

化合物半导体

CS **COMPOUND**
SEMICONDUCTOR
Connecting the Compound Semiconductor Community

• CHINA

2021年 4/5月

扩展GaN功率放大器的带宽



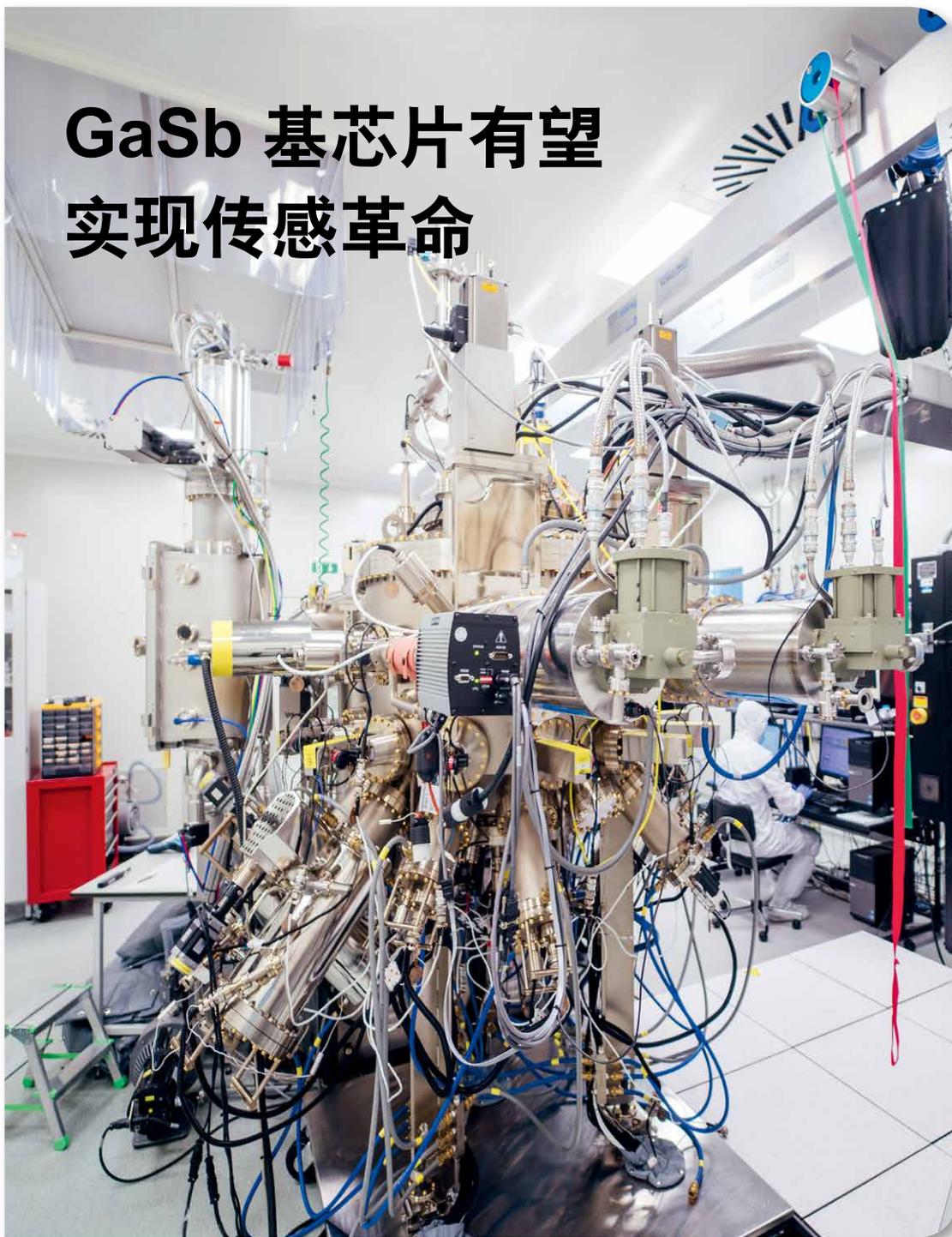
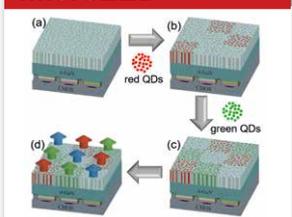
用纳米线瞄准电信



新冠肺炎喜忧参半



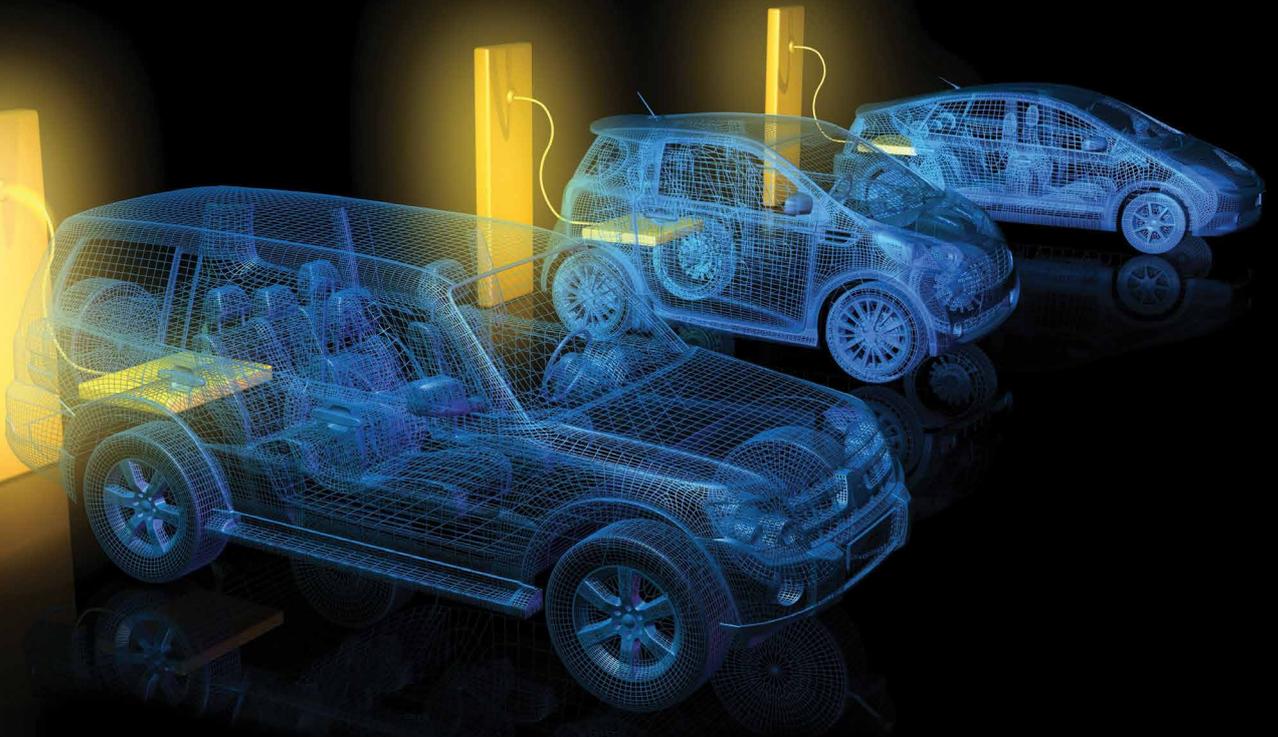
纳米多孔GaN助力microLED



GaSb 基芯片有望实现传感革命

ACT





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



免费
订阅

扫一扫添加
ACT读者服务号免费订阅

雅时国际通讯 (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

09 GaSb基芯片有望实现传感革命

GaSb-based chips promise a sensing revolution

一提起红外芯片，您大概会想到InP。这是因为InP及其合金在光谱领域取得了巨大的成功，为长距离光通信提供了数不尽的激光和探测器。但是InP只能到此为止了。虽然InP是近红外领域的第一选择，但是如果您想在这个方向上走得更远，同时保留带间跃迁，则需要考虑另一类材料。GaSb材料体系是最佳选项，它为光学传感革命铺平了道路。

- KRISTIJONAS VIZBARAS, BROLIS传感科技

编者话 Editor's Note

04 碳化硅的“上车”之路

The road of silicon carbide "on the car"

- 陆敏

业界动态 Industry

05 小米进军智能电动汽车行业 10年投资100亿美元

Xiaomi enters the smart electric vehicle industry, invests 10 billion US dollars in 10 years

05 英特尔将在未来6-9月内开始生产汽车芯片

Intel will start producing automotive chips in the next 6-9 months

06 SEMI报告：2020年全球半导体设备销售额激增19%，达到712亿美元的行业新高

SEMI report: Global semiconductor equipment sales surge 19% in 2020, reaching an industry high of 71.2 billion US dollars

06 湖南大学无锡半导体先进制造研究院签约落户锡山区

Wuxi Semiconductor Advanced Manufacturing Research Institute of Hunan University signed a contract to settle in Xishan District

07 湖南十四五规划纲要出台：设定全国最大碳化硅全产业链生产基地目标

Hunan's Fourteenth Five-Year Plan Outline: Set the goal of the country's largest production base of silicon carbide industry chain

08 华域三电与罗姆成立“技术联合实验室”并举行启动仪式

Huayu Sanden and ROHM established "Technology Joint Laboratory" and held a launching ceremony

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，以及相关市场分析和动态。

About Compound Semiconductor China

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



扫一扫
免费下载电子书



- 08 **总投资10亿元 采埃孚电驱动制造项目开工**
With a total investment of 1 billion yuan, the ZF electric drive manufacturing project starts
- 30 **2020年AXT收入增长15%**
AXT Revenue Grows 15 Percent Year-on-Year

技术Technology

- 14 **纳米多孔Ga_N助力microLED**
Nano-porous GaN enhances microLEDs
- JIE SONG和CHEN CHEN, SAPHLUX
- 18 **新冠肺炎喜忧参半**
Covid-19 delivers a mixed blessing
- 理查德·史蒂文森(Richard Stevenson)
- 26 **用纳米线瞄准电信**
Targeting telecoms with nanowires
- 张国强, NTT公司
- 31 **扩展Ga_N功率放大器的带宽**
Stretching the bandwidth of GaN power amplifiers
- 理查德·史蒂文森(Richard Stevenson)

科技前沿 Research Review

- 37 **超临界二氧化碳孕育出性能出众的MOSFET**
Supercritical carbon dioxide spawns superior MOSFETs
- 38 **构建更好的Ga₂O₃晶体管**
Building better Ga₂O₃ transistors
- 39 **AIPN扩展了氮化物家族**
AIPN enlarges the nitride family
- 40 **广告索引 Advertisement Index**

关于雅时国际商讯 (ACT International)

ACT 雅时国际商讯 (ACT International) 成立于1998年, 为高速增长的中国市场中广大高技术行业服务。ACT通过它的一系列产品—包括杂志和网上出版物、培训、会议和活动—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



用心做设备 助力中国芯

减薄·抛光·CMP



扫码关注

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

碳化硅的“上车”之路

众所周知，因特斯拉 model 3 主驱采用全碳化硅模块，开启了碳化硅大批量应用的“上车”之路。到目前为止，model 3 全球销售近 100 万辆，连续 3 年荣登全球销售冠军车型宝座，足以证明碳化硅上车，在技术、产业及市场等层面都没有问题。碳化硅模块的优越性能可以增加汽车 5-10% 的续航里程，提速更快，充电更快及充电更省电（若配置相同体结的碳化硅 OBC），不过价格也更贵。（以上都是与硅器件的比较）

碳化硅“上车”不是独占性的技术与应用，因为车上早就有了成熟的技术一老大哥“硅”，因此碳化硅“上车”必将引来“硅”的强势堵截，具体的竞争的“领地”有主逆变器、OBC 及 DC/DC。当然车上的其他芯片“领地”，如 MCU、AI 及 CMOS 图像传感器等信息、智能、控制芯片仍然是“硅”的囊中之物，无人能够匹敌。碳化硅虽然有以上所说的这些优越性能，但这些是不是消费者的硬需求或使用痛点，这就决定了大家愿不愿意为这些好处买单，这其实是个很敏感的市场问题，还是留给市场去解决吧。另外，汽车产业是个传统行业，同时汽车安全关系到“生死攸关”的问题，因此供应链系统一直是很严谨和保守的，所以进入 OEM 整车厂合格供应商目录是很困难的，与之相关联的技术、可靠性及供货能力门槛都是很高的，及认证周期也是很漫长的。电动汽车脱胎于传统汽车行业，固然有其新兴业态的特征，但以上高门槛及长认证周期特性是一如既往的。我们常听说的 AEC-Q101 产品认证、IATF16949 体系认证只是进入车规应用的敲门砖，即必备的最低要求，更为严苛的是客户的认证。

现今，除了特斯拉一款车型使用了碳化硅外，比亚迪在 BYD 汉车型上也采用了全碳化硅模块主逆变器，在 OBC 上采用碳化硅技术的大概还有几十家车企，不过，碳化硅在车用功率器件市场的渗透率也就 5% 左右，当然现在在很多器件厂商，如 Wolfspeed、英飞凌、罗姆、安森美等都与 Tier1 或整车厂在展开各种合作，为碳化硅“上车”做着充分的紧锣密鼓的准备，因为毕竟这是一块每年几百亿美金的未来“大蛋糕”，谁都不愿意错过。

基于以上原因，碳化硅的“上车”之路将是持久的，其市场的渗透速度取决于碳化硅价格的下降速度（核心是碳化硅衬底价格的下降），估计到 2030 或 2035 年左右碳化硅在车用功率器件市场的渗透率将达到 50% 左右，因此碳化硅与硅在车上将长期共存，碳化硅首先会在价格不敏感的中高端车型上迅速铺开，然后在后期价格下降到一定空间之后杀入市场容量最大的中低端车市场。渗透周期长其实也是个好事，这样可以给这个行业更多的时间来成长，同时给“后来者”更多的时间及机会来赶超“先行者”，这恰恰也是我们国产替代最好的境遇。

在这条车规赛道上，谁将最终胜出，我看主要比拼的有以下几点：

1、技术为王，王者技术不是最先进的技术，而是最好用的技术，低成本高性能的技术，如长晶技术及封装技术方面，尤其需要突破，一个是关乎买得起的问题，另一个是关乎用得好的问题。

2、管理为本，一旦进入 OEM 供应链，其需求量是相当可观的，必须有一个很大的可靠稳定安全的产能来支撑，没有一套严格先进成熟的管理体系，恐怕难以胜任。

3、合作为魂，车规应用高门槛长周期，其核心是供需之间必须建立牢固可靠的信任关系，只有这样，才能高效的沟通，快速的解决问题，高效的技术迭代，为客户制造出安全可靠性价比优异的电动汽车。故在一开始就应该建立衬底外延 - 器件模块 - Tier1-OEM 供应链合作联盟，展开深度的实际合作，逐步建立完备的互信关系。

总之，碳化硅“上车”之路，路漫漫其修远兮，谁将笑到最后，请拭目以待。



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

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

北京 Beijing

Tel/Fax: 86 10 64187252

上海 Shanghai

Tel: 86 21 62511200
Fax: 86 21 52410030

深圳 Shenzhen

Tel: 86 755 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



小米进军智能电动汽车行业 10 年投资 100 亿美元

汽车电子应用网消息，3月30日下午，小米集团在港交所发布公告，宣布公司董事会正式批准智能电动汽车业务立项。为此，小米将成立一家全资子公司负责智能电动汽车业务，由小米集团首席执行官雷军先生兼任该业务首席执行官。首期投入100亿元人民币，未来十年将投资100亿美元。在小米春季新品发布会上，雷军表示自己一直看好电动汽车的发展，甚至为此在2013年两次拜访马斯克。在过去的75天时间里，小米进行了85次业内拜访沟通、与200位业内人士交流，做了4次管理层讨论，开了两次董事会。经历了如此复杂的过程，同时在米粉的激励和支持下，小米决定正式进军智能电动汽车行业，“很多米粉特别喜欢车，只要米粉需要的，就是小米应该去做的，去奋斗的事情。”小米靠什么造车？汽车行业动辄上百亿投资，要干三五年才见效。然而如今的小米不是十年前的小米，如今的小米已经有了积累，雷军表示小米拥有1080亿现金储备，有一万多人的研发团队，有全球前三的手机业务，还有全球最好的智能生态，“说实话，我们亏得起。”“不认真打一仗，愧对全球米粉对小米的支持。”为了能提供更好的智能生态，小米决定采取全资的模式。“只有和手机的生态链这些产品全部打通，才能给米粉提供无所不在的智能体验。”雷军表示，从个人设备到智能家庭、智能办公再到智能出行，小米将用科技力量为全球米粉提供全方位全场景的智能生活。此次雷军将亲自带队智能电动车业务，他表示这将是他人人生最后一次重大的创业项目，“我愿意压上我人生所有积累的战绩和声誉，为小米汽车而战。”小米汽车的愿景是希望未来全球的



每条道路上，都有小米汽车驰骋的声音。小米也有足够大的耐心，雷军表示，小米愿意用5-10年的时间来为造车做准备。“只要大家愿意等，我们一定会全力以赴。”雷军如是说。在特斯拉、蔚来、小鹏、理想等新势力用互联网思维成功造车之后，作为互联网巨头之一的小米在互联网思维运用、既有粉丝基盘等方面具备更为显著的优势，同时车辆电气化、智能化也可以从小米在消费电子业务中积累的实力与经验中受惠。或许现在，时间点已经到了。CS

英特尔将在未来6-9月内开始生产汽车芯片

汽车电子应用网消息，近日，英特尔CEO帕特·基辛格(Pat Gelsinger)称，该公司正在与汽车芯片供应商接洽，目标是在未来6到9个月开始在英特尔工厂生产芯片。

就在上个月，英特尔表示将开放芯片工厂，成为代工产能的主要提供商，并在美国和欧洲建厂，以满足全球对半导体生产的巨大需求。为了实现这一目标，英特尔组建了一个全新的独立业务部门——英特尔代工服务事业部(IFS)。现在看来，这可能成为汽车芯片的潜在制造来源。

英特尔表示，将向汽车芯片企业开放其现有工厂网络，以提供更多即时帮助，以应对福特汽车和通用汽车的汽车装配线因供应短缺而中断。

英特尔计划生产汽车芯片的消息获得了积极的回应，但



目前英特尔并未透露任何潜在的汽车制造商客户，只表示已经开始与一些关键零部件供应商进行合作。CS

SEMI 报告：2020 年全球半导体设备销售额激增 19%，达到 712 亿美元的行业新高

美国加州时间 2021 年 4 月 13 日，SEMI 在其全球半导体设备市场统计报告 (Worldwide Semiconductor Equipment Market Statistics (WWSEMS) Report) 中指出，全球半导体制造设备销售额从 2019 年的 598 亿美元猛增 19%，达到 2020 年 712 亿美元的历史新高。

Annual Billings by Region in Billions of U.S. Dollars with Year-Over-Year Change Rates

Region	2020	2019	% Change
China	18.72	13.45	39%
Taiwan	17.15	17.12	0.2%
Korea	16.08	9.97	61%
Japan	7.58	6.27	21%
North America	6.53	8.15	-20%
Europe	2.64	2.28	16%
Rest of the World	2.48	2.52	-1%
Total	71.19	59.75	19%

Source: SEMI (www.semi.org) and SEAJ (www.seaj.or.jp), April 2021

中国大陆首次成为全球最大的半导体设备市场，销售额增长 39%，达到 187.2 亿美元。中国台湾地区是第二大设备市场，其销售额在 2019 年呈现强劲增长后，在 2020 年保持稳定，达到 171.5 亿美元。韩国保持 61% 的增长，达到 160.8 亿美元，居第三位。日本和欧洲分别增长了 21% 和 16%，这两个地区都从 2019 年的经济衰退中恢复过来。在连续三年增长之后，2020 年北美降低了 20%。

2020 年全球晶圆加工设备的销售额增长了 19%，而其他前端细分市场的销售额增长了 4%。封装在所有地区均显示强劲增长，2020 年市场增长 34%，测试设备总销售额增长 20%。

根据 SEMI 和日本半导体设备协会 (SEAJ) 会员提交的数据，这份全球半导体设备市场统计报告总结了全球半导体设备行业每月出货金额。设备类别包括晶圆加工、封装、测试以及其他前端设备，包括掩模 / 标线片制造，晶圆制造和 fab 厂设施。

湖南大学无锡半导体先进制造研究院签约落户锡山区

“太湖明珠、江南盛地”牵手“千年学府、百年名校”。4 月 12 日下午，湖南大学无锡半导体先进制造研究院签约落户锡山区。无锡市委书记黄钦会见湖南大学校长段献忠，中国工程院院士、湖南大学机械与运载工程学院院长丁荣军一行，并出席签约仪式。市领导柏长岭、高亚光参加活动。

黄钦对项目的成功落户表示祝贺，对湖南大学多年来给予无锡经济社会发展的支持和帮助表示感谢。他说，无锡半导体产业发展起步早、基础好、底蕴厚，形成了涵盖集成电路设计、晶圆制造、封装测试、装备材料全产业链的发展格局。湖南大学是国家“世界一流大学”建设高校，在半导体先进制造领域实力强劲。此次湖南大学与锡山区签约共建半导体先进制造研究院，补上了无锡集成电路产业链上的重要一环，将有力助推无锡打造世界级集成电路产业链。希望湖南大学以此次签约为新的起点，把更多创新项目、创新人才集聚到无锡，无锡将一诺千金全力支持湖南大学在锡发展，推动双方合作迈上新台阶。

段献忠对无锡产业发展环境赞不绝口。他说，无锡发展

环境佳、创新氛围浓、政务服务好，“确实是一个创新创业的好地方”。湖南大学与无锡关系源远流长，长期以来一直保持着密切的科技、人才合作联系。今后，将充分发挥湖南大学“双一流学科”优势，以及在半导体先进制造领域拥有的国家平台优势，为无锡集成电路产业发展注入新动能，为无锡经济高质量发展作出新贡献。

湖南大学无锡半导体先进制造研究院位于锡山经济技术开发区，由丁荣军院士担任首席科学家，将围绕我市高端制造业和科创产业发展重点，聚焦半导体先进制造核心应用技术研究，针对半导体晶圆激光制造、半导体晶圆超精密制造、半导体光学元器件微纳制造、半导体检测、超精密功能部件制造、功率半导体器件及应用等六个领域，共同建设集“科学研究、技术创新、公共服务、人才培养、成果转化”于一体，具有全球较大影响力和国内一流竞争力的半导体先进制造研究院。研究院还将组建形成国内领先的半导体先进制造技术团队，构建层次合理的科研梯队，引进一批世界级创新人才，为无锡高质量发展提供源头活水。

湖南十四五规划纲要出台： 设定全国最大碳化硅全产业链生产基地目标

3月25日，湖南省人民政府出台《湖南省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》(以下简称《纲要》)。



《纲要》指出，湖南将打造国家重要先进制造业高地，以先进制造业为主攻方向，实施先进装备制造业倍增等“八大工程”，到2025年，制造业占地区生产总值比重高于全国平均水平，制造业质量效益、创新能力达到全国先进水平。

具体包括加快发展先进制造业、提升产业链供应链自主可控能力、培育产业生态、推动数字经济发展。同时，湖南还将大力培育新兴和未来产业。实施战略性新兴产业培育工程，积极推动新一代半导体、生物技术、绿色环保、新能源、高端装备等产业发展，构建一批产业发展新引擎。推进半导体关键核心成套设备研发和产业化，加快6英寸碳化硅材料及芯片、中低压功率半导体等产业化发展，建成全国最大碳化硅全产业链生产基地，创建国家级半导体装备制造区域中心。把握产业变革和技术革命趋势，超前布局未来产业，积极推进量子信息、6G技术、类脑智能等领域创新发展。

在推动数字经济发展方面，湖南将推动数字产业化。推进人工智能、集成电路、5G应用、大数据、云计算、软件服务及互联网产业发展，建设全国数字经济创新引领区、产业集聚区和应用先导区。



为GaN和SiC工艺提供领先的PVD解决方案

LAYERS 想要了解更多LAYERS 6 现在就订一本吧





Evatec 为瑞士精密镀膜设备领导者，在射频元件和功率器件领域，Evatec 提供独特的薄膜生产设备和工艺专有技术，专用于宽禁带第三代半导体 (如GaN和SiC)。

了解更多Evatec生产机台的低损伤金属化和TCO沉积工艺的信息，请联系我们的当地办公室。<https://evatecnet.com/about-us/sales-service>

先进封装 · 半导体 · 光电 · 光学 · THE THIN FILM POWERHOUSE
www.evatecnet.com

华域三电与罗姆成立“技术联合实验室” 并举行启动仪式

中国知名汽车空调制造商——华域三电汽车空调有限公司 (Sanden Huayu Automotive Air-Conditioning Co., Ltd., 以下简称“华域三电”) 与全球知名半导体制造商——罗姆 (ROHM Co., Ltd., 以下简称“罗姆”) 在位于中国上海的华域三电总部成立了“技术联合实验室”, 并于 2021 年 1 月举行了启动仪式。

华域三电和罗姆自 2018 年开展技术交流以来, 双方在采用 IGBT 等先进功率元器件的车载应用产品开发方面建立了合作关系。经过两年多的技术交流, 采用了罗姆 IGBT 功率元器件以及周边部件的电动压缩机于 2020 年 10 月成功投入量产。

此次成立的联合实验室配备了包括可以对以汽车空调为中心的车载应用进行评估的测试设备、以及能够进行元器件评估的测试装置等重要设备。

未来, 双方将会进一步加强合作关系, 不仅是罗姆的功率元器件、还会进一步推进对组合了驱动 IC 和周边部件的 IPM 的评估, 加速创新型解决方案的开发。

华域三电总工程师 姚奕表示: “自 2018 年罗姆为华域三电推介功率元器件产品以来, 双方包括高层在内的交流不断加深。作为两年多技术交流的成果, 华域三电开发出采用了 IGBT 的车载应用并在 2020 年成功实现量产, 对此我们表示非常高兴。该联合实验室的成立, 表明两家公司之间的



华域三电 总经理 王骏 (右) 与罗姆半导体 (上海) 有限公司 董事长 藤村 雷太 (左) 在启动仪式上互赠纪念品

合作关系进一步加深, 我们期待通过完善的设备, 得到更出色的技术支持。”

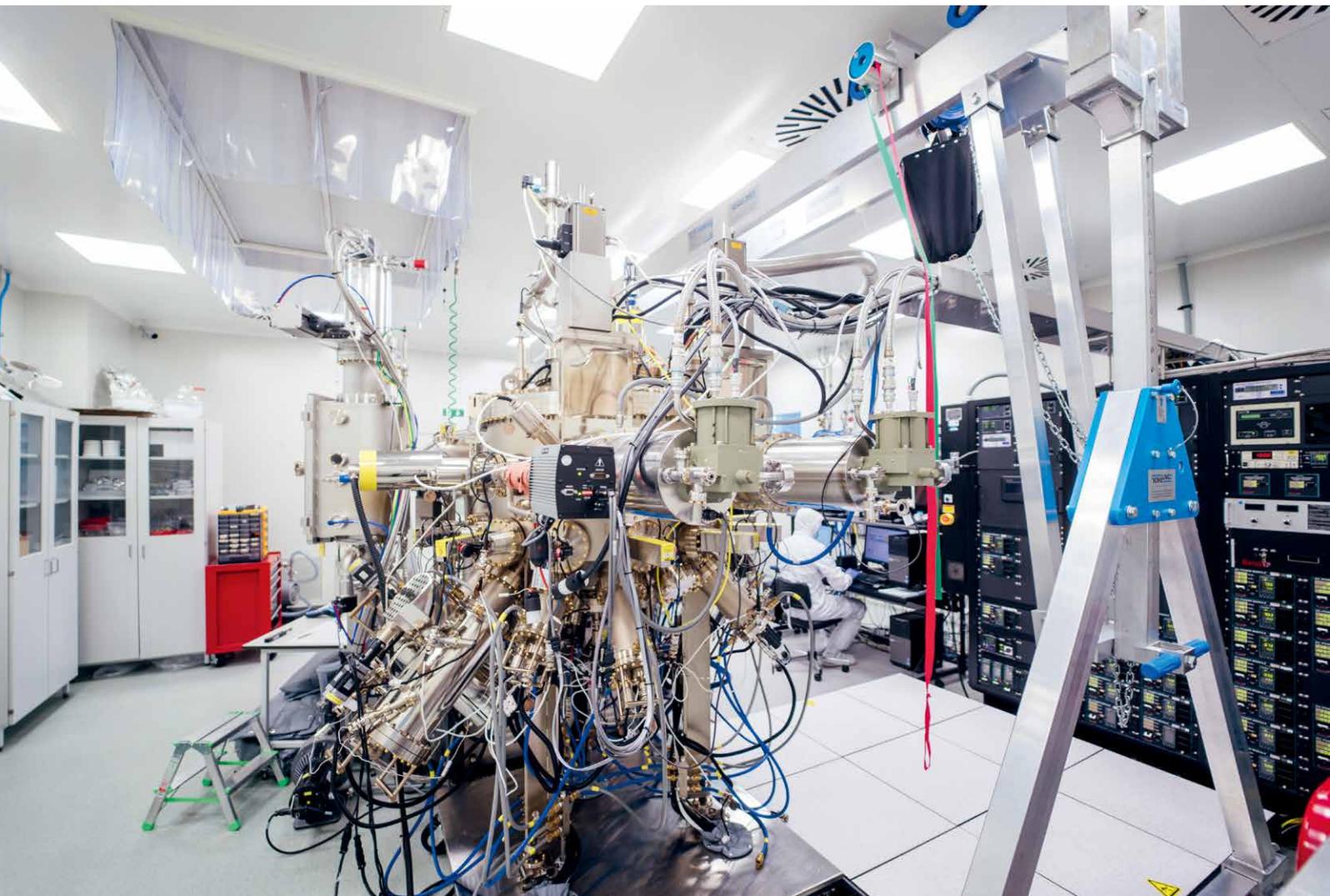
罗姆董事高级执行官 CSO 业务统括 伊野和英博士表示: “我们很高兴能够与汽车空调领域的先进企业——华域三电成立联合实验室。罗姆正在推进从 Si 功率元器件 (IGBT、MOSFET) 到 SiC 功率元器件等丰富的先进元器件开发, 同时, 通过与驱动 IC 等外围元器件相结合电源解决方案, 获得了傲人的实际应用业绩。未来, 双方将通过联合实验室加强合作关系, 凭借结合客户需求以及市场动向的电源解决方案为汽车技术革新做贡献。”

总投资 10 亿元 采埃孚电驱动制造项目开工

汽车电子应用网消息, 4月8日, 采埃孚电驱动科技 (沈阳) 有限公司电驱动系统制造项目建设开工仪式在沈阳经济开发区举行。据了解, 项目总投资 10 亿元, 计划于 2023 年投产。具体来看, 新项目工厂位于沈阳市铁西区, 占地面积为 5 万平方米, 建筑面积为 3.1 万平方米。本次项目中, 新产品覆盖电机、电控和电驱动系统的生产装配以及测试, 主要为本土和国际品牌整车企业提供新能源汽车电驱动零部件及系统, 将用于多个主流车企的新能源汽车平台。采埃孚于 2003 年在沈阳设立了第一家工厂, 经过多年发展已拥有 3 家工厂, 员工总人数超过 1000 名, 产品系列包括电驱动产品、底盘零部件等。2020 年这三家工厂的销售额达 60 亿元。自 2018 年起, 采埃孚已在中国获得了超过 20 亿欧元的电驱动系统领域的订单。截至 2020 年底, 采埃孚在全球的电驱

动部件订单已超过 140 亿欧元, 这些部件将应用于乘用车和商用车。在赢得的纯电动汽车订单业务中, 采埃孚将提供功率电子和电驱动系统。





GaSb 基芯片有望实现传感革命

紧凑型红外光传感器有助于医疗，农业和竞技运动

KRISTIJONAS VIZBARAS, BROLIS 传感科技

提起红外芯片，您大概会想到 InP。这是因为 InP 及其合金在光谱领域取得了巨大的成功，为长距离光通信提供了数不尽的激光和探测器。

但是 InP 只能到此为止了。虽然 InP 是近红外领域的第一选择，但是如果您想在这个方向上走得更远，同时保留带间跃迁，则需要考虑另一类材料。GaSb 材料体系是最佳选项，它为光学传感革命铺平了道路。

GaSb 及其合金的优点包括：其光谱跨度为 1.5 μm 至 4 μm ，这其中富含与分子旋转 - 振动跃

迁相关的强烈且特殊的基本吸收带组合（请参见表 1 的比较）。此外，GaSb 材料体系可以大批量、可扩展制造在室温下工作的高效光源和探测器，并且它们可与 SOI 基 PICs 集成。

在 1.5 μm 至 2.5 μm 范围内，有许多光谱学可应用的方向。该波段内是乳酸，乙醇，葡萄糖，尿素和其他重要生物分子的吸收线。由于红外光可以穿透皮肤，因此可以实现非侵入性监测，协助卫生部门，改善运动员的训练，并帮助预防工厂和道路上的酒驾事故。在介绍了 GaSb 基器件的光谱学之后，将详细介绍以上应用向的细节，

Technology	Spectral region	Spectral region of optimal performance	Typical input power for 1 mm cavity, RT	Efficiency (> 2 μm)	Typical CW Operation temperature	SOI integration compatible*	Reference(s)
InP type-I	1.3 – 2.3	1.3 – 1.7	~ 100 mW	<10 %	RT and above	Yes	[1, 2]
GaSb type-I	1.5 – 3.5	1.7 - 2.7	< 30 mW	10 – 30 %	RT and above	Yes	[1, 2, 3, 4]
InP type-II	2 – 4	Insufficient data	1 W – 2 W	< 1 %	Below 0° C	Yes	[1, 2]
GaSb ICL	2 – 6	3 – 4	~ 100 mW – 2 W	~ 10 %	around RT	Yes	[2, 5]
InP QCL	3 – 20	4 - 12	0.5 – 5 W	< 10 %	RT	Yes	[2, 5, 6, 7]
OPO	2 – 5	2- 5	500 – 1000 W	< 1%	RT	No	[2]

表I. 比较了不同的红外激光技术，突出了GaSb的优点。 [1] R. Wang et al. Sensors 17 1788 (2017) [2] S. Sprengel et al. Semicond. Sci. Technol. 31 113005 (2016) [3] K. Vizbaras et al. Proc. Of SPIE 8277 82771B, (2012) [4] K. Vizbaras et al. Appl. Phys. Lett. 107 011103 (2015) [5] A. Spott et al. IEEE Photonics Conference 2017, October 10, 2017 [6] M. Razeghi et al. Optics Express 23 8462 (2015) [7] M. Vitiello et al. Optics Express 23 5167 (2015)

以及与农业和塑料回收相关的应用。

评估排放

GaSb 材料体系与 InP 及其相关材料一样，具有多种方法来产生激光发射。最常见的是使用 I 型量子阱，但是对于更长的波长，可能需要带间级联跃迁。图 1 列出了这些方法的利弊以及可替代的材料体系。

纵观表格，清楚显示了为什么镓基材料体系更受青睐，以及对受益于低能耗的大批量应用来说，为什么 I 型技术是最佳选择。其优势包括：成熟的设计，电子和空穴波函数最大重叠而产生的高增益，以及对关键电气，光学和结构参数的直接晶圆级测试，包括电流 - 电压特性，电致发光和高分辨率 X 射线衍射光谱，可深入了解应变，成分和层厚。有机会在晶圆被制成器件之前进行仔细检查，在早期控制良率，并可以预选符合要求的晶圆，以便进一步加工。

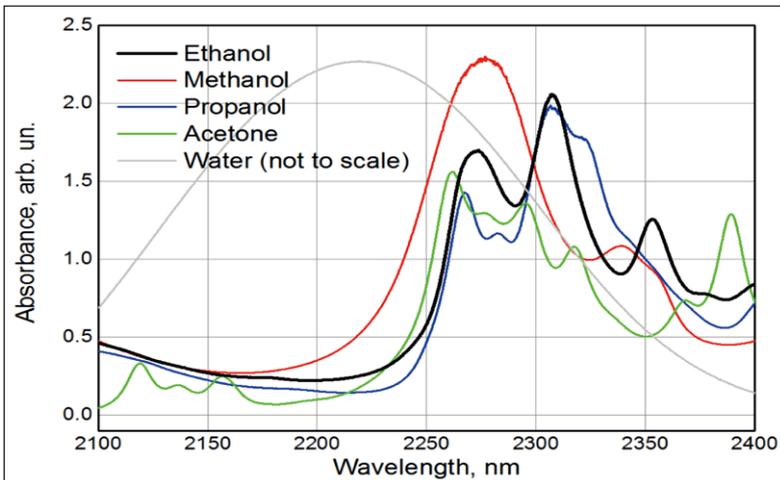


图1. 红外光谱可以通过各物质独特的吸收光谱来鉴别乙醇，甲醇，丙醇和丙酮。浅灰色线显示了叠加的水透射光谱。

与其他形式的 I 型量子阱激光器一样，调整 GaSb 基的发射波长需要改变量子阱和势垒层的组成以及阱的厚度。典型 GaSb 基激光器的量子阱不超过三个，因此外延结构中的大多数都是以体材料形式存在，这种情况简化了外延工艺，使其对生产过程中的偏差不那么敏感。

对于 GaAs 基大批量产品和 InP 基红外和电信波长光电器件，最常见的衬底尺寸是 3 英寸。然而，随着数据通信技术的最新发展，主要是低成本 VCSEL 的闪亮登场，导致 6 英寸 GaAs 衬底的使用增加。

GaSb 激光二极管的生产往往涉及 3 英寸或 4 英寸晶圆，但据说 6 英寸器件级的 GaSb 晶圆已经可以用于测试。它们通常被装入多晶片 MBE 腔室，代表性的配置为 7×3 英寸，5×3 英寸或 4×4 英寸。得益于衬底和生长设备制造商的努力，外延片的产量和质量不断提高。在过去的几年中，诸如 Wafer Technology 之类的衬底制造商将已经纯熟的 GaSb 衬底技术扩展到 6 英寸。美国 Veeco 公司和法国 Riber 公司等 MBE 设备制造商进行了相当大的改进，引入了新的组件设计和腔室几何形状。这些改进可以提高 III 族的通量均匀性和时间稳定性，这对于非常厚的异质结构的多晶片生长至关重要。

通过与 MBE 设备制造商的紧密合作，在过去的八年中，Brolis 的团队在多晶圆领域开发出了丰富的专业知识和技术，可用于 GaSb 基光电器件的大规模生产。我们的第一个重要里程碑出现在 2016 年，我们向全世界展示了第一台广受好评的 GaSb/SOI 混合激光器。此后，我们在 GaSb I 型发光器件与 SOI PICs 集成方面取得了长足的

Technology	Typical materials	Spectral coverage, μm	Pros	Cons	References
Type-I QW	InP**, GaSb	1.5 – 3.7	<ul style="list-style-type: none"> • Semiconductor technology; • Bulk layers mainly, • Easy on-wafer testing; • High manufacturability • Low input power devices 	<ul style="list-style-type: none"> • InP performance drops rapidly at wavelengths > 1.7 micron • GaSb is limited to MBE technology only • GaSb performance drops at wavelengths > 2.5 microns 	[1, 2, 4, 5, 6]
Type-II QW	InP	2 - 4	<ul style="list-style-type: none"> • Semiconductor technology • Bulk layers mainly • Easy on wafer testing • MOCVD compatible 	<ul style="list-style-type: none"> • Extremely sensitive to thickness deviations • Low manufacturability • Current performance data limited • Operating below RT, very low output powers 	[3,4]
ICL	GaSb	2 - 6	<ul style="list-style-type: none"> • Semiconductor technology • On wafer testing feasible but with limitations • Good performance around 3.3 micron • NRL willing to license the patent 	<ul style="list-style-type: none"> • Superlattice based – huge amount of interfaces • Thickness deviation sensitive • Surface passivation needed • Low manufacturability • NRL holds the patent to this technology • Performance below or beyond 3.3-3.4-micron range limited 	[4, 6]
QCL	InP	3 - 16	<ul style="list-style-type: none"> • Semiconductor technology • MBE & MOCVD compatible • Very wide wavelength design range 	<ul style="list-style-type: none"> • Extreme number of interfaces – epi wafer growth complex • No on-wafer testing • Manufacturability low at high volumes • Wavelengths < 4 microns difficult with good performance • High-voltage, high power consumption 	[4, 7, 8]
OPO	Other	2 - 5	<ul style="list-style-type: none"> • Single device for entire spectrum 	<ul style="list-style-type: none"> • Solid-state laser technology • Not-compact • Not scalable • No integration with SOI • High power consumption 	[9]

表2. 有各种各样的光源技术可以获得电信以外的波长。[1] K. Vizbaras et al. Appl. Phys. Lett. 107 011103 (2015) [2] R. Wang et al. Opt. Express. 24 28977 (2016) [3] R. Wang et al. Sensors 17 1788 2017 [4] S. Sprengel et al. Semicond. Sci. Technol. 31 113005 (2016) [5] K. Vizbaras et al. Proc. Of SPIE 8277 82771B (2012) [6] A. Spott et al. IEEE Photonics Conference 2017, October 10, 2017 [7] M. Razeghi et al. Optics Express 23 8462 (2015) [8] M. Vitiello et al. Optics Express 23 5167 (2015) [9] Cobolt Odin TM, IPG CLTSF lasers (<http://www.ipgphotonics.com/en/products/lasers/mid-ir-hybrid-lasers/1-8-3-4-micron/cl-sf-and-clt-sf-0-2-10-w> http://www.coboltlasers.com/wp-content/uploads/2014/11/D0348-B_Datasheet-Cobolt-Odin-Series.pdf).

进步。

我们的最新成功是制造了 GaSb 基单片激光光谱仪，该光谱仪基于四个超宽扫频混合激光器和光电探测器。该光谱仪的核心是四个单模激光器，每个激光器的侧模抑制比都超过 20 dB。这些激光器与两个直径稍有不同的耦合微环谐振器相结合，在 SOI 电路中实现。通过利用游标效应，我们能够以高达 1 kHz 的频率对激光器的波长进行电热扫描。每个激光器提供 120 nm 的调谐范围，通过移动每个 GaSb 光源的增益峰值，我们实现了超过 400 nm 的综合调谐范围（见图 2）。

如果我们只对一个微环进行热调谐，这将导致整个环的自由光谱范围内的光谱跳变 - 模式跳

变通常为 4-5 nm。通过协调两个微环的调谐，我们在整个光谱范围内实现几乎准连续的调谐（见图 3 和 4）。

正如预料的那样，我们的第一个混合传感器看上去有点“笨拙”，一般来说新器件都会是这样（参见图 5 (a)）。但它可以正常工作，因为它成功集成了四个 GaSb 基光电探测器，一个 GaSb 基光发射器和一个外部 SOI 腔。这种光谱传感器的后续小型化正在进行中（见图 5 (b) 5 (c)），它包括 2 至 4 个 GaSb 增益芯片，对接耦合至 SOI，以及四个 GaSb 控制检测器倒装在 SOI 上。这种混合器件的一个通道的实验调谐范围（波长图）如图 3 所示。从长远来看，该技术的占用面积应

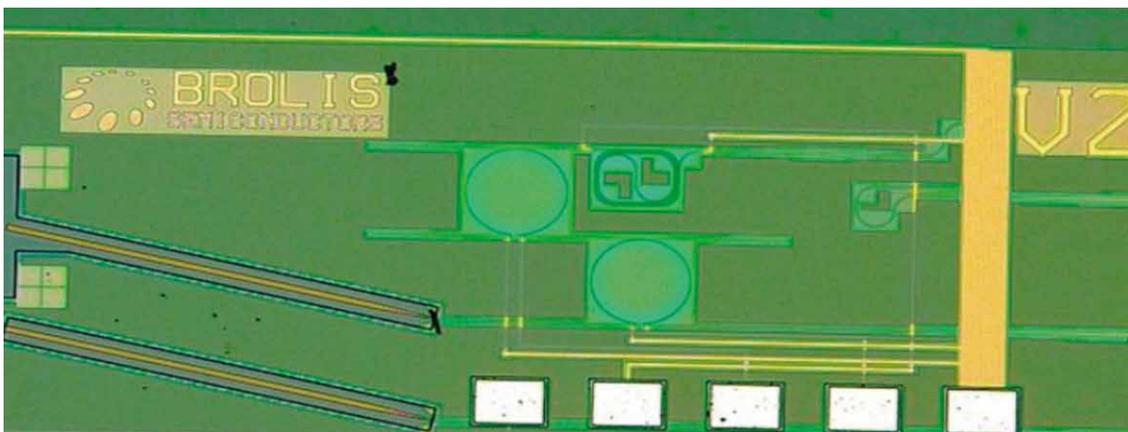


图2. Brolis广泛扫描的 GaSb / SOI混合激光器的SOI部分。两个耦合的微环清晰可见。

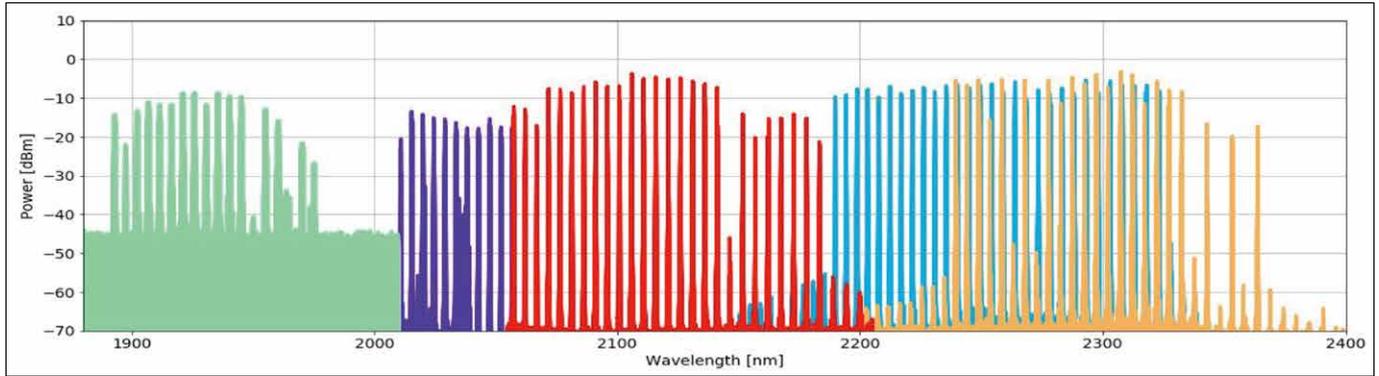


图3. 叠加光谱显示, 四种扫频的GaSb / SOI激光器可以覆盖1900 nm至2400 nm的光谱范围。器件表现出连续波激光, 输出功率约为1 mW。由于调谐仅涉及单个微环, 因此光谱分离由环的自由光谱范围(几纳米)定义。

仅为 $2 \times 3 \times 1$ mm, 完全兼容目前所有的消费和工业平台。目前内部使用的传感器评估板如图 5 (c) 所示。

结合我们当前先进的 GaSb / SOI 技术, 我们使用四个输出功率约为 0.25-1 mW 的激光器来扫描 480 nm 的范围。这种非制冷技术的主要优点是响应度为 1.5 A/W , 探测效率为 $2-3 \times 10^{10} \text{ cm Hz}^{0.5} \text{ W}^{-1}$, 噪声等效功率为 $2 \times 10^{-12} \text{ W Hz}^{-0.5}$ 。这些数据证明, 我们的技术可为多种应用提供足够的性能, 从流体到气体分析的可调谐激光吸收光谱。更重要的是, 随着我们不断改进光源、探测器和混合集成技术, 最好的技术即将到来。

多个应用市场

光谱传感最著名的应用是测量葡萄糖水平, 帮助糖尿病患者监测病情。实现这项技术并不容易, 因为要在皮肤上(即组织基质)检测葡萄糖, 人与人之间的差异性很大, 同一人每天的情况也有所不同。当克服这些挑战后, 还会面临一个问

题, 血糖监测需要一个高度规范的环境。即使有一种技术已经解决好所有这些问题, 也可能需要长达十年的时间才能进入市场。

透皮光谱传感器的一个应用领域是监测乳酸。追踪人体血液中乳酸浓度的好处是, 乳酸浓度的上升是败血症的警报器, 而败血症是全世界五分之一的医院糖尿病死亡的原因。

除此之外, 由于乳酸是无氧运动和疲劳的生物指标, 因此在耐力和力量运动中具有重要意义。对于许多职业运动员、教练和业余运动员来说, 在运动过程中监测乳酸动态的梦想即将成真。这种实时检测将使运动员能够精确地调整训练强度, 避免过度训练和受伤, 并提高成绩。如果光谱传感器采用集成芯片的形式, 就可以将其融入到可穿戴设备的外形设计中, 并瞄准此类消费群体。

另一个需要重要考虑的分子是乙醇, 它是测量血液浓度中酒精含量的关键。通过测量皮肤的反射光谱来确定乙醇的含量(见图 6)。该技术可以抑制酒精类事故的发生, 例如酒后驾驶, 酒后工作。此外, 通过提供自我监控功能, 可以帮助每个人承担更多的个人责任。知道自己喝了太多的酒, 以至于无法安全地工作或开车, 总好过在丧命之后被“抓个现行”。

如果这种设备能够以可穿戴的形式集成到可穿戴/智能手表平台上, 那么个人酒精监测系统的使用率会非常高。在物联网时代, 另一种选择是将传感器与关键的机械部件(例如汽车或工业工具)集成在一起。这可以防止醉酒的司机开车, 防止受酒精影响的操作员使用机械。

与其他分子的经皮测量一样, 确定乙醇的含量也是一项挑战。需要漫长且昂贵的研发工作才能成功, 因此传感器要进入市场至少需要三到五年的时间。

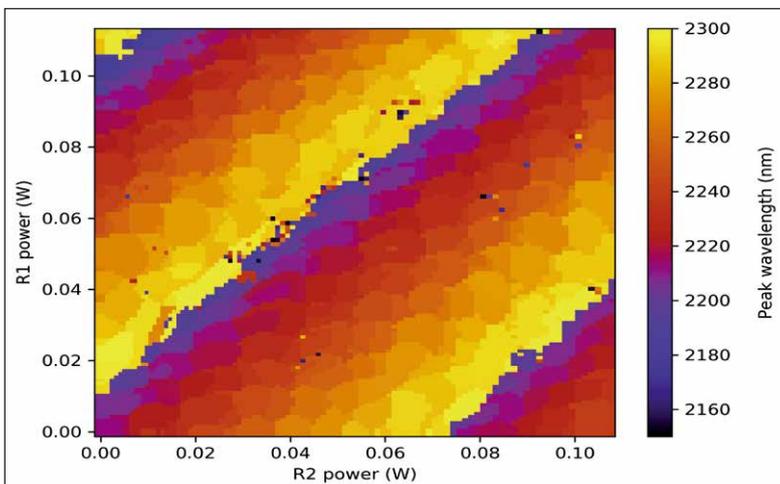


图4. 当两个微环以特定方式进行电热调谐时, Brolis的单个广泛扫描的激光器的峰值波长。连续的光谱覆盖范围清晰可见。

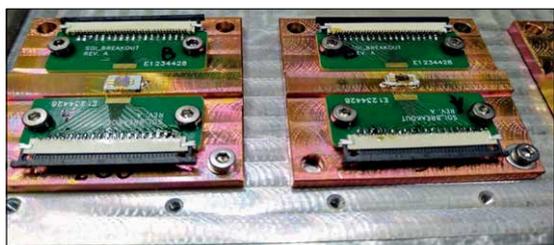
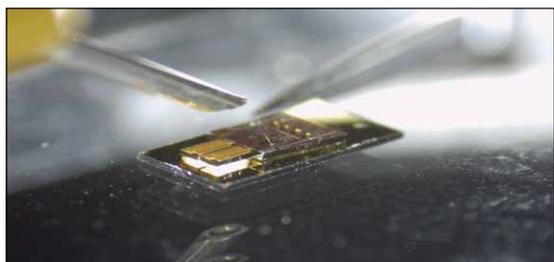


图5。(上图) Brolis 首台集成 GaSb / SOI 的传感器, 该传感器基于四个扫频激光器, 已经在内部进行生产。在 GaSb 增益芯片的右下角, 可以看到耦合到 SOI 外腔, 同时在 SOI 上倒装的四个 GaSb 基光电探测器, 用于波长控制; 输出功率监控 (中心); 以及用于增益芯片耦合的三个附加端口 (侧面)。(中图) 当前混合集成过程的快照—可以看到两个对接耦合至 SOI 的 GaSb 增益芯片。自动混合集成机器人是由 Brolis 内部设计并制造的。(下图) 用于评估板的已组装的 BROLIS 传感器演示器 (当前仅用于内部测试)。对接耦合到 SOI 的所有四个增益芯片都是可见的。

在基于 GaSb 技术对复杂的经皮传感产生影响之前, 我们希望将其部署在手持式流体光谱传感领域。在酿造工业, 精确确定乙醇含量, 区分不同的醇并在过程中控制它们是至关重要的。将光谱传感器添加到现有的工业机械上, 并将手持式光谱仪用于家庭或小规模的酿造是很容易的。

另一个应用是在燃料或其他流体基质中使用

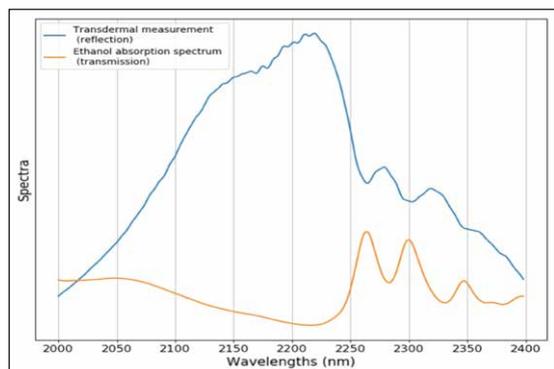


图6. 含有乙醇的组织基质的经皮光学信号, 以反射几何法 (蓝线) 测量和乙醇吸收光谱 (橙色) 测量, 在透皮光信号中可以清晰地看到乙醇吸收峰的特征。

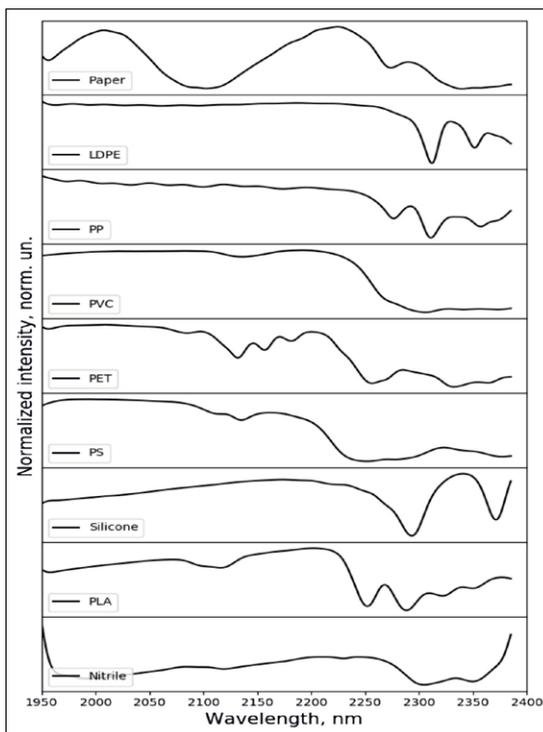


图7. 利用不同材料的透射光谱对不同类型的塑料进行分类。

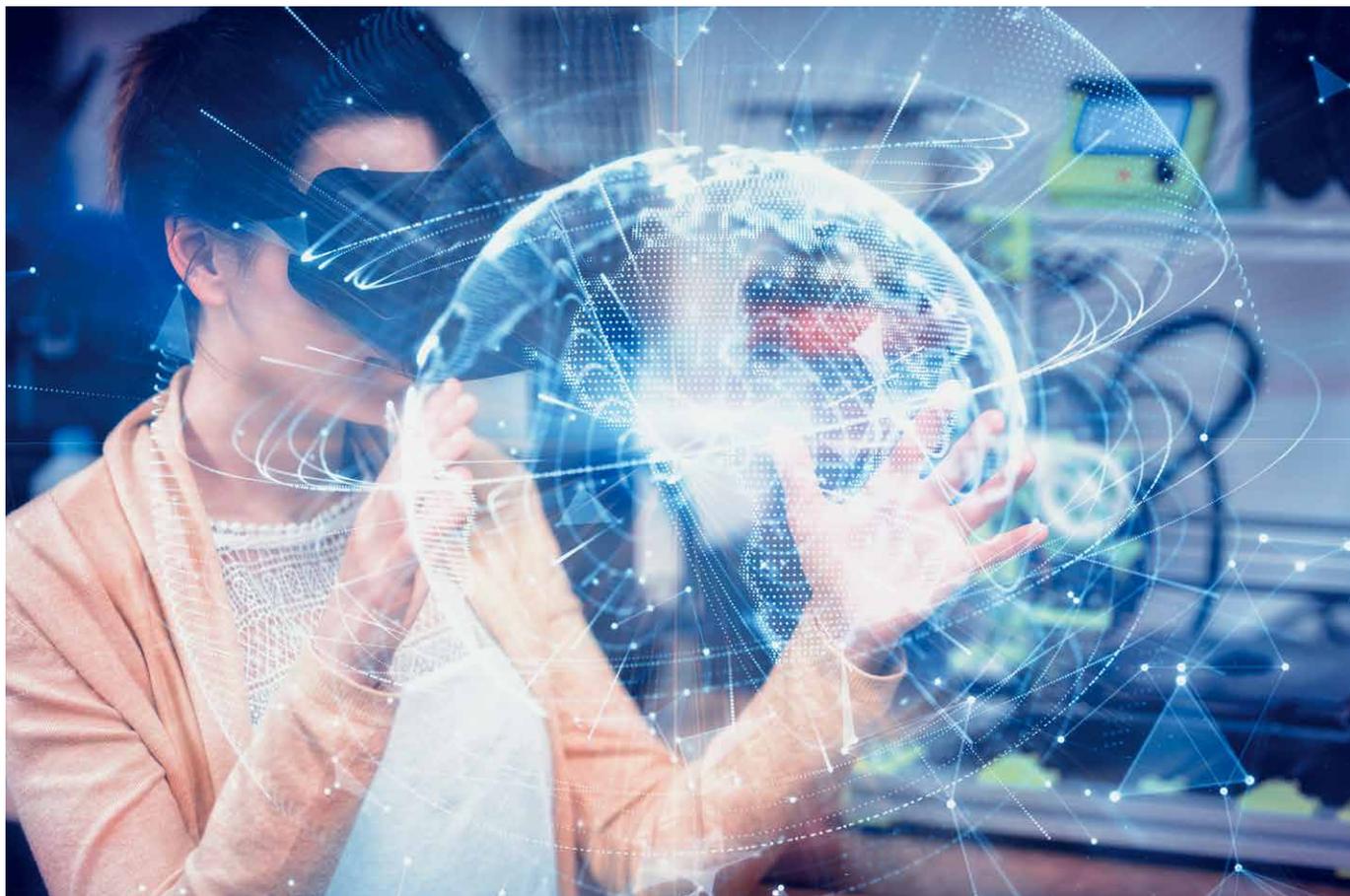
乙醇含量传感器。该传感器可以是手持式的, 也可以整合到现有的工业机械中。

GaSb 基传感器的另一个潜在应用是分类塑料, 用于回收或其他目的。在 $1.5\mu\text{m}$ 到 $2.5\mu\text{m}$ 的光谱范围内, 可通过清晰可辨的特征来识别不同种类的塑料 (见图 7)。基于我们技术的激光光谱仪为当前解决方案——昂贵的短波红外摄像机, 提供了更实惠, 更紧凑的替代方案。

光谱传感在农业领域也有潜在商机。这项技术可以识别牛奶成分, 例如脂肪, 蛋白质和尿素, 因为它们分别在 $1.5\mu\text{m}$ 和 $2.5\mu\text{m}$ 之间具有明显的吸收特征。实时监测牛奶含量并跟踪个体奶牛及其牛群的趋势具有诸多益处。如果牧场主监测并记录乳脂, 乳蛋白, 体细胞计数和尿素含量, 他们就可以调整营养并获得乳腺炎的早期预警。

有了这种洞察力, 牧场主就可以采取预防措施, 而不是最终开出抗生素处方并终止奶牛的生产。我们的技术可以将传感硬件轻松集成到大多数现有的挤奶机械中。

上述列出的示例仅是流体, 固态和气体传感应用的一小部分。关键在于, 我们目前的光谱传感器是一种功能强大的通用硬件, 即将广泛扫描的混合 GaSb / SOI 激光器与不需要冷却的基于 GaSb 的检测器结合在单个芯片上, 满足细分市场, 并可扩展到服务于消费者的应用中。CS



纳米多孔 GaN 助力 microLED

在纳米孔中插入量子点可制备高效、可靠的 microLED

JIE SONG 和 CHEN CHEN, SAPHLUX

由 microLED 制成的显示器因其使用寿命长、亮度和效率出色而引起了极大的关注。一些科技巨头，如苹果（Apple）和三星

（Samsung），正在利用巨量转移或纳米打印技术来开发 microLED 显示器。

经过多年紧锣密鼓的发展，但几个关键技

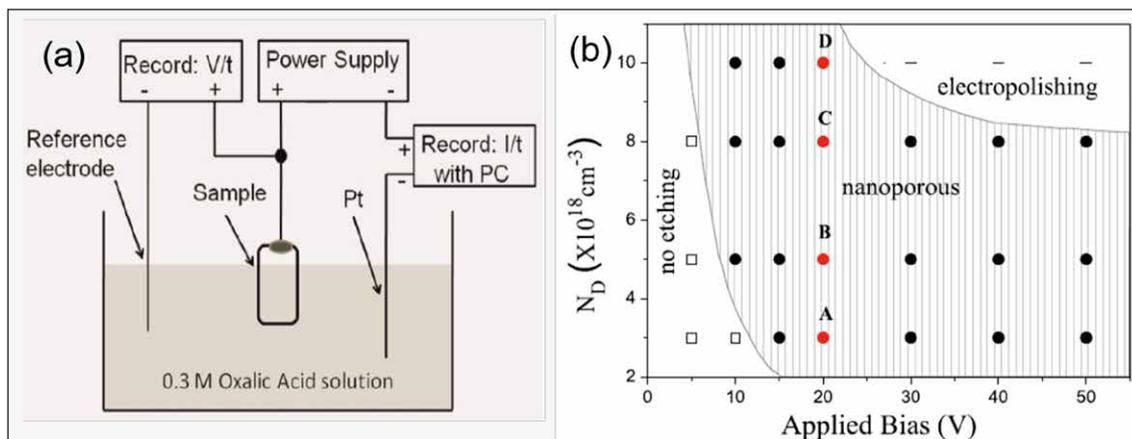


图1. (a) 电化学蚀刻工艺产生纳米多孔GaN。
(b) GaN电化学蚀刻工艺的相图显示了蚀刻特性与GaN中的硅掺杂和所施加的偏压之间的关系。

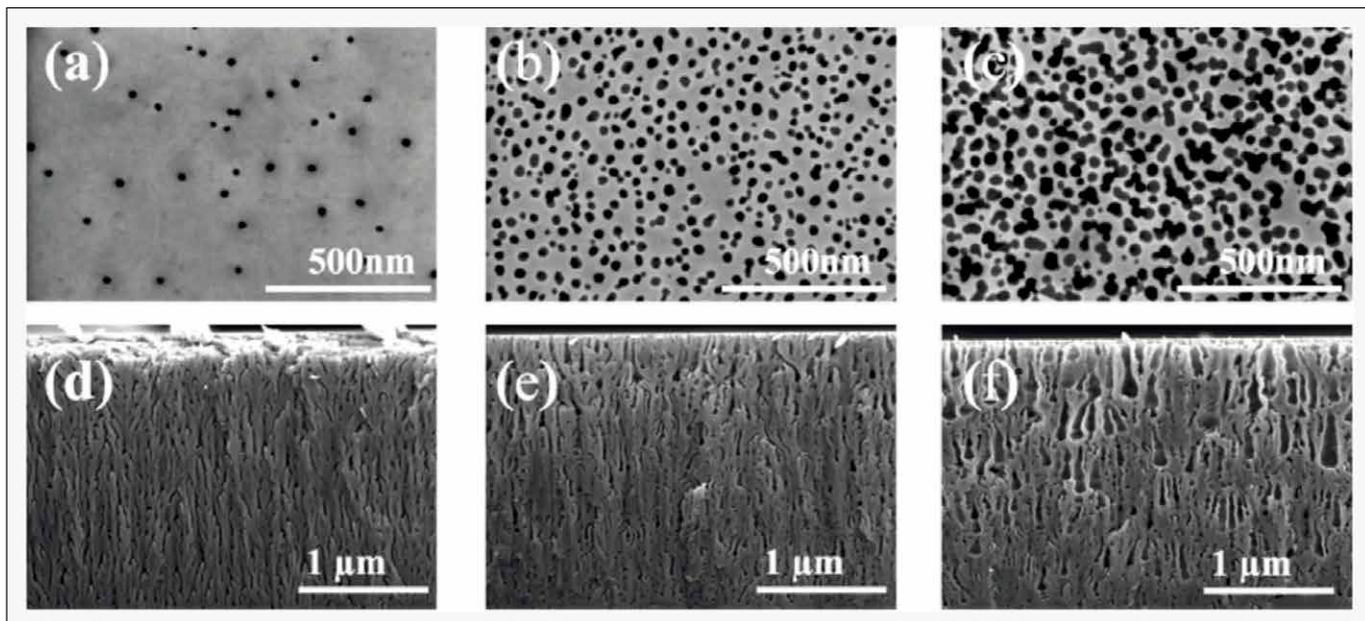


图2. (a-c) 具有不同孔隙率的纳米多孔GaN在不同的偏置电压下蚀刻的俯视图和 (d-f) 截面扫描电子显微镜图像。经美国化学学会许可转载。

术问题仍在阻碍 microLED 前进步伐。那些红光 LED 受到低效率和热光衰的困扰，限制了显示器的性能；制备间距小于 10 μm 的器件具有挑战性，而这是用于增强现实和混合现实的微型显示器的要求；随着 LED 尺寸的缩小，器件分拣变得更难且更昂贵。最令人担忧的是，生产成本很高。

有助于解决所有问题的方法是色彩转换 microLED，它使用在紫外或蓝色发光的芯片来泵浦量子点。以这种方式工作的器件具有许多特性，包括高量子产率、与尺寸有关的发射波长、窄的发射线宽和较短的发光寿命。此外，通过使用图案化和旋涂将量子点添加到衬底上，这类 LED 可以服务于广泛的应用。

制备基于量子点的、具有高光转换效率的色

彩转换 microLED 的方法之一是在芯片上涂覆一层由量子点构成的厚膜。但这并不是一种理想的选择，因为传统量子点的添加会导致光提取和可靠性方面的问题。

为了解决这些问题，来自康涅狄格州 Branford 市的 Saphlux 团队开发了一种纳米孔技术，可以将量子点嵌入到 microLED 中。这样就可以得到非常高效、可靠和低成本的器件。

纳米多孔 GaN

我们将材料浸入酸性溶液中并施加偏压，在 LED 中形成纳米级孔隙，从而驱动 n 型 GaN 的电化学蚀刻（见图 1 (a)）。通过改变施加的偏压或 GaN 中硅掺杂浓度，我们能够在电化

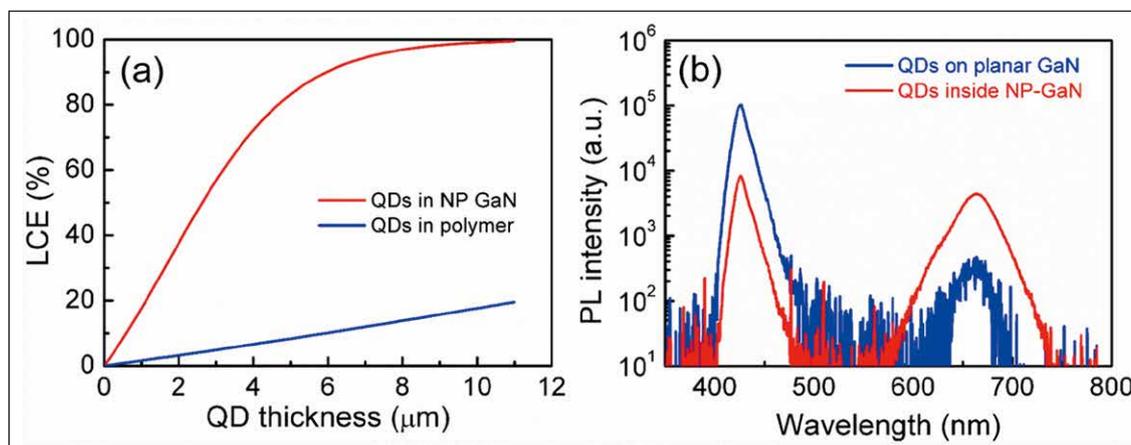


图3. (a) 分别装载在聚合物和纳米多孔GaN中的量子点 (QD) 的光转换效率 (LCE) 的模拟结果。两种样品均使用相同浓度的量子点。
(b) 分别在平面GaN和纳米多孔GaN上的红色量子点的光致发光光谱。

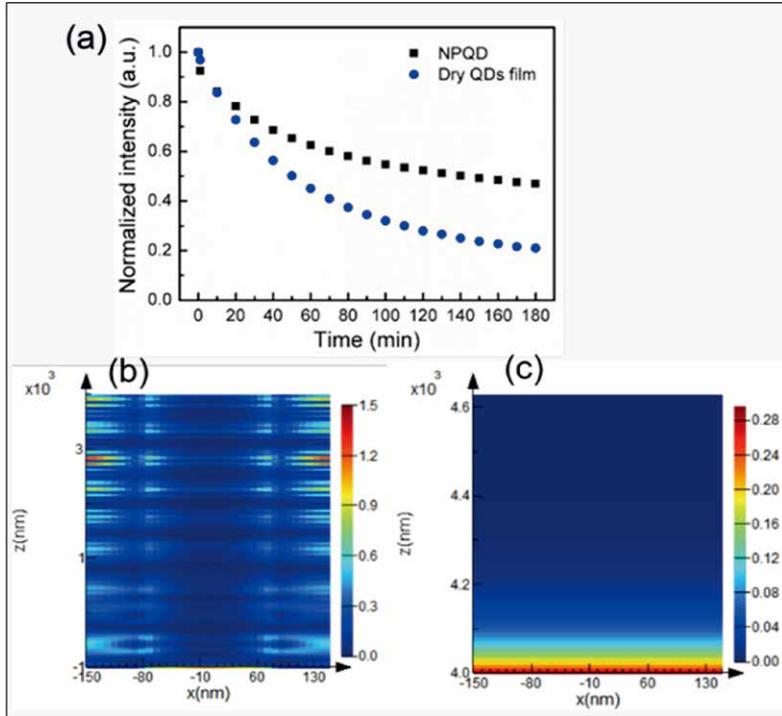


图4. (a) 来自GaN蓝宝石晶片上的红色纳米多孔量子点样品和量子点薄膜的红色发射的归一化功率强度的比较。两种样品均用420 nm蓝色激光激发3小时。(b) 纳米多孔GaN吸收蓝光的模拟映射结果。(c) 纳米多孔膜吸收蓝光的模拟映射结果。

学蚀刻行为中产生戏剧性的变化。如果我们向硅掺杂浓度低的 GaN 施加低偏置电压，则不会出现蚀刻现象；如果使用高偏置电压或高硅掺杂浓度，则会将 GaN 完全蚀刻掉（这称为电抛光）。

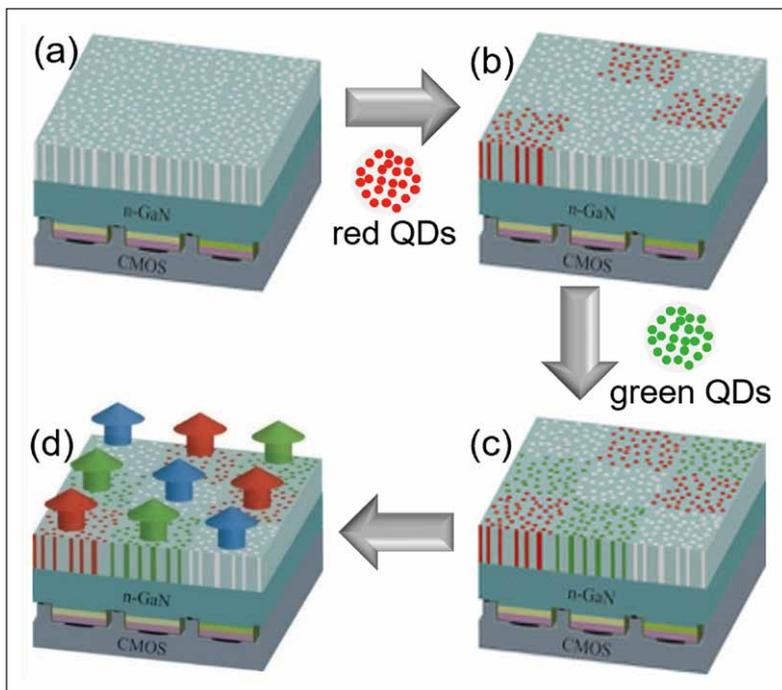


图5. Saphlux的制造单片RGB microLED的方法。(a) 将带有裸露的纳米多孔GaN的垂直蓝色LED键合在电流驱动器面板上。(b) 红色量子点被选择性地加载到红色区域中。(c) 将绿色量子点选择性地加载到绿色区域中。(d) 分别从红色量子点区域，绿色量子点区域和没有任何量子点的区域发出的红色，绿色和蓝色光。

为了形成纳米多孔 GaN，我们绘制了这两种极端之间的变化过程，选择了适当的偏置电压和硅掺杂浓度。

使用扫描电子显微镜对纳米多孔 GaN 进行成像，可以评估硅掺杂浓度和施加的偏置电压对材料形态的影响（见图 2）。显微镜显示，通过调节蚀刻电压，纳米孔的孔隙率和的大小都可以被改变。

模拟结果表明，将纳米孔融入我们的 LED 中可以大大提高器件效率。对于聚合物薄膜中的平面量子点，光转换效率随着量子点层厚度的增加而线性增加，对 10 μm 厚的量子点层而言，光转换效率最高仅为 20%（见图 3 (a)）。与之形成鲜明对比的是，当量子点填满纳米孔时，对于仅有 5 μm 的膜厚，光转换效率超过 80%。

测量结果支持这些模拟结果。我们已经获得了加载在平面 GaN 上的红色发光量子点的光致发光光谱，并将这些结果与通过旋涂添加到纳米多孔 GaN 的点进行比较。使用 420nm 蓝色 LED 泵浦这些样品，我们从加载在平面 GaN 上的红色发光点观察到在 650 nm 处有一个微弱红色峰值（见图 3(a)）。当量子点被放置在纳米多孔 GaN 内时，光致发光强度攀升了近两个数量级，而蓝色激发峰的光致发光强度下降了类似的倍数。根据光致发光光谱，我们计算出纳米多孔 GaN 中红色发光量子点的光转换效率为 91%。

纳米多孔结构不但提高了效率，正如我们在高功率密度下的光激励测量所证明的那样，可靠性也得到了提高。当我们用 420 nm 蓝色激光器以大约 25 W cm⁻² 的光功率密度泵浦平面样品时，激发 3 小时后，红色发射的归一化强度下降到其初始值的 20%。相比之下，当量子点被放置在纳米孔中时，相同的激发条件导致强度比初始值降低了 55%。

我们转而通过模拟来理解纳米孔提高可靠性的原因。这些计算表明，纳米多孔 GaN 中的量子点吸收的最大功率强度为 0.05，而平面量子点膜为 0.39（见图 4 (b) 和 4 (c)）。吸收率提高了近 8 倍，大大延长了量子点的使用寿命。

用于显示器的量子点

制作我们的显示器需要形成纳米多孔蓝色发光 LED，然后将其中一部分放在一边，在另一部分涂上红色发光或绿色发光量子点（见图 5）。在

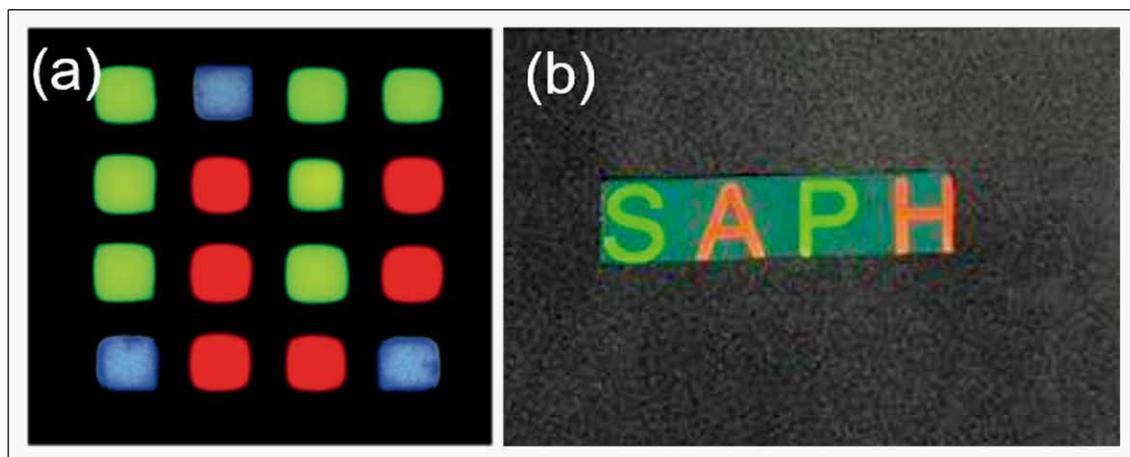


图6. (a) Saphlux RGB单片微型LED由背面的蓝色LED光源激发。(b) 由红色和绿色纳米多孔量子点microLED制成的公司徽标“SAPHLUX”的图片。

将红色和绿色发光量子点加载到不同区域之前，我们将裸露的纳米多孔 GaN 键合到电流驱动面板上。如果这些区域没有量子点，则发射蓝光；如果它们加载了量子点，则通过颜色转换产生红光或绿光。

利用这种方法，我们演示了一个尺寸为 $36\mu\text{m} \times 36\mu\text{m}$ 的 microLED 阵列。它具有一个滤光片，可以阻挡红色和绿色子像素的蓝色背光。通过组合许多 microLED，我们制作了一个带有我们公司标志的显示屏（见图 6(b)）。

我们现在正在制造纳米多孔 GaN microLED 阵列，并根据客户的需求定制像素尺寸。许多应用提供了广阔的市场前景，包括可穿戴设备、车辆显示器、智能手机以及各种形式的增强和虚拟现实设备。

除了这些努力之外，我们还制造了红色 mini LED。同样，通过使用纳米多孔 GaN 将蓝色发射转换为红色来操作。我们演示了一系列

器件，尺寸为 $250 \times 750\mu\text{m}^2$ ， $150 \times 500\mu\text{m}^2$ ，和 $100 \times 150\mu\text{m}^2$ （有关这些 LED 的图像，请参见图 7）。根据测量，我们已经达到了 97% 以上的转换红色纯度。

这些器件，就像它们较小的兄弟姐妹一样，显示出很大的潜力。市场定位好，可以带动由微小、高效、可靠的 LED 制成的显示器的制造，这些显示器成本低廉，将有助于这个市场蓬勃发展。

扩展阅读

- D. Peng et al. J. Disp. Technol. 12 742 (2016)
- H.-V. Han et al. Opt. Express 23 32504 (2015)
- J.-H. Kang et al. ACS Appl. Mater. Interfaces 12 30890 (2020)
- C.-T. Lee Cheng et al. IEEE Photonics Technol. Lett. 27 2296 (2015)
- K.-B. Bae Lee et al. Phys. Status Solidi A 215 1700644 (2018)
- E. Jang et al. Adv. Mater. 22 3076 (2010)

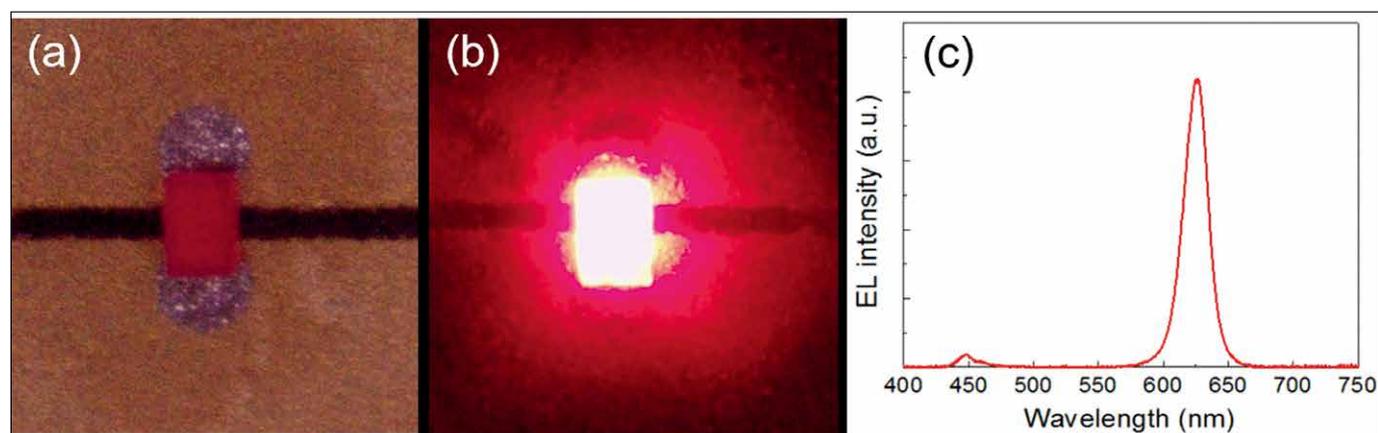


图7.安装在PCB板上的 $100 \times 150\mu\text{m}^2$ 红色纳米多孔量子点 miniLED 的照片 (a)，并以 1 mA 的注入电流点亮 (b)。(c) (b) 中所示的红色纳米多孔量子点 LED 的光谱。测试红色纳米多孔量子点 miniLED 的可靠性显示在 30W cm^{-2} 的可接受结果。对于大多数 microLED 应用而言，此功率密度绰绰有余。

新冠肺炎喜忧参半

这场新冠肺炎疫情是化合物半导体行业某些部门销售额飙升的背后原因，而对于其他的行业则要么是受到了巨大打击，要么也是继续沿着现有的轨道发展。

——理查德·史蒂文森 (Richard Stevenson)

从个体层面上来看，我们已在新冠肺炎疫情中受尽了痛苦。亲人的失去，以及我们许多人不得不待在家里数周之久，生活不再像以前那样有趣。

然而，当谈到商业时，情况就完全不同了，因为我们并不都在分担痛苦。虽然数百万人被裁掉，无数人的工资被削减，但也有一些人受益于新冠肺炎。众所周知，亚马逊 (Amazon) 的所有者杰夫·贝佐斯 (Jeff Bezos) 的财富几乎翻了一番，同时一些 PPE 设备的供应商和分销商通过收取高额利润来中饱私囊。其他许多公司也做得很好，由于一些公司股价飙升，他们增加了投资，并扩大了养老基金。

但是，化合物半导体产业又如何呢？是赢家，输家还是两者兼而有之？

对于任何制造商来说，结果总是受到两个关键因素的影响。其一是大量生产产品的能力。是否有可靠的材料供应？生产设施是否能够高产运转？然而，光在这方面取得成功并不能保证盈利，因为决定财务上的成功的另一个重要因素是市场对所生产产品的强劲需求。

与任何类别的产品制造商一样，化合物半导体行业的生产设施也受到物流问题的困扰，疫情期间通过引入新的做法来最大限度地减少新冠肺炎的传播，使得生产效率也受到了限制。不过，好消息是，这场新冠肺炎疫情对化合物半导体行业造成的影响相当小—肯定比汽车行业要小，例如，在汽车行业，特斯拉在上海和加州的工厂关闭了几个月。帮助芯片制造商一直是各国政府所支持的，政府热衷于维持经济活动，并将半导体

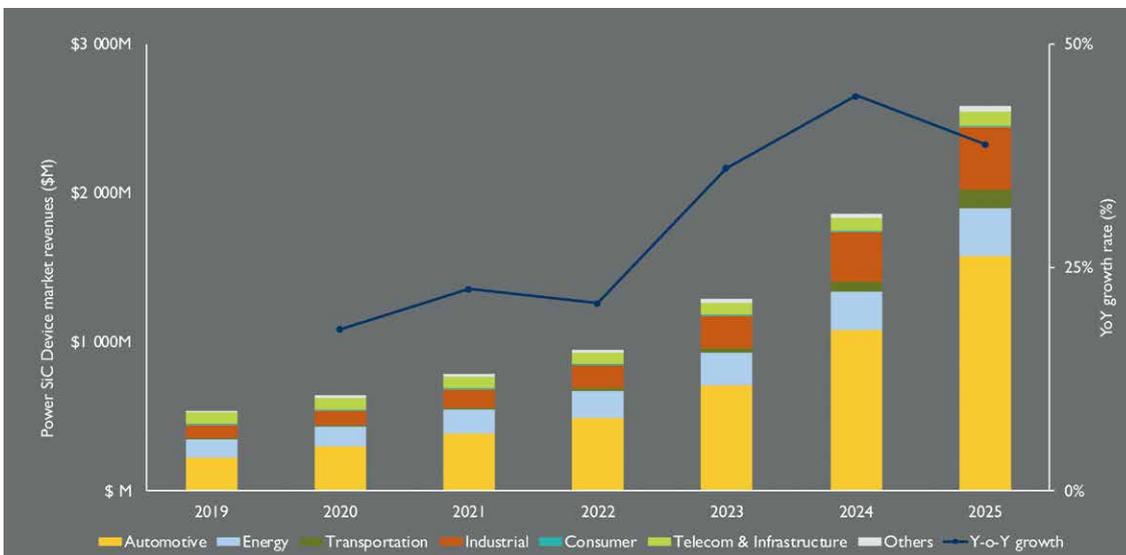


得益于将这些器件部署在Tesla 3, X和S车型中，SiC的销售正在快速增长。

生产视为一项关键活动。

在半导体行业内，各公司也采取了大致相似的做法。欧洲两家大型企业，意法半导体 (ST Microelectronics) 和英飞凌 (Infineon)，有时会缩减产量，但由于没有停产，它们已经能够迅速恢复到正常的生产水平。对于砷化镓射频 (GaAs RF) 行业的两个最大厂商 Qorvo 和 Skyworks 来说，情况与此类似。后者暂时关闭了在墨西哥的工厂，但很快又恢复了生产，而 Qorvo 并没有停止，美国政府将这家芯片制造商视为一项必不可少的业务。

当谈到需求时，整个化合物半导体行业的情况要复杂得多。为了理解冠状病毒的影响，人们需要逐个部门地考虑后果。这需要掌握所有领域的专业知识，从发光二极管 (LED) 到激光、电力电子和射频。Yole Développement 提供了如此全面的报道，该公司拥有一个市场分析师团队，



电动汽车行业正在推动碳化硅功率器件的销售增长。资料来源：化合物半导体季度市场监测，2020年第四季度。模块II, Yole Développement。



发光二极管 (LED) 的商品化导致普通照明和屏幕背光这些大型成熟市场的利润变得微薄。园艺照明，需要微调发射波长以加速植物生长，提供了一个更有利可图的机会。

负责所有关键领域。他们揭示了新冠肺炎所带来的后果是难以置信的多种多样。这场新冠肺炎疫情对一些部门几乎没有影响，变化都是由其他因素引起的；但是，这场疫情也是一些惊人的成功和销量下降背后的原因。

Covid 的一线希望…

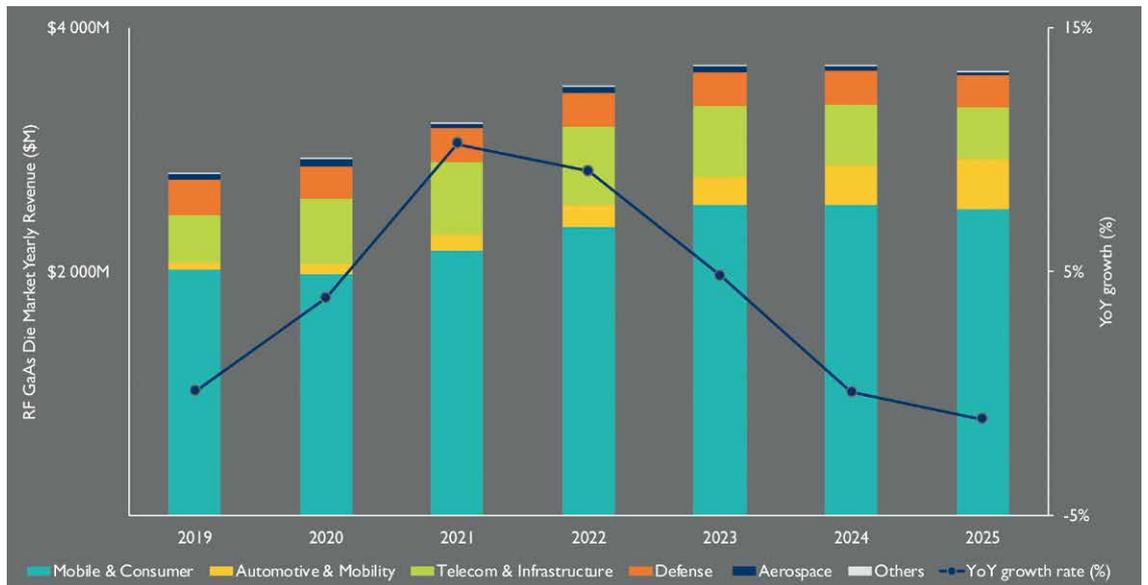
受到此次疫情非常积极影响的一个市场是在深紫外光域 (UVC) 中发光 LED，即波长在 280 nm 以下的 LED。十多年来，紫外线 LED 一直被认为是消毒的重要光源，而今年，紫外线 LED 被证明可以杀死 Covid-19 病毒，因此引起了大张旗鼓的宣传。

固态照明和显示器事业部经理帕斯·穆基什 (Pars Mukish) 告诉《化合物半导体》，他预计深紫外发光二极管 (UVC LED) 市场在 2019 年至 2020 年期间翻了一番，从 1.44 亿美元攀升至 3.08 亿美元。从今年开始，增长将放缓，到 2025 年，复合年增长率仍将保持在 52% 这一仍然非常良好的水平。到那时，该行业的价值将达到 25 亿美元。

穆基什 (Mukish) 说，“这些数字考虑到了疫苗的发展，”他解释道，这场新冠肺炎疫情为 UVC LED 产业带来了巨大的火花。去年的销量增长得益于过去十年的稳步发展，其中包括在每瓦成本惊人降低等方面的改进 -- 从 2015 年的每毫瓦近 100 美元下降到去年年底的每毫瓦仅 1 美元左右。

基于 UVC LED 的灯具的销量也在快速上升。全球照明制造商 Signify(前身为飞利浦照明) 对此提供了一个发展前景。该公司表示，预计 2019 年至 2020 年间，紫外灯的全球收入增长了 73%。为了顺应这一趋势，去年 6 月，该公司宣布将产能提高 8 倍。

值得注意的是，为固化胶粘剂提供光源的 UVA LED 行业并不在同一轨道上。穆基什 (Mukish) 解释说，由于该紫外光 LED 发射的波长只比可见的 LED 短一点，蓝光 LED 的制造商涌入了这个市场，压低了价格。请注意，这些芯片制造商不能朝着这个方向进一步发展并瞄准 UVC LED，因为它有一个明显不同的、更为复杂的架构。



尽管2020年上半年手机出货量大幅下降，但得益于5G的推出和转向Wi-Fi 6标准，GaAs DIE的收入继续攀升。来源：化合物半导体季度市场监测，2020年第四季度。模块II, Yole Développement。



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

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*

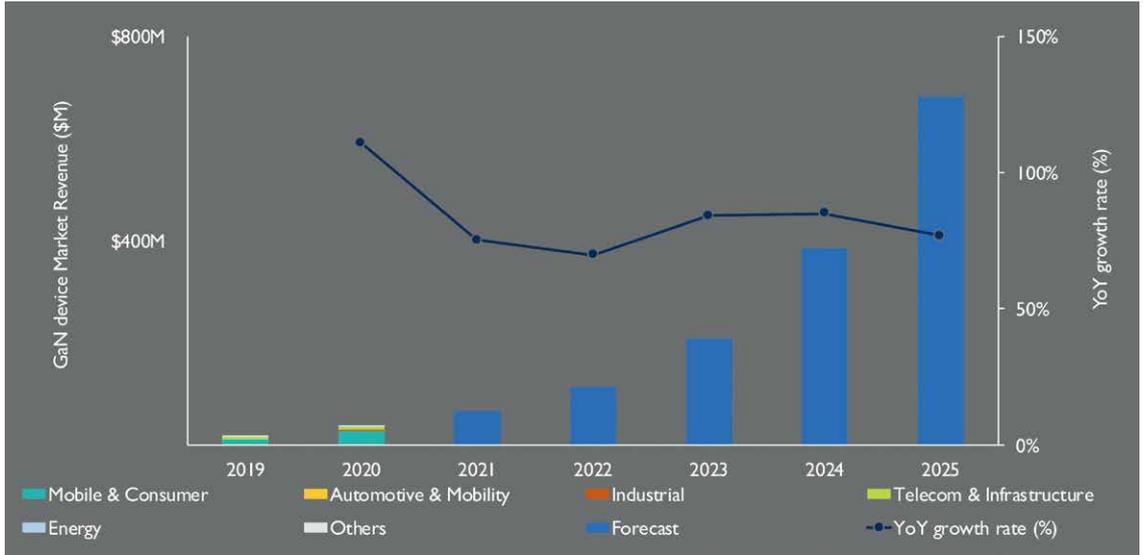
GaAs Multi-Junction Solar

High Efficiency Terrestrial CPV & Space PV

GaN LED & Laser

*MicroLED Display & AR/VR
UV Sterilisation*





得益于采用这项技术的65W快速充电器的快速增长，GaN电源器件市场的收入正在迅速增长。来源：化合物半导体季度市场监测，2020年第四季度。模块I, Yole Développement。

人们可能会认为，用于地铁和长途网络的磷化铟 (InP) 边缘发射激光器制造商，以及用于数据中心的 GaAs 垂直腔面发射激光器 (GaAs VCSELs) 制造商，将从这新冠肺炎疫情中受益。随着互联网流量达到新的高度，现在我们许多人每天的大部分工作时间都花在视频通话上，增加网络容量的需求也越来越大。不过，穆基什 (Mukish) 认为，这种压力不会产生立竿见影的效果。相反，加强基础设施建设需要时间，这将有助于加快我们世界的数字化进程。

令人惊讶的是，新冠肺炎对 SiC 市场也产生了积极的影响。毕竟，这种病毒的爆发阻碍了汽车的销售。然而，世界各国政府的回应一直是试图通过帮助加快该行业的电气化来支持该行业的发展——中国计划将对该行业的补贴延长至 2022 年，而德国、法国、西班牙和英国的公民提供鼓励购买电动汽车的经济激励措施。这对 SiC 行业来说是个好消息。Yole 表示，预计到 2025 年，对电动汽车行业的销售将增长，占 SiC 市场的 60%。

Yole 的化合物半导体技术和市场分析师 Ezgi Dogmus 表示，在电动汽车中部署碳化硅已经在高端汽车上开始进行了，比如特斯拉 (Tesla) 制造的汽车。埃隆·马斯克 (Elon Musk) 的公司在其 Model 3、S 和 X 中部署了这种材料。Dogmus 补充说：“我们知道今年还会有其他 OEMs 采用 SiC 器件。”

几年前，当特斯拉 (Tesla) 在其汽车上使用 SiC 材料时，相应功率器件订单的增加引发了人

们对 SiC 衬底供应的担忧。领先的芯片制造商纷纷与最大的 SiC 衬底生产商 Wolfspeed 谈判长期供应合同，以确保他们不会错过这个绝佳机遇。Dogmus 说，从那以后，人们对衬底供应的担忧已经有所减少。他说，目前市场正受益于众多供应商的进入和扩张。在中国，像北京天科合达半导体股份有限公司 (TankeBlue) 和山东天岳先进材料科技有限公司 (SICC) 这样的公司都有庞大的扩产计划。

随着碳化硅衬底生产商数量的增加，芯片制造商也从美国 GTAT 公司向市场推出的碳化硅晶圆中受益。多穆斯说，GTAT 与安森美半导体建立了合作伙伴关系，最近又与英飞凌建立了合作伙伴关系。“对于拥有内部碳化硅材料的公司来说，这是一种有趣的方法，可以帮助他们生长和生产自己的碳化硅材料，还可以减少 SiC 材料对其他外部公司的依赖。”

还有灰色的云

在汽车行业内，对电气化的投资是以牺牲激光雷达为代价的。与这项技术相关的项目一直被推迟，这项技术涉及激光芯片。穆基什 (Mukish) 说：“当你看一看激光雷达 (LiDAR) 市场时，它是相当巨大的，目前还没有那么多汽车品牌在实施它。”长远的前景是很有希望的，Yole 预测，LiDAR 市场将从 2019 年的 16 亿美元增长到 2025 年的 38 亿美元。

智能手机市场遭遇了关门歇业、旅行限制和勒紧裤带的局面。与 2019 年相比，2020 年全球

出货量有所下降，尤其是前两个季度。

对于 VCSELs 制造商来说，智能手机销量下降只是问题的一部分。在面部识别系统中，也已经从使用一对前置的 VCSELs，转向使用一个后置的发射器进行摄影或增强现实。穆基什 (Mukish) 表示：“这将对风投的数量和收入产生直接影响。”他补充说，Yole 已相应下调了他的预测。然而，尽管存在这种逆向阻力，预计到 2025 年 VCSELs 市场仍将以 18.4% 的复合年增长率持续攀升，总价值将达到 27 亿美元。

在垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 销售中占主导地位的是 Lumentum，该公司从 IQE 采购其外延片。Lumentum 在 2019 年享有 49% 的市场份额，这得益于其与苹果公司的合同，苹果为用于 3D 传感的 VCSEL 创造了最高的销量。然而，由于苹果在 2019 年末收购了 Finisar，其供应正在多样化，来自 II-VI 的 VCSELs 数量显著增加。

Yole 的化合物半导体和新兴衬底技术和市场分析师 Poshun Chiu 表示，尽管 2020 年智能手机出货量减少，但 GaAs 微电子的收入同比增长。他认为，全球销量的增长是因为最新的手机需要为 5G 和新的无线协议 WiFi6 配备功率放大器，这为 GaAs 提供了一个从硅、SOI 和锗技术等领域夺走市场份额的机会。随着收入的增加，GaAs 芯片及其相关外延片的产量也在增加。

Chiu 表示：“5G 和 Wi-Fi 6，这一新的连接是一个很大的卖点，其正在推动消费者更换新手机。”他还指出，许多 OEM 厂商最近都发布了采用这些技术的机型。展望未来，5G 手机将开始包含以毫米波运行的放大器，这可能会增加 GaAs 微电子器件的需求。

Yole 对可见光 LED 市场的最后一次预测是在 2019 年，当时分析师预测该年的销售额为 174 亿美元，到 2024 年的复合年增长率为 5%。然而，它最近的一些分析表明，这场新冠肺炎疫情已经对这个行业造成了影响—商业照明、室外景观照明和室外大屏显示器的下降超过了背光电视、平板电脑和笔记本电脑的销售增长。预计 2019 年至 2020 年总收入将下降 8% 左右，2021 年略有增加。

根据穆基什 (Mukish) 的说法，甚至在此次新冠肺炎疫情之前，可见光 LED 市场就已经处于低迷状态了。普通照明最初是 LED 的杀手级应用，但在台湾和中国厂商进入后，最终导致了产能过剩和强大的价格压力，最终导致了一场大屠杀。

正是这种状况，而不是新冠肺炎疫情所引起的任何后果，才导致 Cree/WolfSpeed 出售了基于 LED 的部分业务，并专注于射频和电力电子产品。

这场新冠肺炎疫情不会加速 LED 行业商品化进程。“它已经商品化了，”穆基什 (Mukish) 认为，他认为疫情可能会推动这一行业的进一步整合。

为了获得更高的利润率，当今一些领先的 LED 制造商瞄准了两个利基领域：外部汽车照明和园艺。

基于 LED 的前照灯继续发展，现在为汽车制造商提供了一个机会，通过使其不论在白天还是黑夜都能立即被辨认出来，来提升他们的品牌影响力。最新的进步之一是将特定品牌的照明与相机相结合，创造出一种提供可控性（如光束方向）的智能前照灯。

穆基什 (Mukish) 解释说：“只有少数几家公司能够供应这类器件，主要用于前照灯，因为这是你需要非常高功率和非常高功率密度器件的地方，这意味着你需要掌握热管理等方面的专业知识。”他说，欧司朗是汽车照明的主要供应商，这一有利可图的市场也为 Lumiled 带来了收入。

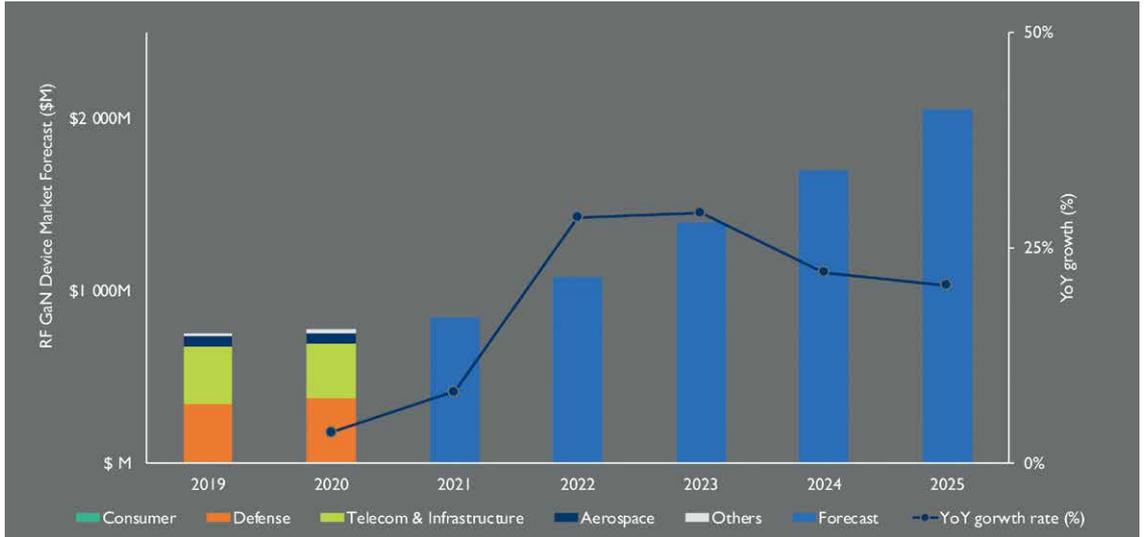
后者是园艺照明领域的关键参与者，在园艺照明领域，在这个领域的成功取决于对发射波长的精确微调，而不是优化功率密度。科学家们正在开始发现加速特定植物、水果和蔬菜生长所需的最佳光谱。

独立成功

GaN 基电力电子是一个没有从疫情中获得任何好处却仍能快速增长的市场。其芯片正被部署



基于 GaN 器件的 65W 快速充电器正在推动 GaN 电力电子市场的快速增长。



美国和中国之间的紧张关系正在阻碍GaN射频市场的增长。来源：化合物半导体季度市场监测，2020年第四季度。模块II, Yole D&Development。

在手机快速充电器中。销量增长如此之快，以至于 GaN 电力市场在 2019 年至 2020 年间几乎翻了一番。

Yole 的艾哈迈德·本·斯利曼 (Ahmed Ben Slimane) 是化合物半导体和新兴衬底公司的技术和市场分析师，他告诉《化合物半导体》，氮化镓 (GaN) 功率器件的销售在 2019 年底开始起飞，当时雷诺的王牌 Oppo 手机开始配备 65 W 氮化镓 (GaN) 充电器。

本·斯里曼说：“我们已经确定了两家瞄准这一消费市场的主要公司：Power Integration 和 Navitas。”“他们的产品的设计都赢得了不同的 OEM 厂商。”因此几款智能手机现在都配备了 GaN 充电器。

快速增长的市场总是会吸引竞争。本·斯利曼 (Ben Slimane) 表示，Transphorm、GaN Systems 和 InnoScience 都发布了令人印象深刻的产品性能数据，这将帮助它们进入 GaN 快速充电器市场，这也将是意法半导体 (STMicroElectronics) 和德州仪器 (Texas Instruments) 等大型 IDM 制造商们的目标。

与功率 GaN 市场一样，micro LED 市场也没有受到新冠肺炎的影响。对于 micro LED 来说，这是因为市场正在形成。去年，随着第一款商业产品的发布，它确实达到了一个重要的里程碑。

根据穆基什 (Mukish) 的说法，该行业的下一步是进一步开发这项技术，并发布一种“真正的”消费产品。穆基什 (Mukish) 解释说：“我说的是真正的消费品，因为当你看一看三星的产

品时，你会发现这是一款标价近 15 万美元的豪华电视。”虽然如此昂贵的商品是我们大多数人买不起的，但由于奢侈品高端电视市场的出现，在销售涓涓细流开始之前，价格可能不需要像人们预期的那样暴跌。

贸易战

对于射频 GaN 器件制造商来说，最大的两个市场是国防和电信基础设施。射频 GaN 已经在无线基础设施中使用，并已用于 4G LTE 基站。对于正在为中国部署 5G 基础设施的华为以及其欧洲的竞争对手诺基亚 (Nokia) 和爱立信 (Ericsson) 来说，GaN 是首选的技术。

据本·斯利曼 (Ben Slimane) 称，这场新冠肺炎疫情对 5G 的射频氮化镓 (GaN) 市场没有太大影响。真正阻碍销售的是中美之间正在进行的贸易战，华为受到贸易限制的严重影响，这也拖累了 Skyworks 和 Qorvo 的收入。

据本·斯利曼 (Ben Slimane) 说：“2021 年将是值得关注的重要一年。”“新总统上任，这可能会带来一个新的对华战略。”

随着乔·拜登 (Joe Biden) 的上任，美国在应对气候变化方面的地位也将发生巨大转变，这可能会进一步刺激电动汽车制造商和该供应链中的其他制造商。今年的另一个重大变化将是一种有效疫苗的广泛推广，这将有助于确保所有化合物半导体工厂的平稳运行。正如 Yole 的分析所示，我们的行业没有受到新冠肺炎疫情的任何重大打击，长期增长的轨迹似乎将在这十年中继续下去。CS。



Wolfspeed®

A CREE COMPANY

W O L F S P E E D
WOLFPACK



提供更高电流
实现更快产品面世速度

Wolfspeed 所有 SiC 模块目前均可提供
半桥与六合一配置

wolfspeed.com/cschina-wolfpack



用纳米线瞄准电信

纳米线激光器可以为电信业提供一种可广泛调谐的、易于与硅光子学集成的光源。

——NTT 公司的张国强

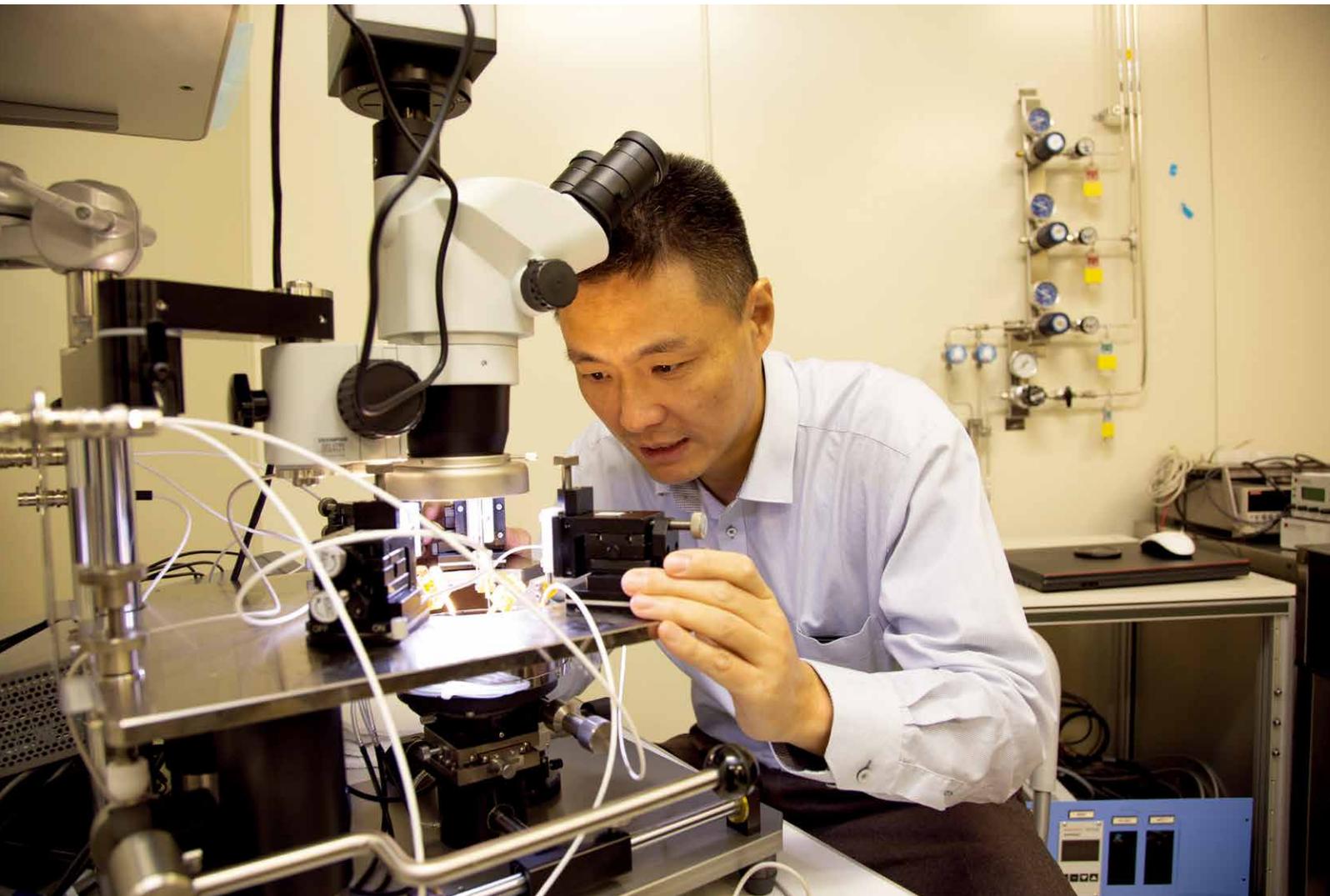
我们行业生产的几乎所有器件都是由化合物半导体异质结形成的。通过控制外延结构中每一层的成分、掺杂和厚度，我们能够制造出具有优良特性的各种器件。

一种这样的装置是基于 InP 的边发射激光器。这种激光器在 1.2 μm 到 1.6 μm 的光谱范围内工作，销售额高达数十亿美元，是光通信网络的关键组成部分。

为了生产这些电信激光器，工程师们将 InP

衬底加载到 MOCVD 反应器中，并沉积包含 InP 和 InGaAs(P) 层的外延堆栈。这是一种有利有弊的材料组合——通过调整成分，设计者可以调整激光器的发射波长，目标是光纤中的吸收值最小；但 InP 与其相关合金之间的晶格和热膨胀系数存在不匹配，这阻碍了进一步集成到功能系统和平台中。

在日本 NTT，我们正在开发一种不受这些问题阻碍的技术。为了打破束缚，我们正朝着一个



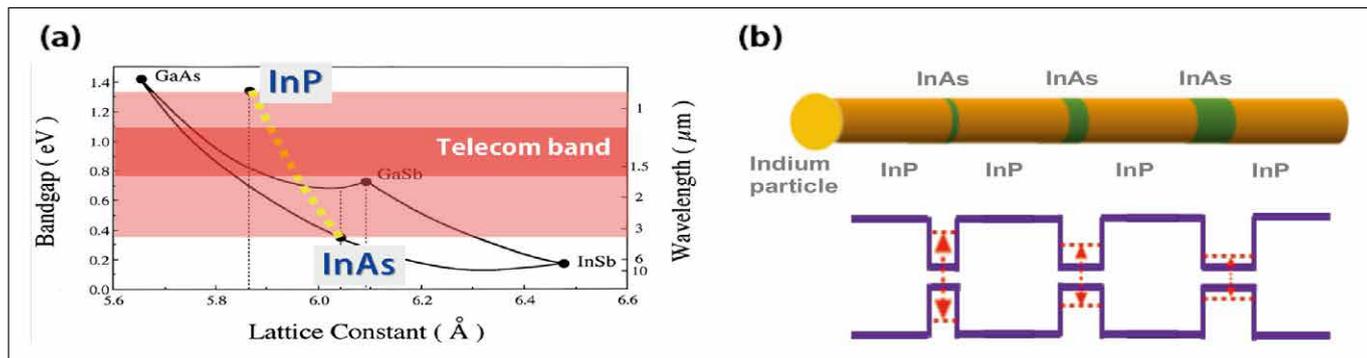


图1. (A) III-V 族化合物半导体的禁带宽度和晶格常数。InP/InAs 可以覆盖很宽的光谱范围，包括电信波段。(B) 由单个钪原子连接的 InP/InAs 异质结纳米线的晶格匹配约束远没有传统异质结中的严重。在这些纳米线中，沿轴向的量子限制效应使得 InAs 层的真实带隙可以通过厚度来调节。

新的方向前进——我们采用了一种能够更好地适应应变的纳米线结构，而不是使用平面材料。这为异质结构和功能器件开辟了新的机遇。

凭借我们的纳米线激光器可以将发光波长精确地定位到 1.2μm 到 1.6μm 的范围内，也为通过光纤传输数据提供了很有潜力的光源，这使得我们有机会转向成熟的硅光子学平台进行集成 -- 这是因为硅在电信波长下是透明的。

我们用 InP/InAs 量子异质结纳米线组成了我们的电信波段单纳米线激光器。InP 和 InAs 的配

对可以创建包括电信波段在内的宽光谱范围的量子异质结，这要归功于 InAs 量子盘沿轴向的实质性量子限制（见图 1）。

掌握不匹配

在平面结构中，由于严重的晶格失配 -3.1%（见图 2(A)-(C)），在 InP 上生长 InAs 层往往会导致 InAs 有源层中的高密度位错（见图 2(A)-(C)）。这种失配使得形成具有优异光学性能的无位错 InAs 有源层极具挑战性。

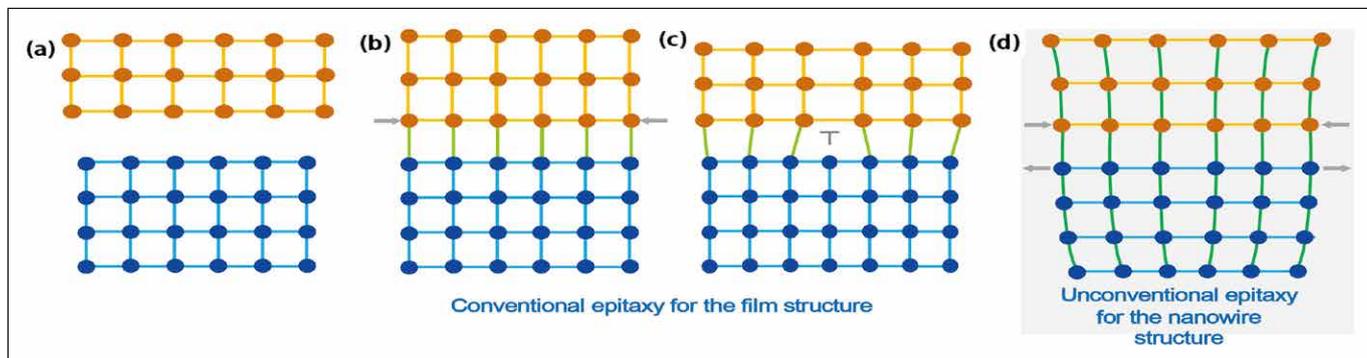


图2. 晶格失配的晶体材料的应变松弛在传统异质结构和纳米线之间有所不同。(A) 外延的晶体材料晶格。(B) 表层晶格弹性变形的共格生长。(C) 非共格生长(失配位错引起的应变弛豫)。(D) 通过两个晶格的弹性变形进行相干生长。与薄膜结构相比，纳米线结构中的晶格由于其微米级或纳米级的直径，可以更大程度地沿轴向变形。也真是得益于这一点，纳米线可以承受更高的晶格失配引起的应变。

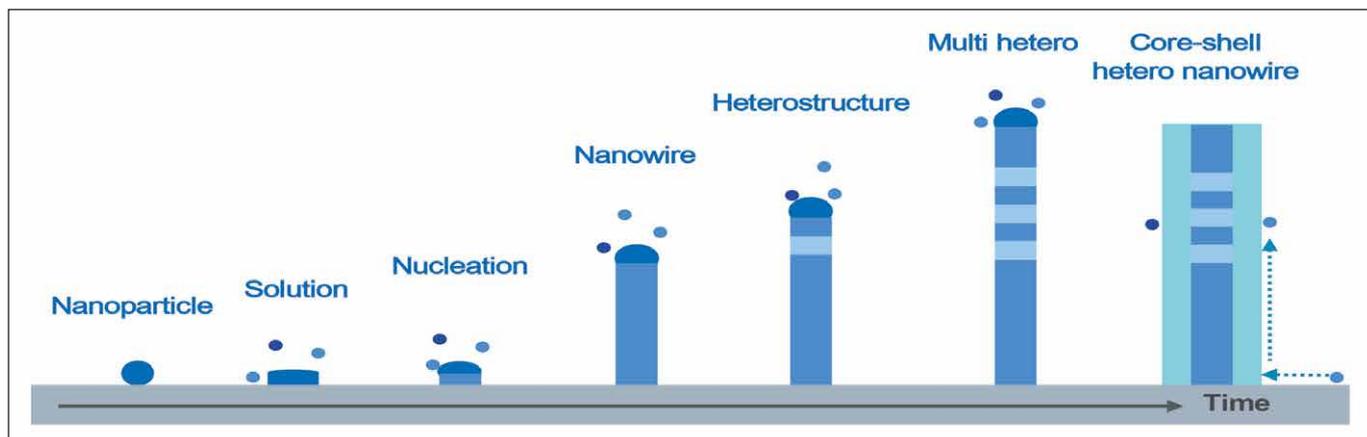


图3. 汽-液-固生长模式示意图。钪纳米线和磷化钪纳米线可以使用钪颗粒通过自催化气-液-固模式进行轴向生长。

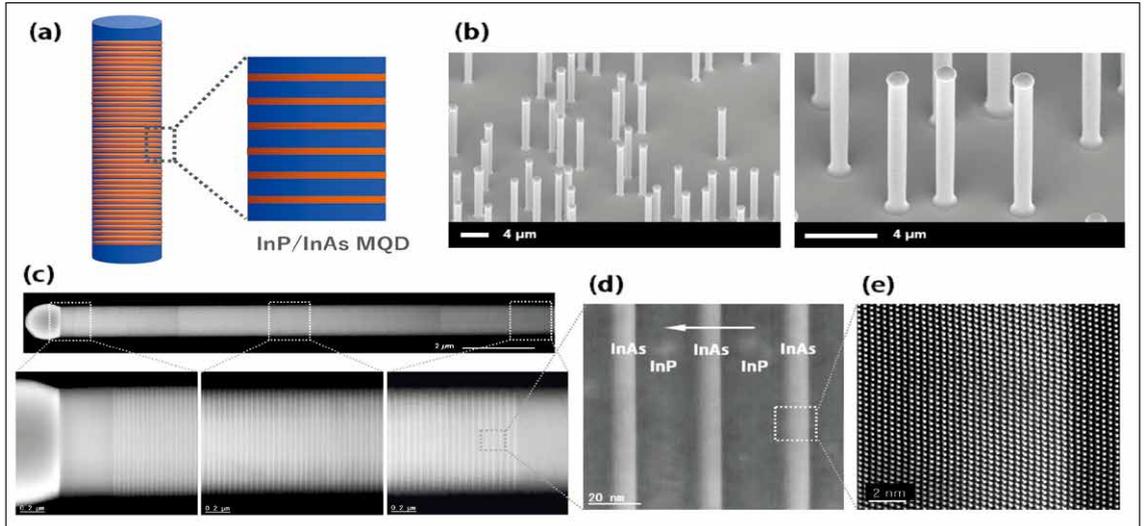


图4. InP/InAs多量子盘(MQD)纳米线。(A)MQD异质结纳米线示意图和突出InP/InAs MQD结构的异质结放大图。InAs层以红色表示。(B)在InP(111)B衬底上生长的InP/InAs多量子点纳米线的扫描电子显微镜图像(倾斜度: 38°)。(C)沿[011]区轴拍摄的InP/InAs多量子点纳米线的高角度环形暗场扫描透射电子显微镜(HAADF-STEM)图像。纳米线包含400个InP/InAs异质结单元。(D)和(E)像差校正的InP/InAs异质结沿[011]区轴方向的HAADF-STEM图像。水平白色箭头表示生长方向。InAs层厚度为 9.0 ± 1 nm, InP势垒层厚度为 25.6 ± 1 nm。

这与纳米线结构的情况截然不同。由于其纳米级的直径，纳米线的晶格可以通过横向变形，从而缓解晶格失配引起的应变（见图 2(D)）。当晶格失配较大时，纳米线异质结构可以承受应变，从而可以形成无位错的有源区。最常见的纳米线

合成方法是从下而上的气-液-固生长法。它在成分、掺杂、异质结构结构和直径方面具有很高的可控性（见图 3）。

研究人员使用金颗粒催化的气-液-固生长方法来制造各种纳米线，包括基于 GaAs 和 InP 的纳米线。使用金并不理想的，因为它与主流的 CMOS 工艺不兼容，因此阻碍了光学有源 III-V 族纳米线与硅技术的集成。通过气-液-固生长方法生产化合物半导体纳米线的更好的替代方案是基于 III 族元素或 V 族元素的粒子催化剂，在这两种元素中，前者更合适。

我们建立了一种通过自催化气-液-固生长模式制备 InP/InAs 异质结构纳米线的生长技术。这种方法提供了高度的可控性，允许我们将多个在电信领域发射的 InAs 量子盘插入我们的 InP 纳米线中（见图 4）。

我们结构的高质量在高角度环形暗场扫描透射电子显微镜中是显而易见的，它显示了沿 [011] 方向的多个量子盘层（见图 4(C)）。我们的结构是由沿轴向占主导地位的气-液-固生长模式造成的。由于生长温度较低，通过传统的薄膜生长模式，径向的生长可以忽略不计——这就是非催化模式。在所有这些因素的作用下，有很高的生长可控性，确保了整个多量子盘区增益介质的均匀性。

用高分辨率扫描隧道电子显微镜对我们的纳米线成像，使我们能够直接观察到 InP/InAs 异质结构的堆叠和界面特征（见图 4 (d) 和 (e)）。尽

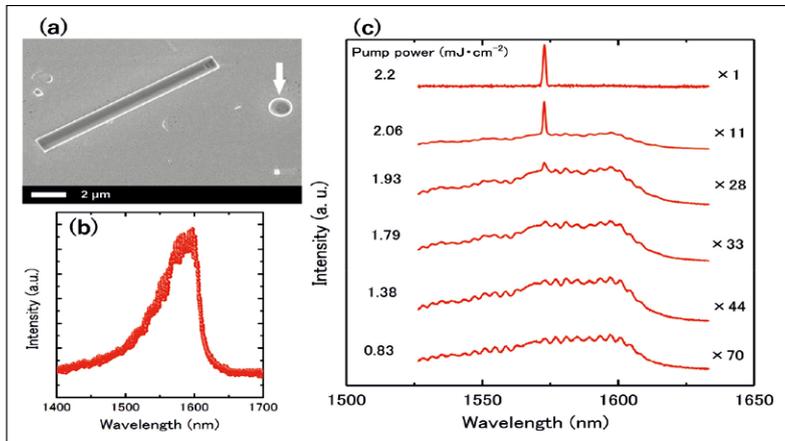


图5. (A)扫描电子显微镜图像，一根纳米线机械地分散在覆盖着金膜的硅基的二氧化硅衬底上。白色箭头表示已移除的细颗粒。(B)单根纳米线在 0.83 mJ cm^{-2} 泵浦激光功率下的光致发光光谱。(C)纳米线的光致发光光谱随泵浦功率的增大而变窄。

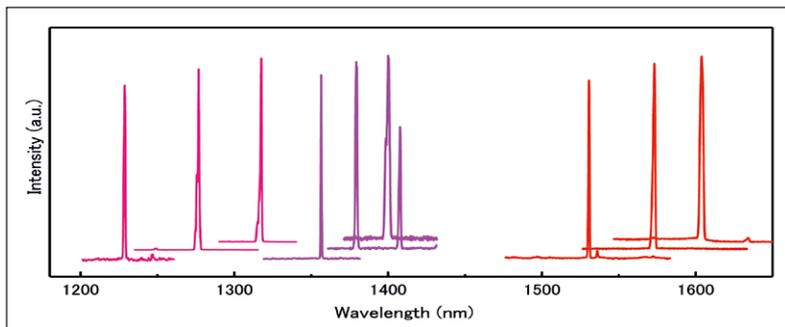


图6. 纳米线允许在整个电信波段范围内调谐激光波长。为了清晰起见，光谱进行了偏移。激光波长受生长参数的调制，如金属-有机源的流速。因此，一个宽的波长范围覆盖了整个电信波段，包括两个技术上重要的电信波段窗口，中心在1.3微米和1.55μm。

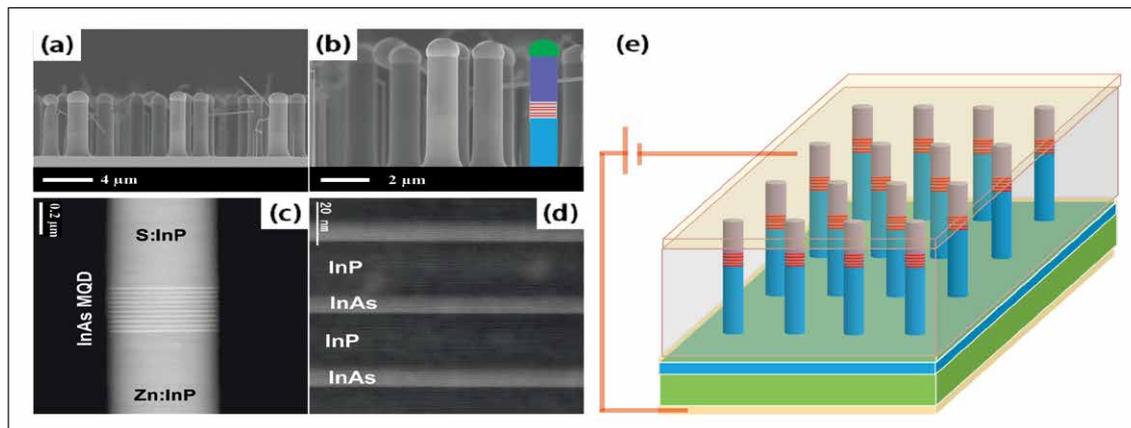


图7. InP/InAs异质结纳米线的形态和结构分析。(A)和(B)InP/InAs纳米线的横截面扫描电镜图像。插图显示了这些纳米线的p-i-n结构。(C)和(D)高角度环形暗场扫描透射电子显微镜图像，显示掺铟和掺硫InP段之间的多量子盘(MQD)有源区。MQD有源区由10个InAs量子盘组成。(E)纳米线LED器件的示意图。(图经IOP出版许可转载)

管 InP 和 InAs 之间有 3.1% 的晶格失配，但这些图像突出了 InAs/InP 的无位错界面。当 InAs 生长在 InP 上时，界面原子级突变（见图 4(c)）；当磷化铟加到砷化铟上时，由于砷在铟催化剂颗粒中的强储库效应，形成了一个梯度层。由于 InP/InAs 多量子盘结构中的相干界面，由晶格失配引起的应变相对较高。由于 InP 层比 InAs 圆片厚得多，所以后者存在压缩应变。

创建腔

我们转向显微光致发光来表征纳米线的光学特性。当它们被机械分散到异质衬底上时，我们可以去除尖端的铟颗粒，从而形成 (111) 镜面，从而形成 F-P 腔。该结构具有本征的 F-P 型共振模式，其在较宽的直径范围内具有足够大的模式指数。

通过光学泵浦我们的纳米线会导致激光行为。通过测量大量单根纳米线的光致发光，发现它们具有较宽的自发发射光谱，峰值波长在 1.57 μm -1.59 μm 之间，当激发功率为 2.15mJcm⁻² 时，出现以 1573 nm 为中心的尖峰。通过改变激发功率来绘制光的输入 - 输出曲线，揭示了从自发辐射到受激辐射的强烈转变。

我们的纳米线激光器的优点之一是它们的波长可以在很大范围内调谐，比如整个电信频段。通过在很大范围内调节单个 InAs 量子盘的厚度，我们能够调制光子发射能量。为了调整光盘的厚度，我们改变了源材料的流速（参见图 6）。基于这种方法实现的结果，我们的纳米线有望在很大范围内提供对激光波长的调制。我们可以通过形成具有纤锌矿晶体结构的纯 InAs 纳米线（注意，

在这些结构中不存在量子限制效应），将其延伸到 2.6 μm 的红外波段。

到目前为止，我们已经描述了光泵浦器件。然而，包括光子集成在内的许多应用都需要电流注入光发射器。要实现单根纳米线的电流注入激光是非常具有挑战性的，因为它们直接接触会恶化光限制。然而，我们已经朝着这个目标

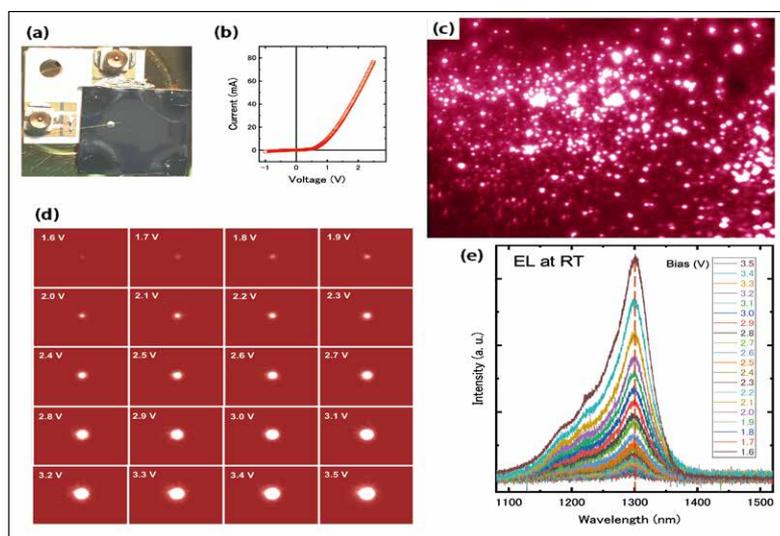


图8. 室温下纳米线LED的电学性能。(A)用金属电极将纳米线样品固定在白色陶瓷衬底上。黑色区域为纳米线发光二极管器件(10 μm × 10 μm)。(B)纳米线LED的典型电流-电压曲线。(C)由红外线相机在2.5伏特的LED偏压下拍摄的电致发光图像。(D)增加偏压(步长: 0.1V)的单个发光纳米线的电致发光图像。每幅图像的面积为24 μm × 36 μm 。(E)随偏压增加(步长: 0.1V), 纳米线的电致发光光谱如(D)所示。光谱在1300 ± 5 nm处有一个恒定的峰, 对应于电信波段的O波段。(图经IOP出版许可转载)

扩展阅读

- G. Zhang et al. ACS Nano 9 10580 (2015)
- G. Zhang et al. Nanotechnology 29 155202 (2018)
- G. Zhang et al. Sci. Adv. 5 eaat8896 (2019)
- H. Sumikura et al. Nano Lett. 19 8059 (2019)
- G. Zhang et al. Jpn. J. Appl. Phys 59 105003 (2020)

迈出了重要的一步，展示了可发射电信波长范围光波 p-i-n 结构纳米线 LED。这些电流注入发射器的制造开始于 InP/InAs p-i-n 结构的生长，采用自催化的气-液-固模式。在 InP(111)B 衬底上生长可实现垂直排列的纳米线（见图 7）。它们的特点是 InAs 有源层薄至约 9 nm。由于这明显低于块状晶体 InAs 的玻尔半径（约 34 nm），这确保了沿轴向的量子限制。

为了形成我们的新型 LED，我们首先将这些纳米线嵌入透明的绝缘苯环丁烯中。随后的反应离子蚀刻将这种有机物从表面移除，暴露出纳米线尖端，最终为增加电接触铺平了道路。在 p-InP 衬底上沉积 Au-Zn 金属，在 n-InP 纳米线段上沉积铟-锡-氧化物，为该器件创造了电接触。

我们已经研究了我们的纳米线 LED 的光电特性。其电流-电压 (I-V) 行为特性反映出了传统 LED 的特性（参见图 8）。为了观察单根纳米线的电致发光，我们在室温下进

行了微电致发光测量。可以看到，仅仅在 380 微米到 475 微米的区域有纳米线的电致发光（见图 8 (c)）。一般来说，单个亮点对应于单个纳米线 LED。随着偏压的增加，越来越多的纳米线显示出不断增加的电致发光强度。

电致发光波长的可调性是高性能光电子器件发展的关键。我们的多量子盘有源区域允许我们通过调整单个 InAs 量子盘的厚度来调制光子发射能量 - 这改变了沿轴向的量子限制。由于气-液-固生长模式提供了高度的可控性，我们能够精确地决定每个 InAs 量子盘的厚度，从而在电信范围的 O 和 E 波段调谐电致发光。

到目前为止，我们的进展取决于克服传统异质结构的晶格匹配限制。通过气-液-固合成的自下而上生长技术模式，我们已经生产出光泵浦纳米线激光器和在电信波段发射的基于 LED 的变体。我们的研究进展将为新的功能器件和不同形式的集成带来新的机遇。☞

2020 年 AXT 收入增长 15%

该公司首席执行官表示，2020 年是稳步改善的一年，因 InP 的强劲增长而告终。

化合物半导体衬底制造商 AXT 公布了截至 2020 年 12 月 31 日的第四季度财务业绩。

“2020 年是 AXT 稳步改善的一年，在第四季度 InP 强劲增长中（尤其是在 5G 中）结束了，这一季度通常是季节性下跌的季度。”首席执行官 Morris Young 说。

“我们完成了 GaAs 制造的搬迁，提高了我们的业务和制造流程，以满足 Tier-1 标准，并根据不断增长的需求扩大了产能。现在，随着 5G 及其相关技术的发展势头，数据中心连接技术的进步以及医疗保健和消费类设备中涌现的新应用，我们相信 AXT 在领导我们的行业方面处于有利地位，并使未来十年的许多决定性趋势成为可能，”他补充说。

2020 年第四季度业绩

2020 年第四季度的收入为 2700 万美元，而 2020 年第三季度的收入为 2550 万美元，2019 年第四季度的收入为 1840 万美元。2020 年第四季度毛利率为收入的 34%，而 2020 年第三季度毛利率为收入的 35%，2019 年第四季度毛利率为收入的 21%。2020 年第四季度的支出为 720 万美元，这主要是研发方面的大量投资和年终员工奖金。相比之下，2020 年第三季度为 660 万美元，2019 年第四季度为 670 万美元。2020 年第四季度的营业收入为 190 万美元，而 2020 年第三季度的营业收入为 220 万美元，2019 年第四季度的

营业亏损为 280 万美元。2020 年第四季度的净收入为 210 万美元，每股收益 0.05 美元，相比之下，2020 年第三季度的净收入为 100 万美元，每股收益 0.02 美元，2019 年第四季度的净亏损为 200 万美元，每股收益 0.05 美元。

2020 年业绩 (2020 年 1 月 1 日至 12 月 31 日)

2020 年的收入为 9,540 万美元，较 2019 年的 8,330 万美元增长了 15%。2020 年的毛利率为收入的 32%，高于 2019 年的 30%。2020 年的运营支出为 2,630 万美元，而 2019 年为 2510 万美元。2020 年的营业收入为 390 万美元，而 2019 财年的营业亏损为 30 万美元。2020 财年的净收入为 320 万美元，即每股收益 0.07 美元，而 2019 财年的净亏损为 260 万美元，即每股收益 0.07 美元。

IPO 动态

AXT 此前于 2020 年 11 月 16 日宣布了一项进入中国资本市场的战略计划，并推进其晶圆制造公司北京通美科技在科创板的首次公开发行 (IPO)。这一过程的第一步是让中国知名的私募股权公司投资通美基金。

2021 年 1 月，AXT 完成了对通美的私募股权投资融资。许多私募股权公司已经投资了约 4,900 万美元，以换取通美约 7.28% 的少数股权。

在科创板 IPO 的过程包括多个审核阶段，因此是一个漫长的过程。通美预计将在 2022 年年中实现这一目标。☞

扩展 GaN 功率放大器的带宽

通过增强基于 GaN HEMT 的放大器之间的耦合，宽带性能达到了新的水平。

RICHARD STEVENSON

您认为放大器的什么属性是最要紧的？无论是增强信号以驱动一对扬声器，还是增加基站的覆盖范围，或者是参与电子战，足够的增益都是首要考虑的因素。线性度也是一个重要选项，因为它确保了波形的忠实再现；而效率则无疑是一笔财富，因为它可以降低冷却要求，减少电费。

在这一高价值属性清单中，对带宽的渴望也包含其中。应用通常需要在很宽的频率范围内进行放大，理想的情况是不必为不同频率区域采用多个放大器，因为这会增加复杂性和成本。

去年 8 月 4 日至 6 日在线举行的 IEEE MTT-S 国际微波研讨会上，专家们概述了几种改善不同频率下放大带宽的方法。在此，我们呈现了该会议上发表的几篇论文的要点，概述了在亚

千兆赫到 200GHz 以上频率上的进展。

所有这些论文都提到了使用高质量 GaN 晶体管来构建宽频带高性能放大器。但请注意，仅仅选择这些器件并不能保证成功。它们如何与周围的组件相互作用至关重要，必须考虑互连技术和阻抗匹配之类的因素。

传输线变压器

富士通实验室的 Yoshitaka Niida 和同事们采用的是这一方法。他们取得了很大的成功，其进展使他们宣称已经为输出功率超过 200W 的 GaN 功率放大器的带宽树立了新标杆。富士通放大器的核心基于传输线 - 变压器的组合架构，其范围为 0.5GHz 至 2.1GHz。这借鉴了一种成熟的方法，即传输线变压器，它是一类宽带阻抗变压器。不



同于通过磁耦合传递能量的传统阻抗变压器，它通过横向传输线模式传递能量。这就实现了超宽带阻抗变压器。

放大器设计者面临的一个重大挑战是如何将晶体管的阻抗（通常只有几欧姆）通过匹配电路转换到 50Ω。对匹配电路采用大的阻抗转换率并不是一个很好的解决方案，因为这会使带宽变窄。

为了解决这个问题，Niida 和同事将阻抗转换功能添加到了功率组合器中。通过这种方法，匹配电路转换的阻抗可达 12.5Ω，从而降低了阻抗转换率。

该团队制造的功率组合器有 4 个输入端口，每个端口的阻抗为 12.5Ω。第一级将阻抗从 12.5Ω 转换到 25Ω，第二级将阻抗从 25Ω 转换到 50Ω。

传输线的制造涉及在 0.5mm 厚的衬底（介电常数为 3.4）顶部和底部创建金属结构，从而促进牢固的耦合。在衬底上形成金属化的通孔，电连接底层和顶层，从而创建一个 22 cm × 11cm 的基于传输线 - 变压器的功率组合器。

该团队通过在一个四路功率分配器和一个四路功率组合器之间放置 4 个 GaN HEMTs 功率放大器（每个有 12.5Ω 输入和输出阻抗）来形成一个宽带功率放大器。这些 HEMT 的栅极宽度为 16mm，采用 0.25μm 的 AlGaN/GaN HEMT 技术在内部生产。在放大器上进行的小信号测量（尺寸为 22cm × 27cm × 1.5cm）显示，在 0.5-2.1GHz 范围内，使用 50V 的漏极电压，增益超过 9.7dB，输入回波损耗低于 -7.9dB。

相同的电压用于涉及 10μs 脉冲和 1% 占空比的大信号测量。对于 44 dBm 的输入功率，该放大器在 0.5-2.1 GHz 范围内以 42.3% ± 19.4% 的功率附加效率产生 53.4 dB ± 1.6 dB 的输出。输出功率在 1.3 GHz 的处达到峰值（高达 55.0 dBm），相

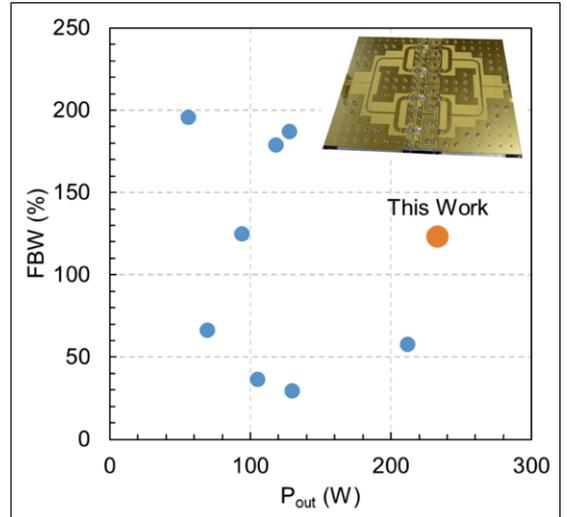


图1.对富士通公司GaN放大器的评估，该放大器采用基于传输线-变压器的组合技术，评估表明，它为带宽树立了新的基准。插图展示了这一功率放大器。

当于 315 W。

Niida 及其同事使用一个被称为分数带宽的指标对他们的结果进行了基准测试（该指标是最高频率和最低频率之差除以中心频率）。基于这个数据，该团队声称其功率放大器是所有已报道的输出功率超过 200W 的功率放大器中带宽最高的。

Niida 和同事们的下一个目标之一是测试这项技术是否可以应用于更高的频率。

非均匀分布式功率放大器

在为商业和国防市场服务的宽带微波系统中，GaN 非均匀分布式功率放大器是一种流行的选择。因为它能将非常宽的带宽、正常的输出功率及良好的功率附加效率结合起来。

来自三菱电机公司信息技术研发中心的 Jun Kamioka 和同事们声称，他们通过构建第一个包含带通滤波器的非均匀分布式功率放大器，取得了新的突破。他们认为，他们的设计为宽带放大器提供了有史以来最高的输出功率。

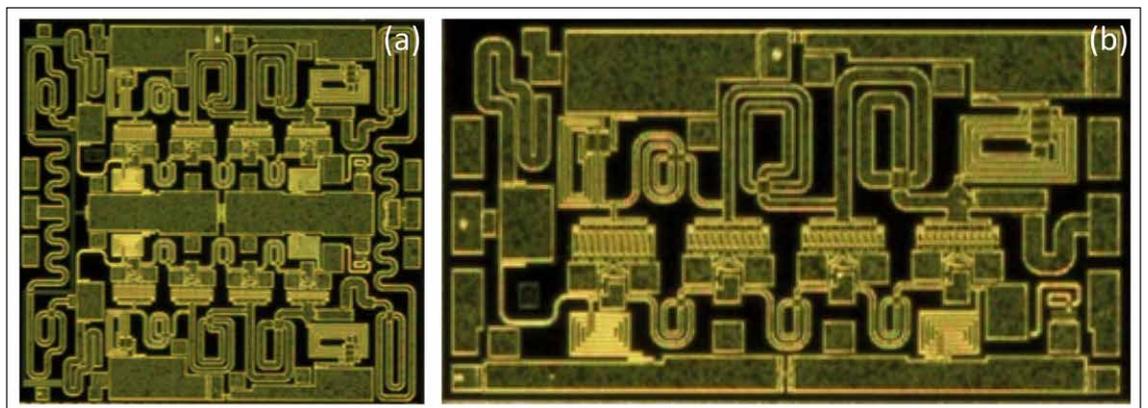


图2.三菱电机公司的研究人员制造出了具有带通滤波器的单端(a)和两路组合(b)大功率放大器。

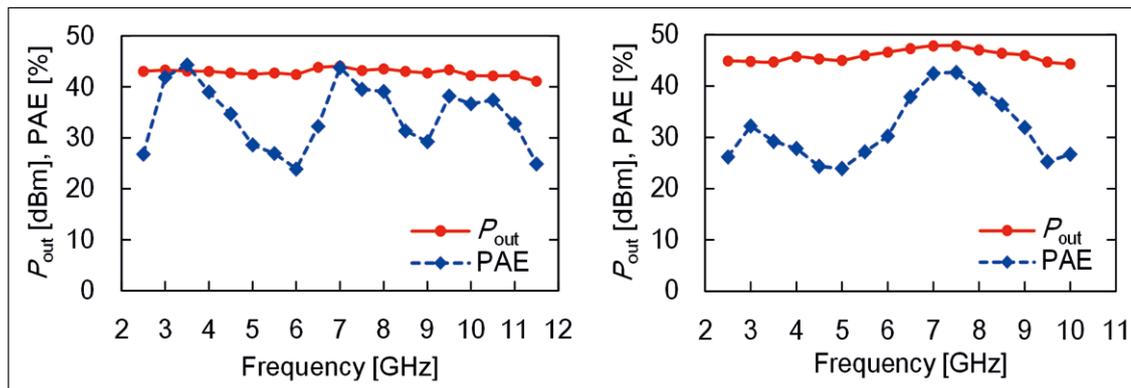


图3. 三菱公司的双路组合GaN MMIC大功率放大器的输出功率(右)比单端型号(左)更高。

对于在第一单元使用人工传输线配置的传统分布式放大器，在每个FET的截止频率和输出功率之间都要进行权衡。增加FET的栅极外围，其输出功率的增加是以牺牲其截止频率为代价的。

这种电路设计的一个变通方法是在第一个单元中增加一个额外的电容，但这在增加截止频率的同时也会影响增益。Kamioka及其同事认为，一个更好的选择是插入一个带通滤波器。它不仅增加了较高的截止频率，也引入了较低的截止频率。

该团队使用公司内部0.25mm GaN-on-SiC MMIC技术(见图2)，通过构建单端和双路组合GaN MMIC大功率放大器，对这种设计进行了研究。

单端型号是一个2.8mm×1.5mm的芯片，具有四个FET。这些晶体管的栅极外围分别为1.0mm、0.7mm、0.6mm和0.5mm，带通人工传输线应用于第一和最后一个FET。使用50V的直流漏极电压和50mA的静态漏极电流，在2.5GHz至11GHz的频率范围内，小信号增益超过12dB。大信号测量，在占空比为10%的脉冲栅极偏置下，在2.5GHz至11GHz范围内产生24%至44%不等的功率附加效率和42.2dBm至44.1dBm的输出范围(见图3)。

双路组合MMIC是一个明显更大的芯片，尺寸为3.2mm×3.0mm。使用相同的测量条件，在2.5GHz至10GHz范围内，这种放大器产生的小信号增益超过11dB，功率增值效率在24%至33%之间，输出功率在44.3dBm至47.9dBm之间--相当于27W至61W。

Kamioka表示，团队的目标之一是在保持大输出功率的同时，尝试扩大带宽。

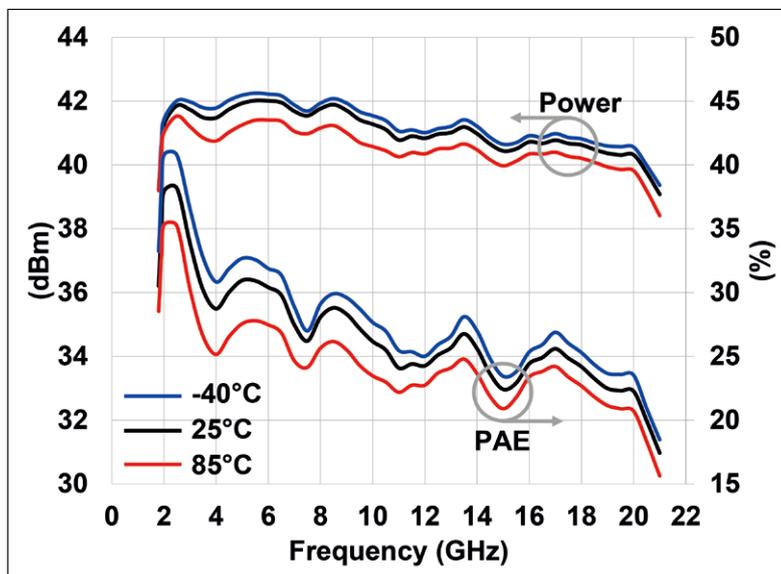
Qorvo公司的工程师已经生产出了带宽更宽的放大器。在今年IMS会议上发表的两篇论文中，该公司基础设施与国防产品部门的开发人员声称已经制造出了带宽最宽的两级GaN放大器，适用

于输出功率超过10W、基于非均匀分布式PA的放大器。该团队的2-20GHz GaN MMIC放大器具有基于带宽的十倍频变压器功率合成器，可提供高达20W的输出。

据Qorvo公司的工程师介绍，到目前为止，由于在该带宽上缺乏低损耗的功率组合器，2-20GHz频段上的输出功率一直受到单个功率放大器的输出功率的限制。为了解决这一局限性，该团队开发了二级放大器，该放大器具有基于带宽的片上变压器功率合成器，带宽为十倍。主要作者Michael Roberg称，该组合器基于宽边耦合变压器，“相当新颖”。他表示，设计和制造中涉及的一些知识产权正在申请专利，因此他目前无法透露更多信息。”

放大器采用了Qorvo的QGAN15工艺制造，该工艺涉及先在SiC衬底上生长再减薄至100μm的技术。Roberg说，部分地进行薄化是为了改善MMIC的热管理。他补充说：“衬底的薄化对于最小化器件源电感、实现高性能、高频运行也是至关重要的。”

图4. Qorvo的TGA29是一款10W 2-20GHz GaN MMIC，芯片尺寸仅为10.5mm²。它在2-20GHz范围内产生40.3dBm至42dBm的输出功率，输入功率为27dBm。



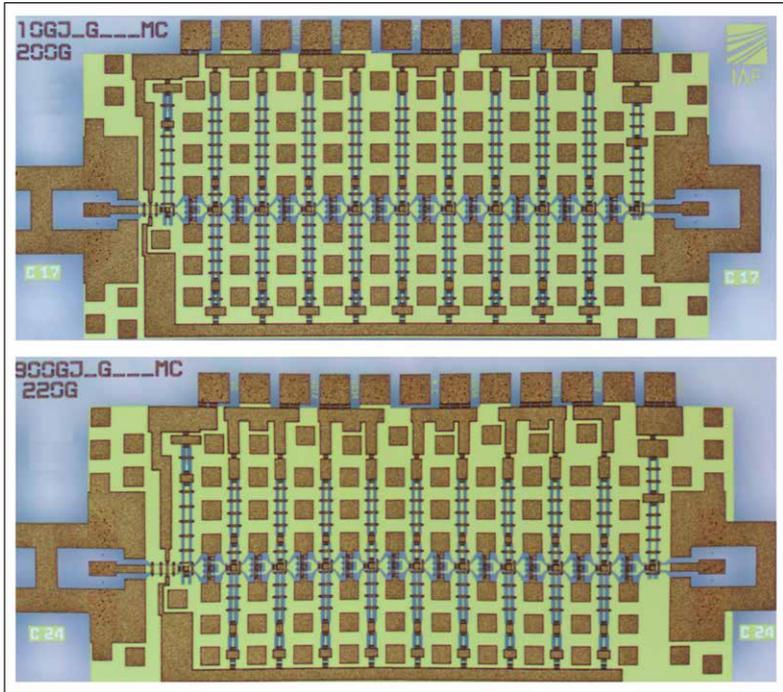


图5. Fraunhofer IAF的研究人员正在为GaN MMIC在200GHz左右频率下的性能设定新的基准。该团队的十级MMIC在145GHz至205GHz（顶部）范围内的小信号增益超过15dB，在162GHz至217GHz（底部）范围内的增益为10dB。

通常情况下，在微波频率下驱动放大器的电压需要 28V 或更高，但由于引入了十倍带宽宽带耦合变压器，Qorvo 制造的 MMIC 的运行电压仅为 22V。Roberg 说，转为这种较低电压有重大意义，因为它带来了几个好处。“在较宽的带宽上，GaN 器件在较低的电压下具有更好的功率附加效率。此外，即使在较低电压下功率附加效率相同，GaN 器件在较低电压下的耗散也更小。”

在较低的电压下工作也带来了与单片工艺相关的优点。通过降低电压，电容器和有源器件之间的电压波动就会减少。“的确，更高的电流被用来换取了更低的电压以实现性能，” Roberg 说，“但每一个导体都能够被适当地设计，以确保不存在电迁移问题。”

他和同事已经评估了两种不同的 MMIC 的性能，这两种 MMIC 都是市售产品。TGA2962 是一款 10 W 2-20 GHz GaN MMIC，芯片尺寸仅为 10.5mm²，而它 20 W 的表兄则是芯片尺寸为 25.8mm² 的 QPA2966D。

尺寸较小的那款芯片在 22 V 偏置点下工作，栅极电压设定为 1680mA 的静态电流，并使用 27dBm 的输入功率，在 2-20 GHz 范围内产生了 40.3dBm 至 42dBm 的输出，相应的大信号增益为 13.3dB 至 15dB（见图 4）。功率附加效率在 2.5 Hz 时达到了 38.2% 的峰值。

在相同的偏置下驱动，但静态电流为 3360mA 并使用 31 dBm 的输入功率，尺寸较大那款芯片在 2-20 GHz 范围内的输出功率在 42.6 Bm 和 44.9dBm 之间波动，并具有 11.6dB 至 13.9dB 的大信号增益。在频段的高端，输出功率有下降，这是由基于变压器的功率组合器建模不准确造成的。Roberg 表示，接下来的目标之一是生产 1-40GHz 的宽频带、大功率放大器的完整产品组合，利用宽边耦合变压器来实现世界级的输出功率和功率附加效率。

G 波段的增益

着眼于更高的频率，Fraunhofer IAF 的工程师在 IMS 上发表了一篇论文，声称已经制造出了第一个工作在 200GHz 以上的 G 波段宽带功率放大器 MMIC。

该团队的工作包括制造一个十级放大器，它在 145 GHz 和 205 GHz 之间提供超过 15 dB 的小信号增益，这在 140 GHz 至 220 GHz 的 G 波段中占有很大比例。人们对这一频段内的大气窗口很感兴趣，因为它们能确保减少下一代高数据速率无线通信链路和高分辨率成像系统的传播损耗。

论文的主要作者 Maciej wikli ski 详细介绍了这种高频 MMIC 的性能，以及另一种在稍微不同频率范围内提供增益的 MMIC，他说，该团队的放大器是使用其内部 100nm 基准工艺的增强版制造的。改进之处包括在 G 波段放大器中采用的、产生 70nm 栅极的能力。

据 Ćwikliński 介绍，Fraunhofer IAF 工艺的独特之处在于它将出色的高频性能（即高 fT 和 fmax）与良好的晶体管良率及均匀性相结合。

放大器的制造开始于将 100mm 的 4H-SiC 衬底装入 MOCVD 室，并沉积了 GaN 基异质结构，其中包括一层薄 AlN 中间层，以减少合金散射并增加二维电子气体的迁移率。工程师们使用硅注入技术来调整接触电阻，并使用电子束光刻技术来定义 70nm 栅极的尺寸。他们通过优化金属-绝缘体-金属结构的沉积，实现了寄生电阻的降低，并通过将 SiC 减薄至 75μm，并通过孔加工 30μm x 30μm。

Ćwikliński 与其同事们制造的 HEMT 的特点之一是栅极-源极和栅极-漏极的间距不对称，栅极和漏极之间的长度超过了栅极和源极之间的长度。

聚焦光电技术在 半导体加工中的应用

展品范围

激光切割/打标/钻孔/焊接/清洗等加工设备、激光器、光学镜头及摄像模组、自动化及高端智能设备、机器视觉系统及应用、光学镀膜技术及设备、光电传感器、太赫兹光谱技术等；

同期展会



第23届中国国际光电博览会

160,000M² 展出面积 | 95,000+ 专业观众 | 3,000+ 参展企业



扫码登记免费参观

WWW.CIOE.CN

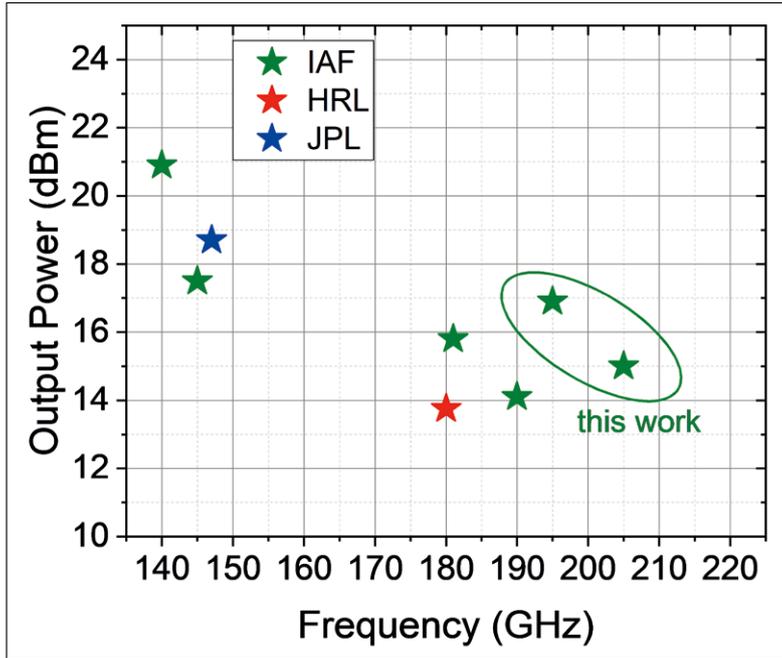


图6. Fraunhofer IAF生产的GaN MMIC的性能比HRL实验室和美国宇航局JPL生产的GaN MMIC性能更胜一筹。

“延长栅极 - 漏极间距的主要目的是提高HEMT的高频增益，这事关降低栅极 - 漏极的反馈电容。”Ćwikliński解释说。

他和同事们使用共面波导形成了MMIC的匹配网络，并且接地间距为25μm。由于该放大器的增益级数较多，因此级间匹配网络决定了性能。它是以双存根调谐网络的形式实现的，两个存根都是直流分离的，这让它们能作为偏置注入点使用。为了使放大器占位面积最小化，级间匹配网络非常紧凑。漏极馈线连接到金属 - 绝缘体 - 金属电容器的顶板，并通过漏极 - 偏置短线进一步向上布线，栅极馈线和栅极 - 偏置短线通过金属 - 绝缘体 - 金属电容器的底板连接。通过将漏极进给器与下一个HEMT的栅极进给器仅相距45μm，可以为MMIC实现相对密集的布局。

该团队的首款十级放大器，芯片尺寸仅为1.55mm×0.8mm，在155GHz下的小信号增益峰值为30dB，在145GHz至205GHz之间的信号增益超过15dB。据Ćwikliński介绍，对于这样的高频设计来说，晶圆上小信号响应的均匀性非常好。射频产出率令人印象深刻，达到了73%。在整个晶圆上，工作频段内小信号增益的单元间变化仅为±1dB。

该团队制造的第二个放大器，尺寸为1.5mm×0.75mm，在162GHz至217GHz的范围内提供平均10dB的小信号增益。直到220GHz，增益仍保持在7dB以上。对于这种放大器，射频产出率为81%，均匀性为±2dB。对这两种设计

都进行了大信号测量。使用195GHz的输入扫频，第一款MMIC以613mW/mm的功率密度提供高达16.9dB的功率。功率附加效率为1.7%。对于8dBm的输入功率，从185GHz到205GHz，输出超过14dBm。第二款放大器以439mW/mm的功率密度提供高达15dBm的功率，相应的功率附加效率为1.1%。在170GHz至220GHz频段，使用7dBm的输入，可以产生超过12dB的输出。

Ćwikliński和同事们以HRL实验室和NASA的JPL团队制造的放大器为基准，对他们放大器的性能进行了比较（见图6）。Fraunhofer IAF制造的MMIC更胜一筹，在输出功率和高频方面都占有优势。

尽管取得了这一进展，GaN MMIC的性能仍需追赶基于InP的MMIC。据Ćwikliński介绍，劣势源于GaN HEMT的高频增益与InP基晶体管相比相对较低。

“当然，克服物理学上的困难、制造出比InP同类产品具有更高增益的GaN晶体管是很难的，”Ćwikliński说，“然而，无论是技术方面还是电路设计方面，我们仍然看到一些改进的空间。”

他认为，GaN MMIC有超越InP MMIC的能力。为了实现这一目标，必须使用高产量工艺生产出均匀度良好的高性能HEMT。而这将为实质性改进多级和多路组合构成的高频功率放大器打开一扇门。

Ćwikliński指出，在200GHz下运行的InP MMIC最先进的一点是在输出级中组合了16个晶体管。“在IMS2020上展示的工作中，输出功率降低了五倍，但仅在输出级使用单个GaN晶体管即可实现。”

他还暗示，InP技术似乎正在接近其在高频下的片上结合极限。该团队的目标之一是对其GaN工艺进行进一步改进，使其能够在100GHz以上运行的MMIC中成为一个有吸引力的选项，这种MMIC主要用于5G之后的下一代通信网络应用。

“长期目标是将我们的GaN HEMT工艺作为整个毫米波频谱（即至少300GHz）内功率放大器MMIC的主导技术。”这种努力将有助于增加GaN放大器的吸引力。它们已经以其高功率密度和高功率附加效率而闻名，而令人印象深刻的带宽也指日可待。☞

超临界二氧化碳孕育出性能出众的 MOSFET

——超临界二氧化碳低温处理改善了碳化硅和二氧化硅的界面

碳化硅和二氧化硅之间的界面质量会对碳化硅场效应晶体管 (SiC MOSFET) 的性能产生限制。但是, 西安交通大学和西安电子科技大学的研究人员声称, 这种不足可以通过超临界二氧化碳处理来解决, 超临界二氧化碳处理可以降低界面态密度。

团队的发言人, 西安交通大学的 Weihua Liu, 告诉《化合物半导体》, 在传统的碳化硅场效应晶体管中, 界面不能通过高温退火来优化, 因为这会产生碳簇和其他缺陷。

用较低温度的超临界 CO₂ 处理可消除这些缺陷的形成, 该处理可保证较高的载流子迁移率, 较低的泄漏电流以及能提高栅极氧化物的临界击穿电场。

在超临界流体中, 液相和气相共存。得益于此, 超临界 CO₂ 兼具了类似于气体的溶解度和类似于液体的渗透性, 从而使得其能够无损地扩散到纳米级结构中。

使用超临界 CO₂ 改善半导体器件中的界面并不是什么新鲜事。早在 2007 年, 就有报道描述了这种技术可以给非晶硅制成的薄膜晶体管带来好处。

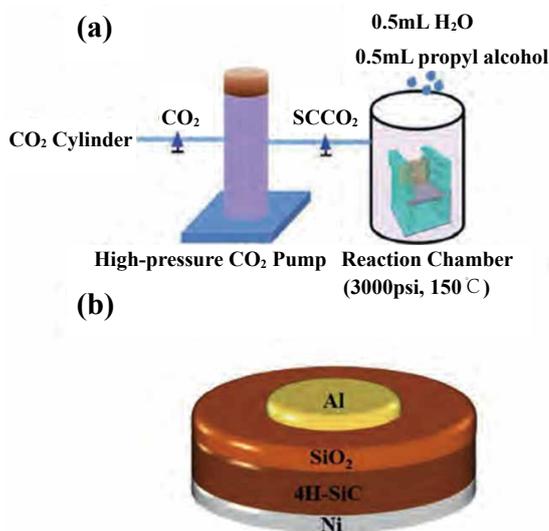
人们认为, 在低至 150 °C 的温度下对 SiC MOSFET 进行超临界 CO₂ 处理时, 会终止氧化物-半导体界面处的陷阱并且能够抑制界面寄生氧化物。

为了评估超临界 CO₂ 工艺的好处, 该团队首先制作了 MOS 结构。他们采用了掺杂浓度为 $3.5 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 的 n 型层外延片, 并应用了标准的清洁工艺后, 使用干法氧化生成了厚度为 55-60 nm 的 SiO₂ 膜。

在 20 MPa 的压力下, 将一些样品在 150 °C 的超临界 CO₂ 中处理 60 分钟 (见下图)。该团队向处理室中添加了 0.5 ml 的水和 0.5 ml 的丙醇。后者充当非极性 CO₂ 分子和极性水分子之间的表面活性剂, 使得水能够均匀地分布在超临界 CO₂ 中。

将超临界 CO₂ 处理(a)应用于 MOS 结构中(b)。

为了对结果进行基准测试, 对一些样品没有



将超临界 CO₂ 处理 (a) 应用于 MOS 结构中 (b)。

进行任何处理, 同时将另一些样品放在 150 °C 的纯水蒸汽中处理 60 分钟, 以形成对照。

利用直径为 300 μm 的铝电极制作的 MOS 结构, 使得该研究小组能够评估近界面氧化物陷阱的密度。通过电容-电压测量, 他们发现未经处理的样品中近界面氧化物陷阱密度为 $1.62 \times 10^{11} \text{cm}^{-2}$, 而在水蒸汽和超临界 CO₂ 中处理的样品的近界面氧化物陷阱密度分别为 $6.63 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 和 $1.84 \times 10^{10} \text{cm}^{-2}$ 。据称, 该最低值的产生是由于 Si-O-Si 特征键的形成而终止了 SiO₂ 中的陷阱。

超临界 CO₂ 处理的其他好处是可以减少漏电流和提高击穿电场。

界面态密度的测量也揭示了超临界 CO₂ 处理的益处。

Liu 说, 该团队的下一个任务是优化实验条件, 以进一步降低界面态密度。另一个目标是通过对比对 4H-SiC MOSFET 器件进行这样的工艺处理, 来验证超临界流体工艺可以为 4H-SiC MOSFET 器件的性能带来好处。☞

参考文献

M. Wang et al. Appl. Phys. Express 13 111002 (2020)

构建更好的 Ga₂O₃ 晶体管

在高导电材料中包裹调制掺杂的 Ga₂O₃ 场效应晶体管解决了与热管理和载流子传输有关的问题

如果 Ga₂O₃ 晶体管要发挥其在射频和电力电子方面的潜力，就必须解决与低的电子载流子迁移率和散热有关的问题。

美国宾夕法尼亚州立大学 (Pennsylvania State University)、俄亥俄州立大学 (Ohio State University)、凯马科技公司 (Kyma Technologies)、现代微系统公司 (Modern Microsystems) 和犹他大学 (University of Utah) 的工程师合作，为上述两个问题提供了有希望的解决方案。该团队正在用一种具有调制硅 δ 掺杂的场效应晶体管（一种被称为 MODFET 的晶体管）替代 MOSFET，并结合高导热材料，以使器件能够运行更激烈而不会产生过热。使用最强大的散热结构，可使功率处理能力提高五倍。

温度的上升下降了近 40%。

工程师们还借助模拟来考虑在调制掺杂场效应晶体管 (MODFET) 下面插入高热导率衬底对功率处理的影响。对于一个具有 10μm 厚的 Ga₂O₃ 缓冲层的调制掺杂场效应晶体管 (MODFET) (见图 (b))，将该器件安装在 4H-SiC 晶片上会使最高温度上升减少 46%。用热导率高约四倍的金刚石代替 4H-SiC，实现了进一步的改善。然而，涨幅不大，最高温度仅下降了 5%，这是因为 10μm 厚的 Ga₂O₃ 缓冲层主导了该器件的散热速率。

为了评估当从 4H-SiC 切换到金刚石时缓冲层对器件发热的作用，研究小组还模拟了 Ga₂O₃ 缓冲层厚度为 100μm 和 1μm 的调制掺杂场效应晶体管 (MODFET)。对于前者，钻石仅比 4H-SiC 提高 1%，但对于后者，则提高了 14%。然而，该研究小组很快指出，将 Ga₂O₃ 缓冲层变薄至仅 1μm 的可行性尚未确定。

双面冷却设计甚至可能会产生更好的效果 (c)

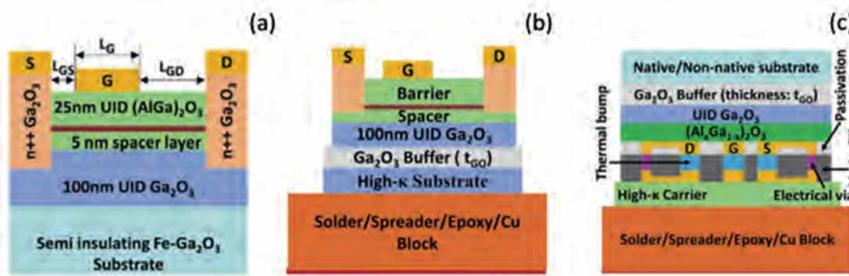
这些趋势的实验验证来自红外热像仪的测量，并且也得到了有限元热模型的支持。工程师证明，在具有 10μm 厚度的 Ga₂O₃ 缓冲层的 MODFET 中增加 500μm 厚度的 4H-SiC 晶圆可将峰值温度降低 66%。

双面冷却设计可进一步降低峰值温度。采用这种架构，最好的结果来自以下几个方面的组合：在 FET 上沉积纳米晶金刚石；使用金凸块，而不是铜制成的凸块；并将晶体管安装在多晶金刚石上。

模拟仿真表明，对于工作在沟道温度为 200℃ 下的 MODFET，从传统的同质外延设计过渡到最佳的双面设计可使功率密度从 1.7 W/mm 提高到 9.5 W/mm。

参考文献

B. Chatterjee et al. Appl. Phys. Lett 117 153501 (2020)



Ga₂O₃ MODFET 的热管理(a)可以通过插入高热导率衬底来改善(b)

该小组的工作包括实验研究和模拟仿真两个方面。它们包括使用热反射热成像来确定各种工作条件下 MODFET 的表面温度。为了验证这些结果，工程师们转向了纳米粒子辅助拉曼测温法。这两种检测栅极金属温升技术的结果具有很好的一致性。这些值在 Synopsys Sentaurus 和 COMSOL Multiphysics 软件生成的模拟中均得到了重复。

利用模拟仿真来考虑在栅极到源极间距为 1μm，栅长为 3μm 的 MODFET 中栅极到漏极距离变化的影响 (见图 (a))。为了提高功率场效应晶体管 (FETs) 的击穿电压，设计人员倾向于采用栅 - 漏间距大于栅 - 源间距的结构形式。根据仿真模拟，通过将栅极到漏极的距离从 3 μm (用于热测量的设备中使用的距离) 增加到 20 μm，峰值电场降低了一个数量级。换个角度讲，峰值

AIPN 扩展了氮化物家族

AIPN 外延层的生长有望得到更好的高电子迁移率晶体管 (HEMTs) 和垂直腔面发射激光器 (VCSELs)

名 古屋大学的研究人员与日本可持续发展材料系统研究所之间的合作声称通过生产组分为 AIPN 的第一外延层而开辟了新的天地。这种与 GaN 晶格匹配的三元体系有望改善 GaN HEMT 和 VCSEL 的性能。

晶格匹配的 AIPN 可以通过引入非常高的极化来转换 HEMTs, 从而导致沟道中有很高的载流子浓度。早期结果非常令人鼓舞, 未经优化的样品, 其薄层的方块电阻仅为 $150 \pm 50 \Omega/\square$ 。

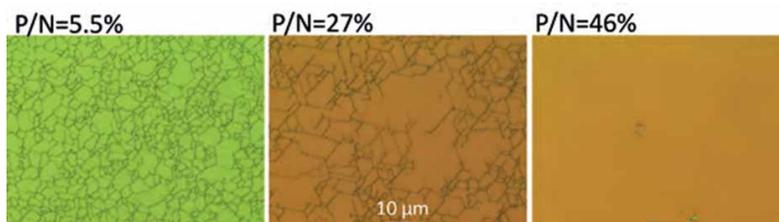
对于 GaN 基垂直腔面发射激光器 (VCSELs), AIPN 可能会改变原有的规则, 从而简化并改善了反射镜的制造过程。在日本团队工作之前, GaN 和 AlInN 提供了唯一可用于生长反射镜的氮化物对。用这种方法, 反射镜的生长需要 12 个小时或者更长的时间。这是由于其存在以下三方面的缺陷: 需要很多镜像对; 三元系的生长速度缓慢; GaN 和 AlInN 之间需要有温度梯度, 且生长温度的偏差必须控制在 3°C 以内。

这些问题归咎于生产集成有两个基于 GaN 反射镜的 VCSEL 所需要的生长时间太长。取而代之的是, 设备倾向于将一个基于 GaN 的镜与另一个由电介质制成的镜结合在一起。

研发这种新型合金的团队的发言人, 名古屋大学的 Markus Pristovsek 说, 改用 AIPN 和 GaN 制成的反射镜有望将生长时间缩短到 2-3 小时。据他介绍, 节省大量时间的原因在于三元化合物有更快的生长速度和反射镜对数量的减少, 这要归功于两种氮化物之间有更大的折射率差异。

三元氮化物的开发历史悠久, 从 1996 年至 2005 年间研究者们针对 AIPN 的表亲 GaPN 进行了一些研究。在那些年中, 研究人员发现, 由于磷的键长较短、原子尺寸较小, 当磷的含量超过 3-4% 时, 磷原子便会进入镓位点。而添加铝提供了解决这个问题的方案。

1999 年, 松下为 AIPN 和 AlGaPN 申请了专利。Pristovsek 指出: “然而, 却从来没有发表过相关的工作”, 他认为要么是尝试失败了, 要么就是申请专利只是为了扩大知识产权范围。



提高叔丁基磷化氢的流量增加了磷氮比, 并降低了 AIPN 层中裂纹的密度。

Pristovsek 从 2012 年开始积极追求 AIPN。“在柏林工业大学申请专利的第一次尝试失败了, 因为他们认为绝对没有商业价值, 专利也赚不到钱, 甚至都不能回本。”

迁至剑桥大学使得 Pristovsek 能够有资金来研究 AIPN 研究。然而, 当订购了可提供磷源的叔丁基磷 (tBP) 起泡器时 (磷化氢是有毒的, 在许多实验室中是被禁止的) 时, Pristovsek 已获得名古屋大学的教授职位。

在 2016 年, 他花了一些时间为他的实验找到了一个未被充分利用的反应器, 并将一条金属有机管线转化为 tBP。第一批外延片布满了裂纹, 但是后来通过增加 tBP 的流量解决了这个问题。

Pristovsek 和他的同事们转向利用 X 射线衍射来研究蓝宝石基氮化镓模板上的, 厚度为 60nm 的 AIPN 层的晶体结构。测量仅产生了氮化镓、蓝宝石和应变 AIP 0.103 N 0.897 的反射信号, 表明该三元化合物是纯的纤锌矿结构的 AIPN。根据该合金衍射峰的位置可以知道, 为了确保晶格匹配, 该三元合金的组成需要为 $\text{AIP}_{0.106} \text{N}_{0.894}$ 。

对 AIPN 厚度为分别为 180 纳米、315 纳米和 665 纳米的样品的椭圆偏振测量结果表明, 当与 GaN 实现晶格匹配时, 该三元化合物的折射率约为 1.95 至 2.05。厚度为 655 纳米的样品存在法布里-珀罗振荡, 表明这种合金的带隙约为 5.5 电子伏。

该团队的下一个目标之一是开发具有 AIPN 层的氮化镓 HEMTs。📷

参考文献

M. Pristovsek et al. Appl. Phys. Express 13 111001 (2020)

Advertiser	广告商名称	网址	页码
Aixtron		www.aixtron.com	IFC
CIOE 2021		www.cioe.cn	35
CREE		wolfspeed.com/cschina-wolfpack	25
Evatec AG		www.evatecnet.com	7
IQE		www.iqep.com	21
NANO-X 纳米真空互联实验室		www.sinano.cas.cn	BC
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行业出版的专业杂志, 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。

如果您有什么意见或建议, 或者有什么想法同本刊编辑探讨, 请不吝赐教。

行政及销售办公室 Administration & Sales Offices

行政人员 Administration

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

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

Editor in China (中国版编辑)
 Min Lu (陆敏)
 minL@actintl.com.hk

UK Office (英国办公室)
 Angel Business
 Communications Ltd.
 6 Bow Court,
 Fletchworth Gate,
 Burnsall Road, Coventry,
 CV56SP, UK
 Tel: +44 (0)1923 690200

Chief Operating Officer
 Stephen Whitehurst
 stephen.whitehurst@angelbc.com
 Tel: +44 (0)2476 718970

销售人员 Sales Offices

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

China (中国)
Shenzhen (深圳)
 Jenny Li (李文娟)
 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)
 Floyd Chun (秦泽峰)
 floyd@actintl.com.hk
 Tel: 852 2838 6298

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

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

Tom Brun
 tbrun@brunmedia.com
 Tel: 724-539-2404

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

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

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

▶ 08.19 第六届

面向5G应用的半导体创新技术

▶ 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)

国际先进半导体封装技术创新论坛

* 以上议题暂定, 请以会议举办实际议题为准



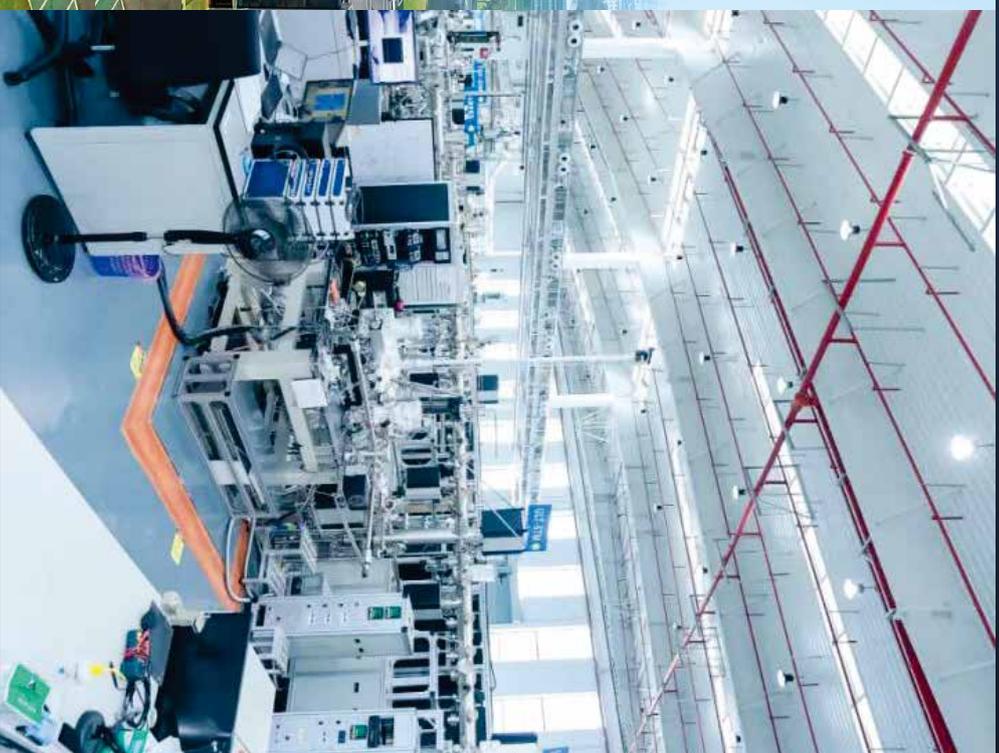
公众号



客服号

NANO-X

纳米真空互联实验站



中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所

Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics (SINANO), Chinese Academy of Sciences