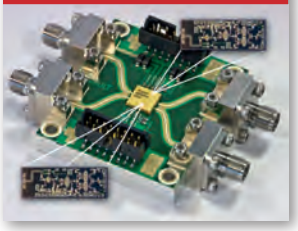
化合物半导体

COMPOUND SEMICONDUCTOR
Connecting the Compound Semiconductor Community

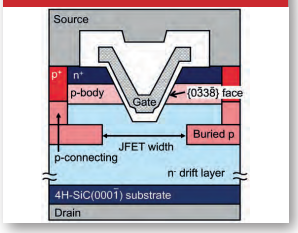
·CHINA

2020年8/9月

毫米波通信



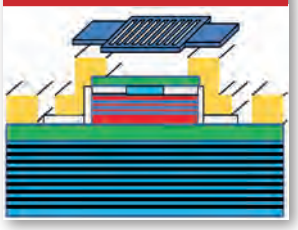
SiC MOSFET



热管理



VCSEL



ACT

更高电压的优势（GaN-HEMT）



化合物半导体先进应用大会

5G和新能源汽车应用

为了配合支持5G及新能源汽车的发展，《化合物半导体》(Compound Semiconductor)主办“化合物半导体先进应用大会”，邀请行业专家共同探讨化合物半导体在数字经济时代的机遇。

化合物半导体先进应用大会将于2020年10月13日在北京国家会议中心与 EDICON China大会同期举行。EDICON是中国射频/微波和高速数字设计领域最大的会议和展览,大会是由美国 Horizon House Publications 及香港雅时国际商讯联合主办，自2013年致今已进入第8年。大会以专业的方式，邀请射频、微波、电磁兼容/电磁干扰、雷达和高速数字设计工程师和系统集成商聚集在一起，为业界带来沟通联络、培训和学习的机会。与会者在 EDICON 上可了解到的实用及先进的解决方案、产品和设计理念等, 可以立即应用于通信、国防、消费电子、航空和医疗行业。化合半导体大会和 EDICON China 的与会者将相互交流，分享更多的相关技术内容，开拓更大的商机。

会议咨询：陈燕 13723739991 skyc@actintl.com.hk
投稿咨询：陆敏 minl@actintl.com.hk

ACT 化合物半导体 CS COMPOUND SEMICONDUCTOR CHINA Microwave Journal China 微波杂志 EDICON 2020 Electronic Design Innovation Conference 电子设计创新大会 Sapphire Industry Alliance

your

EPITAXIAL GROWTH

partner



Enabling advanced technologies

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

IQE

www.iqep.com



化合物半导体 COMPOUND SEMICONDUCTOR ·CHINA

2020年8/9月

目录

Contents

封面故事 Cover Story

10 **GaN HEMT：更高电压的优势**

GaN HEMT: The benefits of far higher voltages

GaN器件的独特优点可以构建更高效、更小巧、更低成本的通信系统。将RF GaN HEMT的电压加倍会增加其每个管芯的功率，并能够大幅减小超高功率系统的尺寸。不过器件的高电压&高功率、高频率&高带宽、高效率&高可靠性间存在着此消彼长的互为约束关系。弗劳恩霍夫应用固体物理研究所团队正在寻求一种更全面的优化折中设计，实现这些参数指标的最佳优化组合，并已突破了可靠的100V GaN技术。

- 塞巴斯蒂安·克劳斯（Sebastian Krause），德国弗劳恩霍夫应用固体物理学研究所

编辑话 Editor's Note

04 **化合物半导体 ——“超越摩尔定律”领域的宠儿**

Compound semiconductor—the favorite of "Beyond Moore's Law"

- 陆敏

业界动态 Industry

05 **比亚迪半导体又一款芯片导入华为手机充电器**

BYD Semiconductor introduces another chip into Huawei system mobile phone charger

06 **长沙三安总投资160亿元第三代半导体项目开工**

Changsha San'an's third-generation semiconductor project with a total investment of RMB 16 billion starts

06 **II-VI 公司拟收购两家晶圆半导体公司**

II-VI Incorporated to Acquire two semiconductor companies

08 **年产200腔体MOCVD设备！中微公司南昌制造基地开工**

200-cavity MOCVD equipment annually! The construction of the Nanchang manufacturing base of AMEC starts

08 **国务院印发《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策》**

The State Council issued "Several Policies to Promote the High-quality Development of the Integrated Circuit Industry and Software Industry in the New Era"

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 COMPOUND SEMICONDUCTOR ·CHINA

2020年8/9月

目录

Contents

09 **泰科天润碳化硅高电压产品突破车规级可靠性认证**
Global Power Technology's silicon carbide high-voltage products take the lead in breaking through car-level reliability certification

技术Technology

14 **为5G毫米波设计MMIC**
Designing MMICs for millimetre-wave 5G
- James Foresi, Luke Smithwick；TRILUMINA 公司

20 **更好晶面的 SiC MOSFET**
A better face for the SiC MOSFET
- Kosuke Uchida, Takashi Tsuno；住友电工株式会社

25 **用石墨释放SiC功率模块的潜力**
Unlocking the potential of SiC power modules with graphite
- Wei Fan, Dawn Krencisz; MOMENTIVE QUARTZ TECHNOLOGIES 公司
Garry Wexler；汉高公司
Emre Gurpinar, Burak Ozpineci；美国橡树岭国家实验室

30 **设计未来的垂直腔面发射激光器 (VCSEL)**
Designing tomorrow's VCSELs
- Dominic Gallagher, PHOTON DESIGN公司
Sam Shutts, 英国卡迪夫大学

科技前沿 Research Review

36 **改进垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 设计**
Improving VCSEL design

37 **更好的紫外发光二极管 (UV LED) 用基板**
A better template for UV LEDs

38 **外延钝化有助于新颖的 FET**
Epitaxial passivation aids novel FETs

40 **广告索引 Advertisement Index**

关于雅时国际商讯 (ACT International)

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——“超越摩尔定律”领域的宠儿

当前全球大部分半导体芯片和器件，虽然仍是以硅基半导体为主。不过，随着万物互联、5G 通信及新能源时代的到来，以砷化镓、磷化铟、氮化镓及碳化硅等为代表的化合物半导体，正在快速崛起。如 5G 基站射频模块、光通信收发器、手机射频 PA，以及人脸识别 VCSEL 光源、新一代显示 Micro-LED、新能源汽车主逆变器、光伏风电逆变器、自动驾驶毫米波 / 激光雷达等新应用场景的出现，都将是化合物半导体的应用发展重点和成长动能。

半导体材料按照构成元素个数分为元素半导体和化合物半导体。元素半导体是由单一元素制成的半导体材料。主要有硅、锗、金刚石等，以硅、锗应用最广。化合物半导体是由两种或两种以上元素制成的半导体材料。主要有砷化镓、磷化铟、氮化镓、碳化硅等。半导体材料按照发展时代又可分为第一代、第二代和第三代半导体，第一代主要有硅、锗。第二代主要有砷化镓、磷化铟。第三代主要有氮化镓、碳化硅、氧化锌、氧化镓及氮化铝等，第三代因禁带宽度宽也称为宽禁带半导体。因此化合物半导体基本上囊括了第二代和第三代半导体（金刚石除外），当然还包括专用的红外窄禁带半导体 GaSb、HgCdTe 及有机半导体（如 OLED 用）等。

以砷化镓、磷化铟、氮化镓、碳化硅为代表的化合物半导体具备高功率、高频、高温、高效、抗辐射等特性，在射频 / 光通信、电力电子、光电子及光子 / 量子计算等应用领域优势显著。化合物半导体最早应用于消费应用市场，包括手机的射频 PA 和 LED 白光照明，技术方向明确，产业格局清晰，市场应用成熟。在行业应用市场，近年来，化合物半导体的产品和方案逐渐被下游系统应用企业采纳，尤其在 5G 通信基站和新能源汽车市场开始批量应用。在通信基站市场，日本住友电工公司制造的 SiC 基 GaN-HEMT 功率放大器已在华为公司新建的基站上批量应用。在新能源汽车市场，意法半导体公司的 SiC 功率模组已经应用于特斯拉 (Tesla) 的 Model 3 电动汽车中。英飞凌、意法半导体、科锐、罗姆等龙头企业已开始使用 6 英寸生产线制造 SiC 器件，并陆续提升产能，巩固市场地位。全球最大的 GaAs 制造企业台湾稳懋公司也已开始了新一轮投资扩产计划。

各主要国家政府高度重视化合物半导体技术发展，国际龙头企业更是加速布局，争相抢占技术和市场制高点。化合物半导体因其良好的物理特性，在光电子及微电子等领域有着不可替代的作用，如在 5G 通信和新能源汽车等新兴市场应用的凸显，被认为是半导体行业的战略发展新方向。在世界发展集成电路的大背景下，化合物半导体受到各国政府和产业资本的热捧。世界产业格局变迁及投资热度高涨之下，我们需要审慎思考发展化合物半导体的机遇、挑战和路径。

未来随着化合物半导体技术的进一步成熟，其核心地位必将愈发显现，在摩尔定律即将走向终结的背景下，化合物半导体技术无疑为集成电路发展开辟了一条全新路径——“超越摩尔定律”新动能发展路径，由此带来对集成电路特色制造工艺和产品的旺盛需求。化合物半导体由于性能优势，无疑是“超越摩尔定律”领域的重要发展方向。

中国是全球最大的化合物半导体应用市场，并已经在 5G、新能源应用领域取得不错的成绩。未来，中国在化合物半导体应用市场的优势将驱动产业链上游环节提质增效发展，为全球化合物半导体企业提供重要发展机遇。

陆敏

化合物半导体
CS COMPOUND SEMICONDUCTOR · CHINA

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

© 2020 版权所有 翻印必究

比亚迪半导体又一款芯片导入华为手机充电器



消费类电子市场是电源管理芯片的主要市场之一，随着消费类市场对芯片的国产化趋势加速，电源 IC 产品对性能与质量的要求也日益严苛。

比亚迪半导体电源 ACDC 芯片 -BF1550，凭借性能与质量的完美平衡，成功导入华为智能手机充电器项目。



BF1550 具有线端 VI 能效、高动态响应、无 Y 设计等特点，可轻松满足高端品牌针对充电器的加严要求，且不额外增加成本。截止到 2020 年 7 月底，出货量超百万只，市场反应良好，用户体验效果佳。

此外，比亚迪半导体还将陆续推出更高集成、更低功耗（30mW）、更大功率（PD65W）的多款快充智能手机 ACDC 芯片，可满足主流品牌的升级迭代要求。

比亚迪半导体电源 ACDC 芯片，从 2007 年开始批量，主要应用于手机 / 平板 / 笔记本 / 路由器等适配器，目前累计出货量超 10 亿颗，且已进入华为、Nokia、Google、飞利浦、TCL、中兴等供应体系并稳定出货。

产品系列	封装形式	电压精度	电流精度	VI 能效	75mW 功耗	驱动方式	Maximum Power
BF1524	SOT23-6	±5%	±5%	√	√	MOS	15W
BF1554	SOP7/8			√	√	MOS	12W
BF1551	SOP7/8			√	√	BJT	12W
BF1550	SOP7			√	√	MOS/BJT	6W

产品系列	封装形式	主要功能	MOS 内阻	MOS 耐压	静态电流	基准精度	Maximum Power
BF1590	SOP8	同步整流	12mΩ/16mΩ	45V	<400uA	±1%	15W
BF1530	SOP8	支持QC3.0/QC2.0/FCP	/	/	<300uA	±1%	18W

比亚迪半导体始终致力于更高集成、更高效率、更高性价比的电源方案研发，为客户提供快捷、定制化的服务，帮助客户提升新产品研发速度、缩短产品上市周期。CSC



长沙三安总投资 160 亿元第三代半导体项目开工

7月 20 日，长沙三安第三代半导体项目开工活动在长沙高新区举行。

当前，第三代半导体材料及器件已成为全球半导体材料产业的前沿和制高点之一。以碳化硅、氮化镓为代表的第三代半导体成熟商用材料，在新能源汽车、5G、智能电网、高速轨道交通、半导体照明、消费类电子、航天等领域具有重要的应用价值。

据了解，三安光电是Ⅲ - Ⅴ族化合物半导体、集成电路龙头企业。长沙三安第三代半导体项目总投资 160 亿元，总占地面积 1000 亩，主要建设具有自主知识产权的衬底（碳化硅）、外延、芯片及封装产业生产基地。项目建成达产后将形成超百亿元的产业规模，并带动上下游配套产业产值预计逾千亿元。

根据此前的公告披露，三安光电拟在长沙高新技术产业开发区管理委员会园区成立子公司投资建设包括但不限于碳化硅等化合物第三代半导体的研发及产业化项目，包括长晶—衬底制作—外延生长—芯片制备—封装产业链，研发、



生产及销售 6 英寸 SiC 导电衬底、4 英寸半绝缘衬底、SiC 二极管及 MOSFET 外延，器件和封装。

湖南湘江新区党工委书记郑建新表示，长沙三安第三代半导体项目作为长沙 17 个制造业标志性重点项目之一，将在长沙建设形成长晶—衬底制作—外延生长—芯片制备—封装的碳化硅全产业链，必将成为推动长沙新一代半导体及集成电路产业链发展的重大动力。CS

II–VI 公司拟收购两家晶圆半导体公司

II-VI 公司于 2020 年 8 月 12 日宣布，将在 2020 年末完成对 Ascatron AB（SiC 外延晶片和功率电子学领域的领导者）和 INNOViON Corporation（Si 和半导体器件离子注入技术的领导者）两家公司的收购。此次收购意在打造垂直整合 SiC 功率电子技术平台。

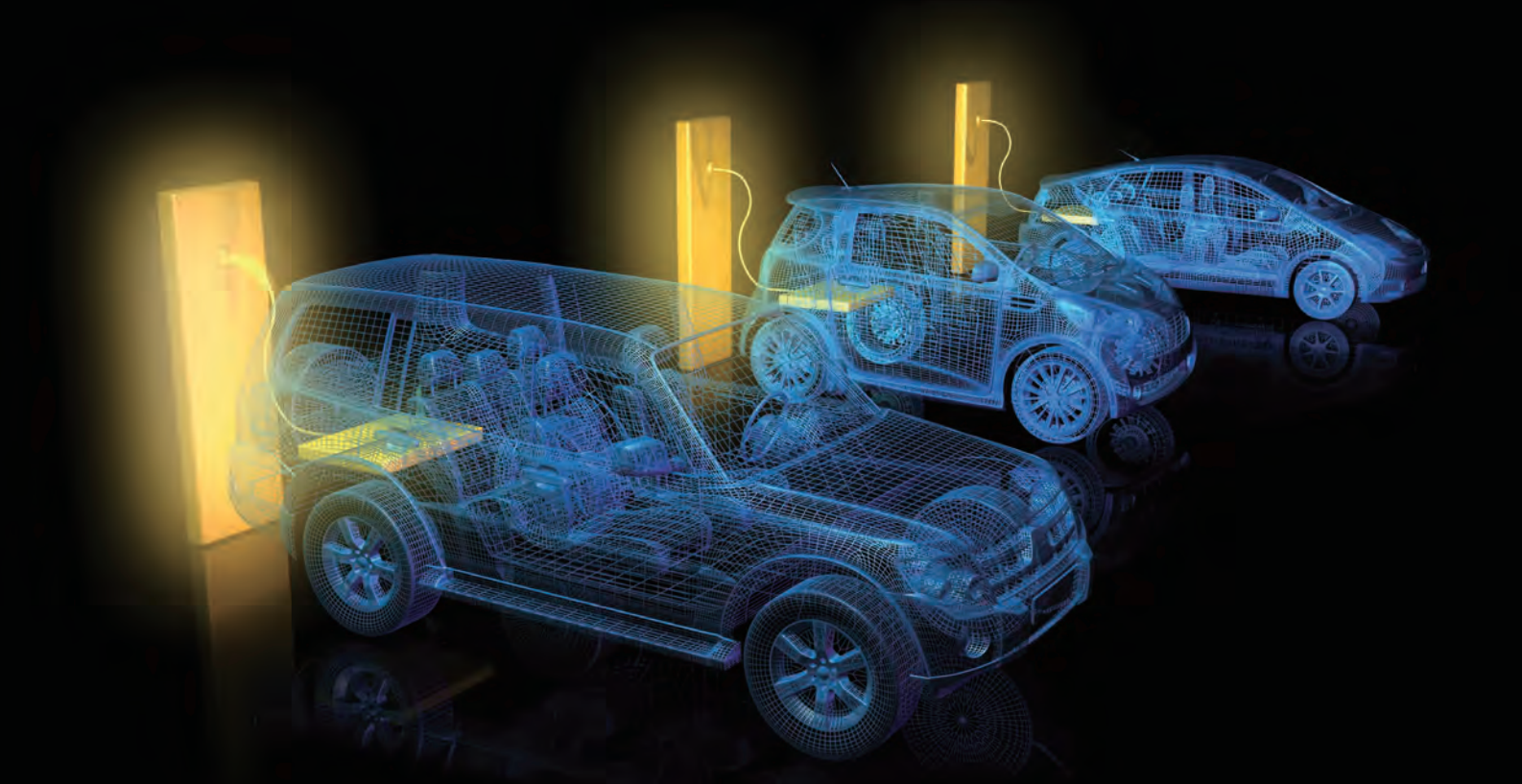
众所周知，目前 SiC 技术已成为了功率电子领域的颠覆性技术，其独特的优势对于电动汽车、可再生能源、微电网以及用于数据存储和通信的电源都至关重要。与最新的硅基器件相比，基于 SiC 的器件具有更高的效率、更高的功率密度和更低的系统成本，且基于 SiC 的电子设备还可以减少二氧化碳排放和减小能耗，从而最大程度的降低对环境的影响。

Ascatron 拥有最先进的生产 SiC 外延片和 SiC 器件的能力，其产品可广泛应用于各种高压电子产品中。其团队由 200 余名宽带隙材料领域的专家组成，他们都在 SiC 行业和半导体行业拥有极为丰富的经验，这也使得 Ascatron 在 SiC 开发和生产工艺领域拥有世界一流的水平。

INNOViON 是世界上最大的离子注入服务提供商，在全球范围内拥有 30 台离子注入机，是世界上唯一可以加工高达 300mm 晶圆半导体材料的公司，其工艺目前可以完成包括碳化硅、砷化镓、磷化铟和硅在内的各种半导体掺杂。

正是基于 Ascatron 和 INNOViON 的技术平台在同类产品中领先的地位，II-VI 公司才会选择这两家公司作为在其原有 SiC 衬底基础上，进行大规模碳化硅外延及碳化硅器件技术、制造及市场的补充。其首席执行官 Jr. Mattera 表示，将在为现有客户提供先进的材料和器件的同时，会基于原有对 SiC 衬底的充分了解及先进的 SiC 外延、SiC 器件制造和设计优势，与两家公司的先进技术相互结合，打造世界领先的垂直整合 SiC（150 mm）技术平台，以满足对 SiC 电力电子器件日益增长的需求。

作为其垂直整合战略的一部分，II-VI 将继续利用其广泛的工程材料和光电器件技术平台，以及在全球范围的制造能力，并将通过开发高性能化合物半导体器件来进一步推动创新并扩大规模。CS



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

年产 200 腔体 MOCVD 设备！中微公司南昌制造基地开工

8月 5 日上午，南昌高新区举行 2020 年重大重点项目集中开工仪式，以中微半导体设备生产研发基地为代表的 27 个项目集中开工。

南昌中微半导体设备有限公司于 2017 年 12 月成立，是中微半导体设备（上海）股份有限公司全资子公司。该项目于 2018 年 3 月实现南昌制造，5 月实现全面投产，9 月实现规模生产，2019 年实现产值 9.2 亿元。

南昌中微半导体设备生产研发基地项目总投资约 10 亿元，总建筑面积约 14 万平方米，该项目达产后将实现年产 200 腔体 MOCVD 设备的生产能力。

据了解，中微半导体设备公司将在南昌大规模制造具有自主知识产权 MOCVD 设备，打造成为全球最重要、规模最大的高端 MOCVD 装备制造基地，推进在南昌开展 MOCVD 相关的基础科学研究和第三代半导体应用产品开发，逐步将南昌中微打造成世界级 MOCVD 研发、制造及创新中心；积极促进中微公司生产基地及上下游供应链企业落户南昌，形成半导体高端设备制造的产业集群。

据南昌高新区报道，受新冠肺炎疫情影响，今年以来，



市场对深紫外 LED 等具有杀毒功效产品的需求猛增，深紫外 LED 应用空间广阔。南昌中微半导体设备有限公司抓住机遇，积极投入研发力量，研制出了具有自主知识产权的高温 MOCVD 设备 Prismo HiT3，该设备是生产深紫外 LED 的关键设备。今年 6 月，首批 HiT3 机台已从南昌发给客户。

中微半导体的落户，为南昌高新区打造了从 MO 源、衬底材料、外延、芯片、封装、终端应用及 MOCVD 核心关键生产设备等自主知识产权的 LED 完整产业链，成为全国唯一拥有 LED 全产业链原创技术自主知识产权的开发区。CS

国务院印发《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策》

国务院近日印发《新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展的若干政策》（以下简称《若干政策》）。

《若干政策》强调，集成电路产业和软件产业是信息产业的核心，是引领新一轮科技革命和产业变革的关键力量。国务院印发《鼓励软件产业和集成电路产业发展的若干政策》《进一步鼓励软件产业和集成电路产业发展的若干政策》以来，我国集成电路产业和软件产业快速发展，有力支撑了国家信息化建设，促进了国民经济和社会持续健康发展。

《若干政策》提出，为进一步优化集成电路产业和软件产业发展环境，深化产业国际合作，提升产业创新能力和发展质量，制定出台财税、投融资、研究开发、进出口、人才、知识产权、市场应用、国际合作等八个方面政策措施。进一步创新体制机制，鼓励集成电路产业和软件产业发展，大力培育集成电路领域和软件领域企业。加强集成电路和软件专业建设，加快推进集成电路一级学科设置，支持产教融合发展。严格落实知识产权保护制度，加大集成电路和软件知识产权侵权违法行为惩治力度。推动产业集聚发展，规范产业市场秩序，积极开展国际合作。

《若干政策》明确，凡在中国境内设立的集成电路企业和软件企业，不分所有制性质，均可按规定享受相关政策。鼓励和倡导集成电路产业和软件产业全球合作，积极为各类市场主体在华投资兴业营造市场化、法治化、国际化的营商环境。

《若干政策》要求，各部门、各地方要尽快制定具体配套政策，加快政策落地，确保取得实效，推动我国集成电路产业和软件产业实现高质量发展。CS

泰科天润碳化硅高电压产品突破车规级可靠性认证

七年磨剑，国内碳化硅功率半导体领军企业泰科天润的1200V 碳化硅肖特基二极管由广电计量基于汽车电子委员会发布的 AEC-Q101《汽车级离散半导体元件应力测试》标准，进行了历时 5 个月之久的测试。测试的器件满足所有规定的鉴定方法和标准，所有鉴定测试中均未观察到失效。泰科天润成为国内碳化硅功率器件率先由权威第三方检测机构测试并通过 AEC-Q101 认证的制造商。

AEC（汽车电子委员会）于 2013 年正式发表 AEC-Q101 标准，此规范主要为分立组件产品进入车用市场制定的判断标准，同时也是目前最新针对车用分立器件通用的国际标准。验证包含如高温反偏、温度循环、高压蒸煮、高加速应力、高温高湿反偏、间歇工作寿命、ESD 性能等 18 项测试，每项都是针车用分立器件所可能遭遇的环境来设计，以保护行车时的安全性。本次测试使用随机抽样选择要做可靠性评估的器件，第一阶段试验项目和条件遵循 AEC-Q101 标准，部分项目甚至严于 AEC-Q101 标准。第二阶段继续测试，标准全部高于 AEC-Q101。

SiC 功率器件在新能源汽车应用中的关注度越来越高，电机驱动、车载充电机（OBC）、DC-DC 等应用都需要高品质的 SiC 功率器件，也因此众多 SiC 功率器件供货商积极布局车用领域。要进入一级 (Tier1) 汽车电子大厂供应链，必须取得两张门票，第一张是汽车质量管理标准 IATF 16949，针对汽车整车厂和其直接的零备件制造商的质量管理体系；第二张门票则要依据国际汽车电子协会所提出的 AEC-Q 车规可靠性验证标准，其中功率器件适用于 AEC-Q101 规范。泰科天润已于 2018 年获得 IATF16949:2016 证书，2020 年初获得了国际船标 DNV（含美国海岸警卫队 USCG）认证，随着这次 AEC-Q101 的验证通过，为其拓展车用市场铺平了道路。

可靠性问题，是功率半导体最核心的技术问题。作为电流电压等级最高的半导体芯片，功率二极管和晶体管是否能顶住客户各种严苛的应用条件，是否能顶住长期的高能量冲击和开关，是各种产品能否真正进入市场的准入门槛。泰科天润作为国内最早从事碳化硅器件生产的 IDM 制造商，在碳化硅产品的设计、生产、品控、应用的各个方面，拥有多年积累的深厚经验，特别是在各种可靠性相关的筛选、测试、失效方面上，经受住了市场各种严苛客户的考验，市场份额逐年扩大，是下游客户十分信耐的合作伙伴。CSC





GaN HEMT:
更高电压的优势

将 RF GaN HEMT 的电源电压加倍会增加其每个管芯面积的功率，并能够大幅减小超高功率系统的尺寸。

塞巴斯蒂安 • 克劳斯（Sebastian Krause），德国弗劳恩霍夫应用固体物理学研究所

最近，GaN HEMT 技术已被应用到从功率转换到移动通信的各种应用中。与硅器件相比，GaN 优异的材料特性大大促进了这种应用。得益于 GaN 器件的诸多优点，工程师们可以构建更高效、更小巧的系统，从而削减系统运营成本。

5G 技术的推出使人们对 GaN 的兴趣达到了新的高度。最初，它被视为服务于 3-6GHz 波段范围的最佳候选者，但是最近，它又有望在 24-39GHz 波段范围的毫米波领域广泛应用。其优点包括比传统的硅 LDMOS 和硅 CMOS 工艺具有

更高的功率密度，从而可以减小芯片尺寸，这是多输入多输出（MIMO）系统中的关键因素。此外，由于 GaN 单个裸芯片输出的功率都超过其竞争对手，因此就可以降低网络合并的片外功率损耗，从而使得系统更小巧、更高效。

出于同样的原因，GaN 也在越来越多要求高输出功率的场合中得以应用。几年来，它已成功部署在民用和军用雷达中，同时也已成为这些系统供电的可靠解决方案。

对于这些雷达应用，GaN 器件的最大特性之一是其效率远远高于硅 LDMOS，后者是该领域的主要竞争对手。归功于其更高的效率，GaN 器件消耗的功率更少，从而降低了对空冷的需求。此外，反映到无线通信上的优势之一是，GaN 器件与硅 LDMOS 相比具有更高的功率密度，即使得单位管芯面积的功率更高。当输出功率增加到几千瓦级别时，此属性就尤为重要。另外对于给定的输出功率，基于 GaN 的系统需要更少的器件，从而大大简化了系统设计，同时还可以大大提高系统的灵活性。

由于 GaN 器件的众多应用，在过去的十年中，类似技术已经进入诸多市场。如专门为功率转换而开发的某些技术支持高达 1200V 的高压应用。但是，针对 RF 高频应用的技术（例如雷达和通信），电压则限制在 28-65V 之间。造成这种差异的主要原因是高击穿电压与高频性能相结合的困难。在一个方面进行改进的同时，则需要在另一方面进行折衷。

减少网络损耗

对于超高功率应用（例如脉冲和连续波雷达，粒子加速器，等离子体发生和微波加热），最主要的实例是已建立的 50V 和 65V GaN 技术以及 50V 硅 LDMOS。生产用于这些应用的千瓦放大器的最大挑战之一，是将它们与 50W 系统的阻抗匹配问题。不幸的是，绝对输出功率与负载线电阻成反比，可以将其视为器件的大信号输出电阻。因此，随着输出功率的增加，负载线电阻下降。这使电路设计工程师的工作很难进行，常常导致匹配网络体积变得更大，而对于超高功率器件则变得更加复杂，最终导致更高的网络损耗。

缓解此问题的一种方法是转变到更高的供电电压。这样做会自然地增加给定输出功率器件的负载线电阻。实际上，这样会有两个好的作用：

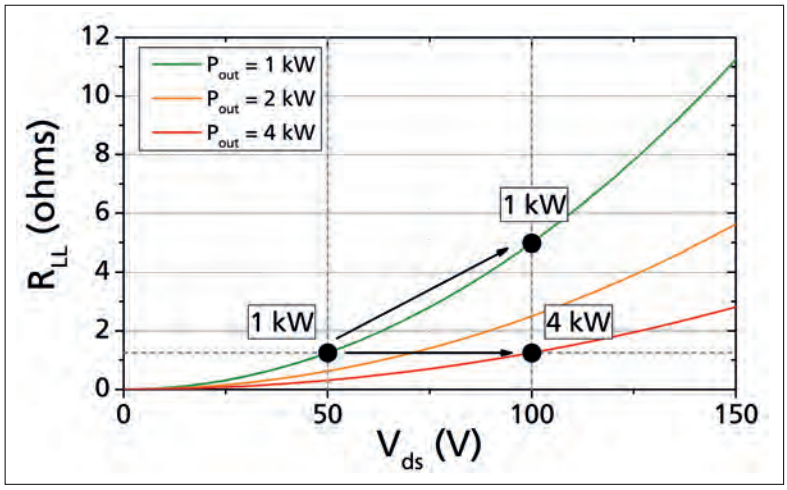


图1. 输出功率为1kW，2kW和4kW的示例器件的负载线电阻与电源电压的关系曲线。

较高的供电电压会产生成比例的较高功率密度；并且根据欧姆定律，这会产生负载线电阻的平均增加。得益于这两个好处中的第一个—功率密度的增加，工程师可以针对给定的输出功率设计出具有较小栅宽的器件，从而实现负载线电阻的进一步提高。同时，由于第二个好处，通过数学运算，可以看到，对给定输出功率器件的供电电压加倍，可以确保负载线电阻增加四倍。

我们以不同的方式看待这种情况，若采用同样复杂的网络，使网络具有类似的损耗，则器件具有四倍输出功率，那么就更容易实现几千瓦输出功率的放大器。

众所周知，没有免费的午餐。当供电电压增加时，器件必须承受更高的峰值电压，该峰值电压是在动态驱动时发生的。为了保证足够的耐压特性，工程师必须确保使用的 RF 器件的击穿电压至少是工作电压的三到四倍。因此，对于要在 100V 下提供可靠工作的器件，击穿电压应在 300-400V 范围内。这与为电力电子技术设计的 GaN 器件相距不远。但是，这些器件表现出相当

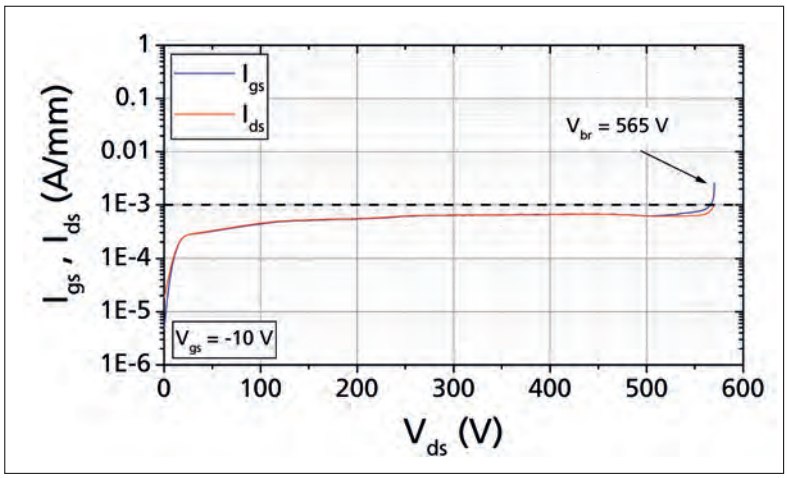


图2. 弗劳恩霍夫应用固体物理学研究所100V GaN器件（3.1mm栅宽）的击穿电压测试曲线。

表1. 弗劳恩霍夫应用固体物理学研究所50V、100V GaN工艺以及具有减小的输出电容的100V GaN工艺的-20dB匹配的负载线电阻，输出电容以及可达到的带宽（波特-法诺极限）

Technology	R_{LL}	C_{out}	Bode-Fano (-20 dB matching)
50-V GaN (10 W/mm)	139 Ω·mm	0.45 pF/mm	3.47 GHz
100-V GaN (17 W/mm)	289 Ω·mm	0.31 pF/mm	2.42 GHz
100-V GaN (17 W/mm) w/ 30 % reduced C_{out}	289 Ω·mm	0.22 pF/mm	3.41 GHz

大的电容，从而其合适的频率仅为几十兆赫兹。很显然，在开发 100V GaN 技术时，主要的挑战将是如何将高击穿电压与 GHz 范围的射频性能相结合起来。

增加击穿电压的关键是确保控制好沟道区域中的峰值电场，同时防止引入额外的电容，这个电容会降低 RF 性能。一种可能的措施是增加晶体管的栅极至漏极间距，但这会有很大的缺点—增加器件的导通电阻，并降低可实现的输出功率密度和最大效率。

弗劳恩霍夫应用固体物理研究所团队正在寻求一种更全面的方法，其基础是增加栅极到漏极的间距以及优化源极终止的场板。我们在努力寻找击穿电压，导通电阻和输出电容的最佳优化组合。由于高压工作有可能损害器件的长期可靠性，因此从开发很早期，我们就一直在关注退化机制的起源。

以功率换取效率?

增加击穿电压的一种选择是将源场板进一步向漏极方向延伸，因为这可以消除栅极边缘的峰值电场。要付出的代价是相对于沟道的漏极侧部分电容的增加。这表现为额外的输出电容。基于效率原因，与低压器件相比，场板的这种额外延伸应保持尽可能小。

通常，当工程师设计高效放大器时，他们会采用一种称为“谐波终端”的技术。他们不仅仅匹配基频，还使用具有特定阻抗的匹配网络来调制第二和第三谐波频率，有时甚至更高的谐波频率。通过这种方法，可以设计 E 类，F 类或 F^{-1} 类配置工作的放大器，其理论最大效率为 100%。相比之下，涉及短路所有谐波的 B 类放大器的理论最大效率仅为 78.5%。

在评估 HEMT 的性能时，采用等效电路会有所帮助 -- 负载线电阻和输出电容组成的并联 RC 电路。在高频下，输出电容支配着晶体管的输出阻抗，从而导致准短路。因此，选择的基频越高，由于存在输出电容必然导致短路的谐波数量就越多。这迫使器件进入类似 B 类工作，从而限制了理论上可实现的最大效率。为了规避这种情形，并从谐波终止带来的效率提高中获得最大好处，关键是要确保输出电容尽可能小。

更大功率，更小带宽?

设计放大器时，必须注意，可达到的带宽与负载线电阻和输出电容的乘积成反比——这就是所谓的 Bode-Fano 准则的结果。例如，如果负载线电阻加倍，则可实现的最大带宽减半。同理，输出电容加倍最大带宽也减半。

原则上，当可达到的带宽较低时，网络必须更复杂才能匹配给定的带宽。如前所述，较高的负载线电阻允许使用更简单的匹配网络，但前提是必须维持可达到的带宽时才成立。因此，设计人员的目标就是减小总输出电容，从而补偿由于较高供电电压而引起的较高负载线电阻的问题。

尽管源场板有助于减小沟道中的峰值电场，但是如果设计不当，则会影响器件性能。如前所述，添加源场板时，会产生额外的寄生输出电容，

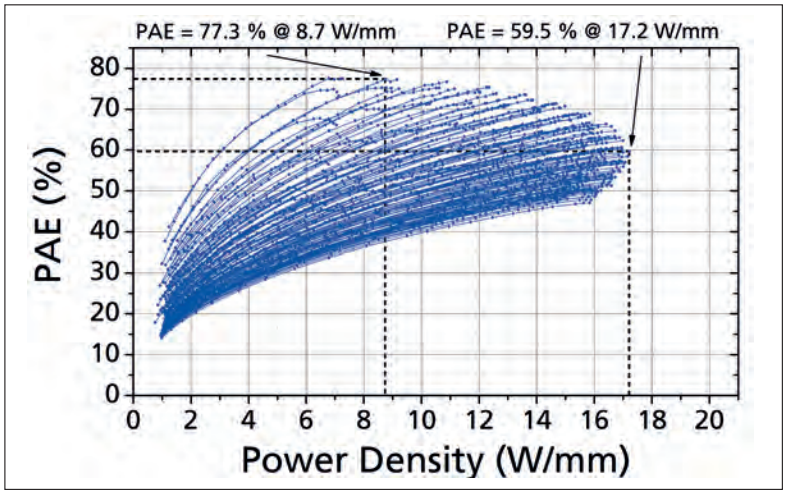


图3. 弗劳恩霍夫应用固体物理学研究所 100V GaN器件（3.1mm栅宽）上进行1.0GHz脉冲负载牵引性能测试。二次和三次谐波输出阻抗已终止，以实现最大效率。脉冲宽度设置为10μs，占空比为10%。

不利于效率和带宽匹配，因此在设计时必须格外小心。

实现大功率

在我们的基准 50V GaN 技术的基础上，我们开发了 0.50 μm 栅长的 SiC 基 AlGaN/GaN 技术，用于 100V 下工作。用于制造具有双场板配置和每个源极区域中独立通孔的器件。由于此工艺的高功率密度，每个晶体管芯的输出功率可以超过 500W。为了应对较高电压工作的高功耗，我们使用了有限元建模来优化版图设计。

基于以上所提及的因素，如栅漏间距和源场板，优化开发了晶体管技术来兼顾效率和击穿电压考量。最初，我们的工作重点放在 L 波段（1-2GHz）上，但是现在我们正在努力将可用频率范围扩展到 6GHz 以上。我们认为通过精心设计，100V 技术可以与 50V 技术具有相当的电容值，包括栅源电容，栅漏电容和漏源电容。这些成功经验可以使我们的 100V 器件能够提供类似的频率范围。

对我们的 50 μm 单栅指器件的 DC 性能的测量表明，在 10V 漏源电压下，最大跨导超过 280mS/mm。我们选择 0.50 μm 栅长来最小化短沟道效应。漏极引起的势垒降低（低于 5mV/V）非常低可以证明该设计是成功的。

我们使用一个更大的器件对我们的技术进行了进一步的表征，该器件栅宽为 3.1mm。通过优化栅漏间距和源场板几何形状的最佳组合，我们将导通电阻降低为仅 5.0Ωmm。令人鼓舞的是，该器件的栅极击穿电压超过 550V，而且没有任何明显的缓冲层漏电流产生。我们可以通过考虑其击穿电压与导通电阻之比来对该器件进行测试评估。它的品质因数为 110V/(Ωmm)，这比以前的 100V GaN 技术验证的品质因数高约 50%。

为了评估我们技术的功率性能和最大效率，我们已将该器件用于 RF 负载牵引测量。以 1.0GHz 频率进行的评估，我们终止了二次谐波和三次谐波阻抗，以确保最高效率。根据对 169 种不同基本阻抗的负载牵引测量，测试显示最大功率密度约为 17.2W/mm，功率附加效率为 77.3%。该效率是至今 L 波段频率上 100V GaN 技术所有报道中最高的。

除了高性能之外，RF 器件还需要在高温下提供良好的可靠性，以适应大功率系统中的应用。

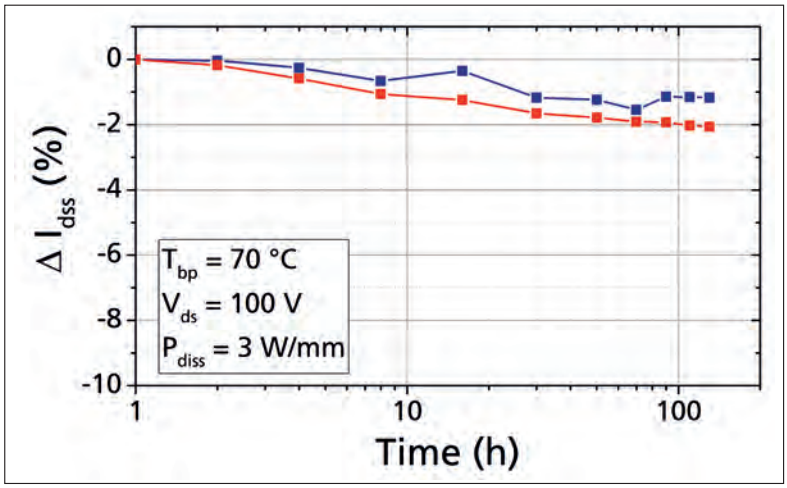


图 4. 漏极 - 源极电压为 100V，单位栅宽耗散功率为 3W/mm 时，直流高温工作下的寿命。基板温度设置为 70°C，产生的模拟结温为 150°C。

为了深入了解我们技术的长期稳定性，我们对两个 3.1 mm 栅宽器件进行了直流高温加速寿命测试，并将其安装在 1 毫米厚的铜钼铜基板上。我们发现，在估计结温为 150°C 的情况下承受 130 小时的应力后，饱和漏极电流仅下降了 2%，这证明了我们 100V 技术是可靠的。我们现正在对更高的结温进行更彻底的可靠性研究。

我们的测量提供了 100V GaN 技术可以可靠应用的实证。现在，我们正在建立 L 波段频率上创纪录的效率，并努力将适用的频率范围扩展到 C 波段（4-6GHz）或更高。为了获得成功，我们将需要进一步减小输出电容，以进一步提高效率，（尤其是高频应用）。另一个相关的好处是可实现带宽的增加，从而实现宽带宽、高功率的设计。

基于我们所取得的进步，完全有理由相信我们的 100V 技术将这种宽禁带半导体技术性能开发到极致。CS

扩展阅读

S. Krause et al. “High-Power-Density AlGaN/GaN Technology for 100-V Operation at L-Band Frequencies,” 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), San Francisco, CA, USA, 2019, pp. 17.4.1-17.4.4.

G. F. Formicone IEEE Trans. Semicond. Manuf. 31 440 (2018)

R. Leoni et al. “Raytheon high power density GaN technology,” 2017 IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium (CSICS), Miami, FL, 2017, pp. 1-4.



为 5G 毫米波设计 MMIC

毫米波 5G 的高性能前端需要功能强大且高效的 GaAs IC，这些 IC 必须以精心选择的方式进行封装。

Liam Devlin, Andy Dearn, Stuart Glynn, Graham Pearson, Robert Smith, Mohammed Tahir; Plextek RFI

为了满足对更高数据传输速率和容量的需求，最新一代蜂窝通信技术正在扩展其频谱范围到毫米波频段。此举有利也有弊：它为化合物半导体行业带来了巨大的机遇，但却给 5G 应用的前端 IC 设计人员带来了巨大的挑战。

我们 Plextek RFI（PRFI）团队正迎接这挑战来发挥我们在 5G 应用中的作用。我们的工作包括设计和实现许多定制的 GaAs IC，并评估其性能。在此，我们将详细介绍这项工作，并讨论在毫米波频率下采用低成本表面贴装技术（SMT）封装的挑战，以及可用来确保高性能封装部件的技术。

采用砷化镓技术

基于 GaAs 技术的毫米波功率放大器（PA）提供的功率密度比采用硅技术的高得多，并且功率附加效率更高。使用稳懋半导体公司的 0.15 μm 栅长的增强模式（E-mode）pHEMT 工艺，我们设计了 28 GHz PA，并将其组装成 20 引脚 4mm × 4mm 包覆成型塑料 QFN（四方扁平，无引线）封装形式（请参见图 1）。为了评估其性能，我们将该 PA 安装在具有代表性的 PCB 评估板上。

该封装中的功率放大器为三级设计。其输出级包括四个相同的晶体管，在输出端配置有功率组合匹配网络。这种方法在毫米波频率下至关重要。从理论上讲，随着晶体管的增大（通过添加更多的栅指或增加单位栅极的宽度），RF 输出功率的能力也会成比例增加，但实际上，在更高的频率下无法采用这种简单的方法。这里的问题在于，随着尺寸的增加，在更高的频率处会产生更多的寄生效应，从而损害了可用增益。因此，必须在尺寸上找到一个最佳点，以平衡对增益和 RF 输出功率的竞争性要求。

我们使用带有温度补偿的输出功率采样来测量发射的 RF 功率。我们使用一对驱动器件来驱动四个输出晶体管，而驱动器件又由一个较小的预驱动器来驱动。选择增强模式工艺的优点之一是栅极以正向电压偏置，因此无需像大多数耗尽模式（D-mode）pHEMT PA 所要求的那样使用负电源电压。我们使用 +4V 漏极电源为整个 PA 提供偏置电压。



片内还包括一个可快速开关的使能电路。它可用于快速打开和关闭 PA 的电源。通过在不使用状态时仅 0.1mA 的消耗电流，这种设计有助于最大程度地提高整体系统的效率。

和 5G 通信系统中使用的大多数 PA 一样，我们的设计也采用压缩退避的工作方式，因此我们可以保留传输信号的调制保真度。这是通过深度 AB 类偏置方案实现的。我们的设计工作始于为输出级选择最佳的晶体管尺寸。之后，我们考虑不同的静态偏置条件，模拟负载牵引条件以确定最佳阻抗，以在退避时获得最佳线性度和功率附加效率。随后进行增益，线性度和功率附加效率的评估，使我们能够确定最佳的偏置条件。测量结果表明，在从 27.5GHz 到 28.35GHz 的 28GHz 5G 频段上，采用偏置从而确保 +4V 的总静态电流为 180mA，我们获得了具有良好性能的测试结果。对于此 PA，小信号增益大于 20dB，并且整个频带的输入返回损耗超过 16dB。

我们设计的该 PA，实现 +25dBm 输出功率 1dB 压缩点以下退避 7dB 时，具有最佳的三阶互调性能和功率附加效率；这样的条件与我们期望 5G 系统 PA 使用条件接近。根据我们的测量，P-1dB 处的功率附加效率约为 25.5%，在频带最大点上升至 30%，而封装部件在工作点的效率为 8%。虽然这可能看起来并不令人印象深刻的结果，但对于在这种退避水平下工作的 AB 类放大器来说，该性能是极具有竞争力的。

我们进行的另一项测量是在 +18dBm 输出下的两音互调测试。对于 -35dBc 的 IMD3，该测试揭示出度量水平为 +32.5dBm 的三阶截取点（OIP3）。

我们的 PA 的性能也已使用真实的 5G 宽带信号进行了评估：400MHz 带宽的 OFDM 信号，其每 120kHz 的子载波运行 64QAM，峰均比为 11.7dB。当 PA 发送该信号时，它具有很高的线性度，这从 28GHz 时误差矢量幅度与输入功率的关系图可以明显看出（见图 2）。

完善封装

在消费电子产品中，表面贴装技术（SMT）

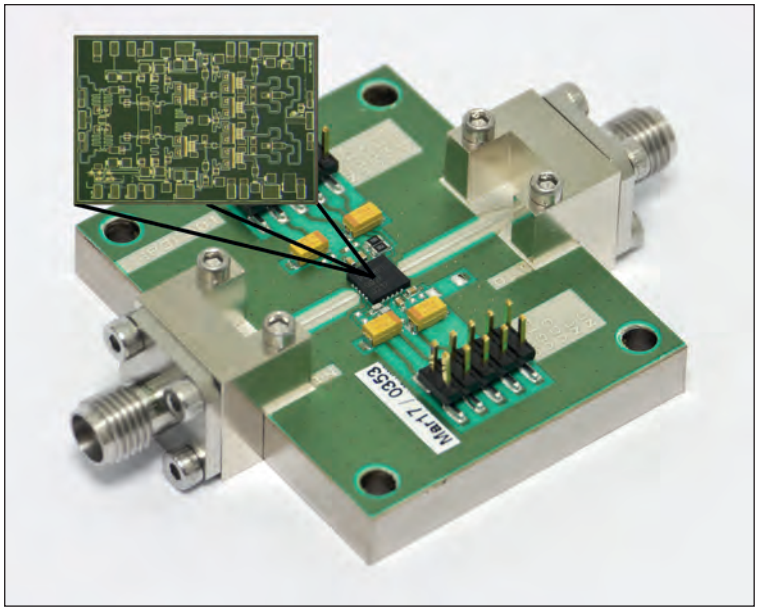


图1. 由PRFI开发的SMT封装28GHz 5G PA，已安装在评估PCB上。芯片照片的右侧可以看到一个功率组合输出匹配网络。

是主导的封装工艺。因此，如果毫米波 5G 组件要在商业上获得成功，则必须可以采用兼容 SMT 的封装。用于微波和毫米波组件的最常见，成本最低的形式是包覆成型的塑料封装，已用于我们前面已经描述的 28GHz PA（如图 1 所示）。对于这种放大器，其形式为 QFN，这是用于微波 IC 中最受欢迎的 SMT 封装。它具有坚固的金属底座，该底座可焊接在 PCB 的接地层上。其优点包括与 PCB 接地的良好热接触和低电感接触。

如果不考虑封装就将 IC 设计成具有最佳性能的裸芯片，并且将该芯片随便进行某种封装，即使其封装已经验证可以有效用于毫米波 IC 的形式，该裸芯片的性能也会严重下降。为了确保封装不会影响性能，需要仔细考虑以下因素的影响：与 IC 表面直接接触的模塑化合物；键合线的电感，以及从芯片至封装到 PCB 的过渡；封装引线框架的物理尺寸，这往往有带内谐振的可能性；以及 IC 接地和 PCB 接地之间的接地电感。

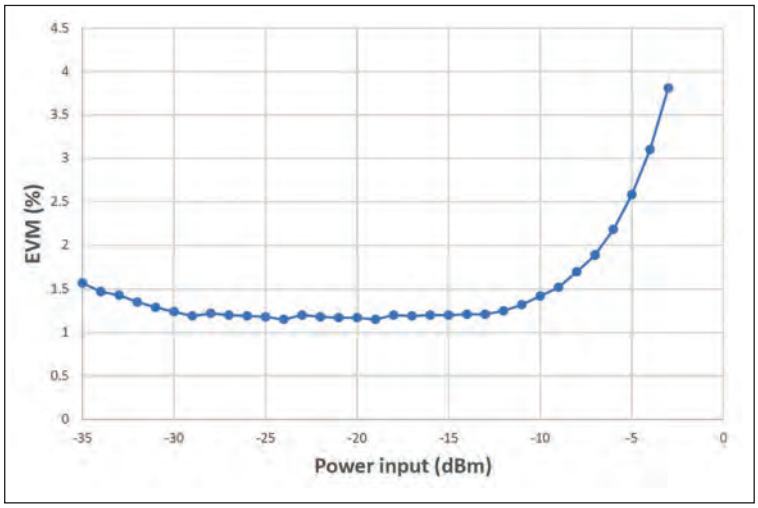


图2. 封装的PRFI的PA的误差矢量幅度（EVM）与28GHz，OFDM 400MHz，64 QAM时PA输入功率的关系。在平均输出功率为18dBm的工作点上，输入功率为-3dBm，EVM小于4%。

在设计过程中，我们使用电磁仿真来评估模塑化合物的影响。毕竟到最后，最重要的是 PCB 上封装 IC 的性能，因此必须为这个性能进行优化设计。许多可用的 IC 工艺包括在管芯表面上的钝化层，都用来缓减塑料的影响。其他安装 PA 的选择包括气腔塑料封装以及另外的具有气腔的 SMT 形式，例如层压板，陶瓷或液晶聚合物。尽管所有产品均以标准的“开放工具”封装形式提供，但都可以使用定制设计来优化特定 IC 的性能。

我们知道，键合线的电感会严重降低毫米波 IC 的性能。我们最小化该电感影响的第一步，是通过同步设计 IC 和封装来缩短键合互连的长度。使用多条键合线可进一步降低电感：我们的封装毫米波 IC 往往与 RF 焊盘有两个或三个键合。除了采取这些步骤之外，我们还将键合线的串联电感合并到一个低通滤波器中，该滤波器还包括 IC 上 RF 焊盘的电容，封装引线的串联电感以及封装 SMT 焊盘到 PCB 地的电容。

我们使用的 5mm × 5mm 封装的角到角距离刚好超过 7mm。这有可能会在 21.4GHz 处产生共振——这个长度是该频率对应空气中波长的一半。模塑化合物的存在会增加有效电气尺寸，从而导致较低的谐振频率。因此，存在封装体的物理尺寸会导致毫米波频率带内谐振的潜在风险。为避免这种情况，我们对定制引线框使用了合适的设计，将选定的引脚直接连接到管芯附着焊盘。另外，我们还对安装有封装 IC 的 PCB 的设计进行了很多考虑。

对于由 GaAs 和 GaN 制成的 IC，芯片的背面通常是 RF 接地。使用 QFN 封装的管芯附着焊盘可对其实现低电感连接。使用这种方法，通常将封装背面的裸露焊盘连接至 PCB 接地。

采用这种方法时，至关重要的是要确保 IC 与 PCB 接地连接之间的电感足够低。必须足够多的考虑接地电感，因为它是 IC 周围串联电感反馈的来源。如果此电感过高，则会降低性能——在最坏的情况下，甚至会导致不稳定。我们可以通过使用薄的基板材料以及多个从焊盘到 PCB 接地

的连接来避免这种情况出现。

封装前端模块

我们还使用 GaAs 技术设计了高度集成的前端毫米波组件。它们包括一个用于 28GHz 5G 频段的前端模块，该模块含有一个三级 PA，RF 发射功率检测器，Tx/Rx 开关，以及两级低噪声放大器（见图 3）。同样，该 IC 是使用稳懋的 0.15 μ m 栅长增强模式 pHEMT 工艺设计的，之前该工艺也用于 PA 的制造，同样也放置在 5mm × 5mm 模塑 QFN 封装中。

人们可以将前端 IC 中的 PA 视为上述 PA MMIC 的一半。也就是说，不是四个用于输出级的晶体管，而是两个。因此，它仅为具有四个晶体管的 MMIC 的 RF 输出功率能力的一半左右，但提供了相似的增益水平。它还具有温度补偿的 RF 输出功率检测器。

在此模块中，Tx/Rx 开关将 IC 的 RF 公共端口连接到 PA 输出或低噪声放大器输入。通过级联配置多个开关晶体管，可以改善功率处理，并在所需的 RF 输出水平下确保线性工作。

为了使最佳噪声匹配点更接近最佳回波损耗点，我们在低噪声放大器中使用了串联电感反馈。采用堆叠偏置方案，两个晶体管都流过相同的直流电流，从而通过 +4V 电源提供 10mA 的供电电流，就获得了 13.5dB 的 Rx 路径增益。

对于发射路径，增益压缩为 1dB 时输出功率刚好超过 20dBm，功率附加效率为 20%。这些数字来自组装到代表性评估 PCB 上的封装部件的测量结果。当针对 IMD3 为 -35dBc 的线性操作退避时，稳懋已针对高效率进行了设计优化。使用 100MHz 的频率间隔，OIP3 在 5G 频段上约为 +28dBm。在 10dB 的动态范围内，频率功率变化很小。

其他测量结果表明，接收路径增益为 13.5dB，噪声系数为 3.3dB。该路径具有令人印象深刻的线性度——OIP3 为 20dBm，而 DC 功耗仅为 40mW。

低损耗 MMIC 开关

大多数商用 RF 和微波开关均基于 FET，使用 pHEMT 或 SOI 工艺进行生产。不幸的是，

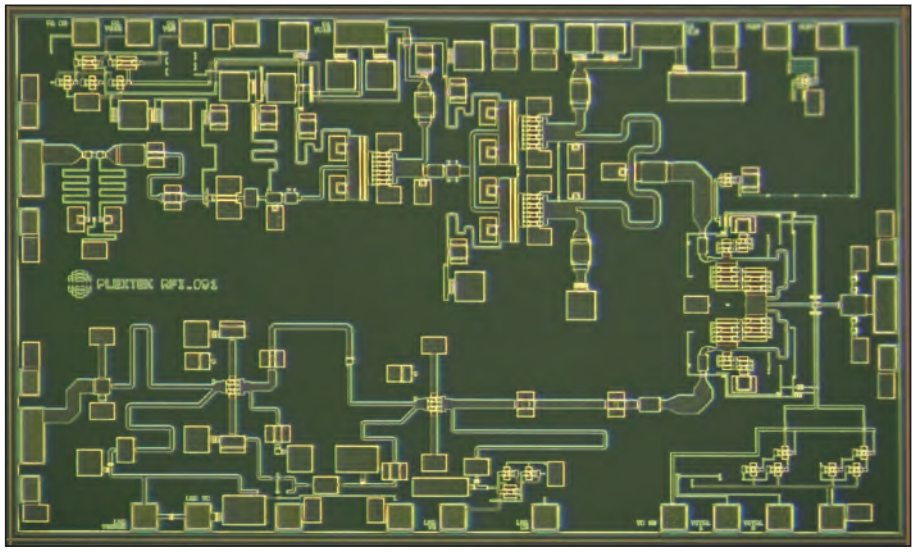


图3. PRFI的28GHz前端模块（FEM）的芯片照片。PA沿着芯片照片的顶部从左到右运行，并且可以在芯片的右中间看到Tx/Rx开关。低噪声放大器（LNA）从右到左运行，RF输出朝向芯片左侧边缘的底部。

随着工作频率的增加，设计此类开关变得越来越具有挑战性。最大的问题是，尽管在夹断状态下 FET 的漏极 - 源极电阻很高，但在较高频率下，存在的并联寄生电容起到越来越重要的作用，从而为 RF 信号提供了低阻抗路径。减小电容的一种选择是采用较小的晶体管，但这会导致导通损耗的急剧增加，并且功率处理能力也会受到影响。

相反，我们在此倡导在毫米波应用中使用 p-i-n 二极管开关。它们的最佳特性之一是，对于可比拟的导通电阻，它们提供的寄生截止电容要比 FET 低得多。这使得在毫米波频率处的插入损耗低并且隔离度高。p-i-n 二极管的另一个优点是，它在 RF 和微波频率下表现为电流控制的电阻。由于也可以优化此类二极管以提供宽电阻范围，良好的线性度和高功率处理能力，

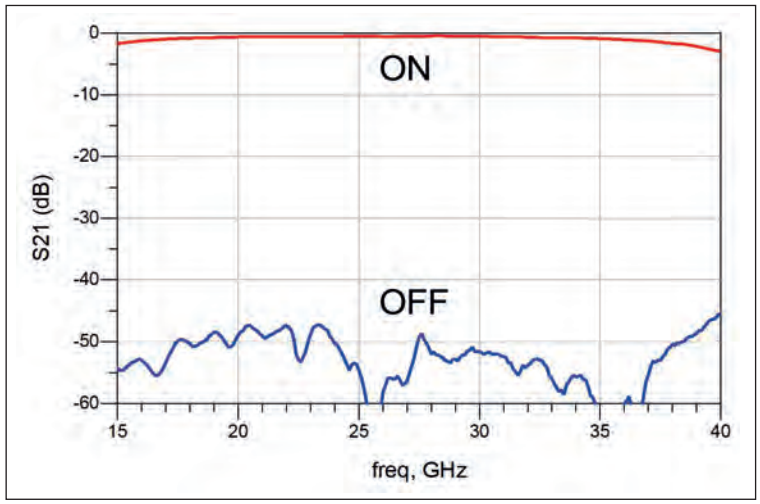


图4. 典型开关的通态和关态性能RF晶圆级测试结果。

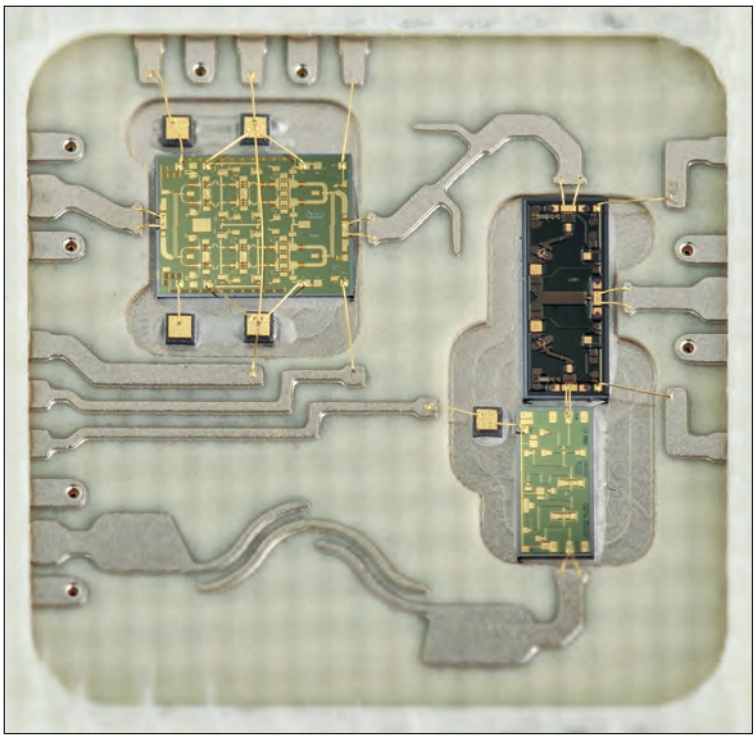


图5. 由PRFI设计并封装在定制层压板封装中的26GHz 5G前端多芯片模组。照片的左上方，是最大的芯片PA。Tx/Rx开关位于照片的右中间，公共RF Tx/Rx端口位于开关管芯的右中间边缘，其接地-信号-接地直通封装过渡清晰可见。开关的Tx端口连接到开关管芯顶部的谐波滤波器，而开关管芯底部的Rx端口直接连接至低噪声放大器输入。

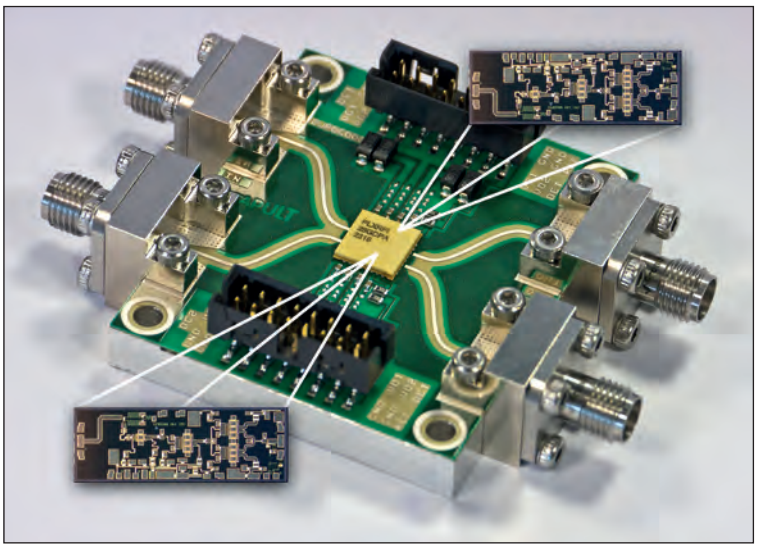


图6. 采用定制层压板封装的PRFI的双通道26GHz PA。与裸芯片相比，在封装部件在频带顶部测得的S22有所提高。从22GHz到28GHz，S22小于-12.5dB。与裸芯片相比，S11略为劣化，但仍低于-10dB。

因此，它是制造 RF 和微波开关的绝佳选择。

尽管 p-i-n 二极管的关态电容非常低，但在毫米波频率下仍可以代表显著的低电抗。例如，如果关态电容仅为 0.05pF，则在 28GHz 时，串联安装的关态器件的隔离度将降至 3.6dB。为确保高隔离度，我们使用并联安装的二极管在通态下提供一条低电阻接地路径。当串联二极管和并联二极管组合在一起时，所产生的宽带开关范围可以从接近直流一直到毫米波段。如果不需要在如此低的频率下运行，则可以仅使用并联器件来实现开关。这会产生带通响应，但由于没有串联器件，因此具有毫米波频率下较低的插入损耗的优势。

我们使用 p-i-n 二极管工艺设计了 SPDT，SP4T 和 DPDT 毫米波开关 MMIC。进行 RF 晶圆上测量时，我们可以将 SPDT 开关的通态损耗与关态隔离进行比较，该 SPDT 开关在每个臂中都有两个并联安装的 p-i-n 二极管（见图 4）。当二极管“导通”时，它们提供低的接地电阻以及通过该分支的高隔离度。当它们“关断”时，它们具有一个很小的并联电容，该电容通过低通滤波器吸收，从而通过该分支的插入损耗很小。我们的射频晶圆上测量结果表明，在 20GHz 至 32GHz 范围内，通态损耗仅为 0.55dB±0.1dB，隔离度超过 47dB。

多芯片模块

另一类设计是毫米波多芯片模块，该模块采用表面贴装技术制造，并使用层压板封装形成。使用这种方法，我们创建了一个多芯片前端模块，该模块安装在 10mm×10mm 的层压 QFN 封装中（见图 5）。制造和组装由英国 Filtronic 承担。

该多芯片模块包括三个市售的管芯：p-i-n 二极管 SPDT Tx/Rx 开关，pHEMT 低噪声放大器以及 pHEMT PA。在 PA 的两侧各有一对单层电容器，它们可实现电源去耦合。PA 的输出通过谐波滤波器路由，该滤波器印刷在层压板封装的底部，并制成封装的组成部分。该滤波器提供超过 20dB 的谐波抑制，其插入损耗仅为 0.2dB。

该模块包括一个接收带通滤波器，集成在低噪声放大器输出的封装底座中。该滤波器是耦合线结构，采用了弯曲的形状以适应可用的物理空间。它的插入损耗为 0.7dB。已安装在 PCB 上的该前端模块的测量结果与仿真显示出良好的一致性。接收路径增益为 20dB，噪声系数约为 3.5dB。传输路径增益为 19dB，OIP3 为 +36dBm。

双通道放大器

为了解决毫米波域中非视距通信的难题，5G 移动终端将采用相控阵或开关天线拓扑。这两个选项都需要使用多个相同的 RF 前端组件，例如 PA。这些放大器必须满足许多标准——它们需要

提供足够的增益，输出功率和线性度，同时还要高效，紧凑和低成本。制作多通道毫米波 PA 的一种解决方案是在单个管芯上实现多个 PA（我们将在本文的后面讨论），另一种方法是将多个单 PA 管芯进行集成封装。

后一种方法的一个示例就是我们的双通道 PA，采用定制的层压表面贴装封装，具有两个 RF 输入和两个 RF 输出（请参见图 6）。该 PA MMIC 在 24GHz 至 28GHz 频带上产生 22dB 的增益，在 P-1dB 处的 RF 输出功率为 26dBm，功率附加效率为 30%。容纳 MMIC 的封装具有标准的 32 引脚 QFN 使用面积，实心铜基座和 7mm × 7mm 的主体尺寸；它连接到代表性的评估 PCB 上。我们与 Filtronic 合作开发了该单元，后者提供封装制造和组装。

令人鼓舞的是，封装的双通道 PA 的两个通道的 s 参数测量值，与相应的晶圆上测量值非常相似。这突显了定制设计封装所提供的从裸芯片到 PCB 过渡的高质量。在 -40℃，+25℃和 +85℃下对封装的 PA 的测量表明，增益随温度的变化约为 0.04dB/℃。输入和输出匹配随温度变化非常小。在室温和 -40℃时，已封装 PA 的 OIP3 测量值通常约为 36.5dBm，而在高温下则下降约 1dB。

四通道单芯片 PA

我们还设计了覆盖 28GHz 5G 频段的单芯片四通道 MMIC（请参见图 7）。这些 IC 采用三安集成电路的 P15EP 工艺制造（一种 4V，0.15 μ m 增强模式 GaAs pHEMT 工艺），并采用标准的 5mm × 5mm 塑料包覆成型 QFN 封装。为了测试基准性能，此封装体已安装在代表性的评估 PCB 上。

四个功率放大器中的每个功率放大器都是三级设计，包括自己的独立射频输出功率探测器。对于每个通道，在 26GHz 至 29GHz 范围内测得的增益为 19.6dB ± 1.4dB，整个频带上的输入和输出回波损耗为 10dB。尽管用于 5G 系统的功率放大器将工作在压缩退避，但为了提供有助于比较的性能指标，我们已经测量了增益压缩为 1dB 时的 RF 输出功率。得出的数值为 24.5dBm，相应的功率附加效率为 19.5%。饱和输出功率和相应的功率附加效率值为 25.5dBm 和 21.5%。

如果所有四个 PA 用相干的 RF 信号驱动并部署在合适的四单元天线阵列中，则 RF 输出信号将合并，从而在单个通道上提供额外的 6dB RF 功率。通过调节到四个天线元件的信号相位，波束的方向可以实现电子控制。由于每个天线单元的增益也增加了总有效各向同性辐射功率，因此这种方法增加了有效 RF 功率和通信链路的范围。

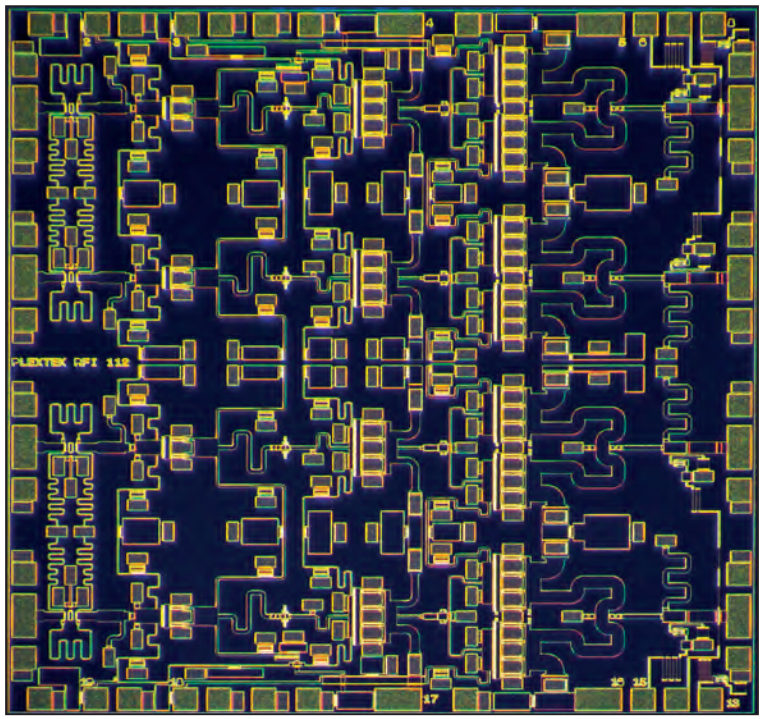


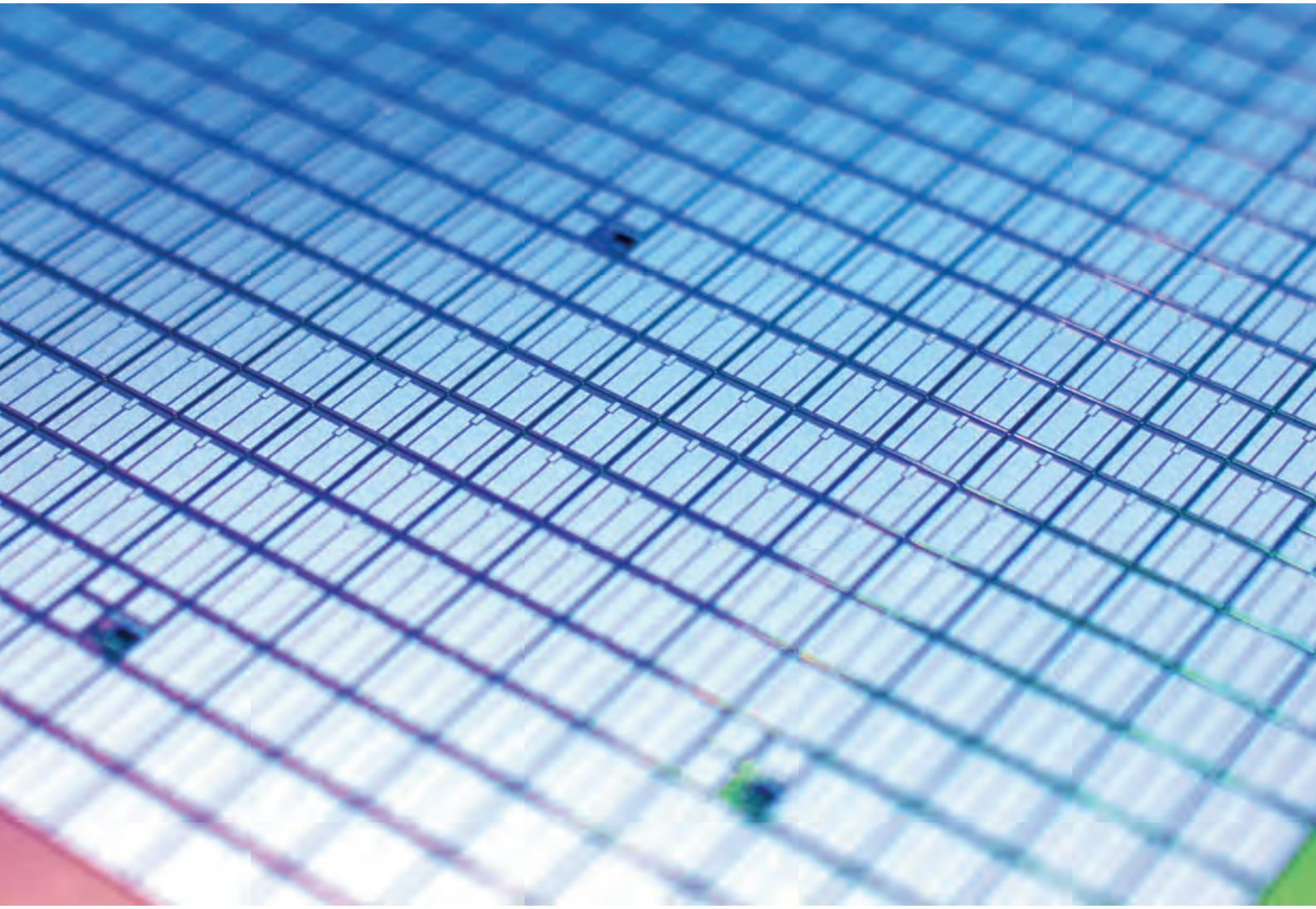
图7. PRFI的4通道28GHz PA的芯片照片。

通过将毫米波频段添加到 5G 通信标准中，我们开发的设计为化合物半导体行业提供了巨大的机遇。通过器件设计的创新以及精心选择封装方式，市场成功的机会是非常之大的。CS

扩展阅读

Closing the Gap between Measured and Modelled MMIC Performance - PRFI White Paper: https://www.plextekrfi.com/wpcontent/uploads/accurate_simulation_of_mmics.pdf

L. Devlin “A guide to SMT packaging of Microwave ICs” proceedings of the ARMMS RF and Microwave Society Conference, November 2012: https://www.plextekrfi.com/wp-content/uploads/Guide_to_ SMT_Packaging_of_Microwave_ICs.pdf



更好晶面的 SiC MOSFET

具有 V 形沟槽的 SiC MOSFET 可降低导通电阻并减小开关损耗。

Kosuke Uchida, Takashi Tsuno; 住友电工株式会社

2020 年 1 月份世界上几个最强大国家的领导人召开了世界经济论坛，其中的一个主要议题就是气候变化。对于他们来说，这是迄今为止我们这个时代最大的问题，现在就需要马上采取行动减少碳足迹。

现在还有很多机会可以保证去做到这一点。有些是国家层面的，比如增加核电站和太阳能发电站的数量。还有就是公司可以做出的一些改变，例如采购更高效的机器，当然也有一些纯属个人的选择，例如素食主义，减少飞机出行等。

在这些方案中，节省能源和减少二氧化碳排放的一种选择是引入更高效的功率控制技术。功

率控制技术应用广泛，在电动汽车，可再生能源系统和工业电机驱动中起着至关重要的作用。

当今大多数功率器件都是由硅制成的。几十年来，它们的性能有所提高，但是现在它们已经达到了理论极限。这意味着不可能显著降低由于传导和开关损耗而引起的功率损耗。

目前需要的是用宽带隙材料（例如 SiC 和 GaN）制成的器件来代替硅器件。这两种材料非常引人注目，是因为它们在许多方面都具有领先于硅的优势，包括更高的介电击穿电场，更高的电子饱和速度和更高的热导率。由于这些特性，SiC 和 GaN 可以提供更高的击穿电压和更低的导通电阻，从而可以降低导通损耗。

SiC 和 GaN 之间值得注意的区别是晶体的质量。体 SiC 材料具有较少的晶体缺陷，因此可以制造高质量的 SiC 外延衬底，进而可以制备垂直 SiC 功率器件。这些使用整个外延层的器件将高电流与高击穿电压结合在一起。因此，SiC 有望在实现高功率的高压应用中取得极大的成功，而 GaN 有望用于中低功率的应用。

SiC 器件将取代硅绝缘栅双极晶体管（IGBT），IGBT 结合了高击穿电压和低导通电阻特性。由于该器件的双极性工作，开关损耗随电子-空穴复合时间的增加而增加。SiC MOSFET 则不会如此，因为 SiC MOSFET 是一种单极型器件，可提供高速开关和更高的击穿电压。

卓越的沟槽

日本住友电气工业有限公司为 SiC MOSFET 开发了一种新的结构。它具有 V 型沟槽，具有更高迁移率的性能。

这个开发过程是可以借鉴我们在化合物半导体产品生产方面的丰富经验，其中包括 GaN HEMT，GaAs FET 以及相关衬底。最近，我们一直在开发 SiC 晶体，并开始大规模生产 6 英寸 SiC 外延衬底，我们将其称为 EpiEra。它们是使用高质量，具有成本优势的生产工艺——我们称之为多参数区域控制 SiC 生长技术。我们使用独特的仿真技术来确定最适合的掺杂浓度及均匀性，以实现预期的器件性能和良率。通过垂直整合 SiC 的材料和器件技术，我们生产出了高性能和高良率的 SiC MOSFET。

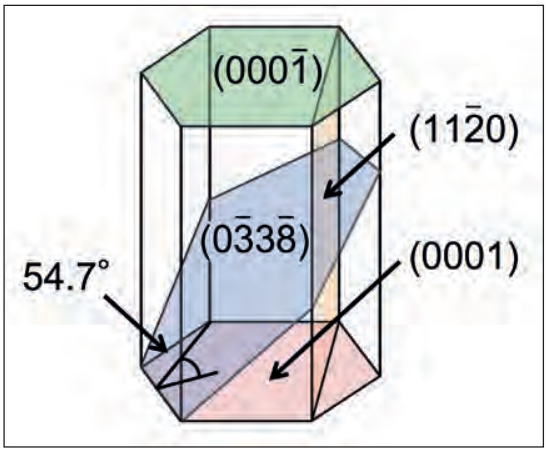


图1. 4H-SiC的主要晶面。（0$\bar{3}$3$\bar{8}$）面与（0001）面的夹角为54.7度。

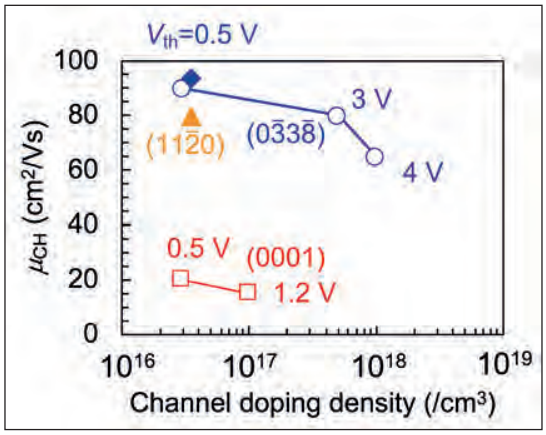


图2. SiC横向MOSFET的沟道迁移率与掺杂浓度的关系。（0$\bar{3}$3$\bar{8}$）面显示出比其他晶面更高的沟道迁移率和更高的阈值电压。

我们之所以开发出新颖的 MOSFET 结构，是因为界面态密度高，导致传统设计中的沟道迁移率将会大大低于材料的体迁移率。为了验证我们的设计，我们在 4H-SiC（0$\bar{3}$3$\bar{8}$）面上制造了一个横向的 MOSFET，该面与（0001）面成 54.7 度的偏角（见图 1）。

我们的结果表明，这是制备 SiC MOSFET 的最佳晶面，这是因为由于其较低的界面态密度和较高的自由电子比，该面在所有掺杂浓度下的沟道迁移率最高。（见图 2）。当采用 10^{18}/cm^3 的掺杂浓度时，可实现 60cm^{2}V^{-1}s^{-1} 的高沟道迁移率，以及高达 4V 的阈值电压——该电压足以抑制高温下的误启动。

为了充分利用这个晶面的优势，在过去的几年中，我们开发并商业化了 4H-SiC V 形沟槽 MOSFET，该器件被称为 VMOSFET。最近，我们已经在致力于提高功率转换效率，从而使得这些器件能够处理数百安培的电流，并且击穿电压高于 1kV。这些晶体管具有 4H-SiC{0$\bar{3}$3$\bar{8}$} 沟槽侧壁，该侧壁具有比其他 SiC 晶面更高的沟道迁移率（此结构的示意图请参见图 3）。使用这种设计，可以在实现高沟道密度的同时降低沟道电阻。

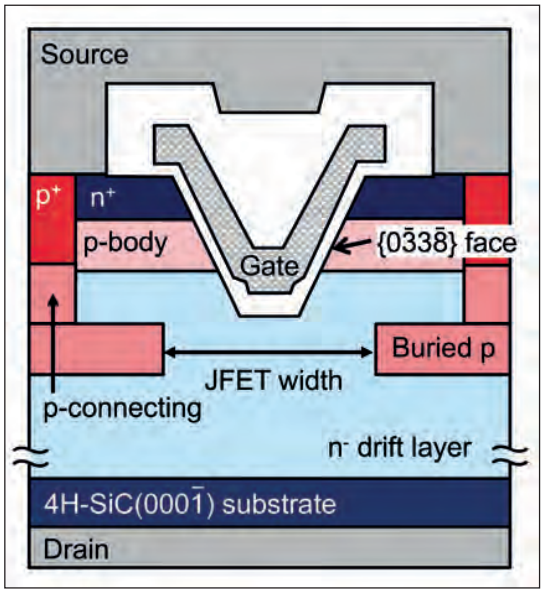


图3. SiC VMOSFET的剖视图。

生产该器件的关键是使用化学刻蚀工艺来形成 V 形沟槽。我们使用二氧化硅作为刻蚀掩模，并在约 900℃ 的氯气环境中进行刻蚀。在此工艺中，氯气在表面产生化学反应，使得 SiC 转化为碳，然后再与氧反应。生成的氯化硅和二氧化碳在高温下挥发（见图 4）。

此工艺将会导致 {0338} 面暴露出来，而这些面是非常稳定的。注意，利用诸如反应离子之类的刻蚀，是形成 U 形沟槽的常规方法，但是将会导致刻蚀损伤和子沟槽的形成。通过扫描电子显微镜的图像，我们可以看到采用我们的方法获得了高质量的晶面（见图 5）。

沟槽结构的缺点是当向器件施加高电压时，在沟槽底部形成的栅极氧化膜容易击穿。为了解决这个问题并增强 VMOSFET 的可靠性，我们在沟槽底部周围注入 p 型电场缓冲区。借助于此额

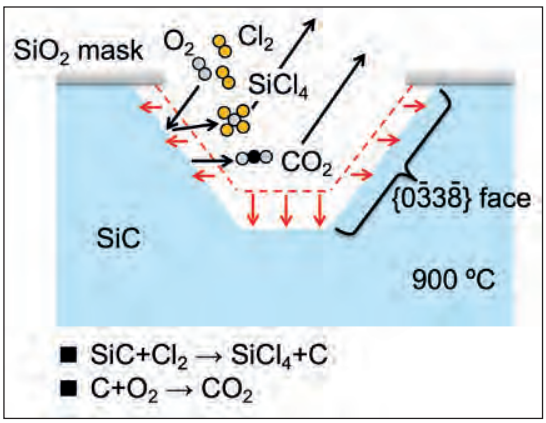


图4.氯气刻蚀产生的MOSFET的V形槽。

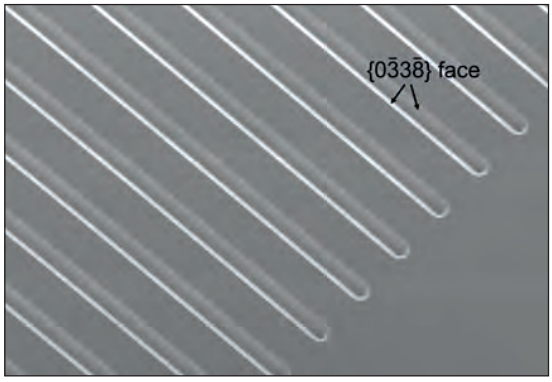


图5. V型槽的扫描电子显微镜（SEM）图像。

外的区域，施加到漏极的高电压会使电场集中在掩埋的 p 区边缘上。采取这样的改善措施降低了栅极氧化膜上的电场。

这种设计也能够减小栅极和漏极之间的寄生电容，从而提高了开关速度并减少开关损耗。这是通过电学连接掩埋的 p 区到源电极的 p 连接区，从而形成源极电势来得以实现。

可靠性验证

为了确保实现低导通电阻和低氧化物电场下的长期可靠性，关键是优化 JFET 的宽度和掩埋 p 区之间的宽度。我们的相关工作包括研究漏极偏置条件下，氧化物电场与寿命之间的关系。

使用专用结构的测试芯片，我们获得了高温反向偏压条件下的寿命预估。为了增加氧化物的电场，与大规模生产而设计的 VMOSFET 相比较，该 V 槽栅极沟槽结构的器件具有较大的 JFET 宽度。这些测试是在 175℃ 的环境温度下进行的。这些晶体管中的氧化物电场通过 Technology CAD

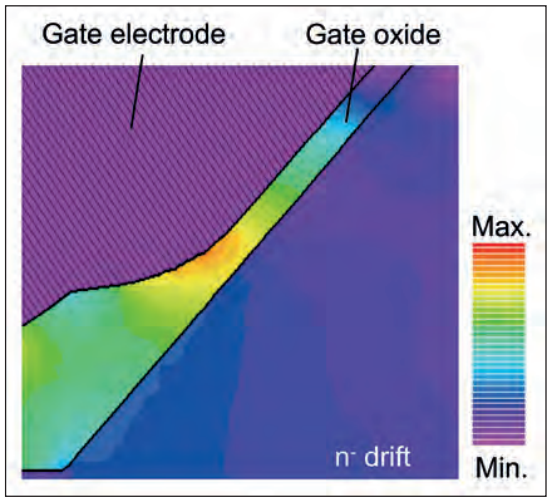


图6.通过TCAD模拟计算的V形沟槽底部周围的电场分布，用于寿命估算。

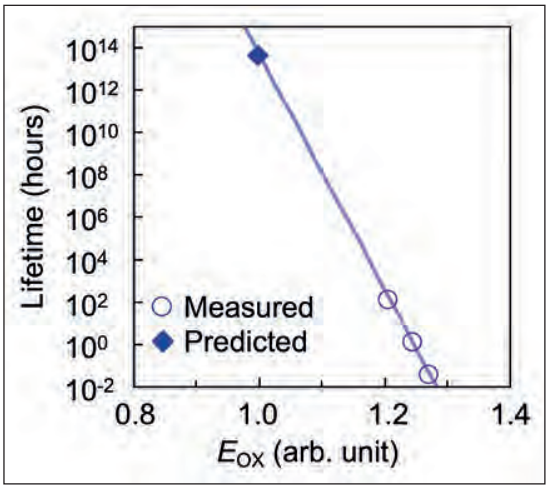


图7. VMOSFET的长寿命。累积故障率为10%，T=175℃，漏极偏置条件情况下所估算的寿命。在0.1 ppm累积故障率的条件下，预计寿命200年。

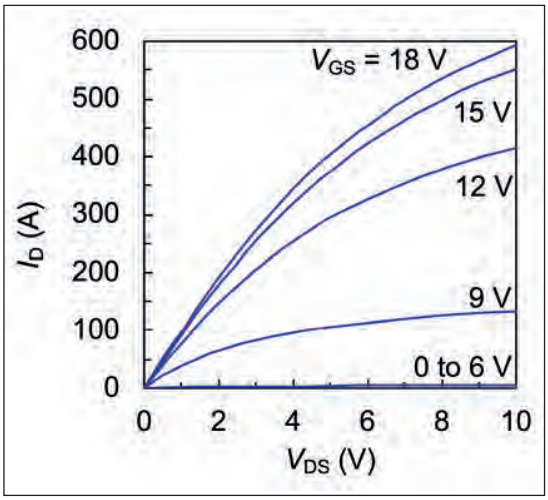


图8. T=25℃时，I_D-V_{DS}特性（V_{GS}=0 – 18V）。VMOSFET展示出200A DC和600A脉冲的高电流能力。

模拟计算得出。电场分布的计算表明，由于电场集聚，氧化物电场在底部氧化物边缘具有最高值（请参见图 6）。

进行高温反向偏置测试后，我们分析了 VMOSFET 的失效点。我们发现其位置对应于我们模拟出来的氧化物电场的最高点处。

通过这些测量，我们确定了氧化物电场对寿命的影响。图 7 显示了 10%累积故障率的图表。

对于高可靠性应用，我们的目标是累积故障率为千万分之一时，寿命达 20 年以上。我们的结果大大超出了这个值。对于 1.0 的氧化物电场，请注意这里采用的是任意单位，预测寿命为 4.5×10^{13} 小时。根据我们将寿命与累积故障率相关联的计算，这等价于在千万分之一累积故障率条件下，可以达到 200 年的寿命。

利用高温反向偏置测试的结果，我们使用仿真设计了一种结构，该结构具有低导通电阻，并且在 1200V 的漏极偏置下有 1.0 的氧化物电场。这让我们得以在 150 毫米晶圆上，制造出具有优化设计的 VMOSFET。在结温为 25℃的条件下工作时，制备的 6.0 平方毫米芯片可以处理 200A 的直流电流和高达 600A 的脉冲电流（见图 8）。栅极 - 源极电压为 15V 且漏极 - 源极电压为 1V 时，比导通电阻仅为 3.1 mΩ cm^2；在 25℃，当漏极 - 源极电压等于栅极 - 源极电压时，阈值电压为 4.6V，而漏极电流密度为 1mA/mm^2。

击穿电压远高于目标值，能够承受高达 1640V 的电压（见图 9）。另一个令人鼓舞的特性是栅极到漏极的电容很小——漏极 - 源极电压为 800V 时仅为 15pF，由于接地的 p 区有效地阻挡了来自漏极的电力线，因此让我们能够有效抑制自导通。

我们还采用电感负载进行了双脉冲测试，其中使用 SiC 肖特基势垒二极管作为续流器件（详细信息请参见图 10）。该测试展示出我们的 VMOSFET 的快速开关和低开关损耗性能。上升和下降时间分别为 16ns 和 7ns；导通和关断能量损耗仅为 260μJ 和 270μJ，因此总开关损耗仅为 530μJ。

进一步的测试涉及评估我们的 VMOSFET 的阈值电压稳定性。175℃下评估了 22 个样品后发现，经过 1000 小时的高温栅极偏置测试，其阈值电压漂移小于 0.1V。这个小的偏移也再次证明了 $\{0\bar{3}3\bar{8}\}$ 晶面上栅极氧化物的高质量和稳定性。

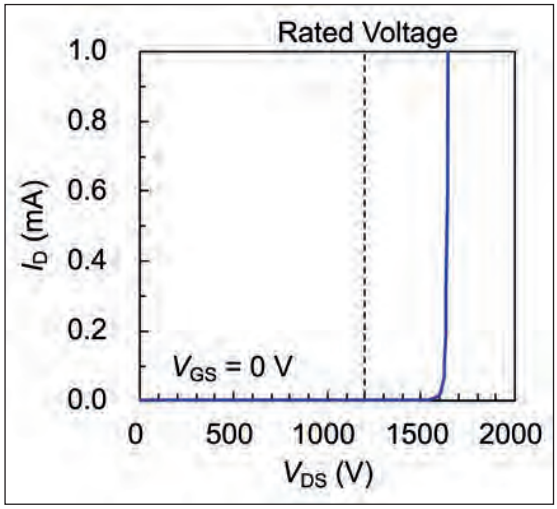


图9.阻断特性。VMOSFET对1200V的额定阻断电压显示出足够的余量。

表1. 住友电气工业株式会社的VMOSFET产品列表。

Current Range		<10A	30A	100A	≦200A	≦400A	≦600A
Discrete	600-900V	✓	✓	✓			
	1,200V	Now	Now	Now			
	1,700V	Now	Now	Now			
Module	1,200V				Now	Now	✓
	1,700V				Now	Now	
	3,300V					✓	

Available Now　Coming Soon

Discrete
- TO-247-3L
- TO-247-4L
- TO-3PF

Various packages upon requests



Module
- Si compatible Package
- Custom Package



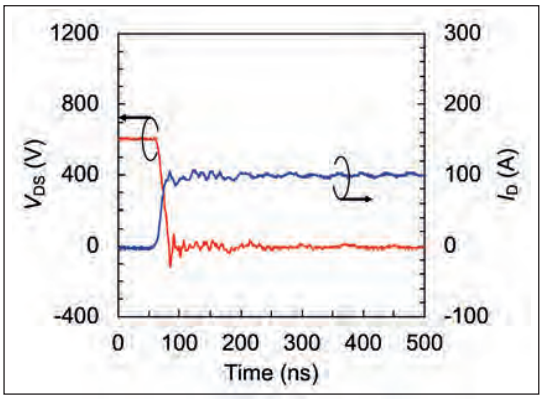


图10. 双脉冲测试下VMOSFET的快速开关特性。该测试的条件是：R_G=1.0Ω，V_{GS}=+15/-5V，V_{DD}=600V，I_D=100A，L=100μH。

1200V/200A VMOSFET 的成功开发，扩充了我们此类晶体管的产品（请参见表 1）。从用户角度看，采用 VMOSFET 可以：在组件和系统级都具有更好的性能；设计更小组件的能力更强；稳定的供应链和更好的质量管理。我们预计，我们结合低功耗和高可靠性的 VMOSFET 的卓越特性，将为 SiC 市场的进一步拓展奠定基础。

本研发工作的部分支持来自超级洁净室电力电子生产线（SPEL）的联合研究财团项目，主持单位为国家先进工业科学技术研究所。CSC

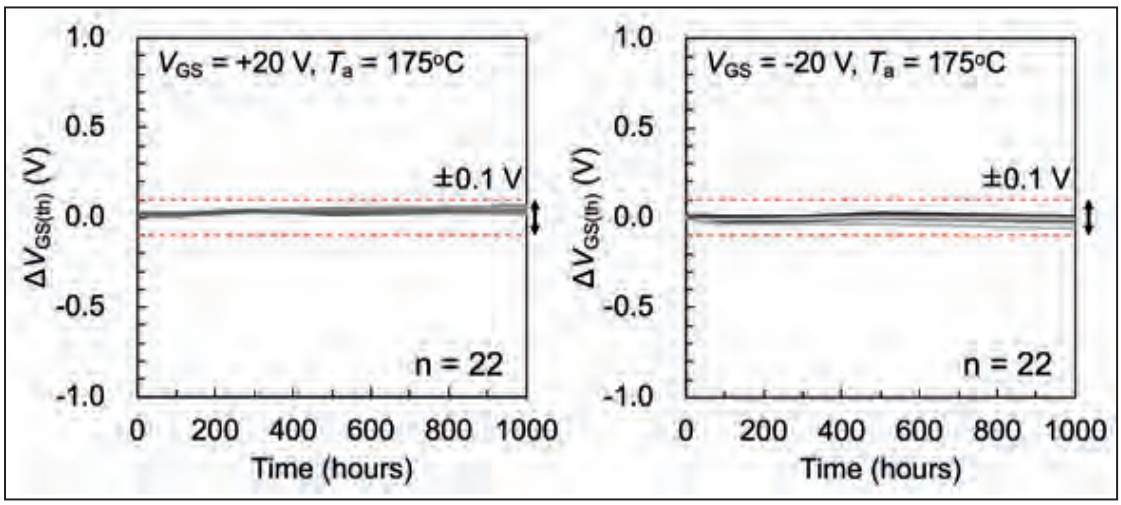


图11. 在T=175℃，V_{GS}=+20V（左）和-20V（右）的高温栅极偏置测试下，VMOSFET的阈值电压稳定性。

扩展阅读

K. Wada et al. Mater. Sci. Forum 105-108 963 (2019)
T. Hiyoshi et al. Mater. Sci. Forum 740-742 506509 (2013)
T. Hatakeyama et al. Appl. Phys. Express 12 021003 (2019)

用石墨释放 SiC 功率模块的潜力

用高度取向石墨替代绝缘金属衬底中的铜芯，可在提升 SiC 功率模块导热性的同时减轻其重量。

Wei Fan, Dawn Krencisz; MOMENTIVE QUARTZ TECHNOLOGIES 公司
Garry Wexler, 汉高公司
Emre Gurpinar, Burak Ozpineci; 美国橡树岭国家实验室

如何选择自己的下一辆汽车，这是件很不容易的事。基于环保考虑，你肯定想要购买一辆纯电动汽车。虽然这样的汽车无疑将有助于减少碳排放，但是它的单次充电续航里程能满足需要吗？也就是说，在长途旅行中，你的汽车会不会因为电池电量耗尽而动弹不得？

为了避免陷入这种令人苦恼的两难境地，就需要开发充电时间间隔较长的车辆。增加电池的容量、同时大幅提高电力电子器件的性能将会有所帮助。

此类工作已经在美国展开，并得到了美国能源部一个发展路线图的支持，该路线图详细描述了针对下一代电力驱动系统的要求。其目标包括：实现功率处理能力翻倍，以使电力牵引驱动系统能够处理高达 100 kW 的峰值功率；功率密度从 2020 年的 13.4 kW/L 大幅上升至 2025 年的 100 kW/L。在面向电动汽车的下一代电力电子器件的开发方面，研究机构和工业伙伴持续不断地投入了大量



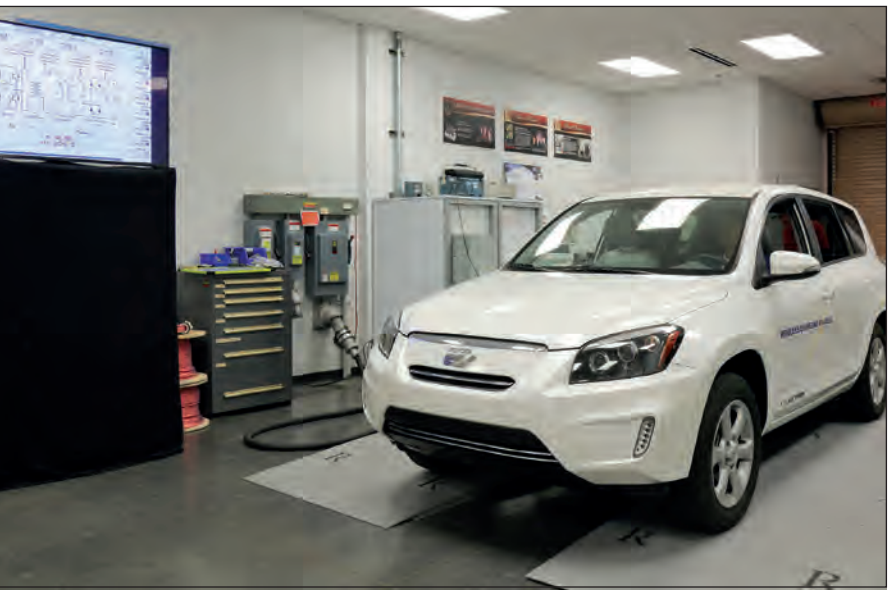


图 1. ORNL的电动汽车 (EV) 测试平台，其用于评估无线充电用功率模块。

的资源，并付出了巨大的努力（见图 1）。

增加功率密度必须伴之以改进热管理系统。不过，这一定不得以增加汽车重量为代价，因为重量的增加将对汽车的行驶里程产生负面影响。要满足该要求，除了传统的热管理、水冷和风冷之外，还需要采用更先进的热管理方法。

如何在改善 SiC 功率模块的热管理能力的同时减轻其重量？ Momentive Quartz Technologies、汉高 (Henkel) 公司和橡树岭国家实验室 (ORNL) 之间建立的合作伙伴关系旨在有效地应对这一难题。该合作团队（以下统称为“小组”）在美国能源部电力驱动技术协会内工作，将重新设计绝缘金属衬底。此项技术的特点是轻量，其采用了导热石墨堆芯。通过运用这种方法，工程师可以将衬底重量降低 30%，并使 SiC 功率模块的动力负载增加 15% 或更多，这得益于热导率的几乎翻倍。

该技术有望彻底改变标准隔离式多芯片 SiC 功率模块。现今，如果切开这其中的一个模块，很有可能在安装到一个厚的铜基板的直接铜键合衬底或绝缘金属衬底上发现 SiC 芯片。这些部件将通过焊接或环氧胶粘层合并在一起。

当使用直接铜键合衬底时，它通常将提供优良的导热性和电隔离。不幸的是，这常常以热膨胀失配、化学不稳定性、衬底僵硬和层厚受限为代价。这些限制往往会束缚 SiC 功率模块的性能。

绝缘金属衬底是常用的替代方案，它的制备方法是将金属层（通常是铜或铝）堆叠到一个导热的电绝缘介电层上。这造就了一种低成本的灵活电路结构，此结构可以通过改变金属和介电层的厚度来定制。遗憾的是，电介质中的热导率已被证明不及直接铜键合衬底中的陶瓷。不过，鉴于这项技术所具备的设计灵活性和可靠性，只要与 SiC 芯片接触的金属层热导率有所增加，那么绝缘金属衬底就能胜过那些基于直接铜键合的衬底，这一点是毫无疑问的。

该小组开展的合作能够利用 Momentive Quartz Technologies 的专长，半个多世纪以来，这家公司基于其深厚的开发经验，在航空、电信和国防领域中的热管理技术方面一直是业界的领先者。在其产品库中，包括：TC1050 均热片，自上世纪 90 年代以来就用于板级热管理；2011 年推出的 TMP-EX 散热器，其与芯片的热膨胀系数相匹配；和 TMP-FX 导热带，它可以在紧密的空间里提供灵活的热传导。

值得称道的石墨

对于所有这些产品来说，关键的组成部分是

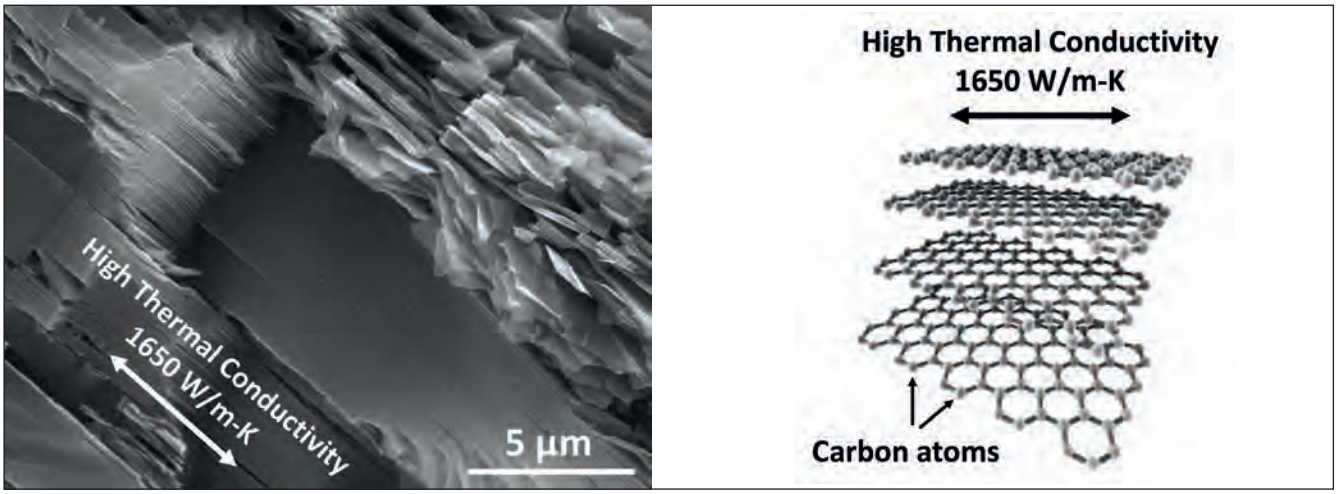


图 2. Momentive Quartz Technologies 的热解石墨堆芯的截面图，由扫描电子显微镜提供（左）。该材料的示意图，显示了高准直性石墨烯基面（右）。

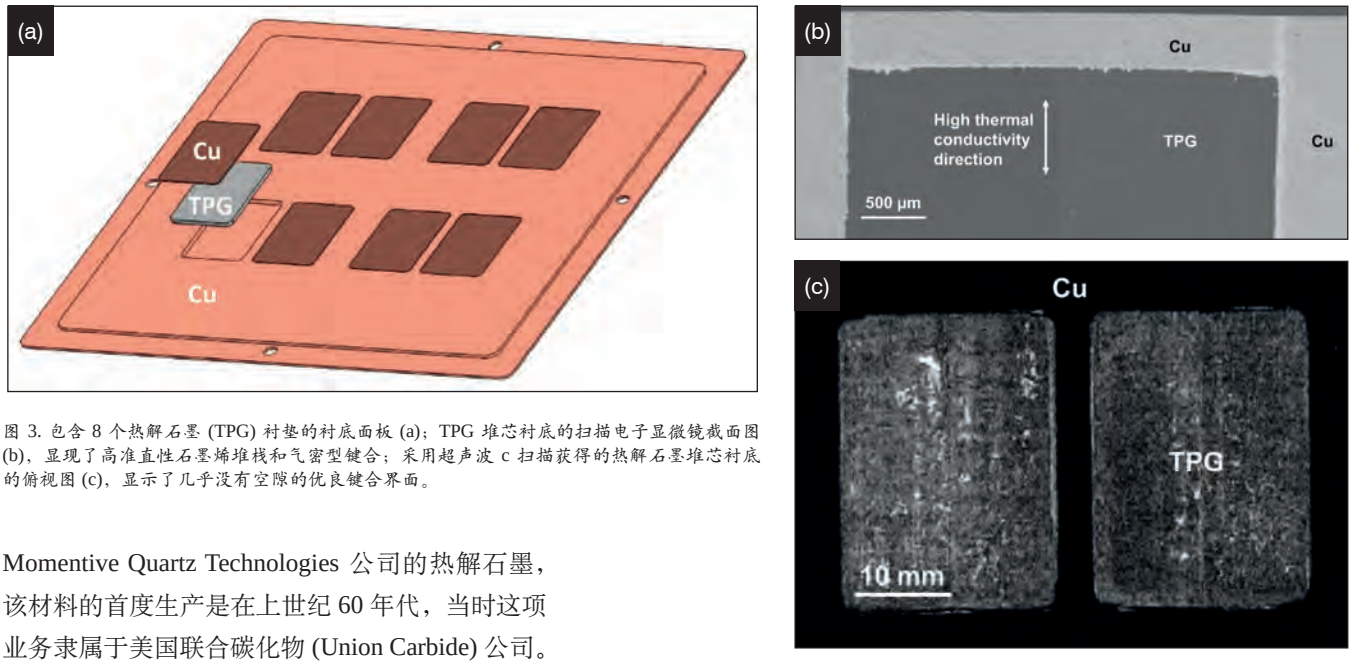


图 3. 包含 8 个热解石墨 (TPG) 衬垫的衬底面板 (a)；TPG 堆芯衬底的扫描电子显微镜截面图 (b)，显现了高准直性石墨烯堆栈和气密型键合；采用超声波 c 扫描获得的热解石墨堆芯衬底的俯视图 (c)，显示了几乎没有空隙的优良键合界面。

Momentive Quartz Technologies 公司的热解石墨，该材料的首度生产是在上世纪 60 年代，当时这项业务隶属于美国联合碳化物 (Union Carbide) 公司。这种形式的石墨采用 CVD 工艺在高于 2000 ° C 的温度下制备，其由数以百万计的高度取向石墨烯层堆叠构成。它们使此材料拥有了极高的热导率（见图 2）。石墨烯平面与其基面平行，热导率为 1650 W m^{-1} K^{-1}，是铜的 4 倍。这种材料的另一个优点是重量轻。它的密度仅为 2.25 g/cm^3（对于热解石墨），是铜密度的 1/4。

将这种形式的石墨的堆芯封入铜衬底，可以实现高热导率与小质量的结合。通过运用 Momentive Quartz Technologies 专有的键合工艺，以确保石墨衬垫和铜外壳之间拥有优异的热及机械接合，该小组能够实现这一目标。这种键合所具备的高质量在扫描电子显微镜和超声波 c 扫描图像中是一目了然的（见图 3 (b) 和 (c)）。它们展现了一种气密、近乎无空隙的封装。

各向异性热导率是热解石墨衬垫的特性之一。这允许根据应用要求来定制铜外壳内石墨的取向和排列。使用 Netzsch Nanoflash 476 闪光导热仪进行的测量显示：在夹于铜之间的热解石墨结构中，热导率为 760 W m^{-1} K^{-1}。该热导率几乎是铜的一倍。在 Momentive Quartz Technologies，研究人员对金属封装石墨进行了一系列测试，包括热循环以及机械冲动和振动。此检查结果表现了这种混合结构所拥有的出色热性能和可靠性。

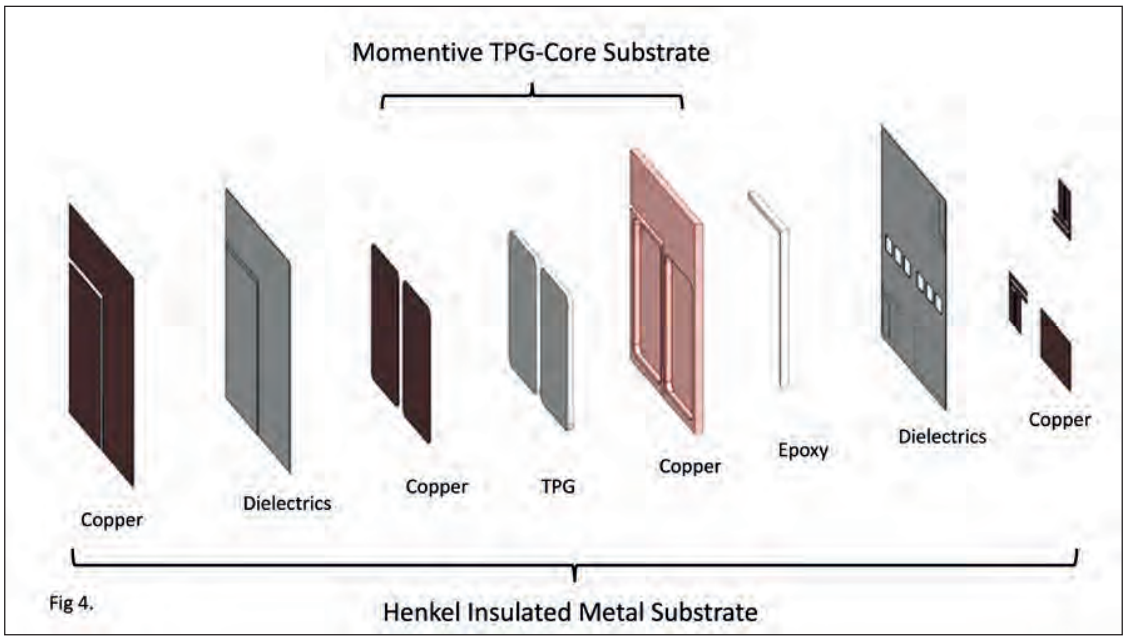


图 4. 一种 7 层热解石墨堆芯绝缘金属衬底结构，其采用了 Momentive Quartz Technologies 和汉高公司提供的专有材料和加工工艺。

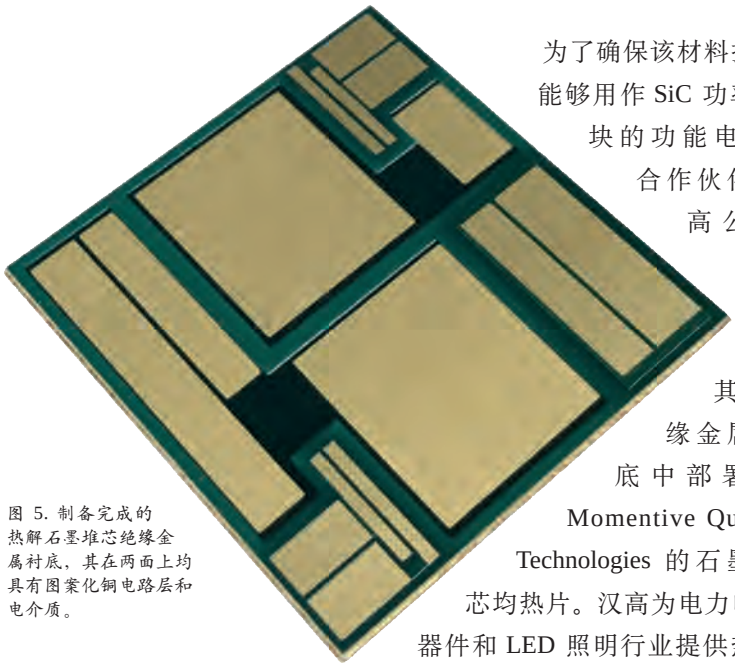


图 5. 制备完成的热解石墨堆芯绝缘金属衬底，其在两面上均具有图案化铜电路层和电介质。

为了确保该材料技术能够用作 SiC 功率模块的功能电路，合作伙伴汉高公司在其绝缘金属衬底中部署了 Momentive Quartz Technologies 的石墨堆芯均热片。汉高为电力电子器件和 LED 照明行业提供热包芯绝缘金属衬底已有 20 多年。业已证实，这些衬底特别适合当今的较高功率密度和表面贴装应用，比如 SiC 功率模块。一旦石墨被封装到铜里面，那么在汉高的合片工艺中，单片金属就可以直接被它取代（见图 4）。需要注意的是，从固态铜芯转变为包含石墨的堆芯，带来的好处并不限于热导率的增加，因为它们还使重量减轻了 30%。

在绝缘金属衬底的制备过程中，汉高的技术人员采用了一种专有的涂层工艺，以将介电层涂敷到石墨堆芯衬底平面和铜箔层上（见图 5）。增添这些介电层对于满足击穿电压要求是至关重要的。另外，汉高的工程师还纳入了诸如非导电型环氧填充凹槽等特点，可在两极之间提供电隔离。

已被证实的资质 (Proven Credentials)

为了展示这种方法的威力，该小组构建了一个测试平台，即普通的半桥式 SiC MOSFET 逆变器模块（见图 6）。在该设计中，Momentive Quartz Technologies 的石墨衬垫放置在 SiC 芯片的正下方。利用这种布置，废热通过厚度方向被引向端子，在那里可将其传递至汉高的导热介电层（见图 7）。除了减低铜衬底的热阻之外，由热解石墨提供的均热作用还增加了介电层的有效接触面积，因而增大了其热导。根据我们在 ORNL 的团队所做的建模，采用热解石墨堆芯的绝缘金属衬底的温度均匀性有了立竿见影的改善，这得益于此种形式的石墨具有较高的面内热传导（见图 8）。

热分析的另一个深层次发现是结温有了显著的下降 – 在稳态和循环状态下均降低了 11˚C。因此，在相同的温度下，SiC 功率模块能够产生的功率比标准绝缘金属衬底多 15%。使用石墨的另一个已经证明的优势是：电源接通和关断两状态间的结温差异有所减小（见图 9）。

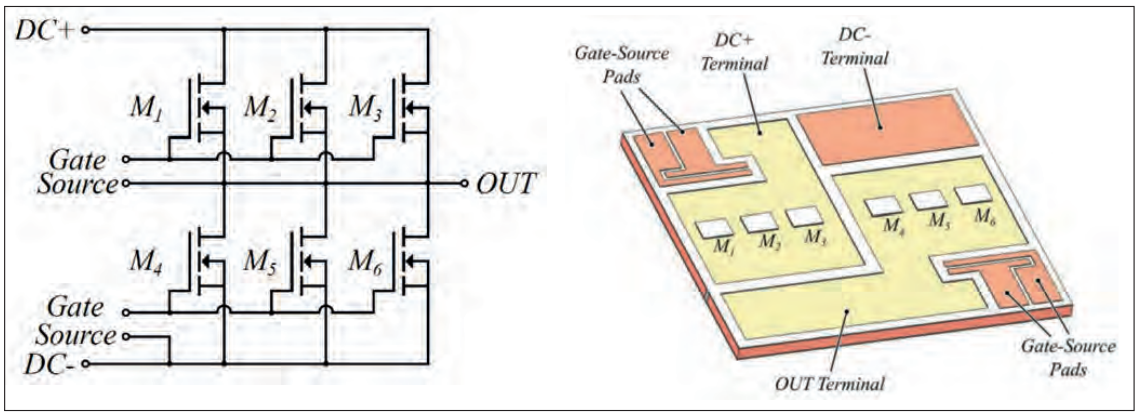


图 6. 半桥模块的电气原理图（左）和绝缘金属衬底电路布局（右）。更多详情请查阅 https://doi.org/10.1115/IPACK2019-6436

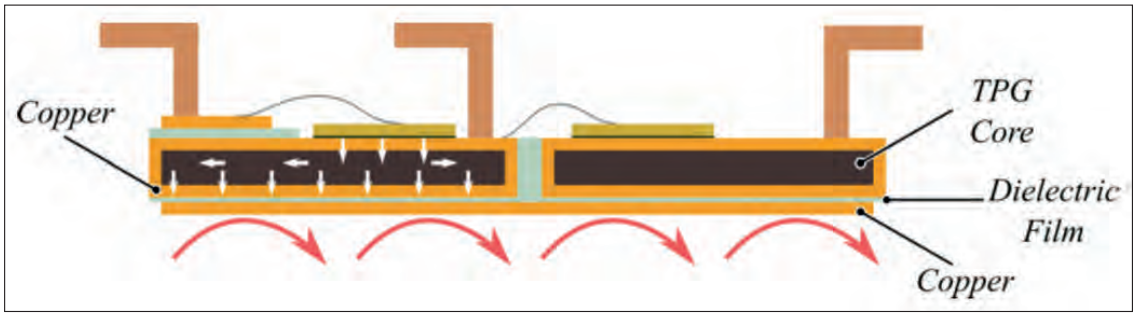


图 7. 采用热解石墨堆芯以将废热引离芯片的概念模块设计。更多详情请查阅 https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/06/f63/elt208_gurpinar_2019_o_4.9_3-41t.pdf

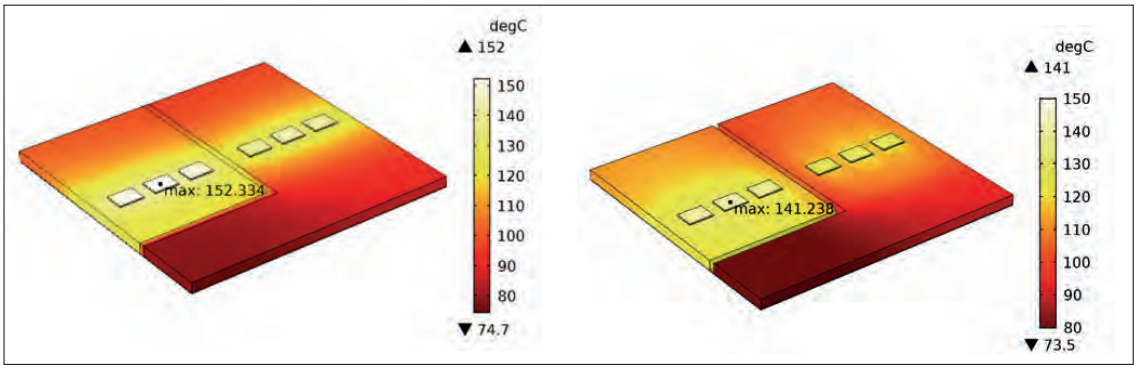


图 8. 采用具有铜芯的绝缘金属衬底的 SiC 模块（左）和采用具有热解石墨堆芯的绝缘金属衬底的 SiC 模块（右）的热分析。分析结果展现了通过两个热解石墨堆芯实现的均热改善。更多详情请查阅 https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/06/f63/elt208_gurpinar_2019_o_4.9_3-41t.pdf

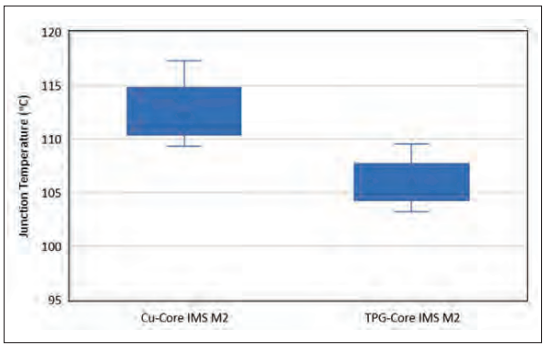


图 9. 功率循环期间的 SiC MOSFET 结温变化曲线显示：采用热解石墨堆芯绝缘金属衬底时，温度范围缩减了 1.8 ° C。

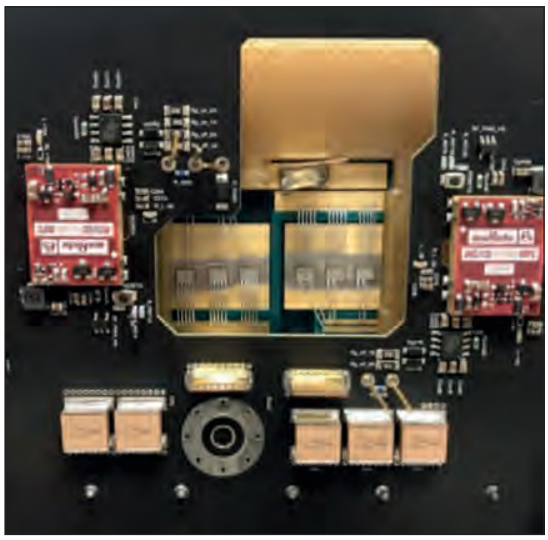


图 10. 组装完成的 SiC 功率模块（其采用了热解石墨堆芯绝缘金属衬底）。

为了验证他们的模型，ORNL 的科学家进行了实验台测量，以比较两种 SiC 功率模块的性能，一种 SiC 模块采用的是具有铜芯的绝缘金属衬底，另一种则采用的是具有热解石墨堆芯的绝缘金属衬底（见表 1）。对组装好的功率模块的初步测量证实了早期的建模结果。相关的测试工作正在进行之中，该小组在 ORNL 的成员负责评估采用热解石墨堆芯的绝缘金属衬底的最终封装性能、耐用性和可靠性（见图 10）。

这项合作的成果展示了在绝缘金属衬底中采用热解石墨堆芯的优点。相比于传统的铜芯，转变为使用这种形式的石墨实际上使得热导率翻倍，同时将重量减轻了近 1/3。另外，该解决方案的可制造性已得到证明，它还能实现热负荷的增加、可靠性的改善、模块设计的简化、以及组装成本和工序数量的减少。通过确定铜芯内石墨的方位，即可针对芯片尺寸、位置、电路版图和动力负载优化热传导。

此外，该技术还能够实现更加精细复杂的多层电源板设计，可以同时解决热、电和重量方面的问题。该小组在美国能源部的支持下工作，为实现这一目标发挥着自己的作用，持续不断地改进自身的技术，这样就能够释放 SiC 器件的潜力，并推动其在电力驱动系统中的使用。CS

表 1。采用铜芯的绝缘金属衬底与采用热解石墨堆芯的绝缘金属衬底的热性能比较。* 采用 Nanoflash 方法获得的测量值。

	Thermal Conductivity [W/m-K]			Junction Temperature T_{max}		Junction Temperature Variation
	x	y	z	@ steady state	@ power cycle	@ power cycle
Cu-core IMS	395	395	395	152°C	113°C	8.6°C
TPG-core IMS	1155	130	760*	141°C	104°C	6.8°C

设计未来的垂直腔面发射激光器 (VCSEL)

精心构建的专用模型使得 VCSEL 设计人员能够评估温度对器件的增益、输出功率和空间分布的影响结果。

Dominic Gallagher, PHOTON DESIGN 公司
Sam Shutts, 英国卡迪夫大学 Sam Shutts, 英国卡迪夫大学

在当今化合物半导体产品系列中，最热销的器件之一是垂直腔面发射激光器 (VCSEL)。它的迅速崛起在 Trumpf 公司最近的一项信息发布中可见一斑，该公司不无自豪地宣称其 VCSEL 出货量高达 20 亿颗。在这些器件中，有很多用于移动电话，例如：苹果公司制造的移动电话在其人脸识别 (Face-ID) 功能中就使用了数百颗 VCSEL。

制造 VCSEL 涉及一系列不同于传统边发射激光器生产的工艺步骤。后者的制备需要将经过加工的半导体晶圆切割成小的芯片。光束从芯片的边缘出射，从而形成一个水平激光谐振腔。

就 VCSEL 而言，生产过程更具挑战性。为了限定垂直腔，在半导体结的上方和下方形成了反射率非常高的反射镜。幸运的是，这种额外的复杂性所产生的回报是巨大的 – 用这种方法制备的器件尺寸小巧，具有低阈值电流，并提供了廉价的光连接。

对于设计人员来说，VCSEL 提出了许多挑战。和所有形式的激光器一样，它具有一种被一对反射镜围绕的增益介质。当光线在反射镜之间反射时，就会来回穿越增益介质，每次往返都会产生光损失。必须利用光增益来弥补这些光损失。对于具有 200μm 波导并放大激光的典型边发射激光二极管来说，这是一个相对容易的要求 - 具有 50% 反射率的反射镜足以使单程光强度翻倍。与之相比，VCSEL 则必须在使用一个仅 0.1μm 增益区的情况下做到这一点。这就要求采用光反射率远超 99% 的反射镜。在满足该标准的同时，必须最大限度地减少在谐振腔内部的吸收或散射。即使只有 0.5% 的光以这种方式损失掉，仍足以严重影响器件的效率。

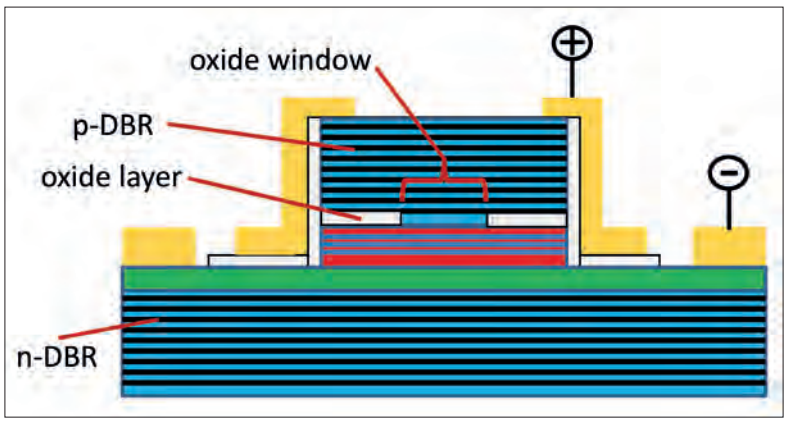


图1. 典型的 VCSEL 结构包含一个夹在一对反射镜中的有源层：这对反射镜是一个 n 型 DBR（分布式布拉格反射镜）和一个 p 型 DBR。电流通过反射镜到达有源层。

为了制备具有如此高反射率的反射镜，工程师们生长了高、低折射率交替多层结构（见图 1）。为完成此项任务，他们使用了建模方法 – 但是必需格外谨慎，以确保结果是有效的。VCSEL 建模绝不是件简单的事，因为在大多数器件中可接受的准确度水平（通常情况下，几个百分点就可以了）在这里是根本不行的。倘若传统建模使用的是约 1% 的镜面反射损耗和相似的传输损耗值，就将得到毫无意义的结果。

使问题复杂化的是，对 VCSEL 电子行为的模拟提出了任何硅半导体仿真器均未面临的挑战。最大的挑战之一是，反射镜中的许多界面严重地破坏了电子和空穴的流动（见图 2 所示的 VCSEL 电子能带图）。

显然，为了给 VCSEL 设计人员提供支持，需要一种专用、可靠的跨学科仿真工具。服务于这类需求的是一款由总部位于英国的 Photon

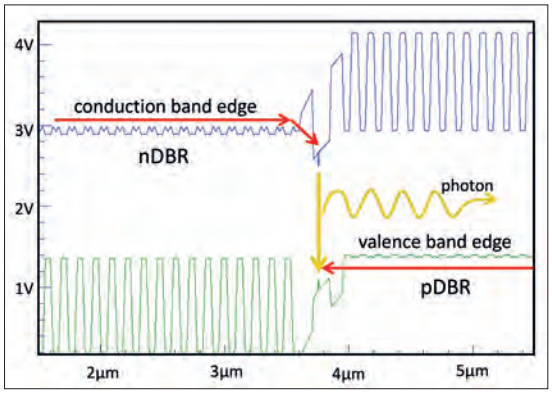


图2. VCSEL 的轴向导带边缘图。

Design 公司开发的工具 Harold/VCSEL，我们的团队中就有一名研究人员供职于这家公司。在生产可用于实际应用（原子钟）的器件的过程中，我们的另一位合著者（卡迪夫大学的一名学者）使用了这款仿真软件，此软件能够模拟在新式 VCSEL 中起作用的光学和电子特性的大多数细节。

设计器件

为了维持 VCSEL 中的激光发射，该器件的反射镜必须具有至少 99.5% 的反射率。帮助实现这一目标的是分布式布拉格反射镜 (DBR) – 具有不同折射率的层的堆叠，可以产生周期性的反射率。但是，仅靠这些反射镜是不够的，VCSEL 还必须横向限制光线。尤其有必要使腔模远离 VCSEL 的侧壁（光损失在此处会增加）。

要做到这一点，常用的方法是引入一个“氧化孔径”。其生成方法是：从 VCSEL 器件的侧壁向内氧化一个或两个外延层，以形成一个具有较低折射率的导光环（腔模的图示请见图 3）。采用这种设计，电流将通过一个位于顶面上的环形电极注入激光器。

载流子流过 DBR，到达有源区（见图 1）。不幸的是，这种做法正好是您不想要的，电流最高出现在氧化物窗口的顶端，电流最低出现在基模的峰值（发生在 VCSEL 轴的中间）（见图 4）。当发生这种情况时，高阶模更受青睐。

对于工作在较长波长的 VCSEL（例如，1.3μm 或更长）来说，创建良好的 DBR 堆栈是特别成问题的，原因是折射率差值的下降，而这不得不增添更多层的办法来弥补。通过厚的 p 型 DBR 注入载流子并不容易，因此有些设计采取了从侧面注入载流子的方法（见图 5）。由于避免了与导电性

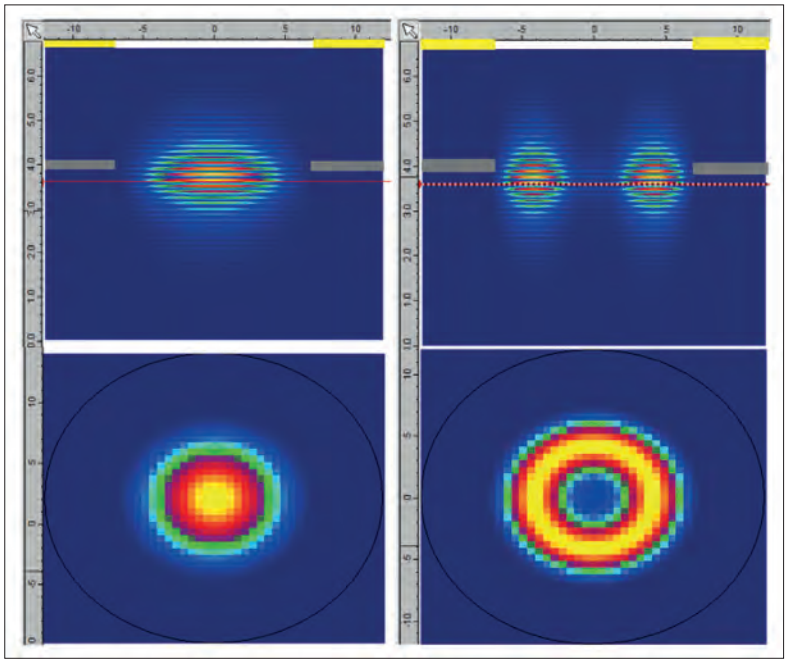


图3. VCSEL 的腔模 – 上图：侧视图；下图：平面图。

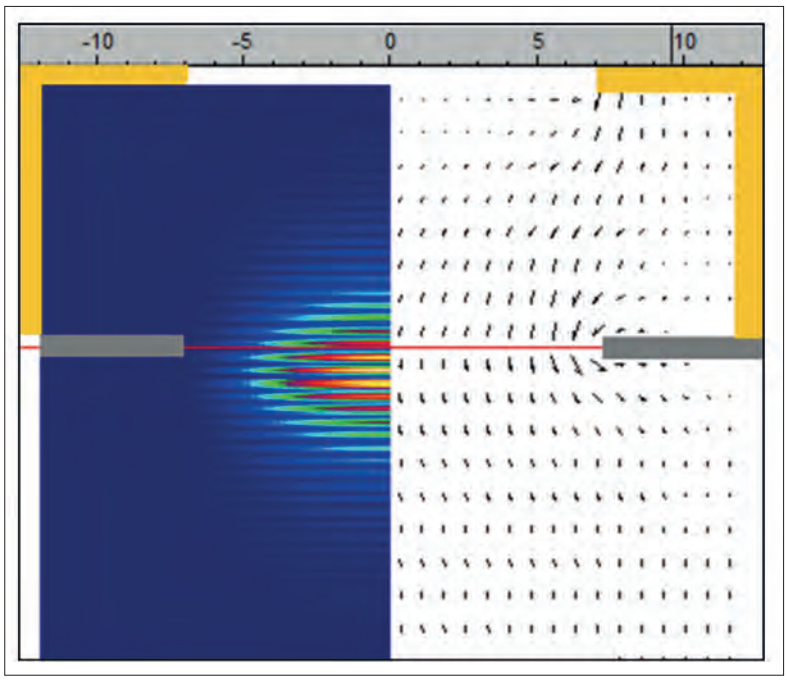


图4. 顶部接触 VCSEL 的横截面，左半部分显示计算模式，右半部分显示电流。

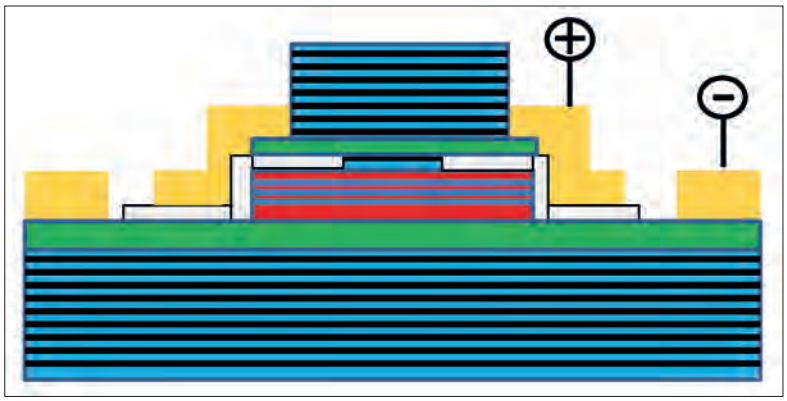


图5. 载流子侧面注入式 VCSEL，电流绕过顶部 DBR 堆栈。

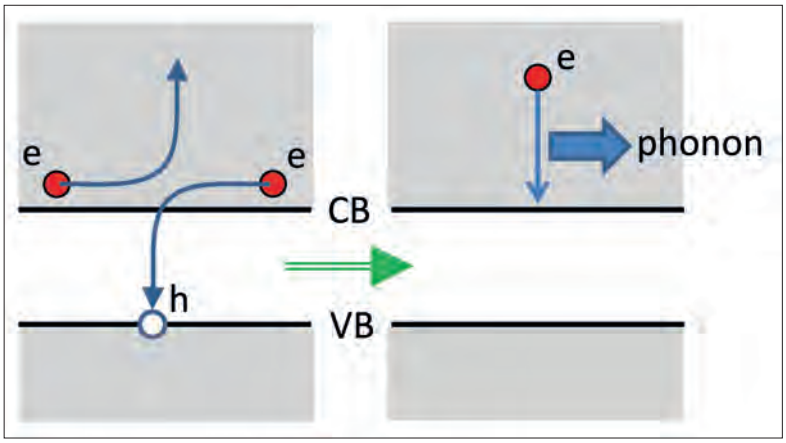


图6. 在 VCSEL 中，重要的光损失机理之一是俄歇复合。当导带中的两个电子碰撞时，这会使一个电子与一个空穴复合，而另一个电子则在导带上被进一步激发。结果是：受激电子被转换为热量。在较长的波长上，这个问题变得更加严重。

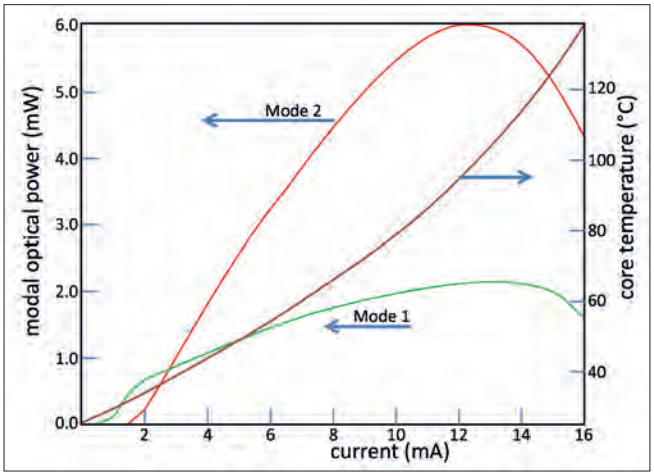


图7. VCSEL 的激光功率-电流曲线，如图所示，在高电流条件下达到饱和状态。

相关的问题，所以顶部 DBR 现在可以针对其光学特性进行优化。但是，这样做的代价是流入有源层中心的电流有所减少，而这里恰恰是产生基模最需要电流的地方。

保持低温运行的需要

VCSEL 的输出功率主要受限于该芯片内部产生的热量。这些热量的产生是电阻、非辐射电荷复合、光子吸收和俄歇复合等综合作用的结果（见图 6）。

对电阻有影响的因素之一是 DBR 反射镜中的界面。当增添更多层时，该电阻将增加。

我们的仿真还表明：当流过器件的电流增加时，其温度迅速上升（见图 7）。这会造成两种不利的影响，即增益减小和俄歇复合增加，而二者均将导致更多的发热。因此，当流过 VCSEL 的电流增加时，其输出功率升高、达到峰值、而后又下降。

显然，对于 VCSEL 设计人员来说，目标之一就是最大限度地减少器件内部的发热。为了获得成功，需计算发热分布图和最终的温度分布，这一点很关键。使用 Harold/VCSEL 工具进行建模可提供充足而深入的了解，如一个以 16 mA 电流驱动的 VCSEL 器件的温度曲线图（见图 8）所示（采用 20°C 的背景温度）。在该 VCSEL 中，有两种腔模。基模在 1 mA 启动激光发射，但是

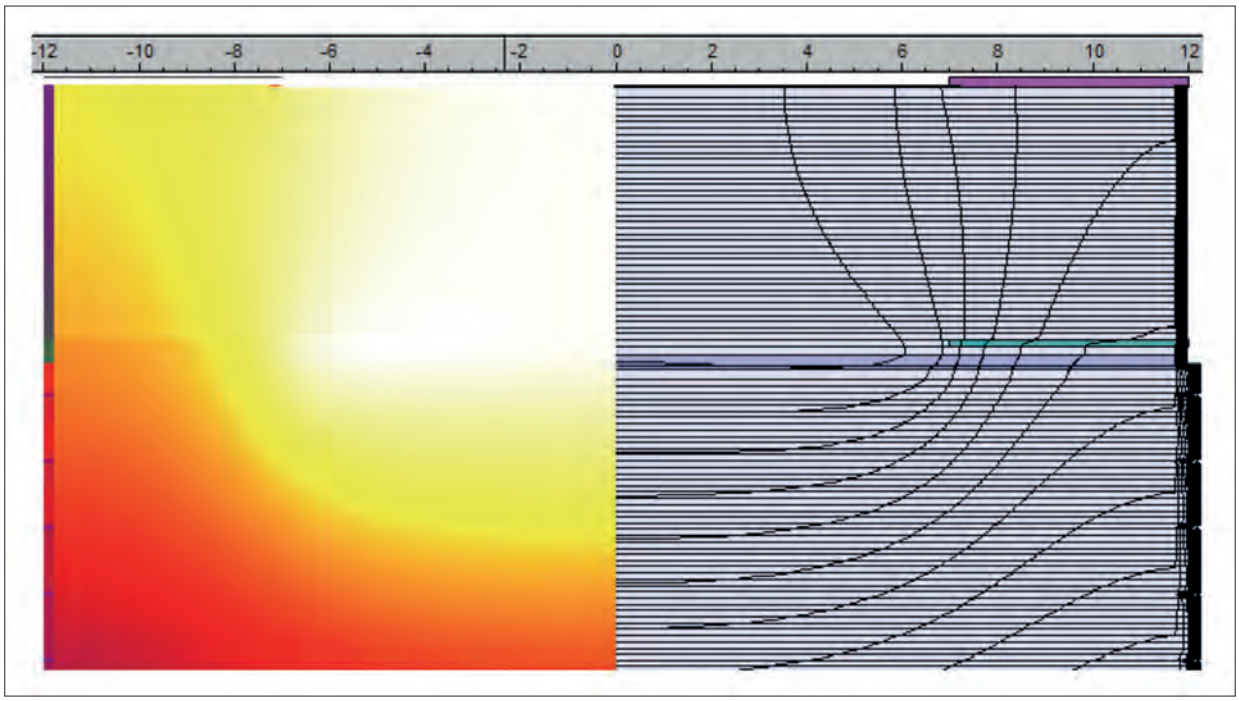


图8. VCSEL 中的温度分布，被绘制为热图（左）和等温线图（右）。

很快，第二种环形腔模开始产生激光。它首次出现在 1.5 mA 电流下，并迅速占据主导地位。

和预期的一样，仿真结果显示：随着背景温度的上升，饱和功率下降。根据我们的计算，当环境温度从 25°C 升至 75°C 时，VCSEL 的输出会下降 8 倍（见图 9）。这种影响对 VCSEL 设计人员提出了重大挑战。由于这是设计阶段中最基本的挑战之一，因此，极其重要的是，必需制造出能够准确地预测热量生成及其对性能的影响的工具。

为了增加 VCSEL 的饱和功率，一种简单、显而易见的可选方案是增大其尺寸。采取这种方法，关键的侧向尺寸是氧化层窗孔的直径。在侧向限定腔模的是该窗孔，而不是 VCSEL 的侧壁。加大这个窗孔的尺寸后，供热量流动至衬底的表面积就增加了。或者，也可以保持每一单位面积的热通量，从而使允许的总热通量成比例地增加，最终达到提高光功率的目的。

增大氧化层窗孔直径的缺点是，这将导致多模 VCSEL 工作。在许多应用中，这都是可以接受的，因此大多数商用 VCSEL 均为多模。然而，这样的器件并非真正适用于驱动单模光纤数据链路，而后者是数据通信产业的主力。

令人惊讶的是，这些额外腔模实际上带来了一个重大的好处。仿真结果表明：如果人为地抑制除基模以外的所有腔模，那么峰值功率将骤降（见图 10）。低强度单模集中在氧化层窗孔的中央，这里是电流最高的地方。电子密度在氧化层窗孔的边缘升高，因而造成了俄歇复合及发热量的增加，最终导致空间烧孔效应。最好是多模工作，因为这可以确保更加均匀的光强，从而获得更均匀的电流密度。

VCSEL 设计人员的另一个考虑因素是增益谱，其具有一个幅度和位置随温度而变化的峰值。这会在 VCSEL 中导致线性欠佳，而当折射率随温度发生变化时，谐振波长将有所改变，这种改变使 VCSEL 线性不良的情况有所加重。

改善线性的方法是明智地使模谐振与增益峰失谐。这在图 11 中进行了说明。并非旨在使 VCSEL 在其室温增益峰值下工作，而是可以应用失谐，从而实现了高温下增益降幅的显著减小。

为了试验和改善 VCSEL 性能，几个研究小组正在探索替代设计。人们常常将精力放在改善顶部反射镜上，采取的方案包括引入悬挂式高对

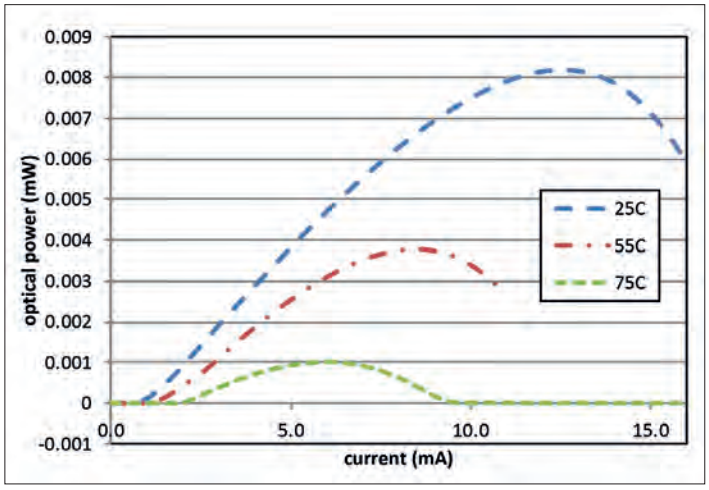


图9. 随着背景温度的升高，VCSEL 的性能会大幅下降。本图示出了同一个 VCSEL 在 25°C、55°C 和 75°C 条件下的光功率-电流曲线。

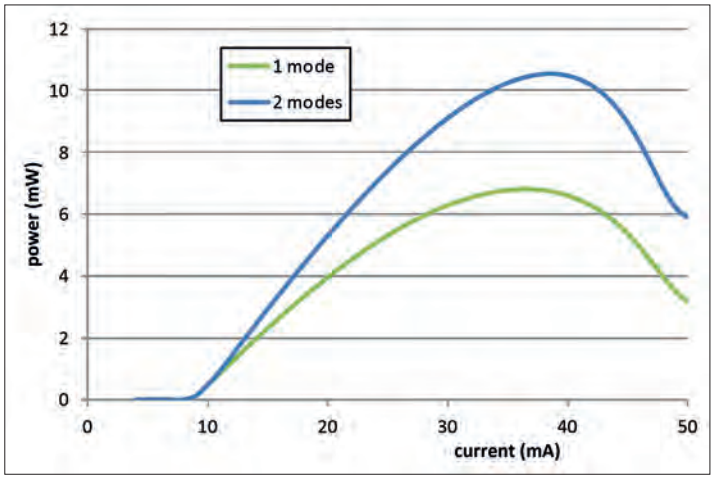


图10. 支持两种模的 VCSEL 的光功率-电流曲线（蓝色）。第二种模被抑制（绿色）。

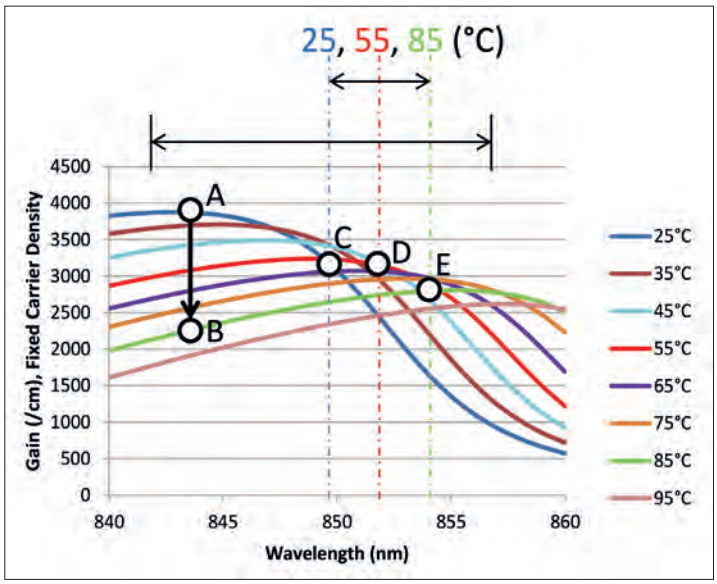


图11. GaAs VCSEL 在不同温度下的计算增益谱。随着 VCSEL 的升温，增益峰移动至较长的波长，且幅度减小。如果 VCSEL 专为在 25°C 增益峰 (A) 下运行而设计，那么当处于 85°C 时，增益将下降至 B 点。最好是使 VCSEL 失谐，以在室温下工作于 C 点，这样在 85°C 时增益仅有少量的下降（E 点）。

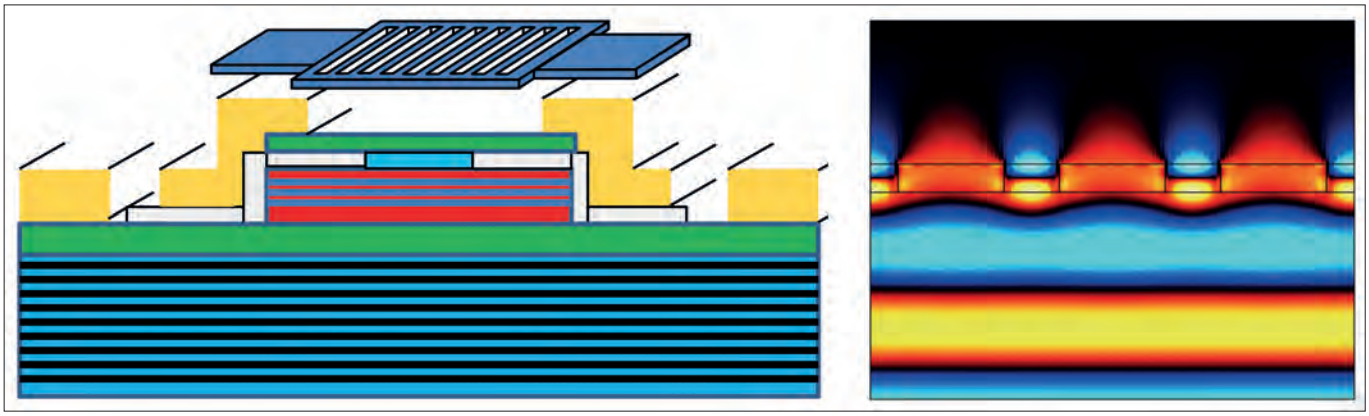


图12.（左）包含一个用于顶部反射镜的悬挂式光栅的 VCSEL。（右）从下方入射到光栅的平面波产生的电场 – 需注意的是，在光栅的上方几乎没有光。

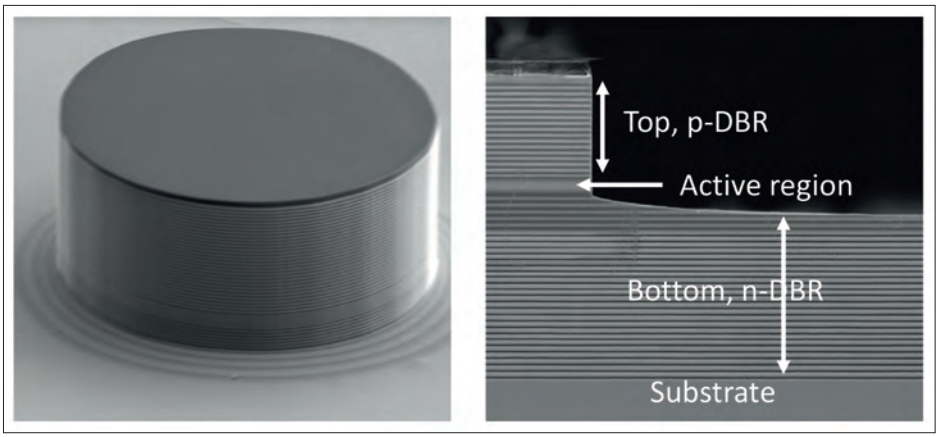


图13. 卡迪夫大学化合物半导体研究所制造的蚀刻 VCSEL 台面的侧视图（左）和横截面（右）。

比度光栅（见图 12）。该设计具有诸多好处，包括：电流无需通过顶部 DBR；对光进行了强极化；通过利用 MEMS 执行器移动光栅，可以调整发射波长。在 Photon Design 公司对该 VCSEL 器件进行的建模表明：可以设计具有强谐振的实际光栅，从而实现高于 99% 的反射率。

保持精准计时

VCSEL 的应用并不限于面部识别和数据通信。这些器件还能服务于一些专业应用，包括用于精准定时的低功率原子传感器。在当今数字基础设施的内部，高精度时钟对于同步是至关紧要的。此类时钟依靠来自全球导航卫星系统的信号来提供精确的定时基准。然而，卫星系统很容易遭受因意外或恶意攻击所致的断电故障，而为此付出的昂贵代价令人咋舌。举个例子，假如英国发生大范围断电，那么给英国经济造成的损失可达每天 10 亿英镑。卡迪夫大学及其合作伙伴正在开发的一种解决方案是“芯片级”原子钟。它可以布设在所需的地点，以在全球导航卫星系统发生电力中断时提供备份。

每个全光原子钟的核心都是一个蒸汽电池，内含碱金属原子，如铯或铷。该电池的一侧是光源，另一侧是光电探测器。通过巧妙的光谱询问 (spectroscopic interrogation)，可以将原子“困”在激发态，这种效应被称为相干粒子捕获。当发生这种情况时，蒸汽电池是透明的，因而导致击中光电探测器的光的强度增加（见图 14）。由于出现这种情况的精确定义的频率是原子的固有特性，因此将激光“拨入”该频率可以提供一种产生非常稳定的定时信号的方法。

在原子钟里，对光源的要求比大多数电信应用要苛刻得多，这并不让人感到惊讶。相关要求包括：非常精确的发射波长 – 对于铯 D1 线，光源的发射波长必须在 894.6 nm；低于 100 MHz 的谱线宽度；单个横模；和偏振稳定性。此外，由于时钟必须具有小巧和便携的特点，因此光源必须紧凑、高效节能，且消耗功率低于 2 mW。VCSEL 成为了颇具前途的候选方案，特别是因为其小体积压制了寄生元件效应，从而使之能够被调制在针对相干粒子捕获的所需频率上，比如，对于铯而言，所需的频率为 4.6 GHz。不过，为

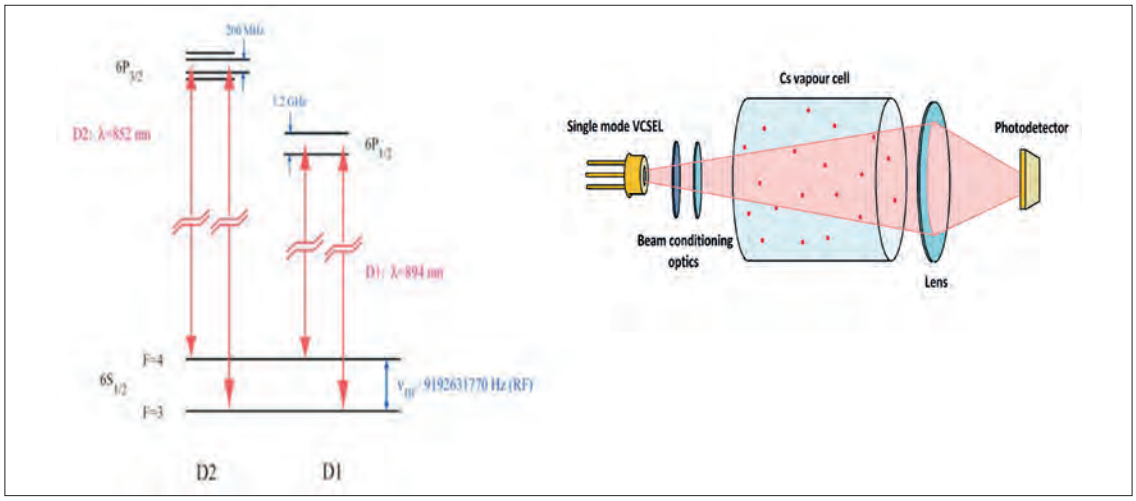


图14.（左）用于面向 894.6 nm 波长（D1 线）的原子钟的铯电子跃迁。（右）由 VCSEL 激发的铯钟蒸汽电池（图片提供：英国国家物理实验室）。

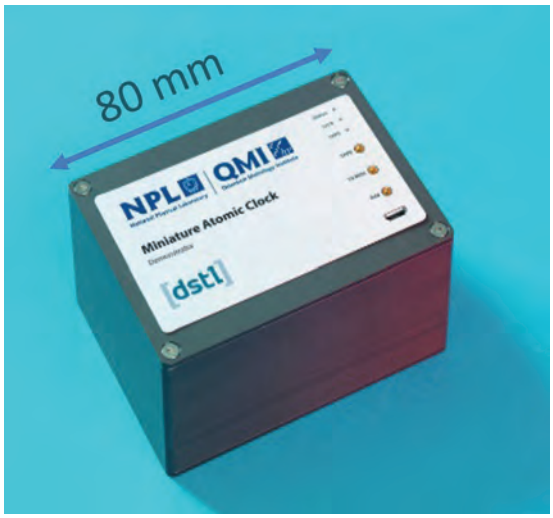


图15. 具有 VCSEL 泵的封装型铯原子钟（照片提供：卡迪夫大学、英国国家物理实验室和英国国防科学与技术实验室 [DSTL]）。

了满足所有要求的特性，在设计外延结构和器件几何图形时必须非常谨慎。

为了符合这些规格要求，一支由卡迪夫大学研究人员领导的团队转向使用 Harold/VCSEL 工具进行建模。除了可以帮助 VCSEL 外延结构和器件几何图形的设计之外，建模还对器件结果的解释有所帮助。更重要的是，它能让我们非常深刻地了解器件特性应该归因于制备方法、还是源于外延生长或设计。

建模还具有特定于原子钟的其他好处。它能有助于确保空腔谐振必须出现在要求的波长，而且有源区在附随的峰值波长处提供光增益，这是实现高效运行的关键所在。当蒸汽电池被加热时（通常至 70°C），这些波长必须与该升高的温度近乎吻合。这不是件容易的事，因为在对温度的敏感性方面，增益 - 峰值波长大约是空腔谐振的 4 倍。

除了所有这些考虑因素之外，通过在外延设计中谨慎地选择层的组分和厚度，我们发现影响 VCSEL 性能的还有其他因素。它们取决于器件的制备方法。

对 VCSEL 性能有着重大影响的一个因素是氧化孔径。由于原子钟要求 VCSEL 具有单模发射能力，因此氧化孔径的直径通常被限制在不超过 3μm。这么小的孔径具有两个显著的影响：它导致了局部很高的电流密度，而且改变了空腔那个区域中的有效折射率。

高电流密度有损于 VCSEL 的性能，而且电流密度会随着注入电流的增大进一步升高。这将导致焦耳加热，受到焦耳加热有害影响的不仅有光输出功率，还包括发射波长。功率的变化并不是什么重大问题，因为对于一个原子钟来说，1 mW 的光功率就足够了。但是，波长是一个至关紧要的参数，必需精确地规定。遗憾的是，发热升温会造成发射波长超出目标设计规范，而且使问题进一步复杂化的是，有效折射率的变化可能导致发射波长的额外偏移，这将改变空腔谐振频率。

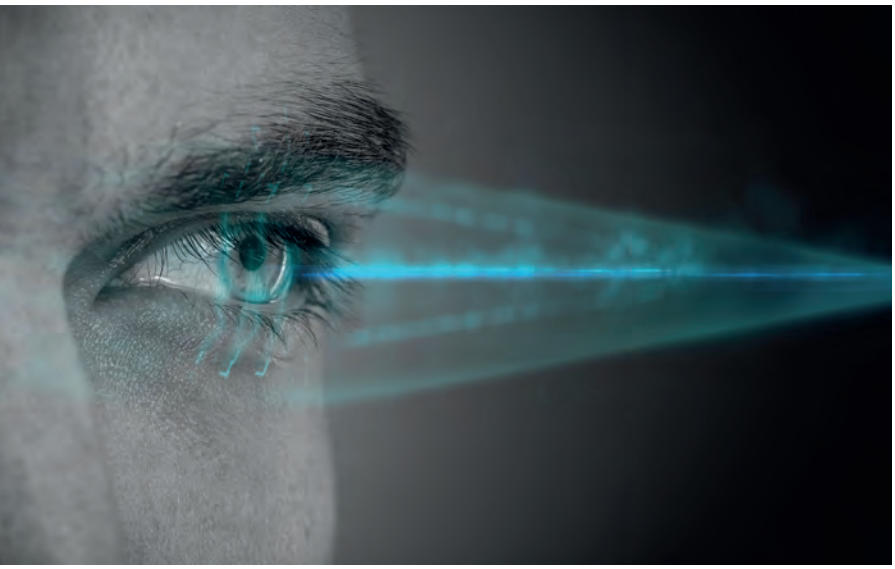
解决方案是采用建模，将波长随着注入载流子和有效折射率的变化而出现的偏移考虑在内，这样就可以在外延层的设计中对上述的这些影响予以补偿。此类建模对于 VCSEL 的开发和制备是一种非常有用的工具，目前 VCSEL 的产量已达数十亿，预计在未来的几年里其产量将继续增长。CSC

改进垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 设计

曲面镜和较长的谐振腔能减轻绿光 VCSEL 中的过热现象

SONY 的工程师制备了一款能在室温下产生连续发射绿光 VCSEL。通过在其上叠加红光和蓝光 VCSEL，研究人员声称用这种激光器制成了有史以来第一个全彩色光源。

据该研究小组称，VCSEL 具有高方向性和非常低的功耗，有望成为可见光高效传输的新标杆，可应用于视网膜扫描显示等领域。



视网膜扫描显示：采用红、绿和蓝光 VCSEL 制成的高效率、低功耗、全彩色光源。

其实，Sony 并不是绿光 VCSEL 的首家生产商。2016 年，来自中国厦门大学的一支研究小组报告了可发射蓝、绿和黄光的量子点 VCSEL。这些器件具有非常低的阈值电流（< 1 kA cm^{-2}）。然而，Sony 的这支研究小组表示，由于量子点品质的不一致性和谐振腔长度控制的不稳定性，因此对于该设计而言，波长发射稳定性是一个挑战。另一个阻碍波束形成的问题是丝状激光发射，它被认为源于量子点的空间不均匀性。

为了解决这些问题，Sony 的工程师开发了一款绿光 VCSEL，该 VCSEL 具有量子阱结构，并采用了一种可以解决另一个问题的设计，这个问题就是底部反射镜中的热阻导致芯片过热的现象。

有了 Sony 的解决方案后，使用较长的谐振腔可以减小热阻。增加谐振腔的长度有可能会造成衍射损失的增加而影响激射，但是，通过使用曲面镜可以避免出现这种情况。

有源发光区中的高电场是影响绿光 VCSEL 性能的另一个障碍。它将电子与空穴分开，因而导致较高的阈值电流。为了解决该问题，Sony 的工程师使用了一种半极性衬底，用于其有源区的外延生长。

Sony 的 VCSEL 制备的起点是将 {20$\bar{2}$1} GaN 衬底放入 MOCVD 反应腔，并外延 4 周期量子阱结构、1 个 p 型掺杂 GaN 层、和 1 个 p 型接触层。在这个 130 nm 厚的异质结构上，研究小组添加了一个 30 nm 厚的铟锡氧化物层，然后是专为 515 nm 波长上具有峰值反射率 Ta_2O_5 和 SiO_2 交替的 p 侧分布式布拉格反射镜 (DBR)。接着进行电极的蚀刻和沉积，以生成一个光圈和一个电流注入区。

然后，工程师将晶圆的厚度减薄至大约 20μm，之后使用光刻制备 26μm 直径的树脂盘。将样品加热至 200°C 使树脂盘熔化成液滴，然后反应离子蚀刻将其形状转移到氮化镓上，形成透镜状表面。再增添 14 层交替的 Ta_2O_5 和 SiO_2 形成了曲面镜，在晶圆划片并封装之前完成以上制备过程。

该绿光 VCSEL 的测量结果显示：阈值电流为 1.8 mA，而电光转换效率 (wall plug efficiency) 低于 0.1%。

当电流从 5 mA 增至 6 mA 时，发射峰从 515 nm 变为 518 nm。这 3 nm 的变化与 18.6μm 的腔长、GaN 折射率的预期值和它随波长的变化是一致的。

发射的远场图显示一个单峰，可以用高斯曲线拟合。这种发射对应的发射光斑尺寸为 2.4μm 至 2.6μm。CSC

参考文献

T. Hamaguchi et al. Appl. Phys. Express 13 041002 (2020)

更好的紫外发光二极管 (UV LED) 用基板

无氨生长工艺制备的高质量、半极性基板助力紫外 (UV) 发光器件

和绿光 LED 一样，深紫外 (UV) LED 也会受到内建电场的影响而削弱辐射复合，并伴随辐射红移现象。

为了解决这些问题，日本筑波先进电力电子研究中心的沈旭强和同事们开发了用于 UV LED 生长的高质量、半极性氮化铝 (AlN) 基板。

沈旭强解释说：“我们用相对简单、无氨、高温的 MOCVD 生长方法成功地获得了高质量的半极性 AlN 基板，没有出现可见的孪晶和基面堆垛层错。”

这一成功开创了新的局面，因为之前的努力未能生产出具有足够高质量的半极性 AlN 来制备高效率的器件。

该突破使用了一种无氨生长工艺。在实验工作验证之前，理论模拟暗示了用氮气代替氨的好处。

沈旭强认为，不使用氨具有以下几个优点：它可以防止相关预反应；能在高温条件下实现快速生长；简化了减排设备；削减了运行成本和更加环保的制备工艺。

半极性基板的生长不是在商用反应腔中实现的。沈旭强说：“我们使用的是一种特别设计的 MOCVD 系统，该系统非常简单。”

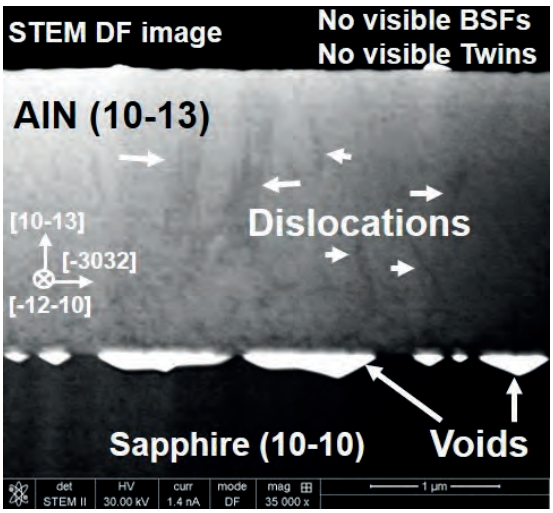
沈旭强和同事将 m 面 $(10\bar{1}0)$ 蓝宝石衬底装入反应腔，1650° C 的温度下以 1.2μm /h 的生长速率外延一层 $(10\bar{1}3)$ AlN 薄膜。用于生长的原材料是氮气和三甲基铝，氢气作为载气。

在具有 2.3μm 厚 AlN 薄膜的样品上进行的 X 射线衍射测量产生了两个峰一个对应 $(10\bar{1}3)$ AlN，另一个则对应的是 $(30\bar{3}0)$ 蓝宝石。这意味着 $(10\bar{1}3)$ AlN 的单相外延层已在 m 面 $(10\bar{1}0)$ 蓝宝石衬底上成功生长。

在蓝宝石衬底上生长 AlN 时面临的风险是，衬底中两个相同的 $\{11\bar{2}0\}$ 面会导致外延层中孪晶的产生，因而形成粗糙的表面，这一点与高质量器件制备的要求是格格不入的。

为了查看样品是否产生了孪晶，沈旭强和同事进行了高分辨率 X 射线衍射，使用了精心选择的样品方向。扫描未能发现在其半极性 AlN 薄膜中存在孪晶生长的任何证据。

额外的 X 射线扫描分别产生了 $(10\bar{1}3)$ 322 弧秒 和 (0002) 373 弧秒的衍射峰。据该研究小组称，这些数值（它们反映了材料质量）比在 c 面蓝宝石衬底上生长的“顶级”AlN 外延层的对应指标更好。



扫描隧道电子显微镜的横断面暗场像显示了半极性 AlN 基板的高质量。不存在孪晶或基面堆垛层错。

5μm x 5μm 面积的原子力显微镜扫描显示：表面粗糙度约为 2 nm。扫描结果还显现了高度约 5nm 的条纹，这些条纹被认为源于衬底的斜切角（其为 2.0° ）。

为了仔细观察 AlN 外延层的微观结构，该研究小组使用了处于暗场模式的横截面扫描隧道电子显微镜，在两个垂直方向上对样品进行了分析。显微镜图像显现了延伸到晶体表面的位错、以及位于衬底和外延层间界面上的空隙（见插图）。

该小组的研究计划改善生长工艺来提高外延质量，并将 AlN 外延层用于制备器件的基板。沈旭强表示：“我们期待多方合作，进一步发展该技术。” CSC

参考文献

X.-Q. Shen et al. Appl. Phys. Express 13 035502 (2020)

外延钝化有助于新颖的 FET

厚外延生长铝镓氮 (AlGaN) 替代氮化硅 (SiN) 钝化层可以消除分级极化 FET 中的稳定性

来自俄亥俄州立大学和 Qorvo 公司的工程师改善了分级极化 FET (polarisation-graded FET) 的设计，此类 FET 是一种适用于 5G 毫米波基站，很有前途的功率放大器。不稳定性源于界面陷阱，为了消除界面陷阱，使用厚的 AlGaN 外延层替代 SiN 钝化层。

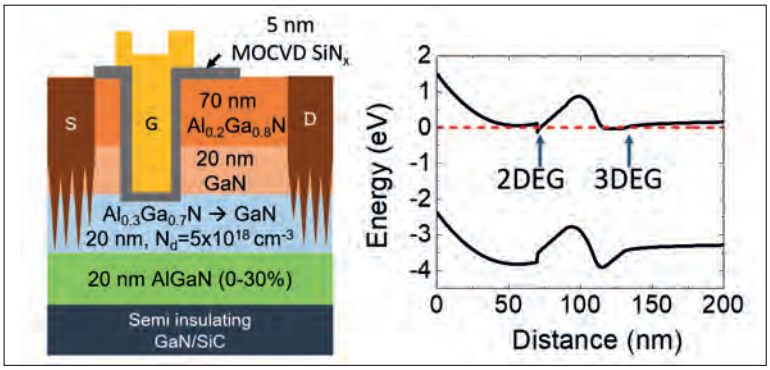
该小组的发言人，来自俄亥俄州立大学的 Shahadat Sohel 说，他们是首个在高功率、高线性度 AlGaN 沟道晶体管中实现 DC-RF 稳定运行（在极高的静态偏置电压条件下）的研究团队。“DC-RF 不稳定是任何晶体管中造成输出功率偏低的主要原因之一。”

分级极化 FET 是富有吸引力的 GaN HEMT 替代方案（后者是高频基站领域中的领先技术），因为其具有更平坦的跨导曲线 (transconductance profile)，可以实现更好的线性度。

具备这个优越性，源于纳入了一种通过对沟道中的铝组分进行线性变化而形成的三维电子气体。采用三维电子气后，偏置电压的变化对载流子体积密度的影响将微乎其微，而反过来，栅极电压的变化仅在电子饱和速度中产生微小的变化，从而实现了更佳的线性。

Sohel 和同事们并不是分级极化 FET 的发明者。“但是，我们优化并改进了设计，以实现针了对 X 波段应用的创记录的线性性能。”

该研究小组的 FET 制备流程是：首先将 SiC 衬底装入 MOCVD 反应室，然后外延一层 GaN 缓冲层，然后是一个包含铝（铝含量在 0% 至 30% 的范围内线性变化）的 20nm 厚 AlGaN 沟道；以及一个由组分为 $Al_{0.3}Ga_{0.7}N$ 至 GaN 的 20nm 线性变化势垒构成的外延钝化区、一个 20nm 厚 GaN 层和一个 80 nm 厚 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 层。在该异质结构的内部有一种二维电子气体，它位于 GaN 和 $Al_{0.2}Ga_{0.8}N$ 之间的界面上，屏蔽了表面的沟道，以确保通路区域 (access region) 的夹断电压比栅极区的更负。



用 AlGaN 替代 SiN 钝化层可以减少来自极化 FET 中表面态的不稳定性。

源极和漏极电极的形成方法是：对盖层进行蚀刻、运用电子束蒸发工艺沉积 Ti/Al/Ni/Au 多层金属、并使用 850° C 快速热退火将其转变成一种合金。栅极是采用氯气蚀刻一个 0.7μm 宽的凹槽，然后使用 MOCVD 沉积一层 5nm 厚的 SiN 薄膜。它充当栅介电层，因而减少了栅极漏电，并且还将栅极与二维电子气隔离开。为了完成肖特基栅的制作，工程师增添了一个 Ni-Au-Ni 多层金属。

为创建一个场板，Sohel 和同事们采取了将栅极向漏极延伸 0.3μm 的做法。这通过减弱峰值电场以及增加击穿电压，使不稳定得到了进一步的减少。

电学特性分析显示了 500 mA mm^{-1} 的最大输出电流、具有 160 mS mm^{-1} 最大平坦跨导、和 110 V 的三端击穿电压（当栅极与漏极之间的间隔为 3.5μm 时）。对漏电流来源所做的分析表明，肖特基栅是导致击穿的主要原因。

测量条件包括具有 0.1% 占空比、5μs 脉冲、5 V 的栅极静态夹断偏置电压、和高达 50 V 的漏极静态偏置电压，结果显示：对于电流崩塌和 knee-walkout（这是膝电压的增加）两种情况，不稳定性均极小。相比之下，Sohel 和同事们在 2018 年报道的采用 SiN 钝化的分级极化 FET 则具有 25% 的电流崩塌和 8 V 的膝电压增加（对于 30 V 的漏极静态偏置条件）。

目前，Sohel 和同事们正在开发一种位于场板下面的牺牲层，以减小寄生电容。“我们还在就栅长和源 - 漏极间隔的调整开展研究，旨在提高晶体管的工作频率。”CS

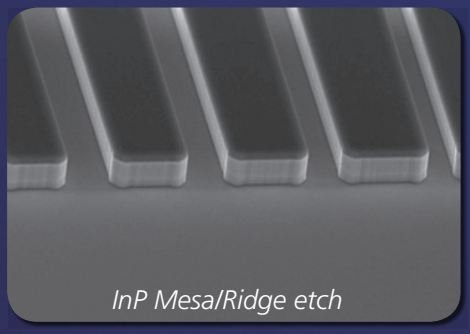
参考文献

S. Sohel et al. Appl. Phys. Express 13 036502 (2020)

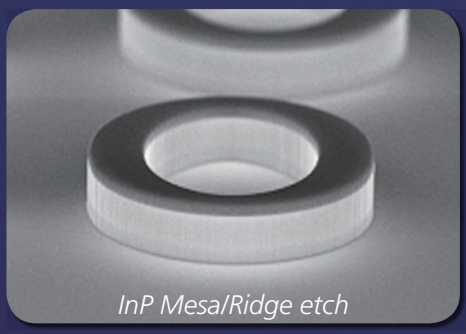
Indium Phosphide (InP) Laser Solutions

OXFORD INSTRUMENTS

- Epitaxial growth
- InP grating etch - **Plasma**Pro **100** Cobra/RIE
- InP overclad regrowth
- SiN or SiO2 mask - **Plasma**Pro **100** PECVD or ICPCVD
- Mask etch - **Plasma**Pro **100** RIE
- InP Mesa/Ridge etch - **Plasma**Pro **100** Cobra
- SiN or SiO2 passivation deposition - **Plasma**Pro **100** PECVD or ICPCVD
- Passivation etch - **Plasma**Pro **100** RIE
- p-type contact metallisation
- Backside thinning
- n-type contact metallisation



InP Mesa/Ridge etch



InP Mesa/Ridge etch



Oxford Instruments Technology (Shanghai) Co. Ltd
1st Floor, Building 60, No. 461 Hongcao Road, 200233, Shanghai
China Hotline: 400-678-0609
Chinese website: www.oxinst.cn English Website: www.oxinst.com

广告索引 Advertisers & Web Index

Advertiser	广告商名称	网址	页码
AIXTRON SE	德国爱思强股份有限公司	www.aixtron.com	7
EDI CON China	电子设计创新大会	www.mwjournalchina.com/edicon	IBC
Evatec Ltd.		www.evatecnet.com	9
IC China 2020		www.IC-China.com.cn	BC
INNOLAS		innolas-semiconductor.com	5
IQE		www.iqep.com	1
牛津仪器		www.oxinst.com	39

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

注册已经开始了

EDICON

2020

Electronic Design Innovation Conference

电子设计创新大会

2020年10月13–14日
国家会议中心，北京，中国

访问www.mwjournalchina.com/edicon注册参会

- 5G/先进通信
- 毫米波技术
- 放大器设计
- 电磁兼容/电磁干扰
- 低功耗射频和物联网
- 前端设计
- 电源完整性
- 雷达和国防
- 射频和微波设计
- 信号完整性
- 仿真和建模
- 测试和测量



www.mwjournalchina.com/edicon

开放发展 合作共赢

Open for development Cooperate for win-win

第三届全球IC企业家大会
暨第十八届中国国际半导体博览会

The 3rd Global IC Entrepreneurs Conference & The 18th China International Semiconductor Expo

中国·上海 新国际博览中心 2020年10月14~16日

关注官方微信

指导单位 工业和信息化部
上海市人民政府

主办单位 中国半导体行业协会
中国电子信息产业发展研究院
上海市经济和信息化委员会

承办单位 北京赛迪会展有限公司
中国电子报社
赛迪智库集成电路研究所
上海市集成电路行业协会

参展赞助及商务合作咨询
电 话：010-68207449/88558152/88558151/88558153
电子邮箱：icchina@csia.net.cn

参会赞助及商务合作咨询
电 话：010-88558808/68209312
电子邮箱：wangyj@cena.com.cn/liuch@csip.org.cn

www.IC-China.com.cn