温度和高湿度下工作，以及在不完美的电压供应下的驱动情况。该灯泡轻而易举地通过了所有测试，它的使用寿命可以达到 25000 小时，比紧凑型荧光灯寿命的两倍还要多。

当飞利浦推出这款最令人印象深刻的光源产品时，它的定价非常之高，让许多早期用户望而



60W白炽灯泡有许多出色的特性：瞬间点亮，温暖的色调，以及输出亮度可调。1000万美元的L奖对LED灯泡制造商一个挑战，要求他们能够在综合所有这些优点的同时将功耗降到10W以下。飞利浦Lumiled在推出获奖灯泡之前获得了他们的第一个奖项。这个获奖光源的一个显著特点是其黄色的发射表面，当灯泡不亮时很容易看得到。黄色与荧光粉有关，当用一组18个发光二极管进行激发时，这种荧光粉便会给房间投下均匀、温暖的白光阴影。

却步。真的有人愿意花 50 美元去买一个灯泡吗？幸运的是，价格在后续的几年里得以大幅下降。如今，如果你在固态照明上花 50 美元，你就可以从五金店买回一批飞利浦的 60W 的 LED 灯泡。由于这极具竞争力的价格，许多家庭现在都采用了一系列发光芯片来实现照明。

2012 年：氮化镓获得了信任

“英雄”的结果激起了人们的兴趣，但并不能保证销量。这是因为设计师想要的产品既要有出色的性能，又要经久耐用。

Transphorm 的开发人员完全理解这一点。他们知道他们的 GaN FET 引起了人们的极大关注，因为它们是一种很有前途的产品，效率超过了硅，而且在高温下的应对能力要好得多。然而，为了赢得销售，Transphorm 不得不向其潜在客户保证，他们不需要对可靠性有任何的担忧，因此他们将这款 600V FET 投入独立器件测试。该器件于 2012 年通过测试，使 Transphorm 成为业内首个符合 JEDEC 标准的 GaN FET。

这个西海岸工厂最初的产品是在碳化硅衬底上生产的。但生产很快就转向了硅。这一举措的好处不仅限于更便宜、更大的衬底，还包括有机会使用潜在的利用率不高的晶圆厂中成熟的 200 毫米生产线进行器件的加工。

证明器件可靠性的努力仍在继续。Transphorm 的硅基 GaN FET 现在可以在标准温度和 175°C 下通过测试，这有助于推动其销售量，去年 11 月销售量超过 50 万。今年 4 月推出的第四代产品将硅基 GaN FET 的性能带到了一个新的高度，氮化镓获得了合格证书，促使其增加了对包括计算机和客机电源、伺服电机和电动汽车车载充电器在内的市场的渗透。



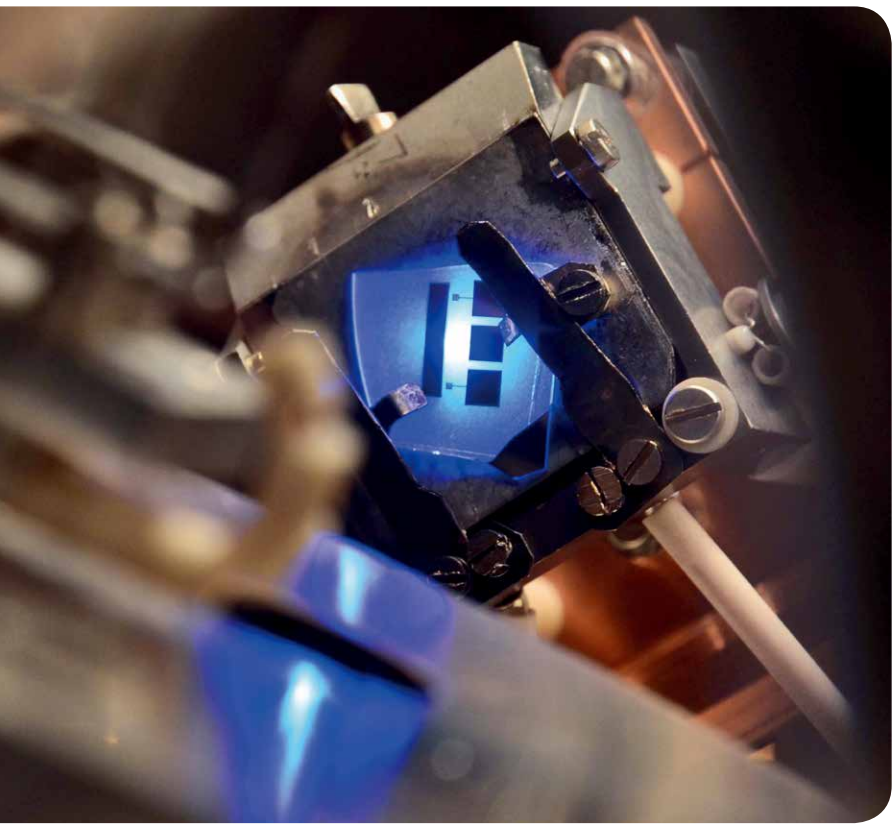
AK OPTICS 昂坤视觉
viperRTC，先进的 MOCVD 在线监测系统

2013 年：“效率下降”的确凿证据?

关于“效率下降”的辩论有可能结束吗？考虑到仍存在着相互竞争又极力自我捍卫的理论，这需要无可辩驳的证据才行。得到这样的证据并不容易，但在 2013 年春天，加州大学圣巴巴拉分校 (UCSB) 的研究人员与法国巴黎高等理工学院（École Polytechnique）的研究人员合作，并声称确凿的证据已经浮出了水面。

这个团队的证据来自一个极其优雅的实验，该实验与罗伯特·密立根在二十世纪初所做的实验很相似。密立根通过测量电子离开被光子束轰击的金属的动能来研究光电效应。

在最近的一次实验中，研究人员将载流子注入到量子阱中，记录了两种现象：LED 发出的光，以及通过器件 p 面出射的电子的能量。为了确保所有的热化电子都离开 LED，p 面的表面已经用铯进行了处理。



通过跟踪通过LED的非辐射电子的能量，同时记录该器件的光输出，来自加州大学圣巴巴拉分校和法国联邦理工学院的研究人员声称，他们有确凿的证据证明俄歇是导致“效率下降”的原因。

当这项合作的科学家们通过对他们的 LED 器件加大电流时，他们检测到了与真空发射的电子相关的更高的能量峰值。根据他们的说法，这一现象的观察提供了确凿无疑的证据，证明俄歇复合效应是导致“效率下降”的原因。在他们看来，没有其他机制可以更好地去解释这些“热”电子峰。强化这一观点的现象是，他们发现，当开始出现“效率下降”效应时，高能峰值也开始出现。

那么，在这个领域工作的其他研究人员是否愿意举杯，为这个团队的成功干杯，并同意这项工作已经结束了这场辩论呢？绝对不会。总体而言，那些试图弄清“效率下降”原因的人立场早已根深蒂固，他们深信，即使在检查了所有证据之后，他们假设的理论仍然是最有说服力的。

对此持反对态度的人士认为，实验结果可能被错误地解读了。波士顿大学的恩里科·贝洛蒂 (Enrico Bellotti) 声称，这项实验表明，电子泄漏才是“效率下降”的主要原因，俄歇效应 (Auger Effect) 对电子泄露有一定的贡献。

纽约州特洛伊市伦斯勒理工学院的弗雷德·舒伯特对此表示赞同，他表示，实验中检测到的一些电子可能根本与俄歇效应无关，它们只是从 LED 的量子阱中泄漏出来的。舒伯特难以将俄歇重组视为“效率下降”的主要因素的另一个原因是，他认为在低温条件下，“效率下降”效应更明面，而此时的俄歇效应则更弱。

加州大学圣巴巴拉分校 (UCSB) 与法国巴黎高等理工学院（École Polytechnique）的研究团队在 2013 年 11 月和 12 月出版的《化合物半导体》杂志上对反对者发表了讲话。在他们的专栏中，他们争辩说，在他们的 LED 中，电场不够强，不足以导致电子泄漏。他们还反驳了不可能观察到俄歇产生的电子逃逸到真空中的说法，并对自由载流子吸收可能是导致“效率下降”的原因表示了关注。

讨论相互竞争的理论将有助于进一步推动相关工作，从而就“效率下降”的原因达成共识。但即使是现在，这场辩论也没有完全消失。

2014 年：充分的补充

新兴器件的应用前景可以通过使用现有技术制造产品的最大生产商的行动来判断。只要替代方案有一丝成功的机会，一些领先的公司就可能会涉足其中；如果它们肯定会发挥重要作用，跨国公司就会对其进行投资，要么通过收购，要么通过内部开发。

从这个意义上说，宽带隙技术在未来肯定会发挥重要作用。电力电子领域的所有领先企业都已从原来的只考虑硅器件向碳化硅或氮化镓器件方面扩展，并取得了相应进展。

以英飞凌为例，它没有对这两个竞争对手中哪个将扮演更大的角色进行押注。取而代之的是，它两者都在追求，将 GaN 视为 600V 以下的有力候选者，将 SiC 视为较高电压的最佳选择。英飞凌并没有启动 GaN 的内部开发计划，而是决定收购这项技术。2014 年，该公司同意斥资 30 亿美元现金收购硅基 GaN 国际先锋整流器 (IR)。然而，值得注意的是，此次收购中其不仅获得 IR 基于 GaN 的技术，还获得了其低压硅 MOSFET 系列的技术，这个系列产品在销售额中占据了最大份额。当英飞凌将 IR 纳入旗下时，它将硅基 GaN 视为一项长期投资计划，其至少要在未来五年内才能实现销售。

2015 年 3 月，英飞凌与松下联手，进一步加深了对 GaN 的涉足。这两家公司签署了一项协议，承诺共同开发一种将松下的常关型硅基 GaN 晶体管与英飞凌的可容纳这些芯片的表面封装技术合于一体的器件。

最近，英飞凌扩大了其使用自己设备制造的 CoolGaN 产品组合。因此，GaN 正在不断发展中，而其 SiC 和 Si 技术都已经很成熟了，这使得这家实力雄厚的德国公司有着非常丰富的产品组合。



2014年，英飞凌同意以30亿美元的价格收购International Rectifier。交易的协调者是英飞凌技术公司首席执行官Reinhard Ploss（左）和国际整流器公司总裁兼首席执行官Oleg Khaykin（右）。

2015 年：两大巨头的强强联合

在过去的 25 年里，我们行业中最大的两个行业朝着截然不同的两个方向发展。在 20 世纪 90 年代末，五个 LED 芯片制造商脱颖而出，它们分别是 Nichia、Cree、Lumiled、Tyoda Gosei 和 Osram，这些企业多年来一直保持着行业榜首之一的称号。如今，它们仍然非常有活力，出货量很大，但它们的总体份额正在下降，目前仅在 200 亿美元的 LED 芯片市场中占有不到一半的份额。与之形成鲜明对比的是，收入仅次于 LED 行业的 GaAs 微电子行业，尽管在过去 25 年中收入从不到 5 亿美元增长到了 80 亿美元左右，但该行业竞争对手的数量却在急剧地减少。

离开该行业的大型企业包括 Anadigics 公司，该公司在过去的几年中将其射频器件（RF）生产

线转换为垂直腔面发射激光器（VCSELs）生产线后，于 2016 年被 II-VI 收购。其他的龙头企业也都已经纷纷合并。

在 2002 年，Skyworks 通过 Alpha Industries 和 Conexant 合并而成；最近，Qorvo 又从 RFMD 和 TriQuint 这两家重量级公司的联盟中脱颖而出。这个新实体于 2015 年 1 月 1 日开始进行交易。

那次合并有很大的好处。许多人认为这两家公司具有很好的互补性，RFMD 在手机射频技术方面拥有更大的实力，TriQuint 则可以提供更好的国防产品组合。

投资者显然赞同这一联盟，两家金融机构的股价在披露计划后都出现了两位数的涨幅。

这个新的实体有潜力实现 20 多亿美元的年净收入；由于协同效应，每年节省了 1.5 亿美元，其毛利率和营业利润率预计分别为 45% 和 25%。

现在，五年过去了，合并兑现了所有这些承诺了吗？是的，截止到去年 3 月 28 日，它的 2020 财年销售额累计达到了 32.4 亿美元，毛利率和营业利润率分别为 41%和 13%。

因此，销售额远高于 2015 年的预期，同时利润率也保持的很好，但没有预期的那么高。投资者似乎对这些数据感到了满意——Qorvo 的股价目前刚刚超过 110 美元，股价高于该股票在第一天交易时的 70 美元。

2016 年：真正的重量级选手秀肌肉

如果你是这本杂志的常客，那么在过去十年里的中期，你就应该意识到了氧化镓的巨大潜力。凭借其非常宽的带隙（约为 5 eV，具体数值取决于特定的多型），它有可能会给 SiC 和 GaN 这两个蓬勃发展的中量级行业带来致命的一击。

得益于氧化镓的超宽带隙，它应该能够在最有价值的特性中占据主导有利地位，导通电阻是击穿电压的函数。但这还不是它唯一吸引人的特性：它提供了更大的适用性，因为氧化镓薄膜可以通过多种技术进行沉积，包括分子束外延 (MBE) 和金属有机物化学气相沉积 (MOCVD)；同时它的衬底材料也有多种选择。其器件可以在蓝宝石或氧化镓衬底上生长，这会使它的价格大幅降低，因为它的块材料可以通过基于熔体法生长单晶的技术进行生产。

那一年，空军研究实验室 (ARFL) 的一个团队取得了两项关键突破。使用由 β 氧化镓制成并生长在同质衬底材料上的结构，制备出了临界场强为 3.8mV/cm 的破纪录的 MOSFET 而引起了人们的关注，这大约是 GaN 临界场强的四倍。同年晚些时候，他们实现了另一项关键突破，报告了有史以来第一个在关断状态下具有高击穿电压的增强型场效应晶体管（FET）。这第二次的成功证明，氧化镓中缺乏 p 型载流子并不是制作常关型 FET 的障碍。

ARFL 的氧化镓研究计划的灵感来自于日本国家信息通信研究所 (NICT) 的工作。NICT 的研究人员与国内合作伙伴合作，推动了材料和器件的早期进步，并在 2012 年生产出了世界上第一个 MESFET 和 MOSFET。

四年后，NICT 的 MOSFET 进行了进一步的改进，包括增加了一个场板，将其击穿电压提高到略高于 750V，这一结果至今仍令人印象深刻。

日本还在氧化镓方面开辟了另一个里程碑。2016 年，Flosfi 的研究人员利用了一种名为薄雾外延的新生长技术，报道了一种蓝宝石上制作的 α-Ga_2O_3 肖特基势垒二极管，其导通电阻优于由 SiC 制成的最先进的变体。京都大学的这一团队正在将这些超宽带隙二极管以及配套的 MOSFET 商业化。生产计划已经在实施中。

2017 年：创建世界上第一个化合物半导体集群

世界上最著名的山谷是什么？好吧，这可能不是第一个让你脱口而出的答案，但是硅谷可以说是一个很好的例子。

虽然该地区如今可能不再有那么多的晶圆厂，但对于在这里工作的工程师们（其中许多人是斯坦福大学的毕业生），我们不仅应该感谢他们在技术上的进步，还应该感谢他们给了我们所有在半导体行业工作的人更高的社会地位。如今，先进技术受到了社会的极大推崇，使许多人从中受益，即使普通路人从未听说过空穴、带隙或平版印刷术。

加利福尼亚州并不是世界上唯一一个拥有半导体公司集群的地区。在比利时的鲁汶、德国的德累斯顿、荷兰的埃因霍温和法国的格勒诺布尔也拥有着半导体公司集群。加起来，集群总共包括 800 家公司和 15 万个工作岗位。由于附近有很多公司，通常在供应链的不同位置运营，它们相互支持，同时吸引更多的工程人才到该地区。这有助于增加集群的声誉，带来更多的业务和创新，同时培养了一种创业前景，给当地初创企业提供了蓬勃发展的最佳机会。

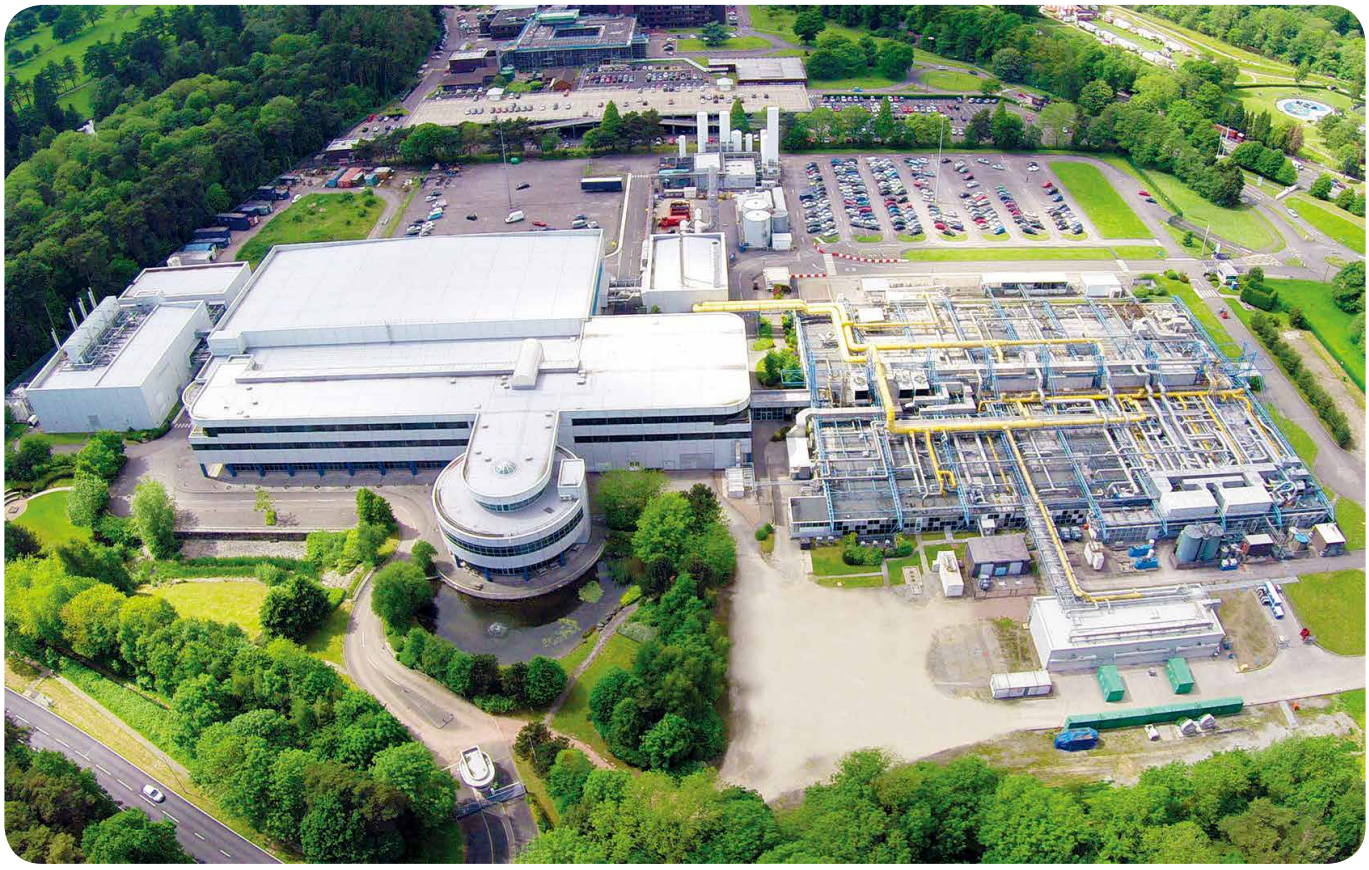
创建世界上第一个化合物半导体集群的努力可以追溯到 2011 年，当时 IQE 富有魅力的领导人德鲁 • 纳尔逊 (Drew Nelson) 会见了当时的威尔士经济部长。纳尔逊（Nelson）提出了在英国国内建立更强大的基础设施来支持化合物半导体行业的理由。当时，IQE 实际上几乎没有国内客户。然而，这并不是说 IQE 是南威尔士唯一一家从事我们行业的公司：英国这一地区过去和现在都是蚀刻和沉积工具制造商 SPTS 的总部所在地，而且还有一家拥有封装专业知识的 MicroSemi 工厂。

纳尔逊（Nelson）的下一步行动还包括在欧盟数字经济技术专员设立的小组工作。纳尔逊（Nelson）参加了一个研究关键技术的团队，并在南威尔士州倡导建立了化合物半导体的主权能力，以重建该技术在这片大陆的制造能力。

在这些努力的基础上，纳尔逊游说威尔士政府和卡迪夫大学成立了化合物半导体研究所。他对当地设施具有远见，提供先进的技术，该技术是使用与大批量生产兼容的工具和流程开发的。2015 年 3 月，英国政府为这项计划提供了资金，并且一年过去后，规划者批准了为化合物半导体研究所建造一座新楼的计划。该研究所是新的创新园区的一部分，计划于今年年底开放。



化合物半导体研究所的建设正在进行中，应于明年完成。



世界上第一个化合物半导体集群CSConnected于2017年开业。到去年年底，这个总部位于南威尔士的集群已经加强了自己的能力，这要归功于纽波特晶圆厂(Newport Wafer Fab)的推出，英飞凌认为纽波特晶圆厂是其要求之外的多余设施。

为了帮助化合物半导体研究所开发的技术商业化，IQE 和卡迪夫大学于 2015 年成立了一家合资企业：化合物半导体中心。利用加的夫大学的资金和 IQE 的一些设备，它运行着协作研究项目。

在那一年的 2016 年，供应链上增加了更多的环节。1 月，英国政府斥资 5000 万英镑，资助了“化合物半导体弹射器”的创建，这是一个开放式研发机构，致力于帮助英国企业在利用化合物半导体技术方面的进步。同年晚些时候，英国工程和物理科学研究理事会 (Engineering And Physical Science Research Council) 向化合物半导体制造中心投入了 1000 万英镑，目标是将研究成果转化为大规模芯片制造。

随着许多板块的到位和完善，该集群于 2017 年夏季正式开始运行，名称为 CSconnected，并与所有主要利益相关者的发言人举行了活动。抓住了将自己的生产线投入生产的机会，该集群也迈出了巨大的飞跃。通过收购国际整流器，位于南威尔士纽波特的 200 毫米硅晶圆厂已由英飞凌掌握。这家德国巨头在评估了其全球芯片制造能力之后，认为就当时的需求来说，纽波特工厂（Newport Fab）是多余的。在纳尔逊牵头的一项私募股权收购中，这个工厂被挂牌出售。从这笔交易中脱颖而出的纽波特晶片制造公司 (Newport Wafer Fab) 已经为英飞凌的订单提供了两年的担保。

更进一步，集群中的人希望这些生产线也可以用于生产硅复合化合物芯片。该晶圆厂在生产硅基的 GaN 器件方面有着良好的记录，这些器件是在国际整流器使用期间生产的，但是生产其他材料体系的器件也是可能的。IQE 收购了稀土氧化物的开发商 Translucent，将为这些努力提供帮助。稀土氧化物的开发商可以在硅晶片和化合物半导体外延层之间建立桥梁。

那些在 CSconnected 中不断发展的公司。CS 弹射器（CS Catapult）已转移为 LG Semicon 建造的超大型建筑的一部分，IQE 负责其余部分，并利用它创建了一个可容纳多达 100 个 MOCVD 设备的厂房。该集群还扩大到包括了斯旺西大学 (Swansey University)，该大学正在建设一个集成半导体材料中心。这些活动将继续创造就业机会并增加收入。根据卡迪夫大学（Cardiff University）去年 8 月发布的一份报告，该集群现在的销售额已超过 4.6 亿英镑，创造了近 1500 个工作岗位。对于最终在化合物半导体行业创造 5000 个工作岗位的长期目标来说，这是一个很好的开端。

2018 年：VCSEL 的忧与喜

垂直腔面发射激光器（VCSEL）有一些令人惊叹的优势。它的效率很高，可以用电池供电；它可以以非常高的速度打开和关闭，使其成为传输大量数据的极好的光源；通过调整光圈的大小，它可以实现圆形轮廓的单模发射，简化了光学装置；它非常适合大批量制造，其中一部分原因是它的设计允许在晶片上测试。

然而，它还有改进的空间。尽管经过几十年的发展，VCSEL 的波长范围比边发射激光器和 LED 窄得多。其光谱域的扩展一直非常缓慢，使得这种器件有着悠久的发展历史。它的起源可以追溯到 1965 年，当时在麻省理工学院林肯实验室（MIT Lincoln Lab）工作的伊瓦斯 • 梅伦盖利斯发布了一种“纵向注入激光器”，发射波长为 5.2 μ m。这一器件由锑化铟（InSb）二极管组成，具有抛光的顶面和底面以确保高的光学反射率，这在当时是令人难以置信的壮举，但距离实际应用还有很远的路要走。该激光需要高达 20A 的驱动电流并且要冷却到 10K 才能行。

第一批真正的 VCSELs 来自东京理工学院的 Kenicha IGA 实验室。1977 年，IGA 提出了一种具有当今 VCSEL 许多特征的设计方案。在接下来的 11 年里，他几乎是这类器件的先驱，之后其他团队注意到了他的突破，并将他们的努力转向了这项技术。随后取得了成功，20 世纪后半叶的研究最初集中在近红外上，之后人们试图在两个方向上扩大 VCSEL 的光谱范围。

最初，砷化镓材料体系的突破使 850 nm 和 980 nm 的 VCSEL 得以实现，然后进一步的进展将发射波长扩展到了 650 nm 左右。晶片融合带来了更大的成功，使砷化镓基反射镜与 InP 基有源区相结合，实现了波长为 1.5 μ m 的激光的发射。

在世纪之交，研究人员开始考虑下一个目标：将发射波长扩展到蓝色和绿色。如果取得成功，这将会打开新的市场，使器件能够用于高分辨率打印、高密度光学数据存储、化学和生物传感以及全彩显示器和照明。

制造在这个光谱域中工作的 VCSELs 并非易事。为了达到这些较短的波长，必须用 GaN 及其相关化合物取代以 GaAs 为基础的材料体系。这一转变听起来可能很简单，但事实并非如此。

最大的问题是生产位于有源区两侧的反射镜。这在 GaAs 基的垂直腔面发射激光器中相对容易，因为这种材料体系是由 GaAs 和 AlGaAs 配对而成的。这些 III-V 族化合物具有非常相近的晶格常数，因此应变不是问题，它们的折射率有显著差异，有助于得到更高的反射率。当 20 对交替的 GaAs 层和 AlGaAs 层组成一面反射镜时，它的反射率可达 99%，足以制成高性能的垂直腔面发射激光器。

对于蓝色和绿色的 VCSEL，为了防止应变使反射镜退化，GaN 必须与 $Al_{0.83}In_{0.17}N$ 配对，$Al_{0.83}In_{0.17}N$ 是一种更难生长的化合物，具有相对较低的折射率对比度。制造两套 GaN 基反射镜需要的时间太长，所以最好是将底部的氮化物反射镜和顶部的基于电介质的反射镜结合起来，这是尼古拉斯 • 格兰杰 (Nicholas Grandjean) 的团队在 EPFL 首创的方法。在 2007 年他们达到自己的巅峰时刻，当时他们报道了第一个光泵浦 GaN 垂直腔面发射激光器 (VCSEL)。令人沮丧的是，Grandjean 的资金枯竭了，那些掌握着财政大权的人认为第一台氮化镓基的垂直腔面发射激光器（GaN VCSEL）将来自日本。他们或多或少是正确的，现在我们永远不会知道欧洲是否能够抢先一步做到这一点。

第一个 GaN VCSEL 实际上来自于台湾的国立交通大学，该校于 2008 年 4 月宣布这款器件。

为了获得VCSELs的第二个来源，苹果同意从Finisar购买3.9亿美元的这些器件。





人脸识别为红外VCSEL提供了一个利润丰厚的市场。

这个器件需要低温冷却，同年晚些时候，日亚化学公司使用一对电介质反射镜克服了这一局限。在将器件做得更小并且收益更高之前，Nichia 一直坚持着这一设计，在 2009 年将输出功率提高到了 0.62 毫瓦。但缺乏实质性进展似乎限制了这家日本芯片制造商去进一步开发 GaN VCSEL。

Nichia 从未接近 10 毫瓦，这是增强现实设备、投影系统和显示器的大致功率。这一里程碑是在 2018 年由两家日本公司独立完成的。斯坦利电气（Stanley Electric）与日本明治大学的 Tetsuya Takeuchi 和他的团队合作，在 EPFL 工作的基础上，改善了生长条件。那一年秋天，他们报告了一种输出功率超过 15 毫瓦的蓝色垂直腔面发射激光器 (VCSEL)。2018 年 11 月，索尼推出了一款设计新颖的 12 毫瓦 VCSEL，其特点是具有一个更大的腔体，其中包含了薄得多的 GaN 衬底，以及在晶片背面生长的曲面反射镜。

除了蓝色 VCSEL 在性能上的这些突破外，2018 年还将因红外光市场的成功而被永远铭记。Yole DéDevelopment 的技术和市场分析师皮埃里克 • 布莱 (Pierrick Boulay) 表示，在此之前，数据通信是这款器件的主要收入来源，但是在 2018 年，其在手机市场中的收入出现了新的增长。

一年前，苹果公司推出了采用 VCSEL 传感技术的 iPhone，并于 2018 年成为智能手机中这些激光器的主要消费者。尽管 VCSELs 也出现在小米、Vivo、华为和 OPPO 制造的 2018 年机型中，但它们远没有受到消费者的欢迎。

最初，苹果只是从 Lumentum 购买 VCSEL。但在 2017 年末，这家技术巨头决定需要获得第二个供应商，于是向 Finisar 抛出了意向，承诺订购 3.9 亿美元的 VCSEL 产品。验证该器件需要花费一些时间，并且在 2018 年没有削弱 Lumentum 的订单。

Boulay 预计 VCSELs 将会快速的发展，因为它们在智能手机中的使用将不断地增加，在数据通信网络中仍将继续部署，并开始在更远距离的传感应用中发挥作用，比如汽车上的激光雷达。这些表面发射激光器的市场预计将从 2018 年的 7.38 亿美元激增到 2024 年的 37 亿美元。

2019 年：碳化硅的巨大注资

在 2019 年春季，SiC 衬底材料和各种光电、射频和功率器件的开发商 Cree 以醒目的方式重新调整了自己的业务。这家公司相对较新的首席执行官格雷格 • 洛毫（Greg Lowe）毫不犹豫地将公司的照明产品部门卖给了理想工业公司 (Idea Industries)，他把给公司带来多年成功的 LED 业务放在了次要位置，转而去专注于宽带隙材料以及射频和功率器件的开发和研究。

促使做出这一重大决定的是一些利润丰厚的碳化硅晶圆供应协议：与英飞凌 (Infineon)、意法半导体 (St Microlectronics) 和其他公司签订的合同，这些合同的总额高达 5 亿美元。

到 2019 年夏天，Cree 的 LED 业务已经疲软，并净赚了 3.1 亿美元出售给 Ideal 的大部分股份。这些情况将帮助 Greg Lowe 推进他的愿景，投资 10 亿美元大规模扩大 SiC 产能。到 2024 年，将建成一个最先进的 200 毫米 SiC 晶圆生产设备和厂房，其与 2017 年第一季度相比，产能将扩大 30 倍。

那年晚些时候，Cree 收到了一份无法拒绝的提议，纽约州提供了 5 亿美元的拨款。该公司不必再花费 4.5 亿美元去翻新其位于北卡罗来纳州达勒姆总部的现有设备和厂房，而是现在可以仅需投资 1.7 亿美元，在纽约马西建造一座新的汽

车认证合格的 200 mm 功率和射频晶圆制造工厂。

新建的厂房将于 2022 年建成并投入使用，最初使用 150 mm 晶圆，两年后再过渡到 200 mm 的晶圆。在这之前，总部的产能也正在不断增加。

自宣布这些消息以来，来自利润较低的 LED 产品线的收入比例持续下降，而来自 WolfSpeed 部门（它包括 SiC 晶圆、电力电子和射频器件）的收入却是一直在增长。目前，由于新冠肺炎疫情和与中国的贸易限制，Cree 的销售受到了一定的打击，但 Cree 的长期前景还是非常非常的好。



在纽约州5亿美元资金的支持下，Cree/Wolfspeed正在纽约州马西市建立一个新的汽车认证的200毫米功率和射频晶圆制造工厂，该工厂将于2022年投入使用。

2020 年：微型 LED 显示革命的开端

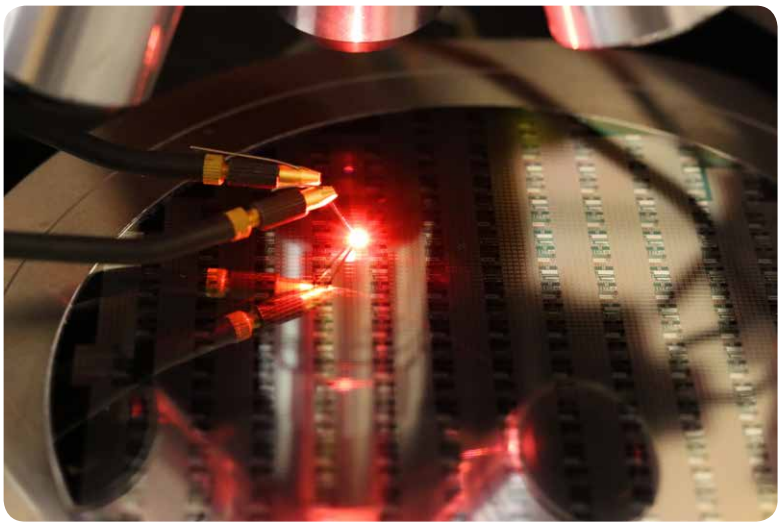
今年将因什么而被铭记？还剩几个月的时间，目前还不清楚，但在我们的行业内，我们当然希望它不是新冠肺炎了。晶圆厂仍在有序地运营着，尽管业务受到了影响，但与许多经济部门相比，我们相对而言并未受到大的影响。

2020 年将很有可能作为微型发光二极管（micro LED）显示屏开始获得吸引力的一年而被载入史册。制造它们并不容易，因为这往往需要将数百万个尺寸为微米级的 LED 芯片从晶片移到显示器背板上，同时还要确保零失误。但这些努力得到了回报，由此产生的显示器提供了突破性的亮度、令人难以置信的效率、非凡的对比度和不易老化。

一大笔资金已经投入到微型 LED 技术上。根据 Yole DéDevelopment 的数据，到目前为止，资金总额高达 48 亿美元。其中，苹果公司占了 18 亿美元，这一数字包括了对 Luxvue 的收购和内部开发。

Facebook 是另一个雄心勃勃的科技巨头，希望在未来的产品中使用微型 LED。它正在与一个英国公司 Plessey 合作，Plessey 公司已经克服了巨量转移问题，其通过在硅基 GaN 晶片上生产 LED，然后再连接到硅背板上。众所周知，可以用 GaN 制造蓝色和绿色的 LED，而用 GaN 制造红色的 LED 则更具挑战性。然而，去年 12 月，Plessey 宣布，通过应变工程，它已经实现了这类器件的红光发射，为制造全彩显示器打开了一扇新的大门。

除了显示屏之外，微型 LED 还有其他方面的应用。今年夏天，CEA-Leti 的工程师们打破了可见光无线通信（光保真技术）（LiFI）技术的数据传输记录，使用 10 μm 的微型 LED 实现了以 7.7Gbit/s 的速度传输数据。这种传输方式可以保证房间内的通信安全，这是 WiFi 或 5G 所不具备的功能。CSc



通过让硅基GaN发光二极管产生应变，Plessey可以在同一晶片上生产红光、绿光和蓝光发射器。这有助于创造一种全彩色的微型LED显示屏，这项技术使的Plessey能够与Facebook进行合作。



不平凡之年孕育非凡的“芯愿”

2020 年，我们共同经历了新冠肺炎疫情全球大流行，近 200 万人悄然离去，尊重生命，尊重科学，团结抗疫成国际共识，武汉封城、长江洪水肆虐、澳洲丛林大火、非洲蝗虫大灾、纳卡地区爆发恶战等都历历在目，可以说，2020 年是大灾大难的一年；但这绝不是全部，2020 年，我们也共同见证了亚太 15 国签署 RCEP 区域自贸合作，提振世界经济信心，SpaceX 实现首次商业载人航天飞行，嫦娥五号任务取得圆满成功，在世界经济遭受严重冲击之际中国成为唯一实现正增长的主要经济体。作为拉动经济复苏引擎的半导体行业，在 2020 年也是敢于担当，成绩不菲：5G 落地之年，5nm 5G 芯片强劲推出，苹果首发了采用台积电 5nm 工艺制程的 A14 Bionic，集成 118 亿晶体管。此后华为与三星也相继发布了麒麟 9000 系及 Exyons 1080。云上 EDA 探索落地，EDA 软件商、IC 设计企业以及代工厂合作推进，能够适配 EDA 工具使用需求、拥有大规模算力自动化智能调度以及海量的云资源提供弹性算力支持，直接提升芯片的研发周期和良率，降低芯片设计成本。3D 先进封装技术稳步提升，突破了摩尔定律瓶颈，在集成度、性能、功耗等方面优势明显，三星在今年对外宣布了全新的 X-Cube3D 封装技术已经可以投入使用。。。当然作为半导体领域的后起之秀，第三代半导体及其他化合物半导体，也是备受关注和亮点多多，下面请听业内各位专家学者细述道来！



《化合物半导体》主编 陆敏博士

1. 2021 年即将到来，面对新的一年，你如何看待化合物半导体行业的发展变化，以及对 2020 年，有哪些总结和感悟？



芜湖启迪研发总监 钮应喜博士

2021 年作为“十四五”的开局之年，也是化合物半导体发展关键时期，借助“新基建”的顺风车，相信化合物半导体在未来将呈现快速发展之势。2020 年，虽然受疫情的影响，对产业有一些影响，但是国内对化合物半导体的热情依然高涨，我们面对疫情，克服困难，夯实代工平台，迎接十四五，有信心也有决心干好我们的事业。



深圳基本半导体有限公司总经理 和巍巍

2020 年受疫情、国际形势等因素影响，半导体行业正发生深刻变化。随着国内疫情逐渐得到控制，同时在市场需求的刺激下，中国第三代半导体产业发展态势总体向好，我们有一定的技术基础，有广大的应用市场，未来五年将是我国第三代半导体技术和产业飞速发展的重要窗口期。

2020 年基本半导体在产品开发、市场拓展和产业布局等方面都有重大进展。碳化硅功率器件产品性能持续优化，产品类型进一步丰富，推出了内绝缘 TO-220 封装及 DFN8*8 封装碳化硅肖特基二极管产品。公司碳化硅功率器件在 5G、新能源汽车、高效电源等领域表现突出，市场覆盖率和占有率也在稳步提升，得到了客户的广泛认可。目前基本半导体位于北京的晶圆产线已经通线，南京外延产线将于 2021 年建成投产，针对新能源汽车领域，基本半导体筹备的汽车级碳化硅模块产线预计于 2021 年投产，建成后公司制造实力将得到大幅提升。基本半导体通过加速布局产业链各环节，进一步增强行业竞争力和抗风险能力，多方位提升服务质量，全力打造国际一流的碳化硅 IDM（Integrated Device Manufacturer：整合元件制造商）企业。



中国科学院物理研究所先进材料和结构分析实验室主任，研究员 陈小龙博士

化合物半导体包含第二代半导体和第三代半导体。2020 年的新冠疫情虽然这个行业有一定影响，但整体还是表现出良好的发展态势。尤其是第三代半导体行业的发展更快一些。我们看到以碳化硅、氮化镓为代表的第三代半导体在材料、器件和应用都有很多的投资，新的企业不断涌现，新技术和新产品也是日新月异。这主要得益于新能源汽车和 5G 通讯基站等领域快速发展的牵引。2021 年会延续这种发展趋势，行业增长将更加快速，国产化率也将有所提升。新的应用需求如轨道交通领域也将开始出现。



Cissoid 中国总经理 罗宁胜博士

继特斯拉之后，2020 年随着比亚迪率先在国内正式推出采用 SiC MOSFETs 驱动的电动车，各大电动汽车厂商也倍加关注 SiC 在电动车上的应用。其在 OBC、DC-DC 及充电桩等方面一般可采用相对低端的 SiC MOSFETs，这样在提高效率和减小体积重量的同时，以求成本相对低些。而对于电机驱动的应用，为追求尽可能高的效率和最低的热损耗，趋于采用高端的 SiC MOSFETs (即内阻偏小的)。在电动车电机方面，业内普遍证实，SiC MOSFETs 对传统 IGBT 的替代可使整体车况的能源效率提高 5-10%，即在同样的电池包条件下可提升 5-10% 的续航里程，而颇具吸引力。2021 年将是 SiC 在电动汽车领域应用的起始爆发之年，因为今年的大规模缺货即是征兆。

另外，GaN 近期也有很好的发展，其主要表现是在移动设备的快速充电器方面。由于涉及消费电子类应用，其需求量将会非常大，因此 GaN 的出货量将很快在数量级上大大超越 SiC 器件。



苏州量芯微半导体公司总经理 傅玥

有关化合物半导体，2020 年给我最大的感悟是以氮化镓，碳化硅为代表的第三代半导体以难以置信的速度跨越式发展，以至于几乎所有供应商都严重缺货缺产能。展望 2021，这种快速发展的趋势只会更加明显，给上游企业带来巨大挑战。



创道咨询合伙人 步日欣

从产业投资角度来看，2020 年是化合物半导体，特别是以碳化硅和氮化镓为代表的第三代半导体，备受追捧的一年。5G 对于高频射频的需求、小米快充的引爆，以及特斯拉为代表的新能源汽车的前景，都为这个本来已经非常成熟和稳定的市场，引入了相当多的关注度和资金投入。如果说 2020 年是第三代半导体的应用元年，那么进入 2021 年，随着第二代化合物半导体需求的平稳增长，第三代半导体应用场景的落地，整个化合物半导体将开启一个新的发展篇章。



六甲电子执行副总裁 小林秀宁

我们相信未来的需求肯定会增加，尤其是 SiC 器件。随着 5G,EV,HV 的进一步增加，SiC 器件的数量将相应增加。作为碳化硅加

工工艺技术（减薄 / CMP）公司，我们六甲电子将继续发展以提高加工精度并满足客户需求。



罗姆半导体（上海）有限公司董事长 腾村雷太

自公司成立以来，罗姆始终秉承“质量第一”的理念，致力于解决质量、安全、生产等方面存在的问题，并对这些方面着重强化。但是，由于新型冠状病毒疫情的影响，各地域的出勤率都明显下降，依赖于人的生产形式已经成为业务连续性的新风险，集团在供应链方面面临的挑战（比如整个供应链的信息管理和确保可追溯性）已经凸显出来。

作为对策，其中之一就是通过制造改革来提高品质。未来，将通过引入柔性生产线来应对多元化需求，同时，通过构筑强化上游设计能力的研发体制，确保开发和设计阶段的产品品质。此外，还会通过节省人力来促进组装工序生产效率的提升与自动化进程。

另一个对策就是优化整个供应链。未来，将会从质量、安全、环境、人权与 BCM 等方面出发，建立可综合管理与集团相关的所有供应商的体系，同时积极运用 Foundry（前期工序外包）或 OSAT（装配或测试等后期工序外包）等方法，实现供应链的整体优化。

在大幅度减轻环境负荷、追求安全的技术创新潮流中，罗姆集团一直致力于在汽车和工业设备市场中的发展。未来，不仅要满足海外汽车市场、以 5G 服务器为首的工业设备市场的需求，同时还要满足包括消费电子设备市场在内的更广泛的客户需求。

为此，开发专用标准产品是势在必行的。希望通过加强组织建设、建立能够捕捉市场先机、并迅速规划市场需求产品的开发体制，打造出能被更多客户广泛采用的产品。

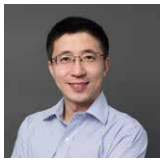
此外，在海外市场，将通过加强分销商渠道和数字营销，在开拓潜在市场的客户的同时，大幅度提高包括海外销售公司、仓库在内的物流管理体制的效率，以进一步加强在工业设备领域的产品开发和推广。特别要加强的是销售推广活动的数字化转型。在新冠疫情时期，传统的线下销售和推广活动一直无法充分地开展，因此除了进一步加强一直在推进中的线上研讨会之外，还会举办与客户的线上技术交流会等，以满足国内外客户的广泛需求。

在中国市场，我们的目标是为每个市场和客户建立最佳的销售支持体制。将以“选择和集中”为营业战略，将罗姆的资源优先投入待攻坚市场和重点产品推广上。此外，还将加强对分销商渠道和数字营销的运用，以提高销售效率，满足包括“长尾客户群”在内的多样化需求。



纵慧芯光销售总监 孟祥培

2020 年注定会是历史中不平凡的一年，我们是做 VCSEL 领域的，所以我来谈一下在此领域化合物半导体的发展变化。2020 年在消费电子领域 VCSEL 应用又得到进一步发展，苹果在 3 月份 iPad 上采用 DToF 方案后，在 10 月份发布的手机上面也引入了 DToF 方案，苹果在 AR 方向前进的决心是很大的，将来前置和后置预计都会采用 3D 方案，VCSEL 是 3D 方案中的核心器件，也将受益于行业的发展，长期向好。在 2020 年 VCSEL 领域另外一个重大变化是 VCSEL 多结技术的成熟，多结技术能够让 VCSEL 在相同的电流下成倍提升 VCSEL 的光功率密度，现在纵慧多结方面很好地开发了 2 结，3 结和 5 结产品，多结产品能够让 VCSEL 更好地适配更丰富的应用场景，如汽车 Lidar 等中近距离应用场景，随着 VCSEL 在 Lidar 领域的渗透，将极大推进 Lidar 的量产落地，将促进汽车自动驾驶的发展。相信在 2021 年 VCSEL 将在消费电子和汽车电子中均会得到更大的应用和发展。



英飞凌科技（中国）有限公司 工业功率控制事业部，应用与系统方案拓展经理 郝欣博士

化合物半导体新材料的发展，推动了很多行业的进步。具有优越性能的第三代半导体材料器件正在飞速发展，而且越来越受到各行业的关注。特别是新能源汽车的迅速发展，对新器件的需求呈爆发式增长。目前第三代半导体材料相对于传统的硅材料，仍然有很大的空间可以发展和改进。材料的质量和工艺日渐成熟，必将更进一步扩大其应用领域和范围。

2. 随着 5G，新能源汽车，大数据，AI，IoT 等技术领域的快速发展，将会为化合物半导体带来诸多机遇，你认为化合物半导体面临哪些挑战与机遇？



芜湖启迪研发总监 钮应喜博士

5G、新能源汽车、大数据等应用领域都是化合物半导体的主要应用场所，终端产品的快速发展必然拉动器件层面的快速发展。存在机遇也存在挑战，国内的应用市场巨大，全球最大的通信市场，全球最大的新能源汽车市场，国内制造商如何和国外进行竞争，需要加快自身技术提升，抓住国内大循环的契机，以性价比优势替代进口，抢占国内市场。

深圳基本半导体有限公司总经理 和巍巍

5G 基建、新能源汽车、大数据中心和特高压、城际高



铁和城际轨道交通、工业互联网都是中央提出的“新基建”战略涵盖的重要领域。第三代半导体材料碳化硅具备大功率、低损耗、高可靠、低散热等特点，可应用在“新基建”大部分领域的产品，例如电动汽车电机控制器和车载电源、氢燃料电池 DC/DC 变换器、通信电源、充电桩、服务器电源、应用柔性输电直流断路器、牵引变流器、电力电子变压器、辅助变流器、辅助电源等等。“新基建”战略的推进将给第三代半导体产业带来广阔的市场前景，倒逼第三代半导体企业加速技术创新，进一步降低器件成本，实现第三代半导体在各领域的广泛应用。

作为中国碳化硅功率器件领军企业，基本半导体掌握行业领先的碳化硅核心技术，研发覆盖材料制备、芯片设计、晶圆制造、封装测试、驱动应用等全产业链。通过前瞻布局第三代半导体产业，基本半导体正以排头兵之势，积极投身中国“新基建”事业，为“中国智造”的高速高质量发展保驾护航。



Cissoid 中国总经理 罗宁胜博士

化合物半导体（SiC 和 GaN）作为新型半导体器件要替代传统 Si 器件，最大的挑战莫过于成本的控制，即涉及生产良率和生产规模的控制。只有在不断地提升良率且同时不断地扩大生产规模才能将成本逐步降下来，由此赢得市场上的广泛应用。挑战也就是机遇，这也是各家化合物半导体厂商取胜而赢得市场份额的制高点。



苏州量芯微半导体公司总经理 傅玥

这些新的应用领域必然会带来新的发展机遇。例如 5G 的基站电源，数据中心电源建设，未来将大量使用氮化镓和碳化硅器件，以满足大幅增长的用电及效率需求。就化合物半导体技术而言，最大的挑战在于可靠性的提升，特别是新能源汽车方面的应用。



创道咨询合伙人 步日欣

5G，新能源汽车，工业，卫星通信等技术发展和产业落地，确实会给化合物半导体带来诸多基于，但也必须看到，我国在化合物半导体产业链诸多环节，还存在短板，比如射频用砷化镓衬底、外延环节，PA 芯片环节，第三代半导体整体环节，都相对来说比较落后，国际头部企业中，还很难看到中国企业的身影，差距明显，能否避免硅半导体的覆辙，还需要国内企业加大追赶步伐。同样的，在市场方面，半导体领域，特别是跟化合物半导体相关的中高端的功率半导体、光通信等领域，一旦有国外企业先入为主打入供应链，后进入的竞争者要实现替代，难度非常大。第三代化合物半导体的功能和性能是毋庸置疑的，但要实现真正的市场普及，还需要提升晶体制备工艺、提升产品良率、降低产品成本，直至性价比符合客户预期的水平，这才是第三代半导体能否实现大规模市场推广的关键所在。



六甲电子执行副总裁 小林秀宁

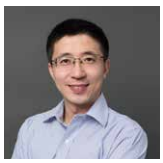
SiC 器件性能良好且数量不断增加，但产品良率却不高。我们相信，六甲电子的 SiC 工艺可以为用户提高良率和减薄精度。用户通常使用外延片进行器件制造。外延片是通过在衬底上生长外延层而制成的，但是衬底中的潜在划痕会导致外延层中引入堆垛层错进而降低良率。与过去相比，在我们的 CMP 工艺中，我们成功地“减少了潜在的划痕”，这有助于“提高 SiC 器件的良率”。关于减薄处理，通过减薄，我们成功地将 4 英寸 SiC 晶片厚度减薄到“超薄 5.5um”。



纵慧芯光总监 孟祥培

在机遇方面，未来的世界会变得越来越智能，感知是智能的基础，而光传感是感知的主流方式，VCSEL 凭借好的光学质量和稳定性，也将随着技术的进步得到越来越广泛的应用。

在挑战方面，市场对 VCSEL 出现多样化和定制化需求，从器件设计，外延设计，FAB 制程工艺和封装工艺等都将出现定制化，这对整个产业链都提出了非常高的要求，所以就需要整个产业链的前沿研究方面更加紧贴一线需求，做好产业链整合，为市场提供性能优异，功能丰富的产品。



英飞凌科技（中国）有限公司 工业功率控制事业部，应用与系统方案拓展经理 郝欣博士

虽然新的化合物半导体器件有很大的优势，但是这些新兴材料的技术距离传统器件仍然有很大的改进空间，比如材料和器件的缺陷，生产的工艺、稳定等等。这就使得新器件的可靠性和成本在应用中成为一大挑战。另外，如何更好的用好这些新的器件，发挥好器件的性能优势，特别是在目前诸多的新兴领域，也会是一个很大的挑战。

3. 碳化硅（SiC）是非常具有发展前景的材料，特别是在电力电子和微波射频器件应用方面，目前受到极大关注，请问贵公司如何看待碳化硅的市场发展？如何推进碳化硅材料的升级和发展？



芜湖启迪研发总监 钮应喜博士

导电碳化硅可以用于电力电子应用，服务于新能源汽车、光伏和风电、工业电源、大数据中心、轨道交通、特高压；半绝缘碳化硅可以用于微波射频器件应用，服务于 5G 通信；这些应用领域在十四五期间都会进入快速发展期，势必给碳化硅的市场带来强劲的信心。从行业本身来看，必须降低成本、稳定产品性能、提高可靠性去迎合市场的需求。



深圳基本半导体有限公司总经理 和巍巍

碳化硅作为第三代半导体材料，其发展前景被行业广泛看好。在大部分电力电子行业，碳化硅基半导体对传统硅基半导体的替代正进行得如火如荼，部分细分领域已经完成了全面的替代。特别在新能源汽车领域的应用，更将成为未来碳化硅对硅基半导体替代的主战场，拥有极大的市场发展潜力。基本半导体凭借掌握的碳化硅功率器件核心技术，不断持续提升自主创新能力，加速产品推陈出新，积极推动碳化硅产品在各个领域的规模化应用。

碳化硅材料的升级有赖于终端市场需求提升所带来的支持。需求量增长会带来产业配套资源的大量投入，从而加快产品迭代更新，促进行业向前发展。推进碳化硅产品市场化进度是促进碳化硅材料升级的基础。市场化机制下，会形成优胜劣汰，引导社会资源向头部领域集中，从而推动更多高性能、高质量的产品研发和制造。同时，能够吸引更多的终端客户采用碳化硅这种新材料，提升产销量、拓展应用方向、获取极大的应用数据、推动可靠性能力进步并降低生产制造成本。让整个碳化硅产业链形成正向循环。



中国科学院物理研究所先进材料和结构分析实验室主任，研究员 陈小龙博士

SiC 的材料在 5G 通讯基站上有着重要应用，主要是在半绝缘 SiC 衬底上生长 GaN，目前看来技术已经较为成熟，确实是可行的应用之一，5G 的通讯基站在 2021-2022 年将会有明显的增加，国内的很多厂家都开始进军 SiC 领域据不完全统计，国内目前有数十家企业也开始布局，或已经开始投资建厂。我认为推进碳化硅材料的升级和发展需要不断发展新的技术，比如切割、抛光和加工等技术，提高产品质量和良率，降低成本。



Cissoid 中国总经理 罗宁胜博士

随着第三代半导体如 SiC 功率半导体器件的日趋成熟和普及，初期将是在应用上简单地替代 Si 器件，但在后期将会主动发挥其性能优势而缔造出许多新型应用，即涉足以前 Si 器件所不能及的应用。例如，SiC 固有的耐高温性能与 Cissoid 高温半导体器件就是非常好的搭配，由此将大大改变电力系统设计的格局，为设计工程师提供全新的且广阔的拓展空间。这些典型、未来的高温、高功率密度应用，包括深度整合的电动汽车动力总成、多电和全电飞机乃至电动飞机、移动储能充电站和充电宝，以及各种液体冷却受到严重限制的电力应用。

电动汽车的动力总成（电机，电控和变速箱）已走向三合一，但目前仅仅是在结构上堆叠在一起，属于弱整合。未来在结构上，动力总成的深度整合是必然路径，因为，这样可能使体积减少约三分之一，重量减少约三分之一，内耗减少约三分之一，并有可能使总成本压缩 2 至 4 倍。然而，电控部分将与电机紧密结合，深度整合使功率密度大幅提高，高温即是所面临的不可回避的最大挑战。

传统飞机中控制尾舵、机翼、起落架等的机械动作都是靠经典的液压传动。液压油作为液体，受环境影响很大并且维护成本很高，目前已趋向于部分或全部的电气化，此即多电和全电飞机的概念。在飞机上采用电机替代液压油路实现机械操作，可靠性高、可维护性强，且方便冗余备份设计。然而，最大的困境是飞机上的电机和电控不允许配备水冷，且只能依靠强制风冷及自然冷却，因此，实现多电或全电飞机、乃至电动飞机的电控设计，需要率先解决的重大技术难题即是高温。

另外，有许多应用场景，特别是随着电动车大规模普及，半移动式储能充电站和全移动式充电宝将可有效地填补固定式充电在某些场景下的缺失。然而，对于这类移动充电应用，水冷机构将不仅带来额外重量体积的负担，更重要的是它消耗自身携带的存储电能，因此，电控采用自然冷却将是佳径，但必须妥善处理好电控系统热管理的问题。

除了上述三种典型的高温应用外，在许多特种工业应用中，因液体冷却受到严重限制时，电控系统将面临同样的高温挑战。耐高温的电控技术是实现以上高温应用的关键，其核心实现技术是 SiC 功率器件的高温封装技术和与之相匹配的高温驱动电路技术。

SiC 材料及其器件结构有天生的耐高温能力，在真空条件下甚至可耐达 400 至 600℃高温。在实际应用中，为防止接触空气而产生氧化，SiC 器件必须有封装，且若要耐高温，则必须采用耐高温的封装。结温 150℃是业界目前最高标准，175℃结温等级刚刚开始展露，有准标准化封装可以采用，而 200℃乃至更高温的封装对封装材料和工艺要求十分严苛，而且必须根据裸片特征进行定制设计，以保证导热和散热性能要求。

SiC 功率器件和模块的应用离不开驱动电路及其相应的

芯片。然而，大多数驱动电路芯片都是普通的硅器件，均不能耐高温，其若能在高温如 175℃ 下工作 1000 小时，已经是凤毛麟角了。另外，耐高温只是问题的一方面，更严重的是高温时器件性能的一致性问题。普通硅器件在 70℃ 之上性能弱化得非常之快，因此在高温下无法应用。历经二十多年创新研发和应用考验，Cissoid 公司 SOI 特种硅器件的耐高温能力已达到 175℃时，可连续工作 15 年之长，且全温度范围内性能有极佳的一致性，是支持 SiC 高温应用的支柱。



国网联研院功率半导体所副总工程师 杨霏

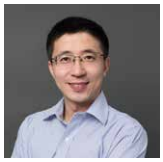
碳化硅作为新一代的化合物半导体的典型代表，基于碳化硅材料研制电力系统亟需的新一代高电压、大功率、高效率、小体积、快速开关的电力电子器件，用于替代换流阀、直流断路器等电力电子装置中的硅器件，可以降低装备的体积、重量，提高可靠性，大幅度提高能源转换效率，还可以研制能源路由器等新型电力电子装置。碳化硅器件可以为电力电子装备从集成创新到原始创新提供核心元器件支撑，支持柔性直流输电、灵活交流输电以及新型配电网等领域的技术升级，对于践行绿色发展理念，建设能源互联网，推动能源低碳转型，构建安全高效的能源体系具有重要作用，未来每年将会带动的数百亿元的市场。

作为电力电子器件应用大国，中国对于碳化硅半导体衬底材料市场需求会有较快的增长，目前本土的山东天岳、天科合达、河北同光等很早就进行了碳化硅衬底材料的研发与生产，已经具有一定的市场规模。作为新兴市场，不仅要做大，还要做强。这需要典型器件应用单位，例如国家电网、中国中车等，提出明确的高端应用材料研发目标，联合碳化硅材料优势企业，在国家和地方政府资金辅助支持下进行长期研发，解决核心技术，实现产业技术升级。



创道咨询合伙人 步日欣

我们非常看好碳化硅的市场前景，特别在新能源汽车领域，会得到率先普及，首先，未来几年，将是新能源汽车的爆发期，市场空间广阔；其次，SiC 功率器件，能够有效提升充电效率，降低功耗增加续航里程，对于新能源汽车来说是刚需；最后，对于一辆汽车来说，其对于 SiC 的价格敏感度并不会像其他领域那么敏感。晶体制备是制约碳化硅材料应用的核心瓶颈之一，碳化硅材料是下一步升级演进，需要从晶体制备工艺、速度、良率和大尺寸方面考虑，解决了这些问题，才会更快推动产业发展。



英飞凌科技（中国）有限公司 工业功率控制事业部，应用与系统 方案拓展经理 郝欣博士

碳化硅半导体器件作为目前广受欢迎的第三代半导体材料器件已有近十年的历史：从最早的二极管到现在的 MOSFET，碳化硅半导体器件已经在工业界有了一定的发展。但是目前碳化硅的应用还处于起步阶段，很多应用领域都处于小批量试用阶段。其原因主要是这种新器件的成本还相对较高，而造成成本高的主要原因之一则是材料的制程。目前国际各大主流制造商都在积极扩大产能，增加碳化硅晶片面积，提高良率，相信在不久的将来，碳化硅器件的价格会降到工业界可以普遍接受的范围。

4. 氮化镓（GaN）市场将随着快充和 5G 基站等应用的发展加快增长，贵公司如何看待 GaN 相关技术和市场的发展？如何把握市场机遇？



芜湖启迪研发总监 钮应喜博士

GaN 在快充和 5G 的应用中有绝对的优势，当然在应用中也采用了不同的技术路线。在快充领域，GaN 凭借硅衬底低成本和卓越性能的优势可以快速的在快充、适配器等消费类电子产品中推广应用。在 5G 通信领域，目前采用的技术路线是半绝缘碳化硅衬底上进行 GaN 生长，目前需要和终端加强联合、建立良好沟通、反馈机制，提升器件可靠性。



苏州量芯微半导体公司总经理 傅玥

从 2019 年开始氮化镓在快充应用开始发力，这一方面是因为氮化镓相比传统硅器件的优异性能，也是因为恰逢快充应用方面的爆炸性的增长。USD-PD 的大规模应用，使得 100 瓦以下的笔记本电脑，平板电脑，手机快充深度整合。从 Iphone12 开始，苹果不再提供充电器，带动了其他主要厂商，例如三星，华为，小米等，开始逐步放弃手机带充电器的传统做法，这将带来一场 PD 市场的盛宴，快充受到市场前所未有的重视。这将会在极大程度上带动氮化镓市场的发展。



氮矽科技 罗鹏

从 2019 年开始氮化镓在快充应用开始发力，这一方面是因为氮化镓相比传统硅器件的优异性能，也是因为恰逢快充应用方面的爆炸性的增长。USD-PD 的大规模应用，使得 100 瓦以下的笔记本电脑，平板电脑，手机快充深度整合。从 Iphone12 开始，苹果不再提供充电器，带动了其他主要厂商，例如三星，华为，小米等，开始逐步放弃手机带充电器的传统做法，

这将带来一场 PD 市场的盛宴，快充受到市场前所未有的重视。这将会在极大程度上带动氮化镓市场的发展。



创道咨询合伙人 步日欣

氮化镓市场的推广，将和 5G 产业的发展息息相关，坦率来说，不管从运营商网络建设，还是用户的感受度，2020 年 5G 发展并没有达到预期，所以未来 5G 的建设进度，也将直接影响氮化镓产业的发展。从消费电子角度，开始推广的主要是快速充电头，主要应用的还是低端的硅基氮化镓产品，而且价格也没有太高的竞争力，未来能否有更多的新的应用，是决定氮化镓产业发展的另一个因素。

5. 氧化镓作为超 / 极宽禁带材料，备受学界关注，并在日本产业界也得到极大的亲睐，贵公司如何看待氧化镓相关技术和未来产业化的发展？



芜湖启迪研发总监 纽应喜博士

氧化镓的禁带宽度可达到 4.5-4.9eV, 其 Baliga 品质因子是碳化硅的 10 倍，氮化镓的 4 倍，理论上可以实现更高的耐压和更低的导通电阻，所以是未来功率器件可以选择的非常优越的半导体材料。但是目前受制于晶体材料生长的限制，还不能进入产业化，公司没做相关布局。



创道咨询合伙人 步日欣

对于任何一种半导体材料，我们认为各有优势，都有各自的用于之地，主要差别在于应用场景和市场空间，以及价格、性能等制约这些材料应用的因素。氧化镓作为近期被学术界关注的新兴材料，同样也要符合这个逻辑，除非能够在价格、性能和应用场景全方位 pk 硅、碳化硅和氮化镓，否则任何一个因素都将限制其大规模应用，我们认为，氧化镓具备一些特殊优势，肯定能够找到适合的应用场景，但其晶体制备成本、导热性等指标参数，也会是制约氧化镓发展的瓶颈，市场空间也会受限。



北京镓族科技总经理 陈政委

氧化镓作为超 / 极宽禁带半导体材料，性能优势非常明显，其禁带宽度为 4.2-5.3 eV，击穿电场强度高达 8 MV/cm，是 Si 的近 27 倍、SiC 及 GaN 的 2 倍以上，巴利加优值分别是 SiC、GaN 的 10 倍、4 倍以上，在制造相同耐压的单极功率器件时，器件的导通电阻比采用 SiC 及 GaN 低很多。氧化镓是未来深紫外光电子器件、高功率器件、高频通信器件等器件制造的关键材料之一，自日本 2012 年 2 英寸氧化镓圆晶片初步解决以来，氧化镓材料受到各国科研人员的高度关注，例如：氧化镓专题顶级国际研讨会每两年召开一次，分别在日本、意大利、美国召开。2018 年 1 月份美国物理学会发表嘉宾社论：氧化镓微电子及其器件的曙光以及 2017 年全球氧化镓研发及从产业状况的分析；在氧化镓产业上，日本发展较早，三菱重工、丰田、日本电装、田村制造、日本光波等著名企业介入氧化镓的产业发展和布局，发展态势迅猛，美国相对缓慢，Kyma 公司 2020 年推出 1 英寸氧化镓晶圆；北京镓族科技有限公司是国内首家专业从事氧化镓材料与器件发展的产业化公司，经过近三年的发展，形成了氧化镓晶体材料、氧化镓外延材料、氧化镓光电器件等核心自主技术，以国家重大需求和市场重要需要为导向，立足材料本身，开展产业化工作；综合国际国内的氧化镓发展情况，镓族认为氧化镓因其良好的性价比特性，在未来半导体市场必然会大放异彩，有很好的市场价值和社会价值，目前镓族科技的晶圆可达 3 英寸，可进行小批量供应，紫外器件也获得市场的初步验证，在未来发展过程中，功率器件仍然是氧化镓未来市场的通衢大道，初步介入市场的应用应该在功率校正、逆变、和高功率方向，此工作日本已经做了很好的布局和前期准备，结合镓族科技的客户使用情况，未来 2-3 年内，国产氧化镓功率器件也会相继问世，带来很好的市场价值。

6. 近年来 mini/microLED 快速发展，促进新型显示技术进步，贵公司如何看待 mini/microLED 现实应用的困难和挑战？ mini/microLED 技术未来发展的趋势如何？



芜湖启迪研发总监 纽应喜博士

Micro LED 的挑战是巨量转移，相比 Micro LED，MiniLED 技术难度较低，更容易实现量产。

在 Micro LED 突破巨量转移之前，Mini LED 作为过渡产品依然是市场的主流，尤其是电视、手机、车载面板等，随着技术的突破，Micro LED 在未来的市场中依然可观。未来技术发展还是如何将巨量转移良率做到 99.99% 以上，甚至更高，才可以满足产业化的需求。



创道咨询合伙人 步日欣

mini/microLED 在亮度、分辨率、反应速度、功耗等方面有着很大优势，但真正产业化和市场化的路还很长，毕竟目前大屏

幕显示还是 LCD 为主，OLED 都尚未在电视领域普及，考虑到 mini/microLED 技术成熟度，以及面板厂商在 LCD、OLED 的巨额投资，都不会是一个周期非常短的事情。

7. 氮化镓衬底及氮化铝衬底是宽禁带氮化物半导体中两个非常难生长的材料，导致其价格也是极其昂贵，从而引发其应用场景的诸多变数，贵公司如何看待氮化镓衬底及氮化铝衬底相关技术和未来产业化的发展？



芜湖启迪研发总监 钮应喜博士

氮化镓衬底及氮化铝衬底目前由于晶体生长相对不是很成熟，导致成本较高，但是芯片端对此该材料的需求是非常渴望的，未来如何提升生长速率、降低缺陷、提高合格率、大尺寸方向依然是技术发展的方向。



氮矽科技 罗鹏

现今商用市场上，氮化镓 / 氮化铝最主要的用途还是分别集中在氮化镓器件的外延以及缓冲层中，而氮化镓 / 氮化铝的生长主要还是依托 MOCVD（金属有机物化学气相沉积），但是其设备昂贵、生长时间长、工艺参数复杂等因素一直是氮化镓器件成本居高不下的主要原因。而对于氮化镓器件来说，外延的厚度远比衬底要薄，所以如果继续采用 MOCVD 来生长氮化镓 / 氮化铝用于制造衬底势必不会被市场所接受，所以市场上主流的氮化镓衬底制造商纷纷转向寻求其他方式来制备氮化镓单晶，有包括 HVPE（氢化物气相外延）、氨热法、钠熔法等，其中 HVPE 已经在 LED 领域得到广泛应用，而在半绝缘氮化镓衬底领域，国内的镓特半导体采用 HVPE 自支撑生长技术在蓝宝石衬底上依次生长氮化镓薄膜 /Ti/ 氮化镓厚膜然后再通过热失配进行自剥离，因此工艺生长速度快、设备要求简单、大尺寸化等原因使其有了商业化的可能。

无论是硅基氮化镓还是碳化硅基氮化镓，衬底与氮化镓 / 铝氮化镓的晶格失配和热失配都是目前制约氮化镓器件性能的因素，而作为同质衬底，氮化镓衬底是氮化镓器件衬底的最优选，国际上日本的住友、三菱都已开发出位错密度低的 2/3 英寸半绝缘氮化镓衬底，随着对生长工艺的不断探索、大量资本的涌入，相信未来氮化镓衬底必将成为氮化镓器件的主流衬底。

8. 砷化镓和磷化铟作为第二代半导体的“老兵”，在可见光及红外光电及微波射频领域一直默默贡献重要力量，随着 5G 通信、人脸识别等新兴应用的推广及普及，“老材料”又被再次引发诸多关注，请贵公司谈谈砷化镓和磷化铟相关技术和未来产业化的发展？



芜湖启迪研发总监 钮应喜博士

随着 5G 对 GaN 等材料有更多的青睐，但不意味着砷化镓被取代，宏基站由于需要大功率的更多选择 GaN，但是小基站和手机终端，由于砷化镓具有绝对的性价比优势，依然占主导位置。据行业报到未来的砷化镓器件的市场增长率依旧保持在 15%，市场仍然乐观。InP 主要领域一个是光子领域，另一个是射频领域，尤其在军事雷达等方面。



创道咨询合伙人 步日欣

砷化镓和磷化铟作为被产业选择、并且已经非常普及的半导体材料，在技术成熟度，产业普及度方面，有着其他半导体材料不可比拟的优势。我们认为，即便是未来有性能更优越的新材料出现，只要砷化镓和磷化铟能够胜任的应用领域，还是被优先采用，就如同氮化镓替代不了砷化镓在 Sub 6 频段的地位一样。



纵慧芯光销售总监 孟祥培

砷化镓和磷化铟主要用来做功率放大器，微波单片集成电路（PA，MMIC）和有源光器件（VCSEL，DFB 等），光接收器件（PD），这些器件是射频组件、3D 传感、数据传输等模块的关键元器件，现在产业界正朝着更高频率，更高功率，更高光电转换效率，高更传输速率等方面飞速发展，产业生态已基本建立。但从晶棒提拉，外延结构设计，晶圆生长，器件设计，工艺制造等各个环节来看，完全拥有自主知识产权、国产化的比例还是不高，这个产业国产化市场空间很大，未来希望更多国内的公司能在不同的环节都能有所突破。

9. 对于中国化合物半导体行业应该如何学习国际经验，加速产业发展，请谈谈你看法。



芜湖启迪研发总监 钮应喜博士

在行业发展初期，由于行业产业链不是很完整，上游很难找到下游的应用领域，在这时期，国际上公司采用垂直一体化模式，上、下游可以高效的沟通、反馈，非常有利于技术提升，尤其是上游，比如国际公司 Cree。国内目前的现状是整个产业链已经健全，不建议照搬国外的模式，国内缺少的是有效的

沟通，应该通过联盟或协会或其他形式，给产业各个环节构筑一个沟通的平台，可以以某一个应用场景为突破口，快速的、及时的进行技术交流及合作开发。



中国科学院物理研究所先进材料和结构分析实验室主任，研究员 陈小龙博士

我们国家在化合物半导体行业离发达国家还是有一定的差距。我们许多原材料还有不少重要的设备还需要依赖进口，在一定程度上限制了我们的发展。，从国际经验来看，化合物半导体行业一个互相联动的行业，无论是单晶材料的生长、外延片的制备、还是器件的制作和封装等，互相之间都会有影响。目前来看，我们在材料和设备方面的研发基础相对薄弱，这看似是一个单独的行业，但是实际上涉及到很多的行业领域，为加速整体产业的发展，应该是各个行业齐头并进地往前发展，不能仅盯着某一个单独的点，需要全面、整体和均衡地推进相关领域的基础研究和工业技术的发展。



Cissoid 中国总经理 罗宁胜博士

尽管中国在化合物半导体领域起步较晚且落后于国外，但该领域非常适合于在中国实现突飞猛进的发展。主要原因有三，第一，化合物半导体的工艺基本都在微米级，从材料到设备有全套国产产业链支持，而不会受到精细纳米级制造设备（特别是光刻机）需要进口而被严重限制。第二，化合物半导体的器件结构相对简单，也不需要非常复杂的顶级的 EDA 支持，又排除了需要进口而受到的严重限制。第三，中国广阔的且巨大的应用市场。因此，可以断言化合物半导体将是中国半导体整体产业提升的重要突破口之一。

近几年来，国家对半导体制造业十分重视，投资也很大，相继有几十家晶圆厂在开工、扩建或新建，尤其是近期有业内人士呼吁要将微电子系统加工作为单独的学科，这都是极好的现象。然而，纵观国内晶圆厂，清一色的新厂房和新设备，投资非常大，但最最缺乏的是工艺开发领域的人才，以及维护工艺方面人才积累的体系。传统的机械加工如车工、铣工及焊工等，都有多层级别工匠制度，与待遇和补贴挂钩，以推进和维护该职业的发展，而如此重要的微电子系统加工业应该有更全面的人才培养体系。



苏州量芯微半导体公司总经理 傅玥

我认为中国需要更多的化合物半导体代工厂，以满足日益增长的设计公司的需求。不能只着眼于建设 IDM，要考虑到市场的多样性。



创道咨询合伙人 步日欣

中国化合物半导体产业发展，没有国外经验可以借鉴，毕竟国外产业发展，并不是弯道超车来的，我们面对的是如何在落后的情况之下，能够实现产业的突破，这是国外经验没法借鉴的。在成熟领域，需要不断的技术积累，实现技术突破，利用贴近本土市场的服务优势、价格优势，不断地扩大市场份额；在一些新兴领域，需要借助资本和国家政策的力量，充分与市场结合，尽量避免进一步扩大差距，重蹈硅半导体产业的覆辙。



纵慧芯光销售总监 孟祥培

化合物半导体属于资本和技术密集型企业，投入资本高，回报周期长，产业的进步需要整个行业来推动，国内行业具备市场优势，全生态产业链基本齐全，但是在基础材料研究、人才储备和产品品质体系流程规范方面相对国外还有一些差距。相信在半导体行业同仁的共同努力下，一定可以弥补相关短板，最终使得中国的化合物半导体在行业内取得领先。

10. 近年来随着深紫外 LED 的发光效率不断提升，深紫外 LED 的市场也快速发展起来了，如何看待深紫外 LED 现实应用或者大规模普及的困难和挑战？深紫外 LED 技术未来发展的趋势如何？



中国科大微电子学院特任研究员，博士生导师 孙海定

一场突如其来的全球新冠疫情，让节能环保（不含汞）而又小巧便携的深紫外 LED 杀菌消毒光源芯片走入公众的视野。据 Mordor Intelligence 2020 年有关深紫外 LED 市场预计报告显示，全球深紫外 LED 芯片市场从 2020-2025 年复合增长率达到 20.1%，预计到 2025 年市场将达到近 10 亿美金，且主要在杀菌消毒应用领域，尤其是在表面 / 空气杀菌净化、静止水杀菌、流动水杀菌为未来主要成长动能。随着技术精进、市场扩容和产业发展，使得深紫外 LED 的市场前景越来越广阔，各大公司推出的基于深紫外 LED 芯片的新品也层出不穷，纷纷抢占市场份额。基于此，这一新兴技术将势必带动中下游产业的进一步发展。目前占据技术领先的地区包括美国，日本，中国等。

目前深紫外 LED 的现实应用的最大挑战和困难还是单颗或者单位面积内输出的光功率还是太小。相较于拥有近 80% 的光电转换效率的蓝光 LED，深紫外 LED（以 280nm

为例）的光电转换效率普遍仅只有 5% 左右，且波长越短这个效率越低。其核心问题还是在于材料本身，受制于制备深紫外 LED 的铝镓氮半导体材料的 p 型掺杂困难，且该材料特殊的能带结构而导致光提取效率很低（实验室最高纪录也仅仅只有 20% 左右），因此如果将来全面普及深紫外 LED，势必攻克掺杂和光提取效率这两大难题方可进一步取代汞灯，实现真正意义上的绿色节能环保“紫外光源”。

从技术层面上来说，深紫外 LED 的未来发展趋势主要围绕“垂直结构”和“水平结构”来设计和制备发光芯片，按照目前的技术路线，垂直结构紫外 LED 具备一定的电注入优势，且更加均匀，有可能是将来发展的主流技术。同时需要进一步优化器件的外延生长条件，提高芯片的电流注入效率，并优化器件的光子提取效率，从而实现更高输出功率，更高光电转换效率的深紫外 LED 光源。CS



再见 2020，

你与我们共同走过艰难，给我们的生命涂上了一层厚厚的底色，这一底色让我们更加体味到活着和幸福的滋味，更加学会珍惜生命、珍爱家人、珍重工作，因此，我们要感恩 2020。作为化合物半导体行业的一员，聆听了各位专家学者的分享，对化合物半导体技术与产业的发展充满期待和信心，感谢你们的真知睿见。你好 2021，让我们一起披戴着 2020 年厚重生命底色的洗礼，满怀热情和希望，勇敢喜乐的走向明天，因为只要有希望，有热爱，就一定有未来、有幸福！

绽放氧化镓的光辉前景

采用窄沟槽的氧化镓肖特基势垒二极管在电压阻断和漏电流方面树立了新的标杆。

WENSHEN LI, ZONGYANG HU, KAZUKI NOMOTO, DEBDEEP JENA 和 HUILI GRACE XING，康奈尔大学

人们一直在不断努力将宽带隙半导体材料运用于电力电子器件中，这并没有什么可奇怪的。毕竟，材料的带隙越宽，其击穿场就越大，为制造相同材料厚度下具有更高击穿电压的器件打开了大门。

然而，大自然并不总是那么慷慨。通常，向更宽带隙的转变伴随着更具挑战性的掺杂，以及制造高质量的天然（同质）衬底的困难。从这些方面来看，氧化镓似乎比碳化硅和氮化镓更有优势。

氧化镓最有前途的形式之一是它的 β 相，其带隙为 4.5-4.7 eV。幸运的是，很容易实现 n 型可控掺杂，掺杂浓度范围为 $10^{15}cm^{-3}$ 到 $10^{20}cm^{-3}$。得益于其在上述整个范围内的浅施主能级，在室温下其掺杂效率也非常高。Ga_2O_3 的另一个令人鼓舞的方面是，这种材料的单晶衬底可以很容易地用熔体法生长技术进行生长，类似于单晶硅衬底的制造。有了所有这些希望，是否有可能充分利用 Ga_2O_3 的宽带隙所带来的所有好处，并展示出优于 SiC 和 GaN 的器件？

为了帮助回答这个问题，我们团队在康奈尔大学一直致力于 Ga_2O_3 垂直功率器件的开发。通过采用垂直结构，能够在每个芯片面积上承载更多电流，同时也充分利用了 Ga_2O_3 单晶衬底易于获得的优势。我们的目标是证明 Ga_2O_3 可以提供的最高的单极器件性能 -- 预计它将远高于 SiC 和 GaN，这主要归功于其卓越的带隙，使其击穿电场可跃升至 6-8 MV/cm。

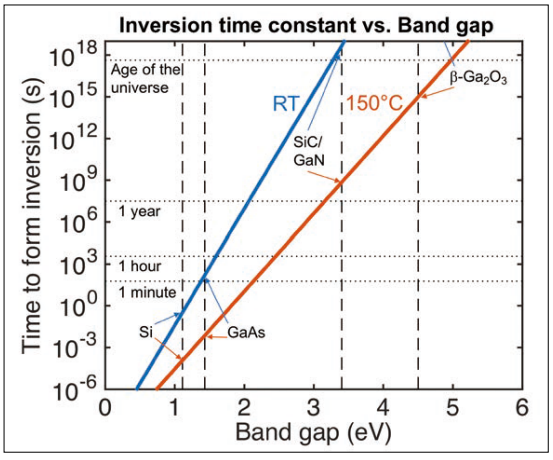


图1：MIS-结中反转时间常数估值随带隙的变化关系。（形成反型层的时间随着带隙的增加而指数增加，从而允许在宽带隙半导体中使用MIS结来进行电压阻断，而不需要担心MIS结随时间的骤回。或者，从另一个角度来看这个图，有必要在窄带隙半导体中使用p型接触，但是在宽带隙半导体中可以避免它们，无需使用p型接触。）

一个明智的结

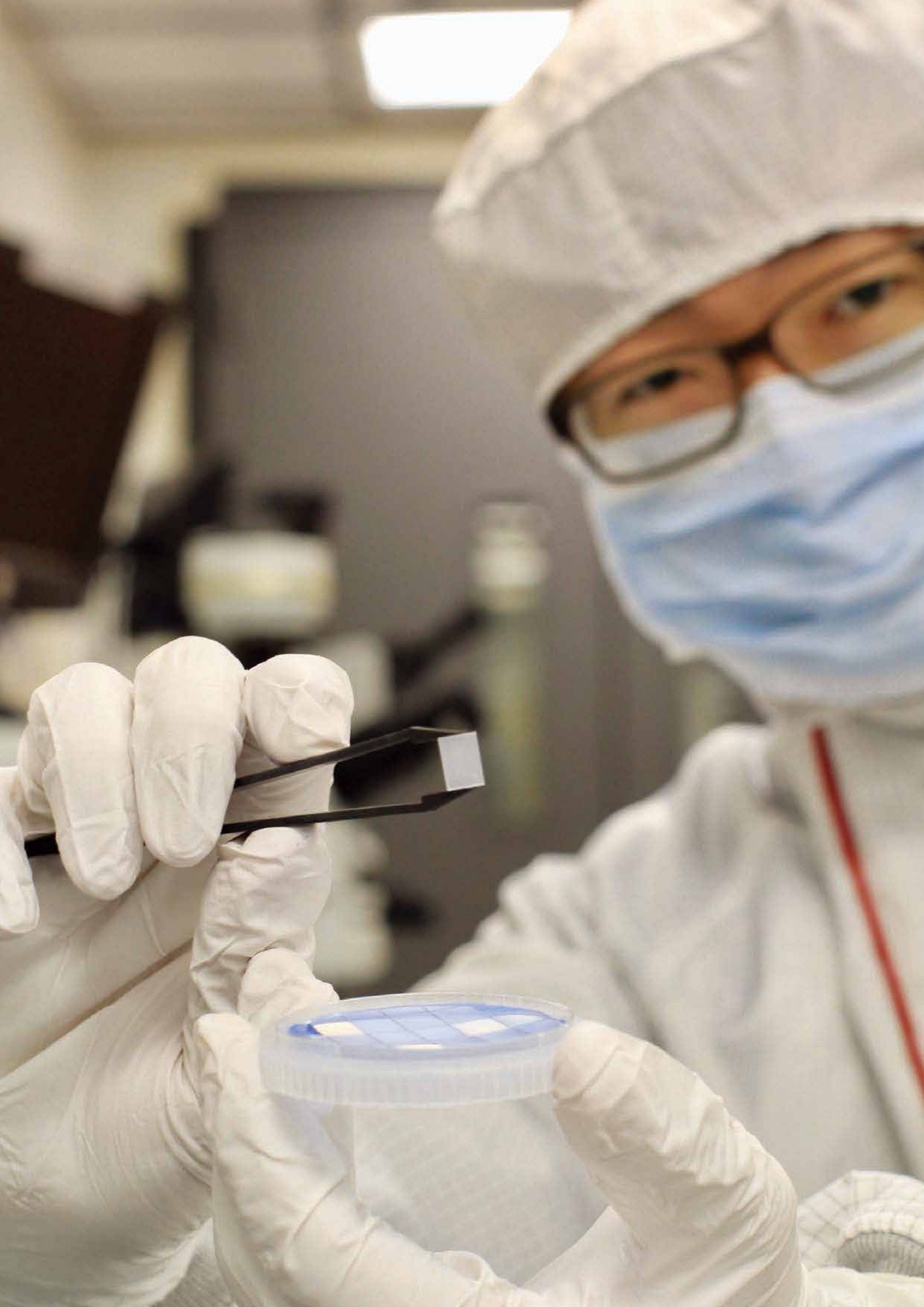
缺乏 p 型掺杂是 Ga_2O_3 的一个缺点。

由于这一缺点，我们在器件中加入了金属 - 绝缘体 - 半导体（MIS）结，以提高其阻断电压。正如我们在下面将要看到的，使用这种形式的结其背后的原因并不简单。

让我们首先考虑处于反向偏压下的 MIS 结构：由于器件内的热能将电子从价带激发到导带，因此半导体在结的附近进入深度耗尽，并且形成了所谓的反型层。这不是一个好消息，因为一旦反型层形成了，整个反向偏置就会在 MIS 结构的绝缘层上下降，从而导致绝缘层以及功率器件发生灾难性故障。防止这种灾难性故障发生的唯一选择是迅速疏散排空所产生的少数载流子。在此处，这意味着要及时地排空 n 型半导体中的空穴。

这个过程中的一个关键品质因数是与反转过程相关的时间常数（如图 1 所示，这个特性取决于带隙的大小）。对于具有小带隙的半导体，例如硅和 GaAs，在室温下几秒或几分钟内就会形成反型层；在电力设备经常运行所处的高温下，因为时间常数下降了几个数量级，这个时间就短得多了。因此，在硅和 GaAs 器件中，需要适当的 p 型接触来清除由热激发或碰撞电离产生的空穴。

与此形成鲜明对比的是，只要 Ga_2O_3 半导体足够纯，并且没有发生光学吸收或碰撞电离来产生空穴，几乎从来不需要担心从 Ga_2O_3 中抽空空穴。氧化镓具有 4.5-4.7 eV 的带隙，能够有效地抑制反型层的形成；并且由这种氧化物制成的器件封装后就避免了外部光吸收。



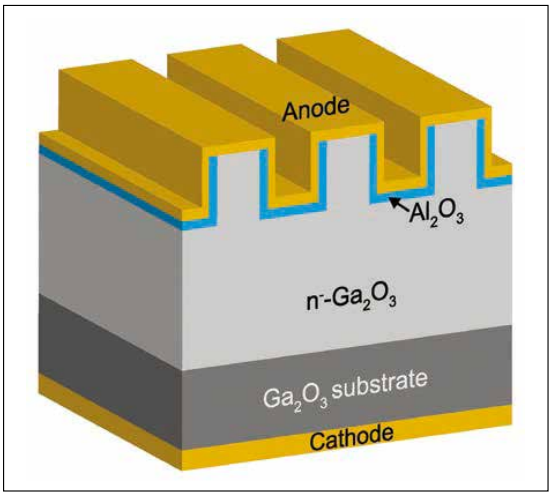


图2：氧化镓沟槽-MIS肖特基势垒二极管具有周期性的鳍状沟道，刻蚀形成。（覆盖沟槽的MIS结提供了一种电荷耦合机制，从而有效地降低了顶部肖特基接触附近的电场。）

事实上，对于 Ga_2O_3 来说，碰撞电离所需的电场如此之高，以至于它几乎不能由真正的绝缘体支撑。即使发生碰撞电离，由于极化子效应和超平坦价带的影响，产生的空穴也是高度局域化的。这就使得疏散排空这些空穴变得非常困难，最好的改进方式就是在一开始就抑制它们的产生。

基于我们刚才提出的论点，我们正在寻求一种采用 MIS 结进行电压阻断并能避免 p-n 结的体系结构。在 MIS 结构中，与反型层形成相关的时间常数的重要性并不广为人知。然而，它却是宽带隙和超宽带隙半导体的另一个重要优点。

增加沟槽

我们一直致力于肖特基势垒二极管的开发。虽然该器件属于单极性器件，能够实现很快的开关速度，但是会受到击穿电压较低且漏电流较高的不利影响。为了解决这两个缺点，我们在肖特基接触周围设计了一个电荷耦合机制。设计结果是这样的：一个沟槽 -MIS 势垒肖特基二极管（见左图 2），这是一种可有效降低顶部肖特基接触附近电场的器件。

对我们设计的一种器件进行模拟，该器件的鳍沟道宽度为 1 微米、沟道深度为 1.5 微米，模拟结果揭示了二极管阻挡 2.44 千伏时的电场分布—这是迄今为止我们所能达到的最高击穿电压。根据这些计算，电荷耦合机制将肖特基接触附近的电场强度降低到了 1 兆伏 / 厘米以下。由于沟槽状结构，电场的终端主要是指向侧壁处的金属，而不是指向顶部肖特基金属。相比之下，在没有获得电荷耦合效应的常规肖特基势垒二极管中，表面电场为 4 兆伏 / 厘米。如此高的表面电场将产生不可接受的高的漏电流密度。

我们结构的另一个好处是，它天然地在器件边缘处提供场镀，从而减少 Ga_2O_3 边缘结构的场集聚。由于绝缘层必须承受高电场，因此需要一种具有高击穿电场和高介电常数的介电材料。氧化铝满足这些要求，我们通过原子层沉积技术来制备。氧化铝的另一个优点是其相当大的带隙，导致氧化镓产生足够大的导带偏移，从而有利于抑制通过 MIS 结的隧道电流。

我们在（001）取向的外延晶片上制作二极管。它们是由新水晶科技（Novel Crystal Technology）公司利用 HVPE（氢化物气相外延）技术生长的。漂移层的净掺杂浓度约为 $2 \times 10^{16} cm^{-3}$，厚度为 10 微米，其被设计用于制造能够阻挡 3 千伏的器件。

为了研究鳍片几何形状的影响，我们制作了二极管和宽度在 1 微米至微 8 米范围内的鳍片状沟道的组合产品。鳍片宽度越窄，表面电场的降

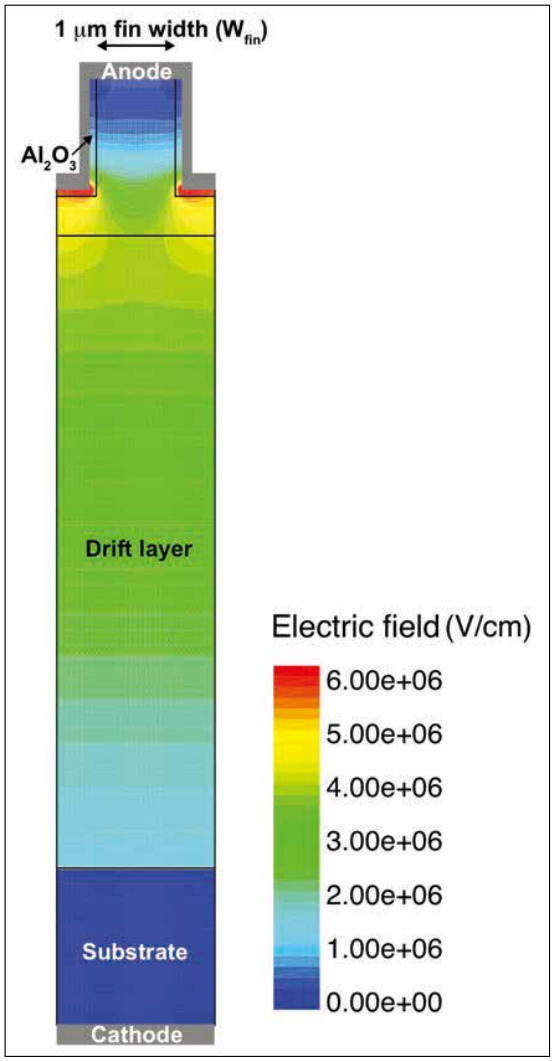


图3：在2.44千伏下，鳍沟道宽度为1微米的沟槽二极管单元中的模拟电场分布。（即使最高平行平面电场达到4.3兆伏/厘米，肖特基接触附近的电场仍然小于1兆伏/厘米，这要归功于沟槽-MIS结构提供的电荷耦合效应。在沟槽底部附近存在5.9兆伏/厘米的电场峰值。）

低越大，因此预期的漏电流密度就会越低。

我们利用干法蚀刻技术形成沟槽，使用金属掩模图案。利用我们的蚀刻工艺方案，我们能够得到平滑弯曲的沟槽拐角，这可以在截面扫描电子显微镜图像中看到（见右图 4）。拐角的平滑度有助于减少在尖角器件中普遍存在的场集聚的问题。

在晶片背面形成欧姆接触之后，在鳍沟道顶部为肖特基接触形成开口（空缺）之前，我们通过原子层沉积技术制备氧化铝。接触是通过蒸发镍，然后溅射钛和铂来形成的，从而在鳍沟道的侧壁上形成金属覆盖层。

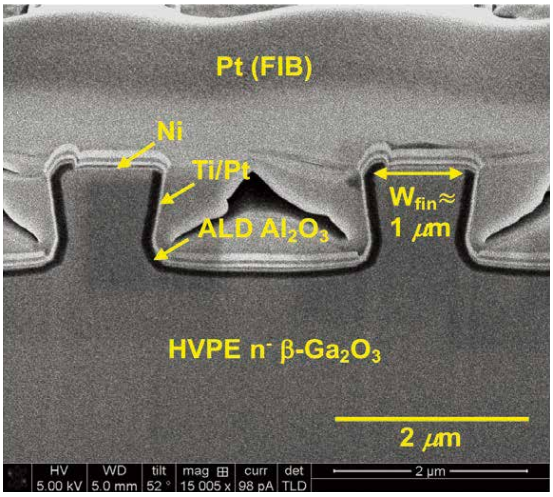


图 4：沟槽肖特基势垒二极管的扫描电子显微镜横截面图像。（可以看到平滑弯曲的沟槽拐角轮廓，这有利于减轻场集聚效应。）

调整泄漏，提升电压

正如预期，我们的沟槽肖特基势垒二极管在 1.25 伏时导通，这一数字与普通二极管相近（见下图 5）。我们发现沟槽二极管的差分导通电阻由鳍面积与总器件面积之比决定。当该数值为 50% 时，沟槽肖特基势垒二极管的比导通电阻为 10mΩcm^2。相比之下，在常规肖特基势垒二极管中，这个数字仅为 7mΩcm^2。较高的数字源于鳍状通道内受限的电流路径，这是我们稍后将要谈到的高级反向阻断能力所要付出的代价。值得注意的是，导通电阻的增加不是固定的，可以通过提高鳍面积比和增加鳍沟道中的有效电子迁移率来实现最小化。

反向特性的改善远超过了导通电阻的损失（如图下 6 所示，沟槽二极管的反向电流 - 电压特性）。我们发现，与常规肖特基势垒二极管相比，我们这种基于沟槽的变化结构具有更低的漏电流和更高的击穿电压。我们的测量还表明，鳍越窄，由于电荷耦合效应的增加，因而漏电流会越低。因此，宽度为 1 微米的鳍沟道器件具有最低的漏电流密度。

我们的制造工艺还有待进一步优化，器件的漏电流存在一定程度的不均匀性。在几个寄生漏电流最小的 1 微米和 2 微米通道器件中，即使电压超过 2 千伏，漏电流也低于我们测量的本底噪声 1 μA/cm^2。如此低的漏电流是非常有益的，因为它可以降低器件在关断状态下的功耗。

即使在 2 千伏的电压下工作，我们的低漏电流器件也只有一个几 mW /cm^2 量级的功率损耗。商用千伏级肖特基器件的反向阻断电压通常规定为 1mA /cm^2 左右的漏电流密度，从这个角度来看，我们器件的漏电流值是非常低的。

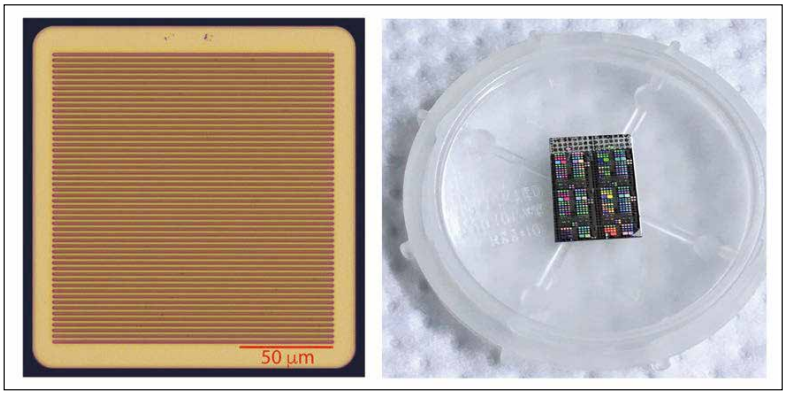
商用器件承受比规定阻断电压更高的电压而不会发生破坏性击穿，是有可能的。然而，在这种状态下工作会增加它们的漏电流，并引起较高的关断状态下的功率损耗。换句话说，由于漏电流施加的限制，材料的完全电压阻断能力可能没有被得到充分的利用。通过减少漏电流，我们将能够探测材料的固有电压处理能力。

理解 Ga_2O_3 的基本极限对于促进我们去进一步理解超宽带隙材料器件的实用性至关重要。

较窄鳍的好处不仅限于降低漏电流，还包括提高击穿电压。其击穿电压可高达 2.44 kV，这是我们具有 1 μm 通道的二极管中最高的击穿电压。

为了理解这一趋势，我们模拟了在所有鳍宽度下的反向偏置电场的分布。这些计算表明，由于电场集聚，在器件有源区内的沟槽底部的拐角处电场达到峰值。在较窄的通道中，由于空间电荷的减少，电场峰值较小。最好要避免较高的电场峰值，因为它们会降低击穿电压。

根据我们的模拟结果，对于所有宽度的鳍，在二极管的击穿电压下，Ga_2O_3 中的峰值电场均达到了5.9兆伏/厘米。这表明，我们所有的二极管，



康奈尔大学开发的沟槽式肖特基势垒二极管

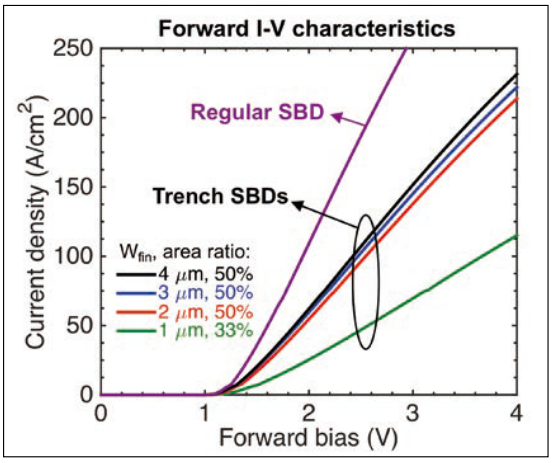


图5：与常规肖特基势垒二极管相比，沟槽肖特基势垒二极管的正向电流-电压特性。所有二极管的导通电压几乎相同。

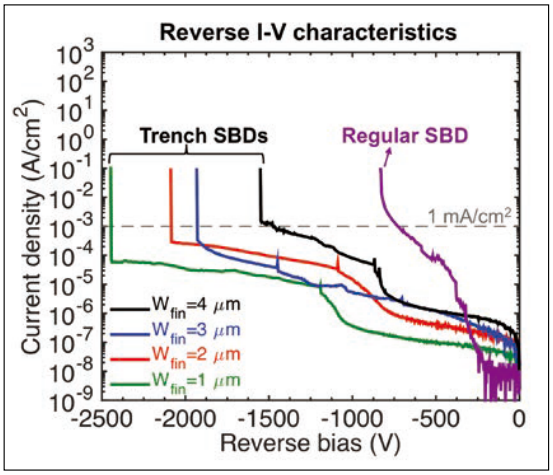


图6：与常规肖特基势垒二极管相比下，沟槽肖特基势垒二极管的反向电流-电压特性。沟槽二极管具有较低的漏电流密度和较高的击穿电压。

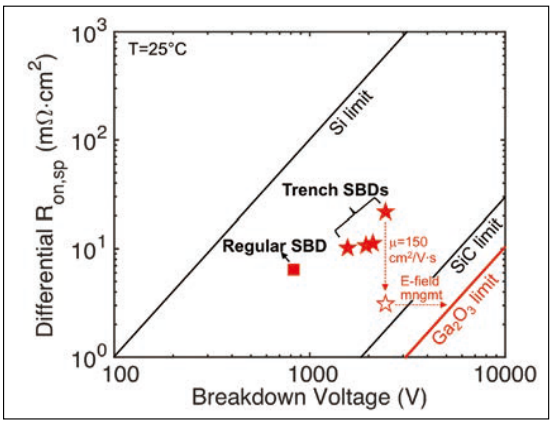


图7：康奈尔大学制作的沟槽肖特基势垒二极管赋予了垂直Ga_2O_3功率器件最高水平的性能。电子迁移率的提高，再加上电场分布调控的优化，可能会进一步促使器件性能接近Ga_2O_3的极限。

无论其鳍片的宽度如何，都会在沟槽拐角处发生故障。因此，为了实现高的阻断电压，必须在同时使用窄的鳍和较平滑的拐角。然而，值得注意的是，即使是使用我们最新的未优化的设计工艺，最高平行平面电场也可以达到 4.3 兆伏 / 厘米，这是碳化硅和氮化镓无法达到的值。

从二极管到晶体管

我们的另一项并行工作是开发垂直鳍沟道晶体管。使用与我们的二极管类似的结构，我们制造了第一个击穿电压高于 1 kV 的常关型晶体管。去年报道的这个结果来自于一个品质因数超过硅单极器件极限的晶体管。

从那以后，我们将常关型晶体管的击穿电压逐步提高到了 1.6 千伏以上，同时还仍然保持了出色的导通电阻。由于我们的垂直鳍沟道晶体管与我们的沟槽肖特基势垒二极管有许多相似之处，我们对这些沟槽二极管的器件物理以及该器件的工艺优化的见解和经验可以直接地应用到我们在晶体管研究和优化的工作中去。

继续前进

在 2018 年 12 月的国际电子器件会议（IEDM）上，我们报告了我们的沟槽二极管的结果，表明这些器件为 Ga_2O_3 垂直型功率器件的击穿电压和 Baliga 品质因数树立了新的标竿。在我们的 2 微米鳍通道二极管上进行脉冲测试，Baliga 品质因数为 0.45 千兆瓦 / 平方厘米。这些器件超过了硅单极器件的极限（见上图 7），但尚未达到碳化硅的极限。

对导通电阻的分析表明，在我们最新的二极管中，其有效迁移率远低于预期值。我们将其归因于未优化的表面处理工艺或初始晶圆的质量。

如果我们能够实现 150 $cm^2V^{-1}s^{-1}$ 的迁移率，这在轻掺杂 Ga_2O_3（掺杂浓度约 10^{15} -10^{16} 每立方厘米）中已有报道，我们的沟槽二极管的导通电阻将下降 3 倍，仅有 3mΩcm²，从而使得预计的品质因数非常接近碳化硅的单极器件极限。这种迁移率不是空想，因为在 β-Ga_2O_3 中室温迁移率的测量值最高可达约 180 $cm^2V^{-1}s^{-1}$。

如今碳化硅的销量飞速增长，氮化镓也紧随其后。这表明宽带隙器件正开始绽放它们的独特潜能。下一个将会是 Ga_2O_3，它现正在快速发展之中。虽然缺少天然的 p 型掺杂对一些传统器件设计带来阻碍，但是通过转向诸如 MIS- 结之类的结构，我们已经表明可以制造出良好性能的功率器件。显然，在熔融生长的高质量同质衬底的支持下，Ga_2O_3 能够提供具有前所未有的单极性能和大规模生产能力的功率器件。CS

延伸阅读

W. Li et al. in IEDM Tech. Digest 2018 p. 8.5.1
W. Li et al. Appl. Phys. Lett. 113 202101 (2018)
Z. Hu et al. IEEE Electron Device Lett. 39 869 (2018)

NASO TECH
纳 设 智 能

碳化硅外延设备团队完成数千万天使轮融资

深圳市纳设智能装备有限公司（简称“纳设智能”）近日完成了数千万元天使轮融资，由东方富海管理的中小企业发展基金（深圳南山有限合伙）及老股东深圳嘉远资本联合投资。本轮融资资金将用于第三代半导体碳化硅化学气相沉积外延设备（简称“碳化硅外延炉”，如图一所示）的产品研发、工艺验证、市场推广以及技术团队扩建。

纳设智能成立于2018年10月，坐落在深圳市光明区留学人员创业园，近期已通过国家高新技术企业初步认定。公司拥有一支包括顶级科学家在内的研发团队，致力于第三代半导体等先进材料领域的高端装备制造。

纳设智能专注于碳化硅产业链里关键的碳化硅外延炉，此设备的关键难点就是温度高，需要达到接近1700°C，需要的反应室材料、温度控制、气体控制、防污染、工艺等都是面临的挑战，而纳设智能团队已掌握相应的自主创新的技术解决方案，可以实现产业化。公司研发团队的主要行业经验包括MOCVD设备、刻蚀设备以及纳米材料等多款半导体设备和工艺开发及市场推广，具有深厚的技术积累和丰富的行业资源；在先进设备的产品化和市场化推广方面拥有平均十年以上的实战经验。2019年，团队成立仅一年便成功完成4台设备的设计组装及调试，其中包括中国首台开放式卷对卷石墨烯化学气相沉积设备，实现了开放条件下，24小时连续不间断生产石墨烯、碳纳米管等先进薄膜材料，该技术实现了全球最低CVD石墨烯薄膜的生产成本；另外也销售了三台科研级CVD设备。

本轮融资资金将支持纳设智能的技术团队实现第三代半导体碳化硅高温化学气相沉积外延设备的高质量产业化，以满足第三代半导体产业规模爆发式增长和技术升级自主可控的重大需求，助力攻关新材料先进装备的核心技术难点，研制国内领先世界一流的碳化硅外延设备，实现下游产业化应用。同时，纳设智能也在不断扩大团队规模，吸纳培养更多的半导体专业技术研发人员，打造一流的人才聚集地。



碳化硅外延炉

官方网站：http://www.naso-tech.com；企业邮箱nasotech_xm@163.com；联系电话：0755-23243345



开拓 SiC 衬底生产

一家晶体生长设备制造商转向了材料制造，为 SiC 电力电子器件的生产创造了更具竞争力的供应链。

SANTHANARAGHAVAN PARTHASARATHY，GT ADVANCED TECHNOLOGIES

硅是整个电子行业应用最为广泛的材料，几十年来一直主导着电力电子产品。但它的影响力正在下降。无论是以哪种形式转换功率的硅功率器件（如 AC-DC 整流器、AC-AC 变压器、DC-DC 转换器和 DC-AC 逆变器）都在努力满足更高额定功率、更快开关频率和更高工作温度的要求。若是不能满足，则会产生不良后果，因为这样一来电路就需要额外的冷却，占用更多空间，同时它们需要大型 "无源 "元件，如电感和电容器。

解决所有这些缺点的是有着更宽带隙的一组材料，如 SiC。更宽的带隙是一个奇妙的属性，可带来多种好处。对于 SiC 来说，其带隙是硅的三倍，提供的击穿场是现有硅材料的十倍（见表 1）。SiC 器件的其他优点是，能在远高于硅等效器件的频率下实现有效开关，从而可以使用小得多的无源器件，并且导热率比硅好三倍。凭借所有这些特性，SiC 掌握了更小、更轻电路的关键，同时这种电路有着更高的效率，能承受更高的电



压，但对热管理的要求却降低了。

随着市场和应用推动 " 万物电气化 "，对这种电路的需求正在增长。虽然这一点在电动汽车行业最为明显，该行业正在推动传统使用的硅基电力电子器件向 SiC 过渡，但其他行业也在受益于这种宽带隙材料。这些行业包括：其他运输方式中的电源转换系统，如电气化火车、船舶和飞机；可再生能源应用，包括太阳能光伏发电和风能；以及工业 / 商业应用，如服务器电源、数据中心用的不间断电源、电机驱动器和医疗成像系统等。

除了所有这些全 SiC 器件外，SiC 还为各种基于 GaN 的器件提供了基础。高频 GaN-on-SiC 晶体管被应用于 5G 通信系统中，如基站、数字电视、雷达和光电器件等。在 5G 应用中，氮化镓外延层和半绝缘 SiC 衬底的组合可制造出优于硅 LDMOS 的器件，并提供更高的容量和更好的覆盖范围。从硅 LDMOS 切换到 GaN-on-SiC 使每座基站的用户数增加了一倍，并将数据传输速度提高了一个数量级以上。

衬底供应

随着人们对 SiC 优越性能的认识不断加深，对这种材料制成的电力电子器件的需求正在快速上升。只有少数公司通过生长高质量的 SiC 晶体来满足这一需求，这就引出了一个问题：为什么不批量生产 SiC 晶体？

答案是多方面的，与生长 SiC 的挑战有关。这种宽带隙材料无法用制造硅熔体提拉法生长工艺来制造。这是因为在正常条件下无法实现化学计量的熔化。在大约 2100℃时，SiC 不是熔化而是升华。因此，SiC 的生长需要一个气相晶体生长过程——通常是物理气相传输或升华技术。

气相生长和熔融生长的晶体生长步骤基本相同。该过程首先是通过升华或熔融产生反应物，并利用特定的温度梯度将其输送到生长表面。在生长表面发生吸附后（称为过饱和），发生成核作用，随后发生晶体生长，该过程通过气固界面或固液界面的推进而进行。

SiC 和硅晶锭生长过程中使用的工艺差异是这些衬底成本、尺寸和可用性差异背后的原因。对于硅，在最先进的晶体生长设备中生产的硅锭直径为 450 毫米，长度超过 2 米，生长速度约为 100 毫米 / 小时。通过使用 10 毫米 ×10 毫米截面的薄籽晶开始生长。

相比之下，SiC 晶体的生长直径为 150 毫米，厚度最大为 50 毫米，生长速度要慢得多——生长速度为 100-300 微米 / 小时。这个过程是从直径 150 毫米以上、厚度 1-2 毫米的起始籽晶开始的。



对于任何想要制造 SiC 衬底的公司来说，一个重要的进入障碍是，启动该过程所需的高质量籽晶，商业上无法获

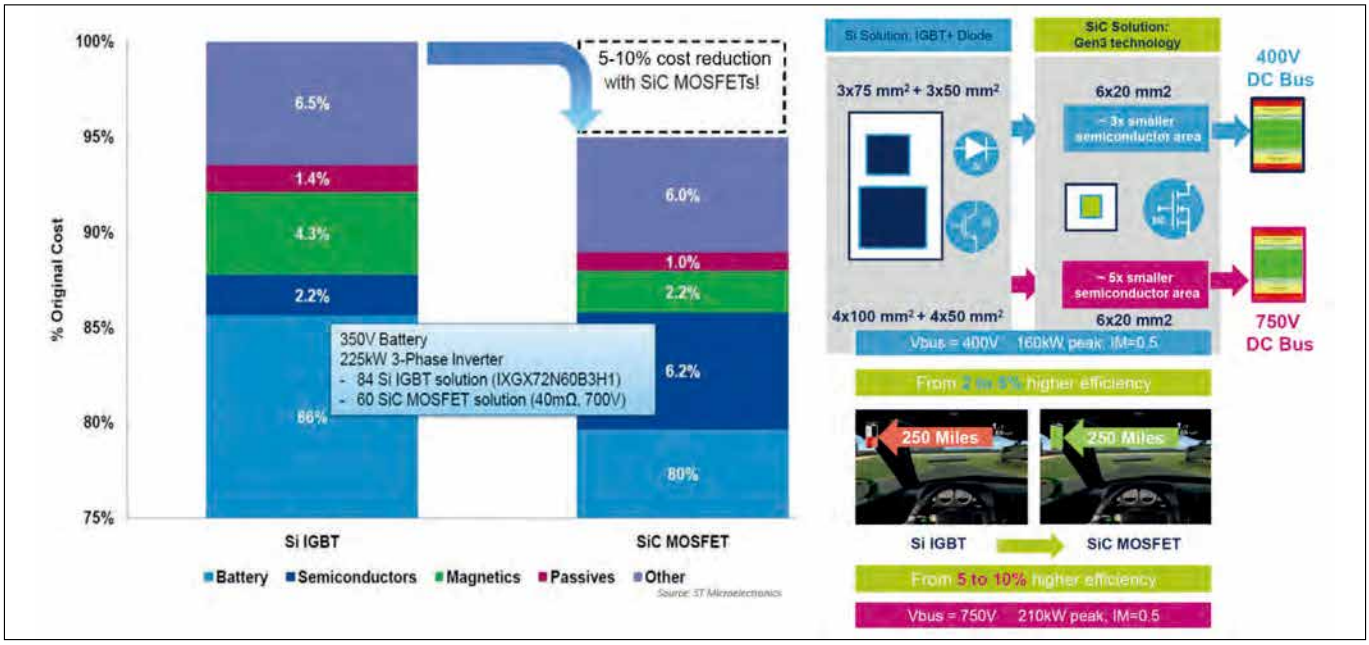


图1.从硅到SiC的转换可在系统层面节省成本。资料来源：ST微电子

得。试图通过使用商业衬底作为块状晶体生长的籽晶来解决这个问题是不可能的，因为厚度不够。因此，这个市场的任何新参与者都必须花费大量的开发时间和资源来生长高质量的籽晶。

除了生长速度缓慢和晶体尺寸的限制外，气相生长过程中与产量有关的困难也是 SiC 晶体的生产成本远远高于硅晶体的原因。然而，尽管衬底成本高得多，即使是今天，一个电路设计者从使用硅器件转为使用 SiC 制造的器件，也能在系统层面降低 5%-10% 的成本。因此，这种材料已经可以收回成本，而且随着时间的推移，SiC 衬底和器件的成本会大幅下降，其赢利空间将会越来越大。请注意，除了节约系统成本外，SiC 器件还能实现更小、更轻的系统，这主要是由于其更高的功率密度（节约成本的细节见图 1）。

与 SiC 相关的另一个挑战与这种材料的晶型多有关。有三种基本晶体结构——立方体（3C），菱形 (15R) 和六边形 (2H、4H、6H 等)——而多型体的晶体结构已超过 200 种。用于电力电子的 SiC 4H 型晶体约占 SiC 市场的 60%。器件是在 n 型 SiC 上制造的，这种 n 型 SiC 是通过掺入氮制成的。这导致电阻率在 0.015 至 0.025 Ω cm 范围内（通常为 0.020-0.022 Ω cm）。用于制造射频器件的衬底销售额占 SiC 市场的 40%。这些器件涉及在 4H 半绝缘衬底上生长 GaN 基异质结构。通过不掺杂或掺杂钒生产，它们的电阻率超过 10,000 Ω cm。在光电器件应用中则采用 6H 晶型。

SiC 的质量落后于硅。后者可以无缺陷地生长，而 SiC 则存在与气相生长、多型和螺旋生长机制相关的基本问题。部分问题在于，在 SiC 中原子从正确的位置迁移走所需的堆垛层错能量远低于硅。这就导致了广泛的缺陷，包括微管、碳夹杂物和扩展的晶体缺陷，如螺位错、刃位错、基平面位错和堆垛层错。减少这些缺陷并不容易，需要结合设备专业知识和工艺知识。仅改善这些问题中的一个而不顾其它，也不足以实现高增长市场所要求的结果。

加快实现成本平价

在 GT 公司，我们已经开发并改进了一种高产量晶体生长工艺，用于大批量、低成本的碳化硅晶体生产，帮助我们实现加速硅和碳化硅成本均等化的主要目标，并大大增加这种高需求材料的供应。

我们的努力使我们能够使用主流生产工艺生产直径 150 毫米的 SiC 衬底。由于大直径晶圆的供应是降低器件成本和提高芯片良率的关键，我们也已经开始了 200 毫米晶体的开发工作。

SiC 衬底的价格取决于单晶炉结构和基础设施相关的成本，例如冷却水供应、不间断电源的成本和需求、占用的空间、排气系统和 HVAC 等因素。产生 SiC 升华所需的高温有两种选择：一种是电阻加热炉，通过辐射将热量从加热器传递到坩埚；另一种是坩埚作为加热器感应加热。电

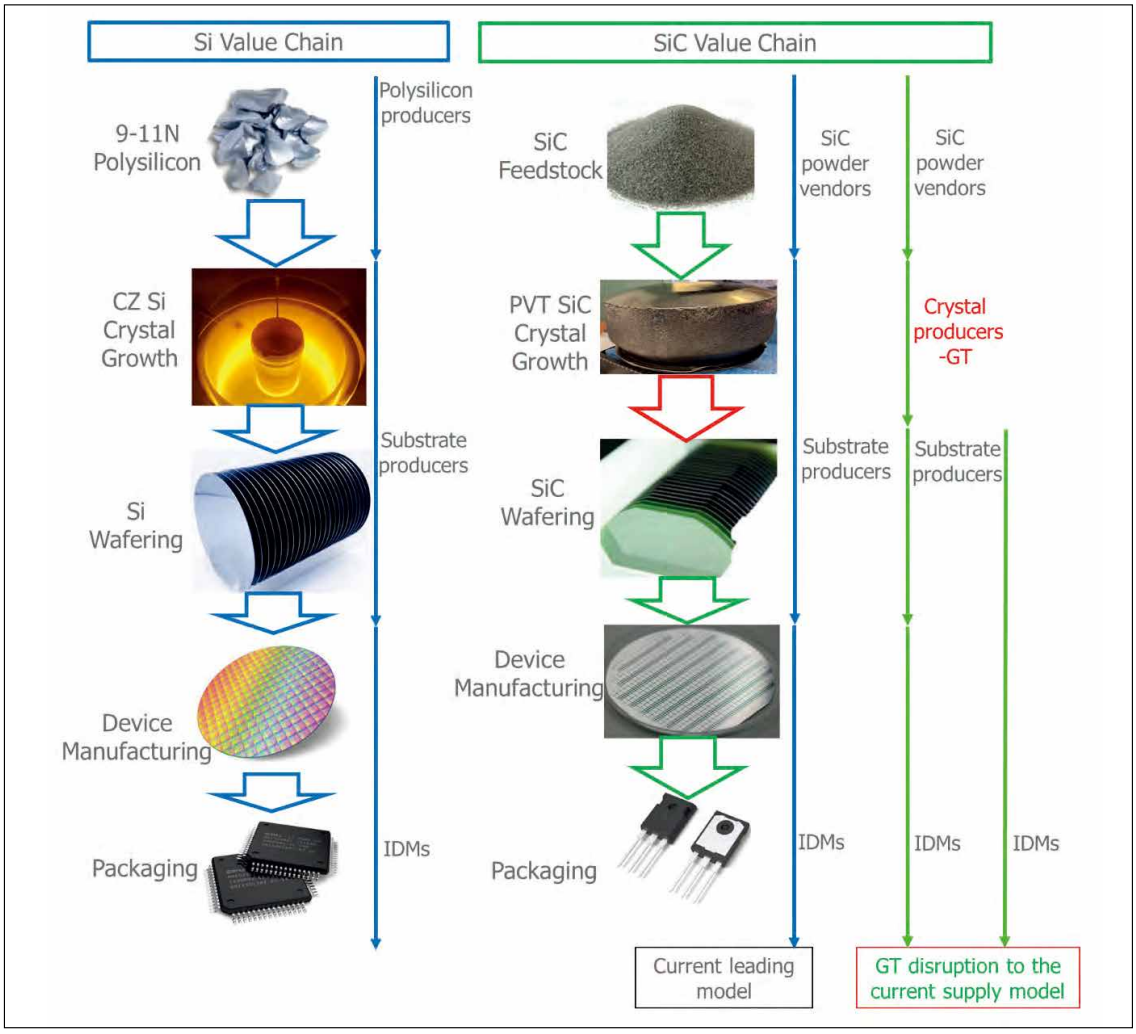


图2. SiC价值链与硅的价值链面临不同的挑战。

阻炉的缺点之一是固定成本高，这是由设备资本支出、大型的基础结构和体积导致的。如果使用这种加热形式，通过操作和技术改进来降低成本的机会有限。而使用感应法，节省成本的预期要大得多。由于较低的资本支出、较高的生产率、较低的电耗和较小的体积，使用者需要负担的固定成本更低。

出于上述原因，我们采用了感应法，我们将自己定位为当今市场上成本方面的领导者，并拥有进一步改进的巨大空间。凭借广泛的热场建模技术，以及卓越的设备设计和过程控制创新，我们的生产过程能够实现高产量、高质量和低成本。我们生产的晶体缺陷（包括微管缺陷和其他晶体缺陷）很低，并且由于具有很高的批次间重复性，我们的生产方式经济高效。

我们还能够利用已建立的供应链资源、设备设计和制造能力以及工艺专长。这些优势使我们处于一个很好的位置，可以根据需求迅速扩大规模，并随着时间的推移进一步改进我们的生产工艺。这将稳步提升我们在提供低成本、大批量 SiC 材料供应方面的竞争力。

SiC 衬底生产所面临的挑战不仅限于晶体生长。由于生长过程中产生的内在热应力和材料的高硬度（仅次于金刚石），将晶柱加工成晶片并不容易。衬底生产首先要将 SiC 晶体滚圆到特定的直径，然后使用金刚石浆料、金刚石砂线或激光切割进行多线锯切。随后进行表面的粗磨和精磨、倒边和化学机械抛光。

器件制造商将把开盒即用（epi-ready）衬底，装入 CVD 室，将其加热到 1600℃，然后用丙烷作为碳源，用硅烷或三氯硅烷作为硅源，来生长外延层。根据预期的器件击穿电压，该漂移层的厚度将在 5μm 和 100μm 之间（漂移层厚度约为 1μm/100V，因此对于 11kV 的器件，外延层厚度需要超过 100μm）。

为了实现优异的可靠性，并推动良率和成本的改善，器件生产可能会采用最近的优化，如栅极氧化和热氧化工艺。这些技术有助于扩大 SiC

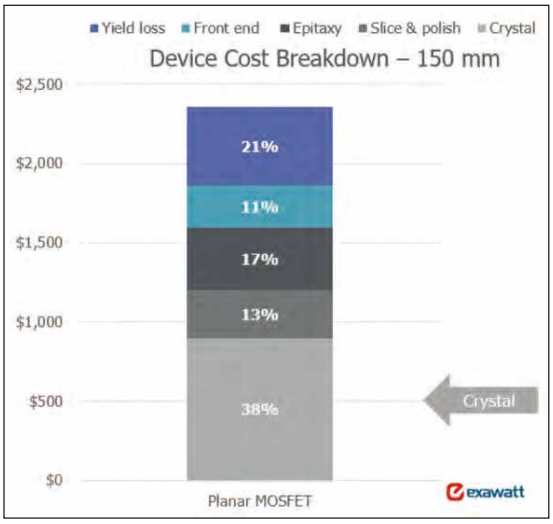


图3.在150毫米晶圆上生产的SiC MOSFET的成本明细。来源：Exawatt

器件的产品组合范围，其中包括肖特基势垒二极管、MOSFET、HEMT、MesFET、JFET、共源共栅和 BJT，其工作电压在 600V 到 30kV 之间。利用封装技术的发展，如 AlN 基板上直接键合铜和直接键合铝等，还可用 SiC 器件生产功率模块。这些模块可以在超过 200℃的温度下运行。

SiC 电力电子器件的供应链与硅的供应链明显不同（图 2）。前者受制于 SiC 晶体的有限供应，这是一个主要的瓶颈，我们正在通过供应链战略消除它。相比之下，硅产业的集成器件制造商（IDMs）则可从多家衬底生产商处购买材料。更为复杂的是，现有领先的 SiC 衬底厂商也在生产自己的器件，因此他们与下游客户产生竞争。

和硅一样，SiC 产业也需要“纯粹的”材料供应商。GT 的供应链战略将使这一点成为可能，从而为现有的硅衬底供应商提供机会，将 SiC 加入到他们的产品组合中，并利用已建立的规模、成熟的价值链以及与购买硅衬底的 IDM 建立的关系。同样，IDM 也可以迅速增加晶圆产能，提高其垂直集成度。无论哪种情况，随着规模的增加和产业摆脱对少数供应商的依赖，成本应该会迅速下降。

SiC 产业的这种转型将为电力电子产业带来巨大成功。如今，单片开盒即用（epi-ready）的 150 毫米 SiC 衬底零售价为 800~1100 美元，占器件成本的很大一部分（图 3 给出了一个 MOSFET 的成本明细）。这种衬底的成本可能会大跌——我们预计在未来几年内它将降至 300 美元。降价的关键之一是增加生长晶体的可用厚度，因为运行成本与晶体厚度相对独立。

其他的驱动因素是降低资本支出、降低运营成本、提高生产率、加强过程控制和提高工厂良率——晶体生长良率必须提高到 98% 以上，而晶体制造良率必须超过 95%。

我们在 SiC 晶体生长方面的专业技术使我们做出了战略决策，利用我们在晶体生长设备和 SiC 生长方面的知识和经验，并且专注于此。我们正在为全球晶圆生产商提供大量的高品质 SiC 晶体。这种供应扩大并加深了 SiC 晶圆的全球供应，有助于降低成本。

功率器件行业已经对这些市场发展表示欢迎：2019 年 8 月，GTAT 与 GlobalWafers 签署了一项长期协议，以供应其 CrystX SiC 晶体，2020 年初又与领先的 IDM 公司安森美半导体签署了长期供应协议。CS

	Ge	Si	GaAs	4H SiC	4H SiC 说明
带隙 (eV)	0.67	1.1	1.4	3.3	更大的带隙，更低的漏电电流，更高的工作温度和抗辐射能力。
击穿场Ec (MV/cm)	0.1	0.3	0.4	2.5	更高的击穿场，更低的导通电阻和更高的阻断电压。
导热系数 W $cm^{-1}C^{-1}$	0.58	1.3	0.55	3.7	更高的导热系数，增加了热扩散和功率密度。
相对介电常数 ε	16	11.8	12.9	9.7	更低的介电常数——更少的寄生。
电子漂移速度 υ_s (cm/s)×10^7	0.6	0.9	1	1.5	高电子饱和漂移速度导致器件体积变小。
电子迁移率μ(cm^2Vs^{-1})	3900	1400	8000	1000	
Johnson品质因素 (最大频率和电压)	1	5	7	63	
Baliga品质因素 (最小传导损失)	1	7	106	2429	

表1.锗、硅、砷化镓和碳化硅的物理特性。



膜点亮硅光子学

晶片键合 InP 模板上的外延生长可以集成高性能激光器和 Mach–Zehnder 硅波导调制器。

TASUROOU HIRAKI，TAKUMA AIHAARA，TAKURO FUJII，KOJI TAKEDA，TAKAAKI KAKITSUKA，TAI TSUCHIZAWA，SHINJI MATSUO，NTT 公司

Covid-19 的爆发导致更多的远程办公，更多的电影放映和更多的在线游戏。所有这些都推动了全球互联网流量的增长，而该流量已经以指数速度增长了很多年。为了满足这一需求，正在部署更多的数据中心。这解决了一个问题，但又增加了另一个问题 - 人类的碳足迹。为了防止该行业的碳排放上升到占世界能源消耗很大一部分的水平，数据中心需要使用耗电量很少的组件来构建。为了赢得销售，这些产品还必须具有竞争力的价格和紧凑，这样它们才能帮助将基础设施的空间最小化。

每个数据中心的关键组件是光收发器。为了增加传输容量，它必须包含 Mach-Zehnder 调制器，因为它们可以实现高波特率和用于高级调制格式的信号。

满足这些要求的一种有前途的技术是硅光子学。通过在大尺寸，廉价的硅晶圆上提供超紧凑型波导电路，可大大降低光子集成电路（PIC）的成本和尺寸。而且它还有另一个优点：它与 CMOS 制造技术兼容，这一特性为集成基于硅的 Mach-Zehnder 调制器、紧凑的波导滤波器、光纤耦合的光斑尺寸转换器、偏振旋转器和分束器以及 SOI 上的锗光电探测器打开了大门。今天，几家公司正在利用硅光子技术来设计和实现光收发器的商业化。

但是，基于硅的光收发器存在一个关键问题：由于硅的间接带隙，它缺少单片集成的激光二极管。因此，必须将外部激光二极管连接到光收发器，从而增加了尺寸和成本。

基于硅的 Mach-Zehnder 调制器还有另一个问题。它的调制效率很差，因为硅只能利用低效的载流子 - 等离子体效应。对于此类调制器，关键品质因数（称为半波电压长度乘积（$V_{\pi L}$））通常大于 1 V cm。这一高值阻碍了继续缩小硅基光收发器的尺寸和功耗的努力。

解决这些问题的一种具有吸引力的方法是将 III-V 半导体异质集成到硅基底上。一个很好的选择是基于 InP 的材料体系，这是一种成熟的用于制造电信应用的激光器材料。基于 InP 的材料的另一个特性是，由于其强的载流子 - 等离子体，能带填充和 Franz-Keldysh 效应，导致它们的折射率变化比硅大得多。这些现象有助于为小 $V_{\pi L}$ Mach-Zehnder 调制器制造高效移相器。

要生产采用该技术的收发器，需要将激光二

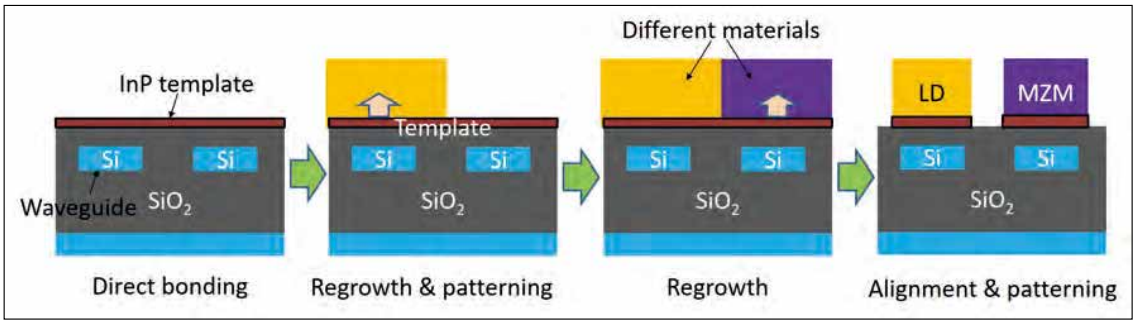


图1.通过直接键合和外延生长集成具有不同带隙的III-V半导体器件的过程。

极管和 Mach-Zehnder 调制器与硅基板集成在一起。一种方法是将不同的器件键合到硅波导电路。通过这种方法，激光二极管和 Mach-Zehnder 调制器可在不同的 III-V 半导体晶片上制备，然后再精确对准的将它们分别键合到硅波导电路上。这种方法的缺点是，实现集成大量组件高效产出具有挑战性。或者，可以通过在硅上外延生长不同的 III-V 来实现单片集成。由于光刻技术允许对所有器件进行图案化和对准，因此具有提供低成本，晶圆级集成的潜力。但是，由于 III-V 与硅的晶格失配，很难获得高质量的 III-Vs 外延层，因此无法保证成功。因此，无论采用哪种方法，都很难在硅基底上同时集成激光二极管和 Mach-Zehnder III-V 调制器。

混合解决方案

在日本神奈川县的 NTT 器件技术实验室，我们的团队正在开发一种新颖的制备方法来解决这些问题。我们的技术将直接键合和外延生长相结合，以将各种具有不同带隙的 III-V 器件集成在硅波导电路上（见图 1）。

首先将 III-V 模板键合到 SOI 晶圆上，该材料可以是 SiO_2 / 硅上的 InP 薄膜，然后在晶格匹配的模板上重新生长不同的材料。下一步是使用光刻工艺在硅波导电路上对准并图型化所有 III-V 器件。通过这种方法，以及在晶格匹配的模板上使用外延生长，我们可以集成具有不同带隙的各种高质量材料。正是这种高度的灵活性使我们能够集成许多高性能的 III-V 器件。

应用此技术时，我们必须考虑键合模板上外延层的临界厚度。该厚度由键合的 III-V 层和硅衬底的热膨胀系数之差确定。例如，对于在 600℃ 的硅基板上外延生长 InP 层而言，临界厚度为 430 nm。令人担忧的是，由于常规半导体激光二极管和 Mach-Zehnder III-V 调制器的典型厚度均为 2μm 至 3μm。由于这些器件比临界厚度要厚得多，因此很难通过外延生长工艺将传统的 III-V 半导体器件集成到硅基底上。

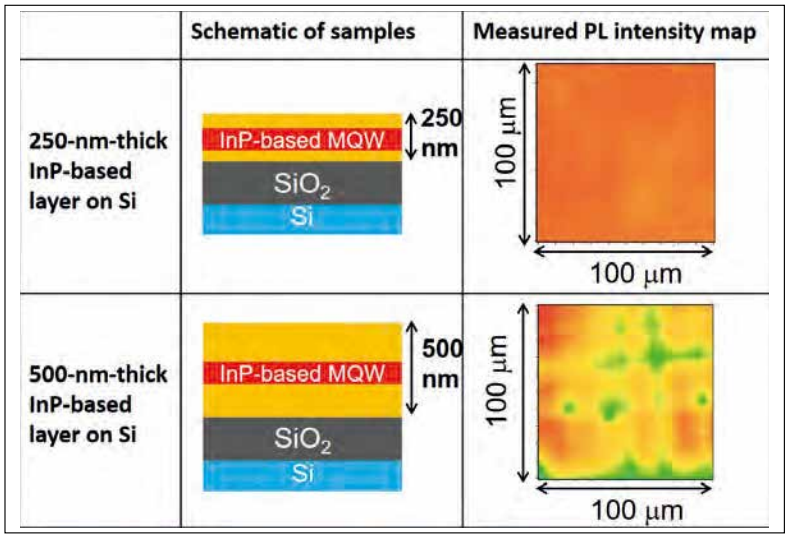


图2.键合到SiO_2/硅基板上的InP基薄膜，并在610℃退火30分钟后的光致发光强度分布。

膜器件

我们的解决方案是削减 III-V 层的厚度，因为这样可以减少外延生长过程中的热应变。这种方法的成功在光致发光强度的测量中得到了说明（见图 2）。据发现，在 MOCVD 室中退火 30 分钟之前（610℃，PH_3 气氛和 30 托），与 SiO_2 / 硅衬底键合的 InP 基层几乎没有应变。尽管在具有 500 nm 厚的 InP 基层（包括 150 nm 厚的多量子阱层）的结构上进行光致发光测量时，由于超过了临界厚度，出现了暗线，而 250 nm 厚且具有相同有源区的结构，由于较低的热应变而不会退化。这些结果突出了使用膜结构在硅衬底上外延生长的必要性。

基于这些发现，我们开发了用于硅基底上的激光器，光放大器和 Mach-Zehnder 调制器的薄膜埋入异质结构横向 p-i-n 和 p-n 二极管。请注意，掩埋异质结构是一个有价值的功能，可以有效限制载流子和光子。为了集成各种横向二极管器件，我们使用硅离子注入和锌热扩散工艺分别形成施

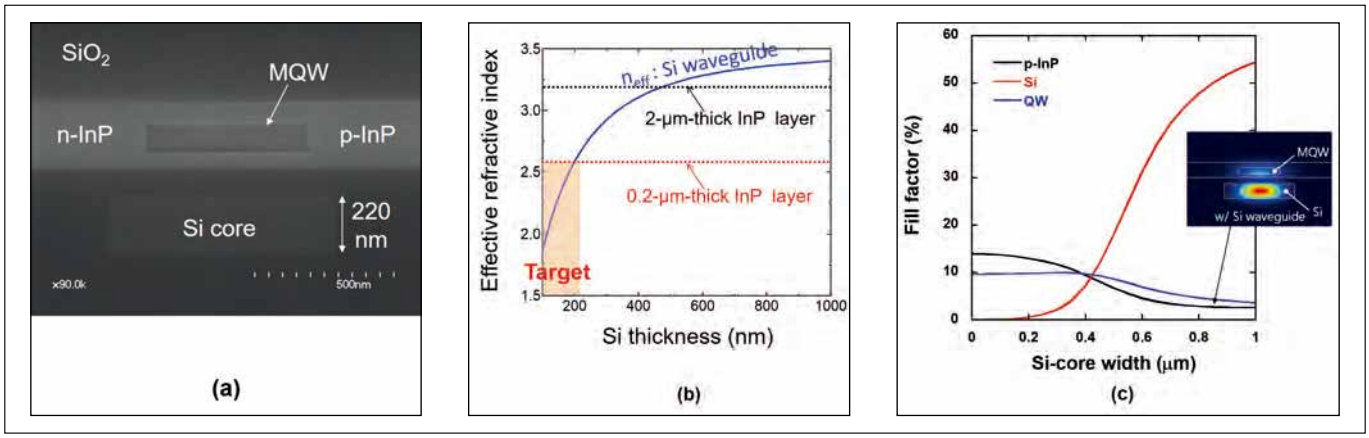


图3.（a）薄膜激光二极管的截面扫描电子显微镜。（b）计算的硅波导和InP层的有效折射率。（c）计算的多量子阱，p型InP和硅核中的填充因子。多量子阱核心的面积设置为0.6 ×0.1 μm^2。

主区和受主区。使用这些技术，我们通过光刻工艺定义了施主区和受主区，从而获得了激光二极管和 Mach-Zehnder 调制器的不同载流子分布。这对于在硅基底上集成激光二极管和 Mach-Zehnder 调制器至关重要。

使用这种方法，我们为激光二极管制造了一个横向电流注入 p-i-n 二极管（见图 3（a））。它的核心是一个多量子阱区，埋在 230 nm 厚的 InP 层中，并与硅波导区精确对准。这种膜掩埋异质结构克服了硅基底上典型的基于 InP 垂直二极管所面临的另一个问题 - 它提供了 III-V 和硅层之间的有效折射率匹配。

对于 InP 和硅层之间的光耦合，计算表明典型的垂直二极管需要厚度在 400 nm 至 500 nm 之间的硅波导层。但是，为低损耗和紧凑型沟道波导电路而广泛开发的硅波导的厚度仅为 220 nm（见图 3（b））。换句话说，典型的基于垂直 InP 器件与这些薄硅波导电路不兼容。幸运的是，我们的 InP 膜层不是这种情况，它比常规的 2 μm 厚的 InP 层薄得多，并且与广泛使用的 220 nm 的硅波导层相当。这意味着，由于有效的折射率匹配，很容易将基于 InP 的膜器件耦合到成熟的硅波导电路中。

多量子阱区和低损耗硅波导之间的高效光耦合是减少激光二极管内部光损耗的关键。 p 型多量子阱区中填充因子的计算表明，由于折射率匹

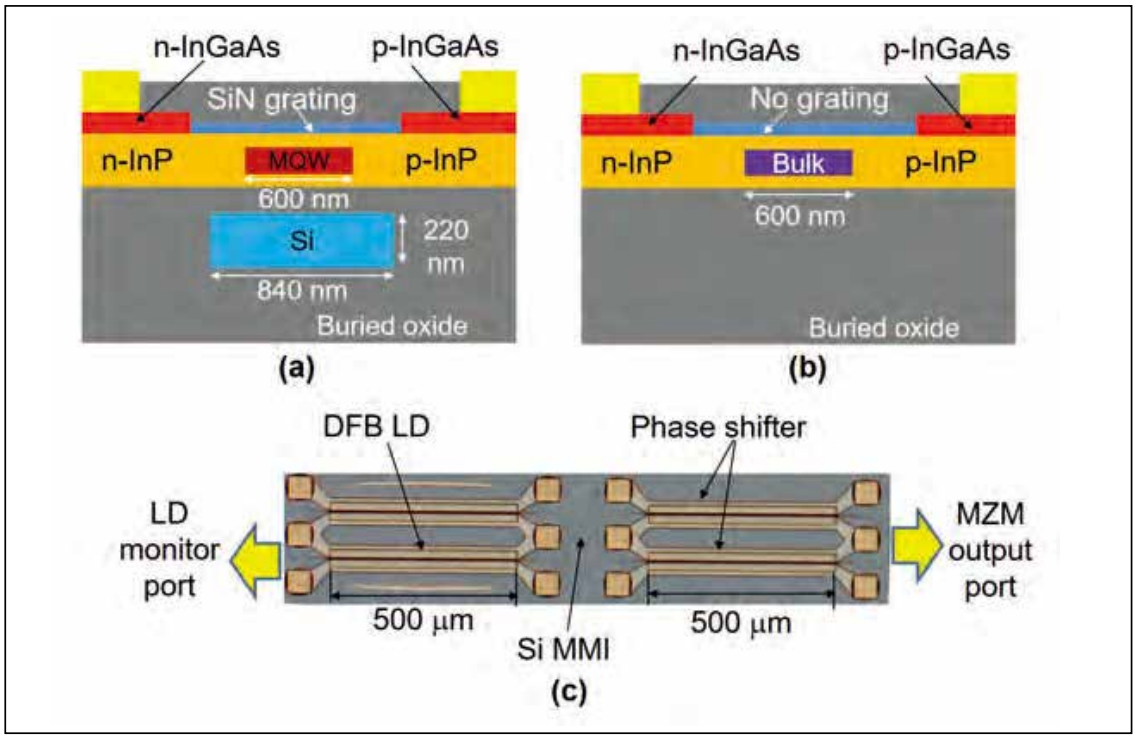


图4.（a）激光二极管和（b）移相器的横截面。（c）激光二极管和Mach-Zehnder调制器装置的显微镜图像。

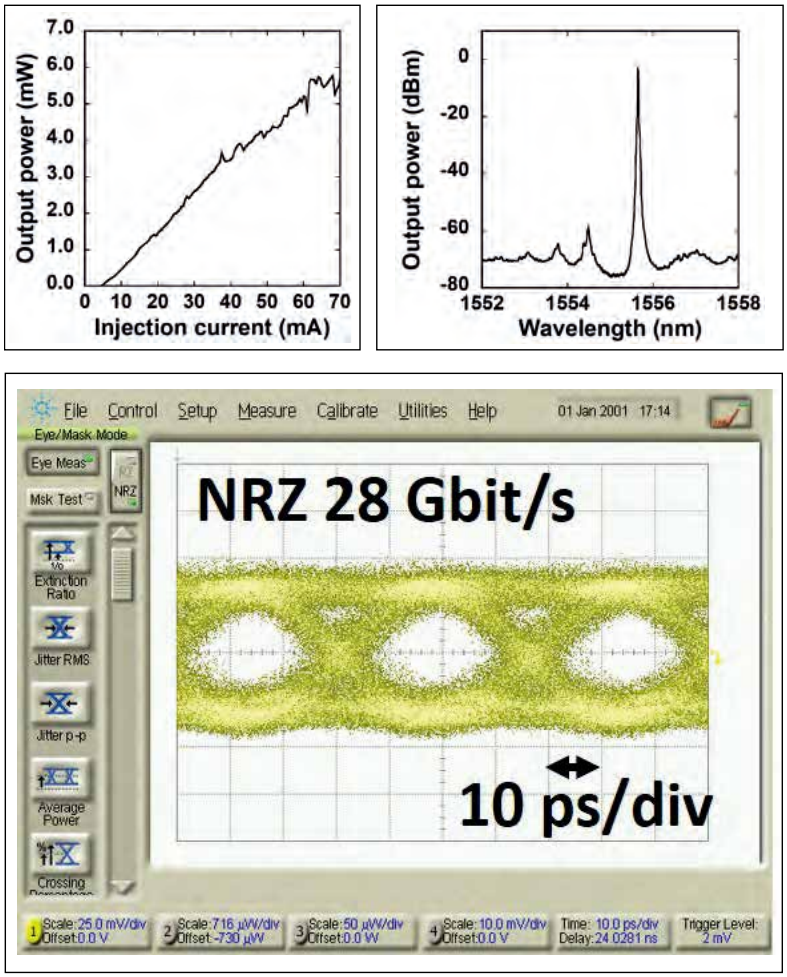


图5.（a）从激光器的激光二极管端口测得的光输出曲线。在该实验中，芯片小平面面向空气，由于小平面上的光反射，从而产生了功率波动。（b）使用50 mA的激光二极管电流和4.5 V的Mach-Zehnder调制器直流电压，从调制器测得的输出光谱。将折射率匹配油插入高数值孔径光纤和硅区之间以减少芯片小平面上的反射。（c）NRZ 28 Gbit / s信号测量眼图。

配，我们可以通过更改硅区的宽度来控制填充因子（参见图 3（c））。因此，可以通过增加与低损耗 220nm 厚的硅区的重叠来减少与大损耗 p 型 InP 区域的重叠。充分利用这一点，我们将硅区宽度设置为 840 nm，以在多量子阱中提供约 4% 的填充因子。我们可以在保持较小的多量子阱面积的同时更改膜结构的填充因子，从而降低阈值电流。所有这些灵活性可以帮助我们通过使用膜结构，在广泛开发的 220 nm 厚硅波导电路上获得高性能的激光二极管。

集成激光二极管和调制器

据计算，我们将膜激光二极管与基于 InP 的 Mach-Zehnder 调制器集成在硅基底上（我们的膜激光二极管和 Mach-Zehnder 调制器的移相器的横截面如图 4（a）和 4（b）所示）。对于这种特殊的设计，我们使用 InP 层顶部具有 SiN 光栅的 500 μm 长的分布式反馈激光器。为了确保在 C 波段工作，我们将激光二极管的多量子阱的光致发光峰值波长设置为 1.52 μm，将移相器的 n 型 InGaAsP 本体区的光致发光峰值波长设置为 1.3 μm。由于激光二极管和移相器均形成在 230 nm 厚的 InP 基层中，因此可以使用外延生长工艺将它们集成在硅基底上。

我们为高效率，载流子耗尽的 Mach-Zehnder 调制器设计了移相器。如图 4（b）所示，移相器的埋入式 InGaAsP 区不与硅波导耦合。通过这种设计，n 型 InGaAsP 区的填充系数约为 30% - 超过了厚度为 1 μm 至 2 μm 的常规 III-V 半导体移相器的相关值。通过对 n 型 InGaAsP 施加反向偏置，我们可以利用载流子等离子体效应，能带填充效应和 Franz-Keldysh 效应来有效地调制光学相位。这种类型的膜移相器的典型 $V_{\pi L}$ 约为 0.4 V cm，该数字远低于典型的硅载流子耗尽 Mach-Zehnder 调制器的数值，该调制器的 $V_{\pi L}$ 高于 1 V cm。膜结构的另一个属性是低电容，这对于减小移相器的电容电阻时间常数很有用。

在此成功的基础上，我们整合了组件，在硅波导上集成了一个 500 μm 长的 DFB 激光二极管，并连接到 Mach-Zehnder 调制器（请参见显微图像，如图 4（c）所示）。该调制器具有硅多模干涉仪和 500 μm 长的膜移相器。芯片小面上有一个面积为 3 × 3 μm^2 的 SiOx 区，专为低损耗光纤耦合而设计。狭窄的反向硅锥度的作用是将光模场直径从纳米线硅波导转换为 SiO_x 波导。SiO_x 纤芯可轻松连接光纤，实现低损耗和低反射。

我们的窄 InP 反向锥形设计用于在激光二极管或移相器与单模硅波导之间传输光模场。长度为 50 μm 且横截面积为 0.1 × 0.23 μm_2 的反锥度将光发射到横截面积为 0.44 × 0.22 μm_2 的单模硅波导中。由于锥形尖端的纵横比远低于常规 InP 器件的纵横比，因此使用成熟工艺来制造这种狭窄的膜锥度相对容易。使用此模式转换器，我们将薄膜激光二极管和移相器与硅波导集成在一起，实现了低损耗和低反射。

为了在硅基底上实现激光二极管和 Mach-Zehnder 调制器的片级集成，我们将 SOI 晶片上的硅波导图形化，然后将其埋入 SiO_2 覆盖层中。对该包层进行化学机械抛光可使其表面平坦化，并将其在硅波导上的厚度减小至 100 nm。此后，我们去除 InP 衬底。除激光二极管区域外，整个多量子阱层均被去除，从而在整个晶圆上留下

50 nm 厚的 InP 模板。然后，在通过光刻将激光二极管和移相器的区域图形化之前，为移相器重新外延生长 n 型 InGaAsP 本体层。接下来的步骤是：重新外延生长 InP 层以形成掩埋的异质结构；InGaAs 接触层的重新外延生长；然后通过光刻对施主区和受主区进行图形化，通过硅离子注入和锌热扩散来实现。后面的步骤使我们能够为整个晶片上的激光二极管和移相器获得不同的载流子轮廓。在转向后端工艺之前，该制造过程包括对 InGaAs 接触层和 InP 台面和锥度进行图形化，以用于添加电极并生产用于光纤耦合的大型二氧化硅基纤芯，这是在低于 200℃ 的温度下制备的，可以避免损坏 III-V 器件。

久经考验的成功

用光电探测器直接面对芯片面检测总输出功率，结果表明，阈值电流仅为 4.5 mA（见图 5（a））。考虑到激光二极管的有效长度为 500 μm，阈值电流较低归因于较小的有效面积。将注入电流增加到 70 mA，可将输出功率提高到 5.5 mW 左右。该结果表明我们避免了再生长过程中对活性层的致命损害，并且基于 InP 的膜层有利于减少外延生长过程中的热应变。

为了评估 Mach-Zehnder 调制器输出端口的输出功率，我们将高数值孔径的光纤对准了芯片端面的二氧化硅纤芯。当以 70 mA 的电流驱动激光二极管时，光纤耦合的输出功率达到 2.9 mW，并通过移相器的 DC 偏置进行调整，从而使被测端口的输出功率最大化。我们将这种高输出功率归因于薄膜激光器的高效发光，以及 Mach-Zehnder 调制器和光斑尺寸转换器的低损耗。

其他测量结果表明，Mach-Zehnder 调制器的半波电压（Vp）约为 7.5V。由此可见，VpL 约为 0.4 V cm，该值比典型的硅载流子耗尽 Mach-Zehnder 调制器小三倍以上。这些结果表明，我们已经成功地在硅基底上集成了基于 InP 的高效 Mach-Zehnder 调制器。

我们还演示了激光二极管和 Mach-Zehnder 调制器集成器件的动态调制。对于 Mach-Zehnder 调制器，使用 4.5 V 的 DC 偏置电压，以确保调制非归零信号，我们研究了激光二极管在不同驱动电流下的输出频谱。这些测量是在没有射频输入到移相器的情况下进行的，显示了单模激射，其侧模抑制比约为 55 dB，驱动电流为 50 mA（见图 5（b））。

为了评估我们设计的调制能力，我们将来自脉冲模式发生器的 RF 信号输入 Mach-Zehnder 调制器中的一个移相器。在以下条件下产生了清晰的眼图张开：42 mA 的激光二极管电流；不归零的 28 Gbit / s 信号；Mach-Zehnder 调制器没有 50Ω 阻抗匹配。

我们的下一个目标是使用我们的技术来集成窄线宽激光二极管以及用于电信系统中光收发器的同相和正交调制器。未来，我们平台的用途将会扩展，因为它不仅限于集成激光二极管和 Mach-Zehnder 调制器，还可以用于在硅基底上构造具有不同带隙的其他 III-V 器件。这种优点使我们的技术成为构建低成本，大规模，高性能 PIC 的理想选择，这些 PIC 具有适用于各种应用的功能。CSc

扩展阅读

T. Hiraki et al. “Integrated DFB Laser Diode and High-efficiency Mach-Zehnder Modulator using Membrane III-V Semiconductors on Si Photonics Platform,” 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, U.S.A, 33.4 (2019)

T. Fujii et al IET Optoelectron. 9 151 (2015)

S. Matsuo et al. Opt. Express 22 12139 (2014)



六结超级电池

将电池结数量增加到 6 个，能将太阳能效率推向一个新的高度，并为突破 50% 的障碍提供一条路径。

RICHARD STEVENSON

每一个高效太阳能电池的开发者都会去拉两大杠杆：一个是增加更多的结，因为这能从太阳吸收的能量得到更好的利用；另一个是使用镜子或透镜，将太阳光汇聚。但要实现真正的高效率，设计的质量及其执行必须达到一流。

那些为太阳能效率设立新基准的公司，往往会将辛勤积累的专业知识与优秀的设计相结合。这一点在破纪录的创新六结电池中就很明显，该电池由 John Geisz 和同事最近发布，他们来自坐落于美国科罗拉多州戈登市（Golden）的国家可再生能源实验室 (NREL)。他们的器件效率超过 47%，通过解决相对较高的电阻，效率可以达到 50%。

这个团队的成功借鉴了数十年来多结电池的发展成果。上世纪 90 年代中期，多结电池首次登上头条，当时是双结电池开始超越单结竞争对手。在随后的十年中，三结电池取得了进一步的进展，这种电池最初是通过在锗衬底上形成锗电池，再添加 InGaAs 和 GaInP 等子电池制成的。NREL 的一个团队与美国 Spectrolab 公司的工程师合作，在这方面取得了很大的进展，在 1999 年 11 月报告了约 32% 的效率。该小组和其他小组对这一设计进行了改进，为实现 40% 的效率铺平了道路。

虽然这种方法使效率远远超过了最好的单结电池的效率，但它也只能走到这一步。部分问题在于，该设计将禁带的选择限制在与衬底晶格匹配的禁带上，以保持晶体质量。如果不能应用一组最佳的禁带，效率就会受到影响。另一个障碍是，虽然使用锗很方便，可以使底层结点与衬底的材料相同，但它不是最佳选择。由于它的间接性，其效率落后于 III-Vs。后者还能从 III-V 异质结的插入得益，该异质结可提供钝化作用并在界面处消除耗能的少数载流子复合。

为了克服与锗底结相关的所有这些限制，在“九十年代”，来自 NREL 的研究人员开创了一种倒置变形设计。它的特点是颠倒了电池的生长顺序。生长从两个高能量子电池开始，这两个子电池与 GaAs 衬底进行晶格匹配，然后用渐变结构改变晶格常数，然后再添加第三个低能量电池。器件翻转后，衬底去除，使光通过能量最高的子电池进入器件。其结果是，通过颠倒生长顺序，让两个电池而不是一个，与衬底的晶格匹配，从

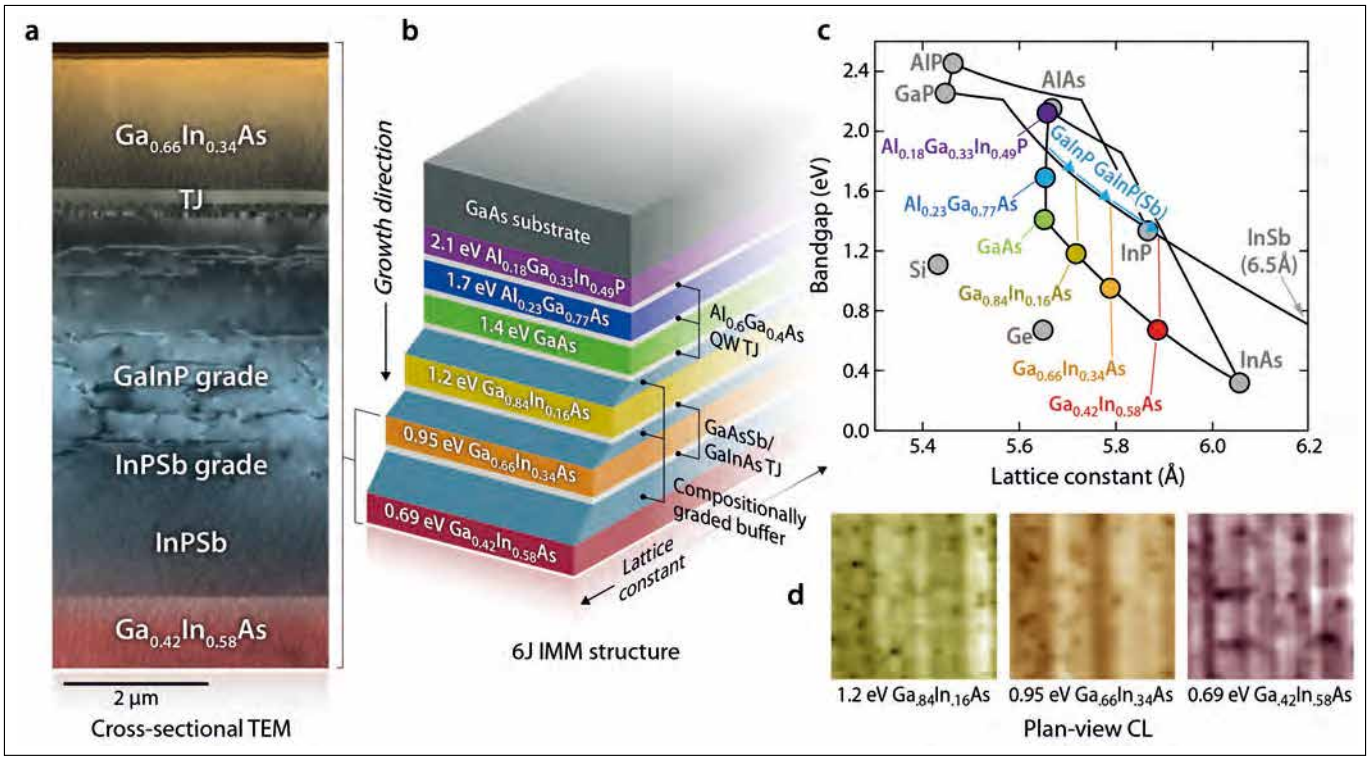


图1：NREL的研究人员已经生产出了一种效率破纪录的六结太阳能电池。倒置变形设计的特点是GaInP和InPSb分级层 (a)各种隧道结 (b)以及使用不同晶格常数的子电池 (c)通过阴极发光检查材料质量 (d)发现每个子电池中的穿透位错密度低至$10^6 cm^{-2}$左右。在一个日照下运行，六结电池的开路电压为5.55 V，而填充因子为83.5%，短路电流密度为8.46 mA cm^{-2}。在143个日照下，即提供最高效率的浓度，开路电压增加到6.29 V，填充因子攀升到87.2%，短路电流密度达到1.23 A cm^{-2}。摘自《自然能源》J.Geisz等。https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5

而提高了器件的材料质量，最终获得可能的更高效率。许多小组采用了这种新的三结架构，竞争促使效率从低于 40% 提升到显著高于 40%。

在过去的十年里，一些激进的设计将效率进一步提升了。2010 年末，Spire 半导体公司以一种在衬底两侧都装有电池的器件抢占了纪录。在 406 个日照下运行，它的效率刚刚超过 42%。为了超越它，美国初创公司 Solar Junction 使用了一种具有新功能的晶格匹配器件——底部结的稀释氮化物。2011 年 4 月，他们将效率提高到 43.5%（在 418 个日照下实现），之后取得了更多进展，2012 年 10 月报告，一个器件在 947 个日照下运行效率达到了 44%。

2013 年夏天，三结倒置变形电池短暂地重回中心地位。这次的成功来自 Sharp 公司，生产出了在 302 个日照下效率高达 44.4% 的器件。

从那时起，破纪录的电池至少有四个结。法国公司 Soitec 通过借鉴晶圆键合方面的专业知识，从 Solar Junction 手中夺走了纪录。通过将一对双结器件组合起来，设计者可以在选择电池的晶格常数时获得更大的自由度。他们与德国 Fraunhofer 太阳能系统研究所的研究人员合作完善这项技术，产生了效率为 46% 的电池。这一纪录于 2014 年底被报道，其保持时间远远超过了先前的纪录。

六结的成功

为了打破这一纪录，Geisz 和同事们又回到了倒置变形设计，但将结点数量提升到了 6 个。帮助他们成功的是他们之前在一个四结器件上的工作，用一对 InGaAs 电池取代了一个 InGaAs 电池。这种改造在 690 个日照时产生了 45.6% 的效率，仅低于用晶圆键合电池实现的记录。

尽管 Geisz 多年来在倒置变形方面取得了很大的成功，但他并没有对其他方法不屑一顾。他认为稀释氮化物非常有前途，但也很有挑战性，在千禧年前后，他曾花了很多时间试图制造包含这种材料体系的高性能器件。然而，他从未在稀释氮化物上获得显著成功。“至少通过 MOCVD，我们还没能获得像变形 InGaAs 那样好的质量。Solar Junction 取得了很多好的成果，但他们是通过 MBE 来实现的。”

Geisz 认为，另一种在近期生产出破纪录电池的方法 -- 晶圆键合，也有很多优点。“当我们

开始六结项目时，晶圆键合是我们想要研究的途径之一。它真的很有前途。”

但是，与晶圆键合相关的设计自由度需要付出代价——相对较高的成本，因为需要两倍的生长和两倍的衬底。

从三个结点的倒置变形开始，再到四结的设计，似乎发展到五结是合乎逻辑的方向。但事实并非如此，Geisz 说：“我们的工作直接在 6 结上获得了最大收益。六结是一种天然的最佳结数。”

制造 NREL 的破纪录电池，首先要将 GaAs 衬底装入 MOCVD 室，生长 140 层。这需要约 7 个半小时，而原来的三结电池只要 3 个小时，大约有 60 层。但请注意，相比其他常用的沉积这些层的方法，如 MBE，MOCVD 要更受欢迎，因为生长配方可以更好地缩放比例，生长速率更高，并且更容易将所有层及其掺杂物的源引入腔室中。

六结结构的生长始于 $Al_{0.18}Ga_{0.33}In_{0.49}P$(2.1 eV) 和 $Al_{0.23}Ga_{0.77}As$(1.7 eV) 的晶格匹配电池。它们取代了三结或四结器件中的单个 GaInP 电池。之后是 GaAs，唯一的二元电池。“这确实是一种很好的材料，所以只要有可能，我们就喜欢使用砷化镓。”Geisz 解释说。

接下来是最彻底的改变。与其仅用一个结来收集所有的低能光子，不如采用三个结，并由成分分级的缓冲区分开。Geisz 认为，这样做的理由是太阳辐射有很大一部分在红外区域。

为了生产这三个电池之间的缓冲区——它们由 $Ga_{0.84}In_{0.16}As$(1.2 eV)、$Ga_{0.68}In_{0.34}As$(0.95 eV) 和 $Ga_{0.42}In_{0.58}As$(0.69 eV) 组成，变形概念被推到了极限。“我们正在将其分级，超出磷化铟的晶格常数，”Geisz 说。“我们使用了大约 4.2% 的晶格失配。”

缓冲层：砷化物 vs 磷化物

当 Geisz 和他的同事开始开发他们的六结电池时，他们使用 AlGaInAs 作为分级层。最近，他们改用能为底部结提供更好性能的 GaInP。

“使用磷化物是昂贵的，而且对反应器的要求很高。”Geisz 一边这样警告一边又认为必须与磷化物的良好特性相权衡，“磷化铟镓中的排序倾向于稳定相分离，并给予位错一些优先滑移。”

由于这个原因，位错被限制在非活性区域，提高了效率。当用透射电子显微镜和阴极荧光仔细观察材料时就可以看到好处，这些技术揭示了子电池中典型的穿透位错密度为 $10^6 cm^{-2}$。

与其他多结电池一样，隧道结提供了子电池之间的电连接。$Al_{0.6}Ga_{0.4}As$ 层和 GaAs 量子阱

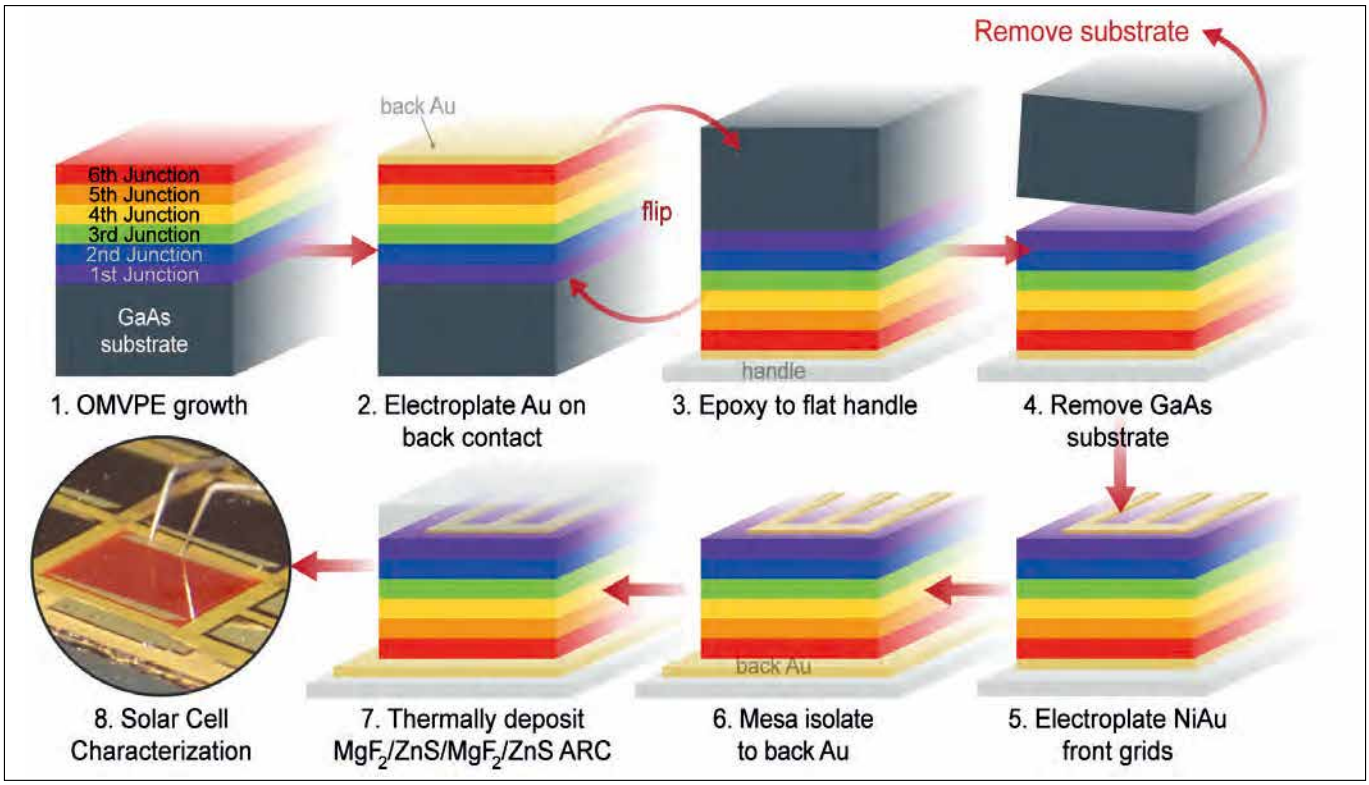


图2：六结太阳能电池的制造始于半导体叠层的外延生长，然后是金膜的沉积。将此金层粘合到支撑基板后，剥离衬底，然后再添加栅格和抗反射涂层。摘自J. Geisz et al. Nature Energy https://doi.org/10.1038/s41560-020-0598-5

的组合用于前三个隧道结，以确保透明度，但这不适用于最后两个。在连接变形电池时，该团队开发了变形隧道结，由碳掺杂 GaAsSb 和硒掺杂 GaInAs 制成。

对 NREL 破纪录的六结装置的测量显示，在 143 个日照时，效率达到 47.1% 的峰值。在更高的日照下，降幅也不大，在 1116 个日照时仍然有 44.9% 的效率，令人印象深刻。通过调整设计，Geisz 和同事们还生产了一种在 1 个日照时达到最高效率的装置。它的特点是由 $Al_{0.03}Ga_{0.97}As$ 而不是 GaAs 制成第三个子电池，可产生 39.2% 的效率，虽然比之前五结键合电池的最高效率 38.8% 要好，但它并没有被纳入到正式记录中，因为资格限制要求电池的最小尺寸为 1cm × 1cm。

虽然这种六结光伏电池为单位面积效率和发电量设定了新的基准，明显适合用于聚光系统的核心，但它在无人驾驶飞行器中也是一个非常有吸引力的候选产品，因为其出色的功率 - 重量比是一笔巨大的财富。

多结电池的另一个市场是在太空，为卫星供电。为了确保最新的 NREL 器件在这一应用中发挥最佳性能，需要对所有六个电池的成分和厚度进行修改。但即使这些改动都顺利得到了优化，也还有与抗辐射强度相关的担忧。

“一般来说，砷化物的抗辐射性不如磷化材料。”Geisz 说，在他团队破纪录的电池的变形结中，他使用了一种三元砷化物 InGaAs。

为了看看这是否会成为一个硬伤，研究人员现在开始研究抗辐射性能问题。Geisz 承认：“目前还不清楚抗辐射性的最大问题是什么。”他表示，研究将从考虑器件中的位错影响开始。

该团队的另一个目标是削减他们六结电池的内阻。目前，它的内阻大约是其三结和四结同类电池的十倍，这是因为其生长时间较长、生长温度较高，导致锌扩散更加明显；顶部子电池中铝的比例相对较高，降低了载流子的迁移率，导致晶格之间的电阻增加。

达到 50%

如果六结设计的内阻能够降低到 0.15 Ω cm^2 左右（在结数较少的电池中实现的值），那么效率应该会提高到 50% 以上。此外，效率的峰值应该会移至更高的浓度。这意味着即使不提高材料质量，在 1000 个日照下效率也能超过 50%。

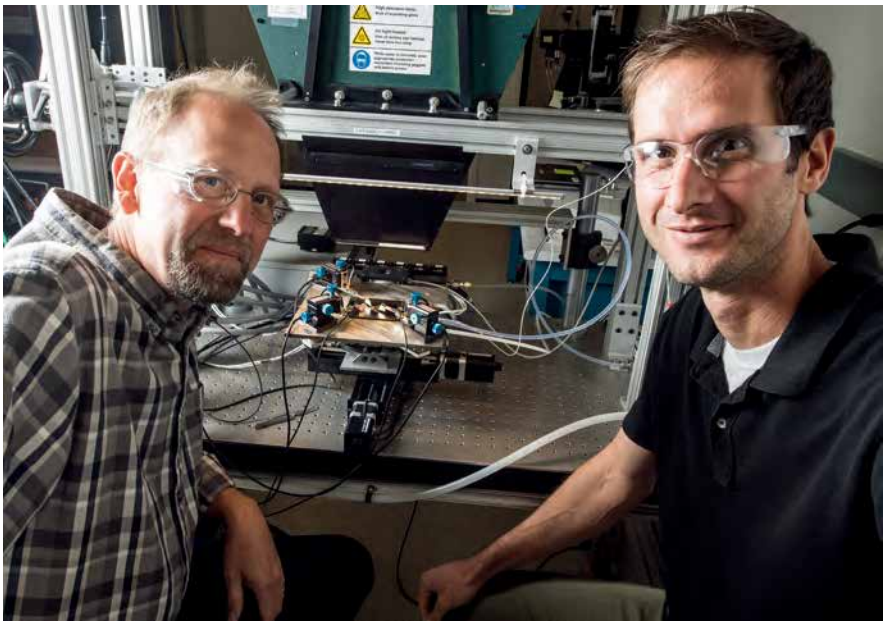
破纪录的效率结合达成更好性能的明确方法，将引起全世界多结电池制造商的兴趣。幸运的是，NREL 非常愿意与电池制造商合作。

“我们一直是直接把技术放到公开文献中，希望有人会使用它，”Geisz 说，“我们是由美国能源部资助的，我们希望开发这项技术以造福所有人。”

虽然超过 50% 的效率对多结电池来说是一个实质性的里程碑，但这绝不是可能的极限。即使是保守的计算也表明，效率的上限高达 62%（在 1000 个日照浓度下实现）。

逼近这个目标不是该团队的唯一目标。其近期目标之一是降低这些器件的成本，使 III-V 太阳能电池能够与硅技术竞争。这是一个实质性的挑战，但倒置变形在一个方面占了上风——它允许重复使用衬底，这是削减材料成本的一个颇具前景的选择。“我们还在研究超高效结构的简化，”Geisz 补充说，这提供了另一条让高效变得可负担成本的途径。

简化结构的尝试可能会导致更少的结。“看起来 6 结似乎有点多，我们可能希望在这方面有所倒退，”Geisz 说。因此，不要指望 NREL 会在一两年内报告破纪录的七八结电池。“永远不要说永远，但似乎六结是实用水平上的最高结数了。”CSC



位于科罗拉多州戈登市（Golden）的NREL开发六结电池的工作是由高效晶体光伏小组的首席科学家John Geisz（左）领导的。该团队的一位重要成员是Ryan France（右）。图片来源：NREL的Dennis Schroeder

广告索引 Advertisers & Web Index

Advertiser	广告商名称	网址	页码
昂坤视觉		www.akoptics.com	9
CREE		wolfspeed.com/cschina-wolfpack	1
创道咨询			IFC
福禄克		www.fluke.com.cn	3
INNOLAS		innolas-semiconductor.com	55
2021集邦咨询新型显示产业研讨会		www.trendforce.cn	IBC
纳设智能		www.naso-tech.com	45
SEMICON China 2021		www.semiconchina.org www.fpdchina.org	BC

欢迎投稿

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

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

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

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

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

文章投稿指南

1. 文章主题突出、结构严谨、短小精悍，中文字数不超过 3,000 字；
2. 文章最好配有两幅至四幅与内容相关的插图或表格；插图与表格分别用图 1、图 2 或表 1、表 2 的次序编号，编号与文中的图表编号一致；
3. 请注明作者姓名、职务及所在公司或机构的名称。作者人数以四人为限；
4. 请勿一稿多投；
5. 请随稿件注明联系方式（邮编、地址、电话、电子邮件）。

新产品投稿指南

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

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

如果您有什么意见或建议，或者有什么想法同本刊编辑探讨，请不吝赐教。

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

Editor in China(中国版编辑)
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)
Mark Mak (麦协和)
markm@actintl.com.hk
Tel: 852-2838 6298

China (中国)

Shenzhen (深圳)
Jenny Li (李文娟)
jennyl@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)
amberl@actintl.com.hk
Linda Li (李承珍)
lindal@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)
Regional Sales Director
Mark Mak (麦协和)
markm@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

2021-3-3 中国 · 深圳

集邦咨询新型显示产业研讨会

主办单位：TrendForce 集邦咨询 LEDinside WitsView　协办单位：isle

支持单位：AIXTRON 国星光电 NATIONSTAR MC SEMITEK Kinglight 晶台光电 KONKA 康佳 Radiant 雷曼光电 uniview 宇视

地　　点：深圳国际会展中心（宝安新馆）

议程信息

时 间	主 题	主 讲 人
9:30-10:10	签到	
10:10-10:20	开幕致词	集邦科技　执行长　林启东
10:20-10:45	2021年新型显示技术展望	集邦科技　研究副总　储于超
10:45-11:10	Mini LED背光市场商业化进程	国星光电
11:10-11:35	8K Micro LED超高清显示技术下的应用	雷曼光电
11:35-12:00	LED显示屏于安防监控系统的应用	浙江宇视显控副总经理　雷涛
12:00-13:00	午休	
13:00-13:25	Mini/Micro LED关键技术解析	晶电/瑞仪光电/台表科（拟邀）
13:25-13:50	Mini/Micro LED量产的重要保障	爱思强
13:50-14:15	商显时代，智享生活	视源股份/利亚德/洲明（拟邀）
14:15-14:40	集成封装技术在Mini/Micro LED显示应用分析	晶台股份
14:40-14:50	休息	
14:50-15:15	Micro LED应用趋势解析	康佳集团　显示设计与工业设计中心总经理　林伟瀚
15:15-15:40	Mini LED背光源芯片级解决方案	华灿光电
15:40-16:05	2021全球LED显示屏市场机遇与挑战	LEDinside资深分析师　余彬
16:05-16:50	沙发论坛（提问交流）	特邀嘉宾

票务

程雪贞（Calla Cheng）
电话：0755-82838931-6805
手机：18128855930(微信同号)
邮箱：callacheng@trendforce.cn

赞助

王春胜（Perry Wang）
电话：0755-82838931-6800
手机：13825284100(微信同号)
邮箱：perrywang@trendforce.cn

免费报名

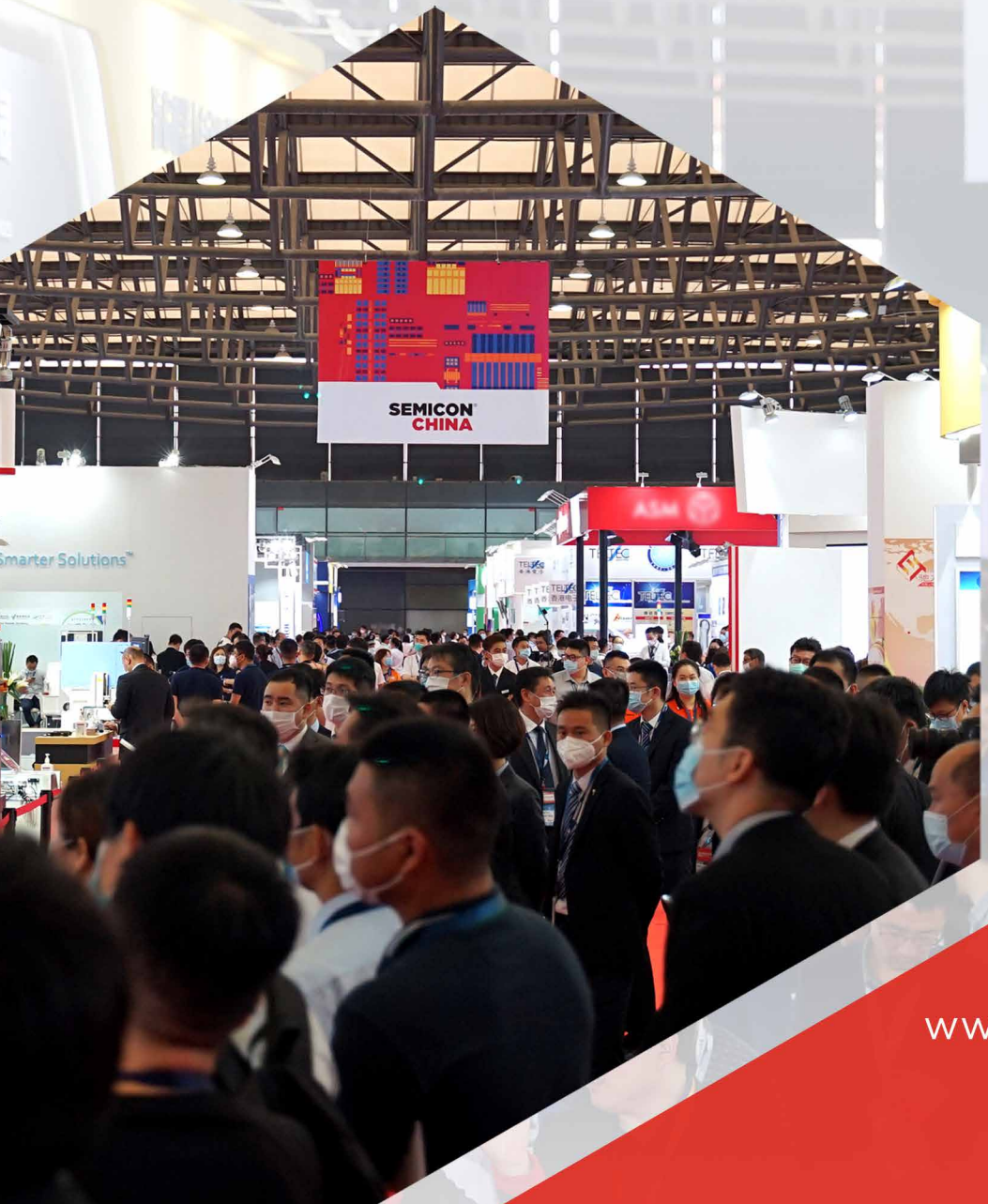
semi

SEMICON® CHINA
FPDCHINA 跨界全球·心芯相联

国际半导体专业展

CONNECT · COLLABORATE · INNOVATE

2021年3月17—19日　上海新国际博览中心



预注册赢iWatch!

www.semiconchina.org
www.fpdchina.org